

# **PROTOTIPO ROBÓTICO DE EXTREMIDAD SUPERIOR DERECHA PARA IMPLEMENTACIÓN DE TAREAS DE IMAGINACIÓN MOTORA**

VALERIA GÓMEZ GIRALDO  
ADRIÁN JAVIER JIMÉNEZ MOJICA

REALIZADO CON LA ASESORÍA DE:  
JUAN CARLOS LIZARAZO  
MAURICIO BONILLA CARREÑO

UNIVERSIDAD EL BOSQUE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
MAYO, 2020

UNIVERSIDAD EL BOSQUE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ÁREA DE ÉNFASIS: EQUIPOS MÉDICOS

**PROTOTIPO ROBÓTICO DE EXTREMIDAD SUPERIOR DERECHA PARA  
IMPLEMENTACIÓN DE TAREAS DE IMAGINACIÓN MOTORA**

VALERIA GÓMEZ GIRALDO  
ADRIÁN JAVIER JIMÉNEZ MOJICA

REALIZADO CON LA ASESORÍA DE:  
JUAN CARLOS LIZARAZO  
MAURICIO BONILLA CARREÑO

## **NOTA DE SALVEDAD**

Según el artículo 37 del 14 de diciembre de 1989 del acuerdo 017, "La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia".

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradecemos a nuestra alma mater, la Universidad El Bosque y al programa de Ingeniería Electrónica por abrirnos sus puertas y brindarnos todas las herramientas teóricas y prácticas que nos permiten hoy estar aquí.*

*Agradecemos al Ingeniero Juan Carlos Lizarazo por el enorme apoyo y respaldo brindado, por compartirnos su conocimiento y estar comprometido con nosotros y con este proyecto que, en conjunto, hemos forjado. Agradecemos, también, al Doctor Mauricio Bonilla y a los Ingenieros Óscar Mauricio Arias y José Luis Gómez por estar dispuestos a escucharnos y aclarar nuestras dudas. Al Ingeniero Santiago Noriega, le agradecemos por estar siempre dispuesto a apoyarnos y compartirnos sus conocimientos y experiencia.*

*A nuestros padres, Cristina, Alejandro, Carlota y Yesid, por ser los principales promotores de nuestros sueños, porque su confianza y amor nos han dado la fortaleza e inspiración para llevar a cabo cada uno de nuestros proyectos sin importar las dificultades. Les agradecemos a ellos por su sacrificio y trabajo que nos han enseñado a ser personas buenas y trabajadoras. Por su apoyo incondicional, gracias.*



## RESUMEN

El Grupo de Investigación Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad requiere periféricos mecánicos para implementar tareas de Imaginación Motora diseñadas para su control. Se presenta el diseño, implementación y pruebas de un prototipo robótico de extremidad superior derecha para la implementación de tareas de Imaginación Motora. Se muestran los cálculos realizados, las simulaciones y el diseño del hardware implementado para la adquisición, amplificación y filtrado de señales electroencefalográficas, particularmente de las ondas Alfa ( $\mu$ ) y Beta, necesarias para el trabajo con Imaginación Motora. Se presenta el diseño del sistema de control del prototipo, a partir del procesamiento de las señales obtenidas por el sistema de adquisición implementado y la transformación de los datos en señales de potencia que permiten a los actuadores generar un movimiento en el prototipo.

*Palabras clave: Electroencefalografía, Imaginación Motora, Interfaz Cerebro-Computador, Periférico Mecánico.*

## **ABSTRACT**

The Investigation Group called Cognition and Affection's Neuropsychology, needs mechanic peripherals in which they can implement Motor Imagery tasks previously designed for their control. The design, implementation and testing of a right upper limb robotic prototype for Motor Imagery tasks' implementation is presented. All calculations made are shown, as well as the simulations and the implemented hardware design for the signal acquisition, amplification and filtering, specifically from alpha and beta waves, necessary for working with Motor Imagery. The design of the prototype control system is presented, based on the processing of the signals obtained by the implemented acquisition system and the transformation of the data into power signals that allow the actuators to generate movement in the prototype.

*Keywords: Brain-Computer Interface (BCI), Electroencephalography, Mechanic Peripheric, Motor Imagery.*

## Tabla de Contenidos

1	Introducción.....	1
2	Definición del problema.....	2
2.1	Contexto.....	2
2.2	Manifestación.....	3
2.3	Causas.....	3
2.4	Efectos.....	4
2.5	Aspectos a solucionar.....	4
2.6	Justificación del proyecto.....	4
2.7	Propuesta de solución.....	5
3	Objetivos.....	5
3.1	General.....	5
3.2	Específicos.....	6
4	Requerimientos.....	6
4.1	Funcionales.....	6
4.2	De calidad.....	7
4.3	Restictivos.....	8
5	Plan de Pruebas.....	8
5.1	Prueba 1: Entrada y salida del sistema.....	8
5.2	Prueba 2: Software.....	10
5.3	Prueba 3: Periférico mecánico.....	10
6	Metodología.....	11
6.1	Seminario de investigación.....	11
6.2	Proyecto I.....	12
6.3	Proyecto II.....	14
7	Recursos necesarios.....	15
7.1	Recursos de tiempo.....	15
7.2	Recursos humanos.....	15
7.3	Recursos técnicos.....	15
7.4	Recursos materiales.....	16
7.5	Recursos de financiación.....	16
8	Estado del arte.....	16
8.1	Bases teóricas.....	16
8.2	Tecnología.....	27
8.3	Glosario de términos.....	31

9	Diseño Funcional.....	32
9.1	Alternativa 1 de Diseño Funcional.....	32
9.2	Alternativa 2 de Diseño Funcional.....	35
9.3	Sumatoria de funciones vs función del sistema. ....	39
9.4	Selección de alternativa.....	39
10	Diseño detallado.....	40
10.1	Subsistema A.....	41
10.2	Subsistema B.....	61
10.3	Subsistema C.....	74
10.4	Subsistema X.....	82
10.5	Esquemático del sistema .....	84
10.6	Simulación del sistema .....	86
11	Plan de pruebas del sistema .....	87
11.1	Plan de pruebas de componentes .....	87
11.2	Plan de pruebas de subsistemas.....	87
11.3	Plan de pruebas de integración.....	87
11.4	Plan de pruebas del sistema .....	89
12	Diseño industrial .....	89
12.1	Conceptualización y definición de diseño.....	89
12.2	Planificación de la producción.....	100
13	Implementación y pruebas de subsistemas.....	109
13.1	Subsistema A.....	109
13.2	Subsistema B.....	137
13.3	Subsistema C.....	144
13.4	Subsistema X.....	150
14	Integración y pruebas del sistema .....	151
15	Pruebas del sistema .....	151
15.1	Prueba 1: Entrada y salida del sistema. ....	152
15.2	Prueba 2: Software. ....	158
15.3	Prueba 3: Periférico mecánico. ....	160
16	Ajustes.....	167
17	Pruebas del Sistema.....	167
18	Manuales .....	167
19	Resultados.....	167
19.1	Fichas técnicas de los subsistemas .....	168

20 Discusión .....	171
21 Conclusiones.....	171
22 Referencias Documentales.....	1
23 Anexos.....	6

## Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de función de transferencia del sistema. ....	6
Figura 2. Función de transferencia Fase I. ....	11
Figura 3. Función de transferencia subsistemas Fase I. ....	12
Figura 4. Función de transferencia Fase II. ....	12
Figura 5. Función de transferencia subsistemas Fase II. ....	13
Figura 6. Función de transferencia Fase III. ....	14
Figura 7. Función de transferencia subsistemas Fase III. ....	15
Figura 8. Potencial de acción típico registrado por el método que se muestra en la parte superior de la figura. Figura adaptada de [8].....	17
Figura 9. Ubicación espacial de los cuatro lóbulos del cerebro humano resaltando las bandas sensoriales y motoras. Figura adaptada de [8].....	18
Figura 10. Bandas sensoriales y motoras asignando la región cerebral para cada parte del cuerpo. Figura adaptada de [8].....	18
Figura 11. Ondas cerebrales. Figura adaptada de [5].....	19
Figura 12. Registro electroencefalográfico por canales. ....	20
Figura 13. Colocación de electrodos según el sistema 10-20. Figura tomada de [10].....	21
Figura 14. Esquema de trabajo para reconocimiento de imaginación motora de señales EEG. Figura tomada de [8].....	22
Figura 15. Prótesis pasiva de miembro superior. Figura tomada de [13] .....	23
Figura 16. Prótesis de tracción de miembro superior desde el hombro. Figura tomada de [12] .....	24
Figura 17. Prótesis de tracción de miembro superior desde el codo. Figura tomada de [12] .....	24
Figura 18. Prótesis mioeléctricas de miembro superior. Figura tomada de [13] .....	25
Figura 19. Prótesis híbrida de miembro superior. Figura tomada de [12].....	25
Figura 20. Prótesis eléctrica. Figura tomada de [18].....	26
Figura 21. Prótesis neumáticas. [13] .....	26
Figura 22. V-Amp 16. Figura tomada de [60] .....	27
Figura 23. Ganglion Board. Figura tomada de [22] .....	28
Figura 24. Sensorhand Speed y Variplus Speed. Figura tomada de [23].....	29
Figura 25. Prótesis Michelangelo. Figura tomada de [24] .....	30
Figura 26. Configuración del húmero y del hombro de la Prótesis Luke Arm. Adaptada de [28] .....	31
Figura 27. Diseño funcional. Entradas y salidas del sistema. ....	32
Figura 28. Función del sistema representada por medio de un diseño funcional. ....	33
Figura 29. Diseño funcional. Entradas y salidas del sistema. ....	35
Figura 30. Segunda alternativa de diseño funcional subsistemas. Bloques del sistema.....	36
Figura 31. Entradas y salidas del subsistema A. ....	37
Figura 32. Entradas y salidas del subsistema B. ....	38
Figura 33. Entradas y salidas del subsistema C. ....	38
Figura 34. Entradas y salidas del subsistema x. ....	39
Figura 35. Entradas y salidas del subsistema A. ....	42
Figura 36. Esquema de las etapas que componen al subsistema A.....	43
Figura 37. Esquema electrónico del AD620. Adaptada de [48].....	44
Figura 38. AD620.....	44
Figura 39. Topología sellen-key de un filtro pasa bajos. Figura tomada de [37].....	46
Figura 40. Componente TL084.....	49

Figura 41. Topología sellen-key de un filtro pasa altos. Figura tomada de [37] .....	50
Figura 42. Esquema del subsistema A con las etapas que lo componen. ....	53
Figura 43. Esquema y simulación del circuito de ganancia 1000.....	54
Figura 44. Esquema y simulación del circuito de ganancia 1000.....	54
Figura 45. Respuesta del AD620 en el osciloscopio.....	55
Figura 46. Esquema y simulación del circuito pasa bajos de Mu con fc de 14Hz. ....	55
Figura 47. Esquema y simulación del circuito pasa bajos de Beta con fc de 29Hz. ....	56
Figura 48. Diagrama de bode para el filtro pasa bajos de la onda Mu, (señal de entrada en XFG1 es la señal de salida de la etapa AA 34mVp=24mVRms con frecuencia de 16Hz). ....	56
Figura 49. Diagrama de bode para el filtro pasa bajos de la onda Beta, (señal de entrada en XFG1 es la señal de salida de la etapa AA 34mVp=24mVRms con frecuencia de 16Hz). ....	56
Figura 50. Esquema y simulación del circuito pasa altos con fc de 8Hz para la onda Mu. ....	57
Figura 51. Esquema y simulación del circuito pasa altos con fc de 14Hz para la onda Beta..	57
Figura 52. Diagrama de bode 1 y 2, (señal de entrada en XFG1 es la señal de salida de la etapa AA 34mVp=24mVRms con frecuencia en 8Hz). ....	57
Figura 53. Diagrama de bode 1 y 2, (señal de entrada en XFG1 es la señal de salida de la etapa AA 34mVp=24mVRms con frecuencia en 8Hz). ....	58
Figura 54. Esquema y simulación del circuito de amplificación con ganancia de 25.....	58
Figura 55. Simulación del circuito de amplificación con ganancia de 25. ....	59
Figura 56. Entradas y salidas del subsistema B. ....	62
Figura 57. Esquema de las etapas que componen al subsistema B.....	63
Figura 58. Arduino UNO con el microcontrolador atmega28P incorporado. ....	65
Figura 59. Dispositivo portátil Acer Aspire 3 y sus características. Tomada de [52].....	66
Figura 60. Esquema del subsistema B con las etapas que lo componen. ....	68
Figura 61. Estructura del código para la comunicación en el Arduino UNO y Matlab. ....	69
Figura 62. Estructura del código para la comunicación en el Arduino UNO y Matlab. ....	69
Figura 63. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab. ....	69
Figura 64. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab. ....	70
Figura 65. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab. ....	70
Figura 66. Algoritmo para el reconocimiento del movimiento imaginado de la mano izquierda y derecha. Tomada de [8] .....	71
Figura 67. Registro de la señal analógica digitalizada. ....	73
Figura 68. Entradas y salidas del subsistema C. ....	75
Figura 69. Esquema de las etapas que componen al subsistema C.....	75
Figura 70. Arduino MEGA.....	78
Figura 71. Servo motor de piñonería metálica.....	79
Figura 72. Esquema de conexiones del Arduino MEGA con el motor, el PC y el sistema de alimentación.....	80
Figura 73. Componentes del servomotor MG995. Tomada de [53] .....	81
Figura 74. Simulación de CA y CB. Arduino MEGA y motor (actuador).....	81
Figura 75. Simulación de CB.....	82
Figura 76. Entradas y salidas del subsistema x. ....	83
Figura 77. Esquemático de subsistema de alimentación (fuente de poder). ....	83
Figura 78. Simulación del subsistema de alimentación. ....	84
Figura 79. Esquemático electrónico de los 2 canales del sistema. ....	85
Figura 80. Esquema electrónico de la integración de todos los subsistemas que conforman al sistema.....	85
Figura 81. Esquema del subsistema A, conectado a su entrada y salida. ....	86

Figura 82. Esquema del subsistema A. ....	86
Figura 83. Simulación del subsistema de alimentación. ....	87
Figura 84. Simulación del subsistema de alimentación. ....	88
Figura 85. Movimientos de la articulación del codo de 0° a 90° (extensión y flexión). ....	90
Figura 86. Norma 10-20 para la colocación de electrodos y en C1, C2 y referencia. ....	90
Figura 87. Filamento de PLA. Figura tomada de [38]. ....	99
Figura 88. Diagrama del laboratorio, ubicación del prototipo (B) y el usuario (A). ....	101
Figura 89. Bosquejo del prototipo. ....	101
Figura 90. Primera alternativa, prototipo robótico de extremidad superior derecha. Adaptada de [42]. ....	102
Figura 91. Primera alternativa, prototipo robótico de extremidad superior derecha. Adaptada de [42]. ....	102
Figura 92. Segunda alternativa, prototipo robótico de extremidad superior derecha. Tomada de [41]. ....	103
Figura 93. Pieza unión falanges.[42] ....	104
Figura 94. Falange proximal de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]. ....	105
Figura 95. Pieza union de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42] ....	105
Figura 96. Falange distal de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42] ....	105
Figura 97. Dedos de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42].	106
Figura 98. Pieza antebrazo del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42] ....	106
Figura 99. Pieza de unión de antebrazo y brazo del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]. ....	106
Figura 100. Pieza de la tapa del brazo del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]. ....	107
Figura 101. Pieza unión de la base del antebrazo a la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42] ....	107
Figura 102. Pieza que permite le movimiento de la articulación de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42] ....	107
Figura 103. Palma de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]	108
Figura 104. Carpienos 4 y 3 de la mano de la articulación de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42] ....	108
Figura 105. Engranajes del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]. ....	108
Figura 106. Tornillos del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]. ....	108
Figura 107. Servomotor del prototipo robótico de extremidad superior derecha. ....	109
Figura 108. Esquemático del circuito de preamplificación. (Componente AA). ....	110
Figura 109. Diseño del componente para impresión en PCB. ....	111
Figura 111. Amplificador con ganancia de 1000. Vista superior. ....	111
Figura 112. Amplificador con ganancia de 1000. Vista inferior. ....	112
Figura 113. Pasa Bajos de onda Alfa. ....	112
Figura 114. Pasa Bajos de onda Alfa rediseñado con valores exactos. ....	113
Figura 115. Diseño del componente para impresión en PCB. ....	113
Figura 116. Filtro pasa bajos de Alfa con frecuencia de corte 14Hz. ....	114
Figura 117. Filtro pasa bajos de Alfa con frecuencia de corte 14Hz. Vista superior. ....	114
Figura 118. Filtro pasa bajos de Alfa con frecuencia de corte 14Hz. Vista inferior. ....	114
Figura 119. Pasa Altos de onda Alfa (Mu). ....	115



Figura 120. Pasa Altos de onda Alfa rediseñado con valores exactos. ....	115
Figura 121. Diseño del componente para impresión en PCB. ....	116
Figura 122. Filtro pasa altos de Alfa con frecuencia de corte 8Hz. ....	116
Figura 123. Filtro pasa altos de Alfa con frecuencia de corte 8Hz. Vista superior. ....	117
Figura 124. Filtro pasa altos de Alfa con frecuencia de corte 8Hz. Vista inferior. ....	117
Figura 125. Pasa Bajos de onda Beta. ....	118
Figura 126. Pasa Bajos de onda Beta rediseñado con valores exactos. ....	118
Figura 127. Diseño del componente para impresión en PCB. ....	118
Figura 128. Filtro pasa bajos de Beta con frecuencia de corte 29Hz. ....	119
Figura 129. Filtro pasa bajos de Beta con frecuencia de corte 29Hz. Vista superior. ....	119
Figura 130. Filtro pasa bajos de Beta con frecuencia de corte 29Hz. Vista inferior. ....	120
Figura 131. Pasa Altos de onda Beta. ....	120
Figura 132. Pasa Altos de onda Beta rediseñado con valores exactos. ....	120
Figura 133. Diseño del componente para impresión en PCB. ....	121
Figura 134. Filtro pasa altos de Beta con frecuencia de corte 14Hz. ....	122
Figura 135. Filtro pasa altos de Beta con frecuencia de corte 14Hz. Vista superior. ....	122
Figura 136. Filtro pasa altos de Beta con frecuencia de corte 14Hz. Vista inferior. ....	122
Figura 137. Amplificador con ganancia de 25. ....	123
Figura 138. Diseño del componente para impresión en PCB. ....	123
Figura 139. Amplificador con ganancia de 25. Vista superior. ....	124
Figura 140. Amplificador con ganancia de 25. Vista inferior. ....	124
Figura 141. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 30Hz. ....	125
Figura 142. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 30Hz. ....	126
Figura 143. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 20Hz. ....	126
Figura 144. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 20Hz. ....	126
Figura 145. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 10Hz. ....	127
Figura 146. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 10Hz. ....	127
Figura 147. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 15Hz. ....	127
Figura 148. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 6Hz. ....	128
Figura 149. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 6Hz. ....	129
Figura 150. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 7Hz. ....	129
Figura 151. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 12Hz. ....	129
Figura 152. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 12Hz. ....	130
Figura 153. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 9Hz. ....	130

Figura 154. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 9Hz. ....	130
Figura 155. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia igual a la frecuencia de corte.....	131
Figura 156. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia igual a la frecuencia de corte.....	131
Figura 157. Respuesta del filtro pasa bajos de Beta a frecuencias superiores a la $f_c$ (29hz). ....	132
Figura 158. Funcionamiento filtro pasa bajos de Beta ( $F_c$ 29hz).....	132
Figura 159. Respuesta del filtro pasa bajos de Beta a frecuencias inferiores a la $f_c$ (29hz). ....	133
Figura 160. Funcionamiento filtro pasa bajos de Beta ( $F_c$ 29hz).....	133
Figura 161. Respuesta del filtro pasa bajos de Beta a frecuencias iguales a la $f_c$ (29hz). ...	133
Figura 162. Funcionamiento del filtro pasa altos de Beta con frecuencia de corte en 13 Hz. ....	134
Figura 163. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias superiores a la frecuencia de corte 14Hz. ....	135
Figura 164. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias inferiores a la frecuencia de corte 14Hz. ....	135
Figura 165. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias inferiores a la frecuencia de corte 14Hz. ....	135
Figura 166. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias inferiores a la frecuencia de corte 14Hz. ....	136
Figura 167. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias inferiores a la frecuencia de corte 14Hz. ....	136
Figura 168. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias iguales a la frecuencia de corte 14Hz.....	136
Figura 169. Vista de los 4 filtros. (Las señales en el osciloscopio corresponden a las pruebas del pasa altos de la onda Alfa). ....	137
Figuras 170 A y B. Vistas de los circuitos. ....	137
Figura 171. Modelo la tarjeta Arduino uno. (Componente BA1).....	138
Figura 172. Tarjeta Arduino uno. (Componente BA1).....	138
Figura 173. Computador para el uso del procesamiento de las señales. (Componente BA2). ....	139
Figura 174. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab. ....	139
Figura 175. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab. ....	139
Figura 176. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab. ....	140
Figura 177. Registro de la señal analógica utilizando Arduino, un computador y Matlab.....	141
Figura 178. Registro de la señal analógica procesada.....	142
Figura 179. Registro de la señal analógica digitalizada. ....	142
Figura 180. Registro de la señal analógica digitalizada, visualizada en pantalla. ....	144
Figura 181. Prototipo robótico de extremidad superior.....	144
Figura 182. Prototipo robótico de extremidad superior.....	145
Figuras 183 A, B, C, D y E. Prototipo robótico de extremidad superior desde diferentes ángulos. ....	145
Figura 184. Programa en Arduino para generar movimiento en el motor.....	145
Figura 185. Conexión Arduino con protoboard para generar movimiento en el motor. ....	146
Figura 186. Conexión de Matlab con Arduino y led. ....	147

Figura 187. Led apagado y encendido por señal enviada desde Matlab, comprobando la correcta conexión entre este software, Arduino y el led que representa al actuador. ....	147
Figura 188. Conexión Arduino, computador, protoboard y prototipo con motor.....	148
Figura 189. Prototipo robótico antes y después de movimiento.....	148
Figura 190. Conexión Arduino, computador, protoboard y prototipo con motor. Prototipo robótico en movimiento de 0° (izquierda) a 90° (derecha). ....	149
Figura 191. Prototipo robótico luego de girar la cantidad de ángulos completos. Transportador midiendo los ángulos de giro.....	149
Figura 192. Prototipo robótico luego de girar la cantidad de ángulos completos. Transportador midiendo los ángulos de giro. Línea para identificar la cantidad de ángulos girados. ....	150
Figura 193. Conexión Arduino, computador, protoboard y prototipo con motor. Prototipo robótico en movimiento de 0° (izquierda) a 90° (derecha). ....	150
Figura 194. Cargador utilizado como fuente de voltaje casera. ....	150
Figura 195. Prueba de fuente de voltaje con multímetro.....	151
Figura 196. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 9Hz (izquierda), con frecuencia de 13Hz (centro) y con frecuencia de 15Hz (derecha). ....	152
Figura 197. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 6Hz (izquierda) y con frecuencia de 30Hz (derecha). ....	153
Figura 198. Canal de Alfa. Pasa altos de Alfa seguido de pasa bajos de Alfa. Vista superior del canal. ....	153
Figura 199. Canal de Beta. Pasa altos de Beta seguido de pasa bajos de Beta. Vista superior del canal.....	154
Figura 200. Dos canales. Canal de Alfa arriba y canal de Beta abajo. ....	154
Figura 201. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 10Hz (izquierda) y con frecuencia de 12Hz (derecha). ....	155
Figura 202. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 6Hz (izquierda) y con frecuencia de 30Hz (derecha). ....	155
Figura 203. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 13Hz (izquierda) y con frecuencia de 24Hz (derecha). ....	156
Figura 204. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 9Hz (izquierda), frecuencia de 11Hz (centro) y con frecuencia de 34Hz (derecha). ....	156
Figura 205. Registro de la señal análoga utilizando Arduino, un computador y Matlab.....	158
Figura 206. Registro de la señal análoga digitalizada. ....	159
Figura 207. Registro de la señal análoga digitalizada, visualizada en pantalla. ....	160
Figura 208. Prototipo estirado. Vista lateral (izquierda), vista frontal (derecha). ....	161
Figura 209. Prototipo durante la generación de movimiento. Vista lateral.....	161
Figura 210. Engranajes de la articulación del codo unidas al servomotor para generar el movimiento del prototipo. Articulación antes de girar (izquierda), articulación después de girar (derecha). ....	161
Figura 211. Prototipo de extremidad superior derecha estirado (izquierda), flexionado a aproximadamente 45° en la articulación del codo (centro) y flexionado a 90° en la articulación del codo (izquierda). ....	162
Figura 212. Prototipo de extremidad superior derecha flexionado y transportador para medir el ángulo de giro. ....	163
Figura 213. Prototipo robótico luego de girar la cantidad de ángulos completos. Transportador midiendo los ángulos de giro. Línea para identificar la cantidad de ángulos girados. ....	163
Figura 214. Acercamiento del prototipo y el transportador con la cantidad de grados de giro. ....	163

Figuras 215 A, B y C. Prototipo robótico de extremidad superior derecha comparado con la extremidad superior derecha de una mujer adulta promedio. ....	164
Figuras 216. Muñeca y mano del prototipo comparadas con la muñeca y mano de una mujer adulta promedio. ....	164
Figuras 217. Mano del prototipo comparada con la mano de una mujer adulta promedio. Dorso de la mano (izquierda) y palma de la mano (derecha). ....	164
Figuras 218 A y B. Prototipo robótico de extremidad superior derecha doblado comparado con la extremidad superior derecha de una mujer adulta promedio doblada.....	165
Figuras 219 A, B y C. Peso del prototipo con una báscula digital (B) peso sin motor, (D) peso con motor.....	165
Figura 220. Prototipo robótico de extremidad superior con longitud de 52 cm.....	166
Figura 221. Consumo de corriente del prototipo robótico de extremidad superior derecha.	166

## Lista de Tablas

Tabla 1. Pruebas de requerimientos funcionales de entrada y salida. ....	9
Tabla 2. Pruebas de requerimientos funcionales de software. ....	10
Tabla 3. Pruebas de requerimientos funcionales de periférico mecánico. ....	11
Tabla 4. Regiones del cerebro: sus localizaciones y sus funciones. Adaptada de [8] .....	17
Tabla 5. Especificaciones técnicas de V-Amp 8 y V-amp 16. Tabla adaptada de [21].....	27
Tabla 6. Especificaciones técnicas Ganglion Board. Tabla tomada de [22].....	28
Tabla 7. Especificaciones técnicas sensorhand Speed. Tabla adaptada de [23] .....	29
Tabla 8. Especificaciones técnicas de prótesis Michelangelo. Tabla adaptada de [24] .....	30
Tabla 9. Especificaciones técnicas tarje la prótesis Luke Arm. Tala adaptada de [28] .....	30
Tabla 10. Requerimientos de componentes de la etapa AA (subsistema A). ....	44
Tabla 11. Coeficientes Chebyshev para filtros de orden 4 con ripple de 1dB.....	46
Tabla 12. Requerimientos de componentes de la etapa AB (subsistema A). ....	49
Tabla 13. Requerimientos de componentes de la etapa AC (subsistema A). ....	52
Tabla 14. Requerimientos de componentes de la etapa AD (subsistema A). ....	52
Tabla 15. Plan de pruebas del componente AA. ....	59
Tabla 16. Plan de pruebas del componente AB A. ....	59
Tabla 17. Plan de pruebas del componente AB B. ....	60
Tabla 18. Plan de pruebas del componente AC A. ....	60
Tabla 19. Plan de pruebas del componente AC B. ....	60
Tabla 20. Plan de pruebas del componente AD.....	61
Tabla 21. Plan de pruebas del subsistema A. ....	61
Tabla 22. Requerimientos de la primera subetapa de la etapa BA (subsistema B). ....	64
Tabla 23. Requerimientos de componentes de la subetapa BA2 (subsistema B). ....	65
Tabla 24. Requerimientos de componentes de la etapa BB (subsistema B). ....	66
Tabla 25. Requerimientos de componentes de la etapa BD (subsistema B). ....	67
Tabla 26. Plan de pruebas del componente BA1.....	72
Tabla 27. Plan de pruebas del componente BA2.....	72
Tabla 28. Plan de pruebas del componente BB.....	72
Tabla 29. Plan de pruebas del componente BC.....	73
Tabla 30. Plan de pruebas del componente BD.....	73
Tabla 31. Plan de pruebas del subsistema B. ....	73
Tabla 32. Requerimientos de componentes de la etapa CA (subsistema C). ....	77
Tabla 33. Requerimientos de componentes de la etapa CA (subsistema C). ....	78
Tabla 34. Requerimientos de componentes de la etapa DA (subsistema D). ....	79
Tabla 35. Plan de pruebas del componente CA.....	82
Tabla 36. Plan de pruebas del componente CB.....	82
Tabla 37. Plan de pruebas del subsistema X. ....	84
Tabla 38. Plan de pruebas de los subsistemas A y B. ....	88
Tabla 39. Plan de pruebas de los subsistemas B y C. ....	89
Tabla 40. Cumplimiento de requerimientos industriales de los materiales.....	96
Tabla 41. Presupuesto para el desarrollo del proyecto. ....	97
Tabla 42. Cronograma de desarrollo del proyecto. Etapa de implementación. ....	97
Tabla 43. Características de los materiales para impresión 3D. ....	98
Tabla 44. Evaluación de las alternativas propuestas. ....	103
Tabla 45. Plan de pruebas del componente AA.....	124
Tabla 46. Plan de pruebas del componente AB A. ....	125

Tabla 47. Plan de pruebas del componente AB B. ....	128
Tabla 48. Plan de pruebas del componente AC A. ....	131
Tabla 49. Plan de pruebas del componente AC B. ....	134
Tabla 50. Plan de pruebas del componente BA1. ....	141
Tabla 51. Plan de pruebas del componente BA2. ....	141
Tabla 52. Plan de pruebas del componente BB. ....	142
Tabla 53. Plan de pruebas del componente BC. ....	143
Tabla 54. Plan de pruebas del componente BD. ....	143
Tabla 55. Plan de pruebas del componente CA. ....	146
Tabla 56. Plan de pruebas del componente CB. ....	149
Tabla 57. Plan de pruebas del subsistema X. ....	151
Tabla 58. Prueba del sistema de adquisición. ....	152
Tabla 59. Prueba del sistema de adquisición. ....	153
Tabla 60. Prueba del sistema de adquisición. ....	155
Tabla 61. Prueba del sistema de adquisición. ....	156
Tabla 62. Prueba del sistema de adquisición. ....	157
Tabla 63. Prueba del sistema de adquisición. ....	157
Tabla 64. Prueba del software. ....	158
Tabla 65. Prueba del software. ....	159
Tabla 66. Prueba del software. ....	159
Tabla 67. Prueba del periférico mecánico. ....	160
Tabla 68. Prueba del periférico mecánico. ....	162
Tabla 69. Prueba del periférico mecánico. ....	162
Tabla 70. Prueba del periférico mecánico. ....	164
Tabla 71. Prueba del periférico mecánico. ....	165
Tabla 72. Prueba del periférico mecánico. ....	166
Tabla 73. Ficha técnica subsistema A. ....	168
Tabla 73. Ficha técnica subsistema A. ....	169
Tabla 74. Ficha técnica subsistema B. ....	169
Tabla 75. Ficha técnica subsistema C. ....	170
Tabla 76. Ficha técnica subsistema X. ....	170

## **1 INTRODUCCIÓN**

La Universidad El Bosque es una institución de educación superior que tiene 56 grupos de investigación que abarcan distintas áreas del conocimiento como la medicina, la ingeniería y la psicología. Entre estos grupos de investigación se encuentra el llamado Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad, perteneciente a la Facultad de Psicología de la Universidad. Los investigadores que conforman este grupo han tenido entre sus objetivos, trabajar con ondas cerebrales humanas con el fin de estudiarlas y, posteriormente, utilizarlas como herramienta de generación de potenciales que permita la realización de tareas diseñadas. Por esta razón, los investigadores han adquirido equipos y software BCI (*Brain-Computer Interface* o Interfaz Cerebro-Computador, en español) que les permiten la adquisición y visualización de señales electroencefalográficas a partir del uso de electrodos ubicados en un gorro que toman las señales de diferentes partes del cerebro.

Los equipos mencionados tienen funciones que no están únicamente ligadas a la psicología, sino también a otras áreas del conocimiento como lo son la medicina y la ingeniería. Por esta razón, los investigadores del grupo Neuropsicología de la Cognición y la afectividad han invitado a profesionales y estudiantes de estas áreas a trabajar con dichos equipos. Además, han requerido de la colaboración de la Facultad de Ingeniería para el manejo del software, el aprovechamiento de los equipos a partir de la programación de estos y el desarrollo de herramientas nuevas que le permitan a los investigadores de psicología probar tareas diseñadas por ellos con enfoques específicos.

Entre las tareas que se diseñan, hay algunas enfocadas al control de periféricos mecánicos a partir de su activación por procesos de atención sostenida e imaginación de un sujeto en estudio. Razón por la cual se presenta a continuación un proyecto cuyo objetivo es desarrollar un prototipo robótico de extremidad superior derecha que le permita a los investigadores la implementación de tareas de Imaginación Motora, previamente diseñadas, enfocadas al control de periféricos mecánicos. Se presenta, entonces, el desarrollo de un prototipo robótico de extremidad superior derecha que permite la implementación de dichas tareas, para que los investigadores puedan continuar de manera óptima con sus investigaciones y pruebas en el campo de la Imaginación Motora.

## **2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

### *2.1 Contexto*

El grupo de investigación Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad, de la Facultad de Psicología de la Universidad El Bosque, diseña tareas para ser utilizadas en técnicas de Imaginación Motora. Este grupo trabaja en el laboratorio de Psicología Experimental de la Universidad, el cual cuenta con equipos y dispositivos tecnológicos que reúnen áreas como la psicología, la medicina y la ingeniería. Uno de estos equipos es el BCI V Amp-16 que trabaja con el software Open-Vibe. Recientemente el grupo de investigación, en conjunto con el Semillero de Comunicaciones Cerebrales, adquirió la tarjeta Open-BCI Ganglion Board, con la cual se trabaja también en Imaginación Motora. Tanto el V-Amp como la Ganglion Board se encargan de las etapas de adquisición, amplificación y visualización de señales electroencefalográficas, y aunque su desempeño en dichas tareas es eficiente, los investigadores no pueden implementar ciertas tareas diseñadas en Imaginación Motora enfocadas al control de periféricos mecánicos por señales electroencefalográficas. Comúnmente, en actividades de Imaginación Motora enfocadas al accionamiento de periféricos mecánicos, se necesita de uno o varios actuadores que puedan reflejar el desempeño del equipo electrónico y el entrenamiento de los investigadores en Imaginación Motora.

La Imaginación Motora es una de las áreas trabajadas por este grupo de investigación y es un proceso cognitivo mediante el cual un sujeto logra que se realice un trabajo o movimiento a partir de su imaginación. El trabajo con Imaginación Motora requiere de entrenamiento en la manera como se logran generar potenciales de acción específicos que hagan que se produzcan ciertos movimientos esperados. Potenciales que se generan a partir de impulsos neuronales en la corteza motora del cerebro humano, en este caso. Para producir estos movimientos esperados a partir de los procesos de concentración del sujeto en ellos, se requiere de herramientas para implementar tareas específicas.

Los grupos de la Facultad de Psicología que trabajan con Imaginación Motora están viendo afectados sus procesos investigativos y de experimentación. Con estos procesos nos referimos al estudio del comportamiento de las ondas cerebrales y las posibles aplicaciones de la Imaginación Motora en el campo clínico, específicamente en la rehabilitación de pacientes y la mejora de su calidad de vida. Todo esto a partir de la utilización de los equipos y dispositivos



que posee el laboratorio en sí; dispositivos orientados a la lectura y estudio de la encefalografía a partir del uso de BCI y el software Open-Vibe adquiridos por la Universidad en el 2018.

La magnitud de esta problemática se ve reflejada en la manera cómo afecta a distintos grupos. En primer lugar, el grupo de investigación ve afectados sus procesos investigativos y experimentales generando un impacto académico negativo considerable. Por otro lado, se encuentran los particulares pertenecientes a la comunidad educativa que hacen uso de las herramientas del laboratorio con las que, hasta el momento, no se logra un trabajo integral en distintas áreas del conocimiento debido a la falta de herramientas que permitan implementar tareas específicas.

## *2.2 Manifestación*

Los investigadores de la Facultad de Psicología de la Universidad El Bosque diseñan tareas de Imaginación Motora enfocadas al control de periféricos mecánicos a partir de señales electroencefalográficas. Sin embargo, no pueden implementar dichas tareas.

## *2.3 Causas*

- 1.** La experimentación en el área de Imaginación Motora para el control de periféricos mecánicos, en el laboratorio de Psicología Experimental, se ve limitada debido a la ausencia de estos periféricos.
- 2.** El grupo de investigación Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad no cuenta con periféricos mecánicos que contribuyan al avance y desarrollo de los procesos de aprendizaje en áreas específicas de Imaginación Motora.
- 3.** El hardware BCI V Amp-16 no cuenta con una etapa que permita validar la activación de periféricos mecánicos basados en el uso registros electroencefalográficos.
- 4.** La experimentación con Imaginación Motora requiere de un entrenamiento arduo que permita al sujeto de estudio reconocer progreso en sus procesos de concentración al lograr, o no, trabajos esperados en periféricos a partir de su atención selectiva y su capacidad de imaginación de los movimientos.
- 5.** Los manuales de usuario existentes y los cursos que brindan los fabricantes no representan una manera completa para que los investigadores de psicología

aprendan a manejar los equipos y aprovechen al máximo las ondas cerebrales para realizar diferentes proyectos.

## *2.4 Efectos*

- 1.** Los procesos de los estudiantes y profesionales de psicología en el campo de BCI, específicamente en el área de Imaginación Motora, se limitan a los programas prediseñados que existen en un único software y la visualización de las respuestas en los mismos.
- 2.** Los procesos de aprendizaje y el desarrollo continuo de los proyectos de investigación relacionados con la aplicación de la Imaginación Motora a pacientes con dificultades motoras se ven limitados.
- 3.** El proyecto Imaginación Motora presenta un retraso en su cronograma de actividades.
- 4.** Las personas pertenecientes al grupo de investigación Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad, no cuentan con herramientas que les permitan explorar el alcance del software en todas sus áreas de trabajo.
- 5.** Los investigadores que trabajan en el laboratorio de Psicología Experimental ven limitada la validación de los entrenamientos alcanzados con Imaginación Motora.

## *2.5 Aspectos a solucionar*

- La experimentación en el área de Imaginación Motora para el control de periféricos mecánicos, en el laboratorio de Psicología Experimental, se ve limitada debido a la ausencia de estos periféricos.
- El grupo de investigación Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad no cuenta con periféricos mecánicos que contribuyan al avance y desarrollo de los procesos de aprendizaje en áreas específicas de Imaginación Motora.

## *2.6 Justificación del proyecto*

El estudio de la Imaginación Motora ha permitido entender el comportamiento de las diferentes ondas cerebrales por medio de la visualización y análisis de registros electroencefalográficos, lo cual ha permitido la realización de trabajos esperados, el desarrollo de proyectos de investigación científica y la mejora de procesos de rehabilitación motora. Sin

embargo, el desarrollo de proyectos con fines médicos requiere del diseño de tareas de Imaginación Motora que no es posible validarlas únicamente con la observación y análisis de las ondas cerebrales, razón por la cual el proyecto Imaginación Motora del grupo de investigación Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad tiene un retraso de 3 meses.

Los estudiantes y docentes pertenecientes al grupo mencionado anteriormente trabajan con estos elementos del laboratorio, sin embargo, la alta tecnología de software y hardware de éstos ha ocasionado que los procesos de investigación y aprendizaje se vean afectados, debido a que se necesita una herramienta externa a él, que facilite la comprensión de los procesos experimentales realizados a partir de la electroencefalografía (EEG). Por lo tanto, la Facultad de Psicología solicita el apoyo de la Facultad de Ingeniería para validar los diseños hardware y desarrollos de software pertinentes a los proyectos en curso, además de proveer herramientas que permitan la implementación y el entrenamiento para el trabajo en los proyectos que involucran Imaginación Motora. Herramientas que sean adaptables a las tecnologías presentes en el laboratorio y que permitan el desarrollo de los procesos y proyectos de los integrantes de los diferentes grupos de investigación en el área, permitiendo a los investigadores validar las tareas diseñadas para trabajo en ella.

Teniendo en cuenta que el fin último de los proyectos de este grupo es llegar a la rehabilitación de pacientes en un ámbito clínico, es importante que las tareas se implementen al control de periféricos capaces de emular movimientos humanos. Al lograr esta implementación, los investigadores podrán alcanzar su objetivo de rehabilitación con pacientes con dificultades motoras.

## *2.7 Propuesta de solución*

Prototipo robótico de extremidad superior derecha para implementación de tareas de Imaginación Motora.

# **3 OBJETIVOS**

## *3.1 General*

Diseñar, implementar y probar un prototipo robótico de extremidad superior derecha para implementación de tareas de Imaginación Motora.

### 3.2 Específicos

- Diseñar el sistema de control por medio de registros electroencefalográficos para el prototipo robótico de extremidad superior derecha.
- Diseñar, implementar y probar un acondicionador de pequeña señal para la adquisición de las ondas Mu y Beta producidas por impulsos neuronales en la corteza motora (Cz) del cerebro humano.
- Implementar el sistema de control por medio de registros electroencefalográficos para el prototipo robótico de extremidad superior derecha.
- Desarrollar un plan de pruebas para los sistemas y subsistemas del prototipo robótico de extremidad superior derecha.
- Realizar simulaciones de los sistemas y subsistemas del prototipo.
- Implementar los sistemas diseñados para el prototipo robótico de extremidad superior derecha.
- Elaborar un manual de usuario detallado para uso adecuado del dispositivo.

## 4 REQUERIMIENTOS

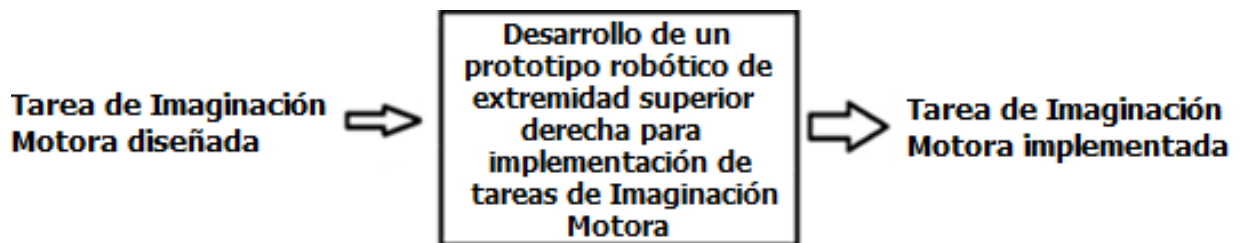


Figura 1. Esquema de función de transferencia del sistema.

### 4.1 Funcionales

1. El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá 1 grado de libertad.
2. El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá una articulación, correspondiente a la articulación del codo.
3. El sistema de adquisición de señales Mu y Beta del prototipo robótico de extremidad superior derecha estará diseñado para trabajar con frecuencias entre 8Hz y 29Hz.
4. El codo del prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá movimiento en el plano sagital de 0° a 90°.

- 5.** El sistema de adquisición de pequeña señal contará con 2 canales (Mu y Beta).
- 6.** El sistema de adquisición de pequeña señal entregará, en un canal (Mu), señales filtradas entre 8Hz y 13Hz.
- 7.** El sistema de adquisición de pequeña señal entregará, en un canal (Beta), señales filtradas entre 14Hz y 29Hz.
- 8.** El sistema recibirá señales de electroencefalografía que serán procesadas por un circuito amplificador de pequeña señal que contará con etapas de adquisición, filtrado, amplificación y aplicación de las señales de Imaginación Motora.
- 9.** El software del sistema permitirá enviar las señales de control de los movimientos del prototipo robótico de extremidad superior derecha.
- 10.** El software de procesamiento deberá realizar una lectura de las señales electroencefalográficas previamente adquiridas.
- 11.** El prototipo tendrá la longitud de un brazo humano de una mujer adulta promedio.
- 12.** El software de procesamiento deberá visualizar las señales adquiridas.
- 13.** El sujeto de estudio hará que el prototipo robótico de extremidad superior derecha realice movimientos a partir de la tarea. En caso de no realizar los movimientos, el entrenamiento o la tarea no habrá sido correctamente implementada.
- 14.** El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá un peso máximo de 600g.
- 15.** El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá una longitud aproximada de 55cm.

#### *4.2 De calidad*

- 1.** El sistema de adquisición de pequeña señal entregará, en un canal (Mu), señales filtradas con tolerancia de  $\pm 3\text{Hz}$ .
- 2.** El sistema de adquisición de pequeña señal entregará, en un canal (Beta), señales filtradas con tolerancia de  $\pm 3\text{Hz}$ .
- 3.** El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá un peso máximo de 600g  $\pm 200\text{g}$  de tolerancia.
- 4.** El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá una longitud de 55cm con tolerancia de  $\pm 5\text{cm}$ .
- 5.** El movimiento en el plano sagital del codo del prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá una tolerancia de  $\pm 4,5^\circ$ .

6. El prototipo de extremidad superior derecha se elaborará con PLA impreso en 3D.
7. El prototipo tendrá la longitud de un brazo humano de una mujer adulta promedio de  $\pm 5\text{cm}$ .
8. El movimiento en el plano sagital del codo del prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá una tolerancia de  $\pm 8^\circ$ .

#### 4.3 *Restringidos*

9. El sujeto de estudio solamente podrá realizar la actividad de BCI para el control del periférico una vez termine su proceso completo de entrenamiento.
10. El prototipo será activado por los procesos de pensamiento del sujeto de estudio.
11. Los movimientos del prototipo robótico de extremidad superior derecha serán controlados a partir de impulsos neuronales.
12. Los movimientos del prototipo robótico de extremidad superior derecha serán controlados por las ondas Mu y Beta del registro electroencefalográfico.
13. Se utilizará el software Matlab.
14. El sistema se encontrará en un lugar cerrado, por lo cual no se verá afectado por condiciones climáticas.

## 5 PLAN DE PRUEBAS

Las pruebas funcionales para realizar son:

Prueba 1: Entrada y salida del sistema.

Prueba 2: Software.

Prueba 3: Periférico mecánico.

### 5.1 *Prueba 1: Entrada y salida del sistema.*

#### **Objetivo de la prueba**

Comprobar la señal de entrada y de salida del sistema. En la tabla 1 se presentan los requerimientos funcionales relacionados con la entrada y la salida del sistema, asimismo, se presentan las pruebas de estos requerimientos.

Tabla 1. Pruebas de requerimientos funcionales de entrada y salida.

Requerimiento a comprobar	Prueba (procedimiento)	Instrumentos
El sistema de acondicionamiento de señales Mu y Beta del prototipo robótico de extremidad superior derecha estará diseñado para trabajar con frecuencias entre 8Hz y 29Hz.	Utilizando el generador de señales se genera una señal sinusoidal de 20mvpp. La señal generada se conecta a la entrada del sistema de acondicionamiento de señal. La frecuencia de esta señal sinusoidal se varía, de manera que oscile en frecuencias entre los 2Hz y frecuencias superiores los 29 Hz. Se comprueba, a la salida, que el sistema de adquisición permita el paso de la señal en las frecuencias entre 8Hz y 29Hz.	✓ Generador de señales ✓ Osciloscopio ✓ Fuente de voltaje
El sistema de adquisición de pequeña señal contará con 2 canales (Mu y Beta).	Se verifica que el sistema de adquisición cuente con dos canales, y que estos sean de las señales Mu y Beta, respectivamente. Se deben contar los canales.	✓ Documento
El sistema de adquisición de pequeña señal entregará, en un canal (Mu), señales filtradas entre 8Hz y 13Hz.	Utilizando el generador de señales se genera una señal sinusoidal de 20vpp. La señal generada se conecta a la entrada del sistema de acondicionamiento de señal. La frecuencia de esta señal sinusoidal se varía, de manera que oscile en frecuencias entre los 2Hz y frecuencias superiores los 13Hz. Se comprueba, a la salida, que el sistema de adquisición permita únicamente el paso de la señal en las frecuencias entre 8Hz y 13Hz.	✓ Generador de señales ✓ Osciloscopio ✓ Fuente de voltaje
El sistema de adquisición de pequeña señal entregará, en un canal (Beta), señales filtradas entre 14Hz y 29Hz.	Utilizando el generador de señales se genera una señal sinusoidal de 20vpp. La señal generada se conecta a la entrada del sistema de acondicionamiento de señal. La frecuencia de esta señal sinusoidal se varía, de manera que oscile en frecuencias entre los 2Hz y frecuencias superiores los 29Hz. Se comprueba, a la salida, que el sistema de adquisición permita únicamente el paso de la señal en las frecuencias entre 14Hz y 29Hz.	✓ Generador de señales ✓ Osciloscopio ✓ Fuente de voltaje
El sistema recibirá señales de electroencefalografía que serán procesadas por un circuito amplificador de pequeña señal que contará con etapas de adquisición, filtrado, amplificación y aplicación de las señales de Imaginación Motora.	Se realiza la conexión del sujeto en estudio al sistema de adquisición y se verifica que se reciba la señal y esta se amplifique y filtre correctamente.	✓ Electrodo ✓ Cables para electrodos ✓ Sujeto entrenado ✓ Osciloscopio ✓ Fuente de voltaje
El sujeto de estudio hará que el prototipo robótico de extremidad superior derecha realice movimientos a partir de la tarea. En caso de no realizar los movimientos, el entrenamiento o la tarea no habrá sido correctamente implementada.	El sujeto deberá pensar en un movimiento en específico según la tarea, y el prototipo robótico deberá realizar el movimiento esperado.	✓ Electrodo ✓ Cables para electrodos ✓ Sujeto entrenado ✓ Prototipo robótico de extremidad superior derecha

## 5.2 Prueba 2: Software.

### Objetivo de la prueba

Comprobar el funcionamiento del software. En la tabla 2 se presentan los requerimientos funcionales relacionados con el software del sistema, asimismo, se presentan las pruebas de estos requerimientos.

*Tabla 2. Pruebas de requerimientos funcionales de software.*

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El software de procesamiento deberá realizar una lectura de señales electroencefalográficas del acondicionador de pequeña señal	Se comprueba que el software permita obtener una lectura de señales electroencefalográficas en el sistema de acondicionador de pequeña señal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Computador</li> <li>✓ Tarjeta Arduino</li> <li>✓ Señales bioeléctricas</li> <li>✓ Matlab</li> <li>✓ Arduino</li> </ul>
El software de procesamiento deberá visualizar las señales adquiridas.	Se comprueba que el software de procesamiento permita visualizar las señales adquiridas por el sistema de acondicionador.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Matlab</li> <li>✓ Arduino</li> <li>✓ Computador</li> <li>✓ Tarjeta Arduino</li> <li>✓ Señales bioeléctricas</li> </ul>
El software del sistema permitirá enviar las señales de control de los movimientos del prototipo robótico de extremidad superior derecha.	<p>El software deberá junto a su respectiva tarjeta, deberá funcionar como ADC y digitalizar las señales obtenidas para su uso en el sistema de control.</p> <p>Se comprueba que el software utilizado envíe a la salida las señales correspondientes para generar los movimientos del prototipo según la tarea.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Computador</li> <li>✓ Matlab</li> <li>✓ Arduino</li> <li>✓ Tarjeta Arduino MEGA</li> <li>✓ Servomotor MG996R</li> <li>✓ Fuente de voltaje</li> </ul>

## 5.3 Prueba 3: Periférico mecánico.

### Objetivo de la prueba

Comprobar el funcionamiento del prototipo robótico de extremidad superior derecha. En la tabla 3 se presentan los requerimientos funcionales relacionados con el software del sistema, asimismo, se presentan las pruebas de estos requerimientos.



Tabla 3. Pruebas de requerimientos funcionales de periférico mecánico.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá 1 grado de libertad.	Se comprueba que el prototipo tenga movimiento en al menos un eje.	✓ Prototipo robótico ✓ Fuente de voltaje
El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá una articulación, correspondiente a la articulación del codo.	Se comprueba que el movimiento del prototipo se realice en la articulación correspondiente al codo.	✓ Prototipo robótico ✓ Fuente de voltaje
El codo del prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá movimiento en el plano sagital de 0° a 90°.	Se comprueba que el prototipo tenga un giro en el plano sagital del codo de 90°.	✓ Prototipo robótico ✓ Fuente de voltaje ✓ Transportador
El prototipo tendrá la longitud de un brazo humano de una mujer adulta promedio.	Se comprueba que el prototipo tenga la longitud de un brazo humano de una mujer adulta promedio.	✓ Prototipo robótico ✓ Mujer adulta promedio
El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá un peso máximo de 600g.	Se comprueba que el prototipo tenga peso máximo de 600g.	✓ Prototipo robótico ✓ Báscula digital
El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá una longitud de 55cm.	Se comprueba que el prototipo tenga una longitud de cerca de 55cm.	✓ Prototipo robótico ✓ Metro

## 6 METODOLOGÍA

El presente proyecto se divide en tres fases correspondientes a tres semestres académicos. Las materias de estos semestres dedicadas al proyecto son Seminario de Investigación, Proyecto I y Proyecto II. A continuación, se muestra lo que se realiza en cada una de estas materias y semestres.

### 6.1 Seminario de investigación

En el primer semestre, correspondiente a Seminario de Investigación, se obtiene como resultado el anteproyecto sobre el cual se continúa trabajando en Proyecto I y Proyecto II. A modo de caja (figura 2), se obtiene como salida del sistema (Seminario de Investigación), este anteproyecto.



Figura 2. Función de transferencia Fase I.

Dentro de esta caja (figura 3), se tienen los procedimientos realizados para tener como resultado el anteproyecto mencionado. Estos procedimientos son:

1. Se encuentra un problema existente y se define su manifestación, su contexto, sus causas, efectos y los aspectos a solucionar.
2. Se hace una propuesta de solución enfocada a solucionar este problema existente.
3. Se generan los objetivos que tendrá el proyecto, enfocados a solucionar el problema.
4. Con todo lo anterior, se presenta una propuesta inicial del proyecto al Comité de Proyectos de Ingeniería Electrónica (CPIE).
5. Una vez aprobada la propuesta inicial, se establecen los requerimientos del proyecto.

Con todo lo anterior, se completa el anteproyecto.

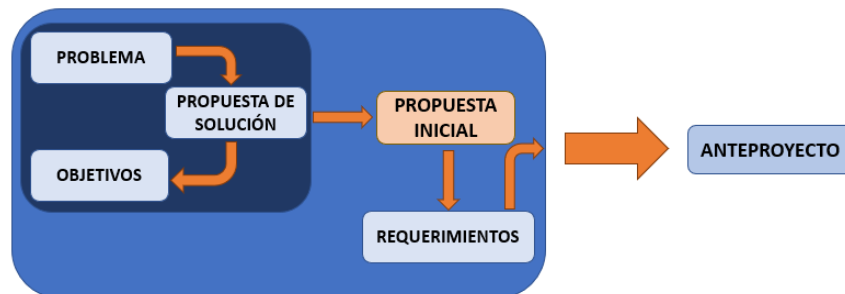


Figura 3. Función de transferencia subsistemas Fase I.

## 6.2 Proyecto I

En el segundo semestre, correspondiente a Proyecto I, se trabaja sobre el anteproyecto previamente entregado y se obtiene como resultado el documento de diseño del proyecto. A modo de caja (figura 4), la entrada del sistema corresponde al anteproyecto, y la salida corresponde al documento de diseño del proyecto.



Figura 4. Función de transferencia Fase II.

Dentro de esta caja (figura 5), se tienen los procedimientos realizados para tener como resultado el documento de diseño. Estos procedimientos son:

1. A partir del anteproyecto, en el que se tienen la definición del problema, la solución y los requerimientos, se comienza a desarrollar el diseño funcional que deberá tener el proyecto. Se realizan dos diseños funcionales a modo de alternativas y, posteriormente, se selecciona una de ellas. En el diseño detallado se plantean las entradas y salidas del sistema a modo de caja negra, del mismo modo, se plantean los posibles subsistemas que se podrían tener con sus respectivas entradas, salidas y función de transferencia.
2. Una vez seleccionada la alternativa de diseño funcional, se realiza el diseño detallado, dentro de él, se hacen las siguientes cosas:
  - a. Se diseñan los subsistemas con sus entradas, salidas y funciones de transferencia. Se explica cada uno de ellos de manera detallada, se realizan esquemáticos, simulaciones y plan de pruebas para cada subsistema.
  - b. Se establecen los requerimientos de cada subsistema.
  - c. Se seleccionan los componentes que se van a utilizar en cada uno de los subsistemas. Se realizan simulaciones, esquemáticos y plan de pruebas de estos.
3. De manera paralela, se realiza el diseño industrial del proyecto, en el cual se especifican los materiales a utilizar, el diseño de los prototipos mecánicos, la normatividad a cumplir y las características estéticas del prototipo.

Con todo lo anterior, se completa el documento de diseño.

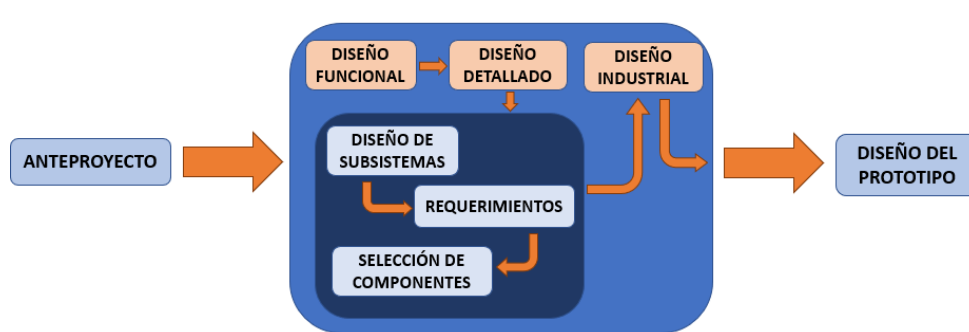


Figura 5. Función de transferencia subsistemas Fase II.

### 6.3 Proyecto II

En el tercer semestre, correspondiente a Proyecto II, se trabaja sobre el documento de diseño previamente entregado y se obtiene como resultado el producto final. A modo de caja (figura 6), la entrada del sistema corresponde al documento de diseño, y la salida corresponde al producto terminado.



*Figura 6. Función de transferencia Fase III.*

Dentro de esta caja (figura 7), se tienen los procedimientos realizados para tener como resultado el producto terminado. Estos procedimientos son:

1. A partir del documento de diseño, se realiza la implementación del proyecto para obtener el producto final. Esta implementación se realiza de la siguiente forma:
  - a. En primer lugar, se hace el montaje de los componentes previamente seleccionados y, de esta forma, el montaje en general de cada subsistema.
  - b. Luego de realizar este montaje, se prueban todos los componentes solos y en conjunto a modo de subsistemas. Al verificar que los subsistemas están funcionando, se realiza la integración de estos y se prueba la integración.
  - c. Luego de probar los subsistemas integrados, se monta el sistema completo y se realizan sus pruebas.
2. Luego de tener lista la implementación y las pruebas, se pone en operación el sistema y se verifica su funcionamiento.

Con todo lo anterior, se completa el producto completo.

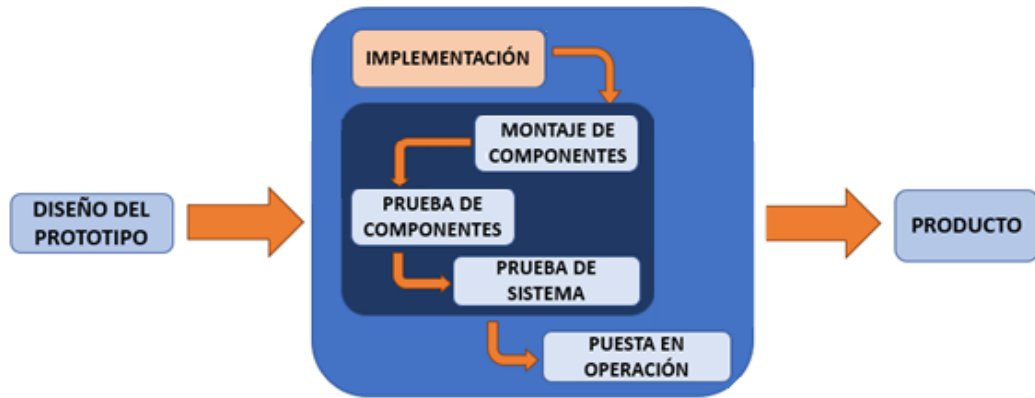


Figura 7. Función de transferencia subsistemas Fase III.

## 7 RECURSOS NECESARIOS

### 7.1 Recursos de tiempo

El proyecto se realizará en dos semestres académicos.

### 7.2 Recursos humanos

- Adrián Javier Jiménez Mojica le dedicará 14 horas semanales al trabajo en el proyecto.  
(Estudiante)
- Valeria Gómez Giraldo le dedicará 14 horas semanales al trabajo en el proyecto.  
(Estudiante)
- El ingeniero Juan Carlos Lizarazo le dedicará 5 horas semanales al trabajo en el proyecto.  
(Director)

### 7.3 Recursos técnicos

Los recursos técnicos utilizados fueron:

- Hardware V-Amp 16. (Entrenamiento).
- Software Open-Vibe. (Entrenamiento).
- Software MatLab.
- Osciloscopio.
- Multímetro.
- Generador. (Pruebas).

#### 7.4 *Recursos materiales*

- Resistencias
- Condensadores
- Integrados
- Microcontroladores
- Amplificadores operacionales
- Amplificadores de instrumentación
- Ácido Poliláctico (*Polylactic Acid* - PLA)

#### 7.5 *Recursos de financiación*

La financiación del proyecto estará a cargo de los estudiantes y sus familias.

## 8 ESTADO DEL ARTE

### 8.1 *Bases teóricas*

#### 8.1.1 *Señales Bioeléctricas*

Señales bioeléctricas son aquellas que son generadas por un ser vivo, se presentan cuando se desplazan iones en disolución, ya que son aquellos que portan alguna carga en los fluidos orgánicos. Este desplazamiento se produce debido a las diferencias de concentración entre diferentes fluidos orgánicos como el líquido extracelular, el líquido intracelular y el líquido intersticial. En el caso de la Imaginación Motora, se trabaja con señales provenientes de seres humanos, especialmente con los iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y cloro ( $\text{Cl}^-$ ).  
[1]

#### 8.1.2 *Potencial de acción*

Un potencial de acción es el cambio rápido del potencial de membrana que se extiende a lo largo de la membrana de la fibra nerviosa. Este cambio es súbito y se genera desde el potencial de membrana en reposo que es negativo, a un potencial positivo y luego de nuevo al negativo. Las señales nerviosas son transmitidas a partir de potenciales de acción que se desplazan a lo largo de la fibra nerviosa hasta su extremo.

La figura 8 muestra un potencial de acción, allí se presentan los cambios generados en la membrana en función del tiempo y en milivoltios. Se puede observar que la membrana comienza con un potencial de aproximadamente -60mV cuando se encuentra en reposo,

luego viene la fase de despolarización en la cual el potencial de membrana pasa de  $-60\text{mV}$  a cerca de  $35\text{mV}$  en  $0,5\text{ms}$ . Al llegar a este máximo, se dice que llega a la sobreexcitación. De allí, baja de nuevo el potencial hasta el potencial de reposo, a esto se le llama repolarización, ya que vuelve a tomar su valor inicial de potencial. Esta repolarización se tarda aproximadamente  $4\text{ms}$ . [2]

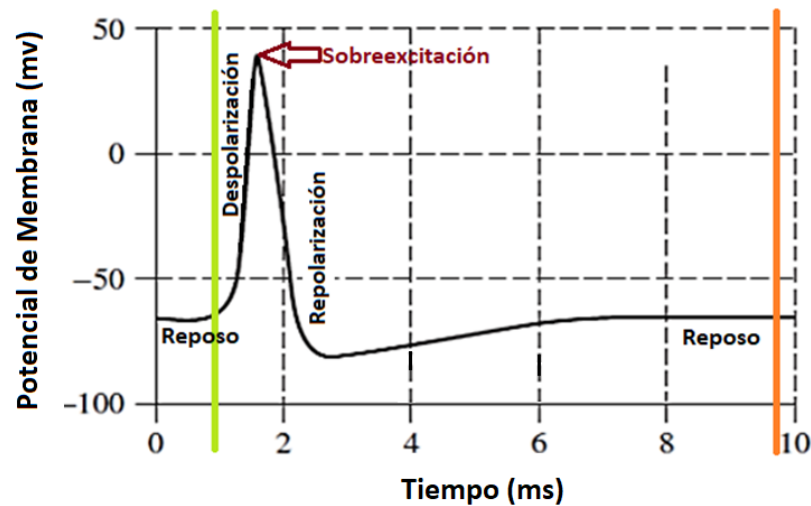


Figura 8. Potencial de acción típico registrado por el método que se muestra en la parte superior de la figura. Figura adaptada de [8]

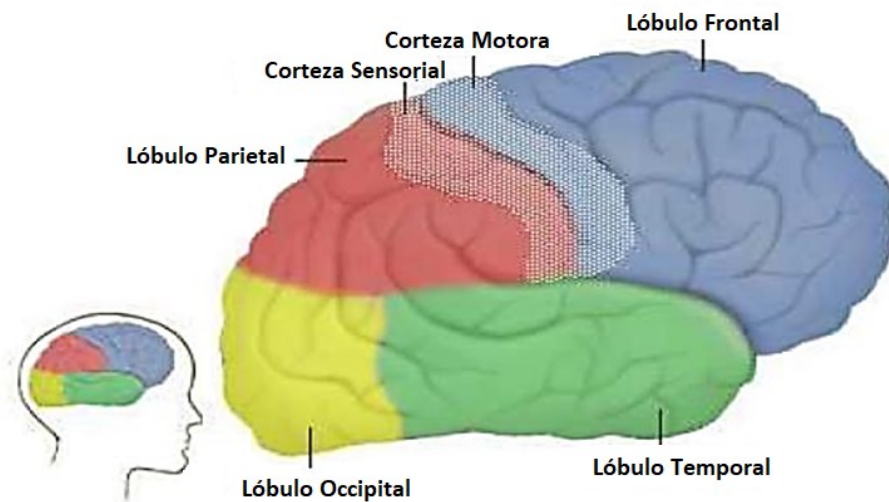
### 8.1.3 El cerebro y las señales

El cerebro es el órgano que controla la actividad del Sistema Nervioso Central (SNC) por medio de los nervios sensitivos y motores. Este se divide en 4 regiones llamadas lóbulos, estos controlan diferentes funciones resumidas en la tabla 4. [8]

Tabla 4. Regiones del cerebro: sus localizaciones y sus funciones. Adaptada de [8]

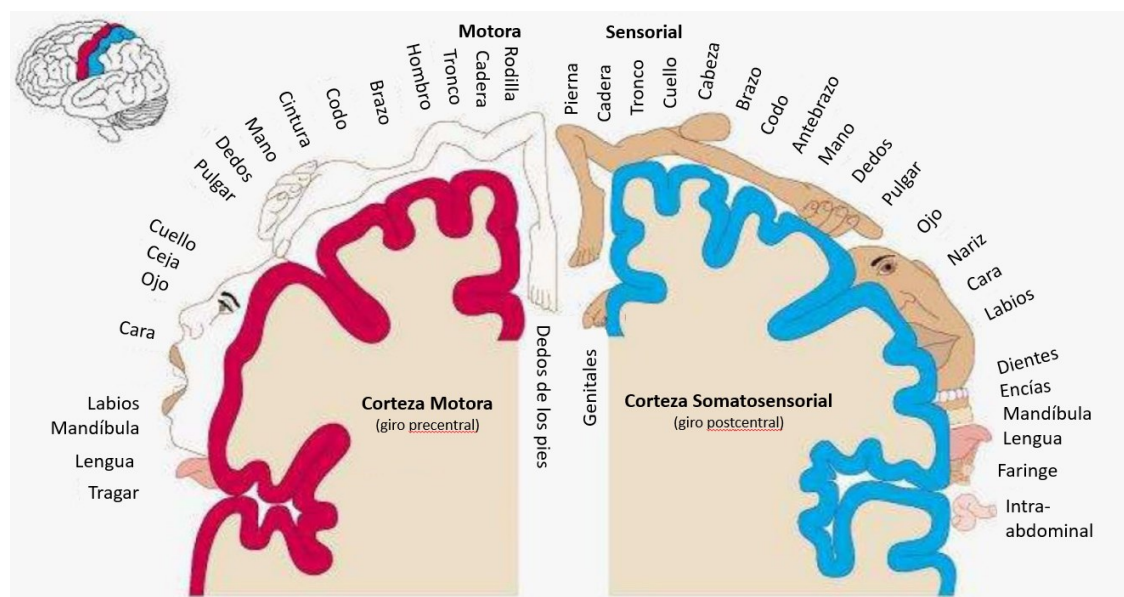
Lóbulo	Localización	Función
Frontal	Atrás de la frente.	Controla parte de los impulsos, juicio, producción del lenguaje, memoria, función motora, solución de problemas, comportamiento sexual, socialización y espontaneidad.
Parietal	Cerca de la parte trasera y la parte superior de la cabeza.	Integra la información sensorial de varias partes del cuerpo y ayuda a la manipulación de objetos. Algunas partes están relacionadas con el procesamiento visual-espacial.
Temporal	En la parte lateral de la cabeza arriba de las orejas.	Contiene el hipocampo y por eso está relacionado con la formación de la memoria. Controla la parte auditiva y reconocimiento de habla y visión.
Occipital	En la parte posterior de la cabeza.	Control de la visión y el reconocimiento de los colores.

En la figura 9 se muestra la asignación de algunas partes del cuerpo en relación con las bandas sensoriales y motoras.



*Figura 9. Ubicación espacial de los cuatro lóbulos del cerebro humano resaltando las bandas sensoriales y motoras. Figura adaptada de [8]*

En la figura 10 se muestran las bandas sensoriales y motoras asignadas a la región para cada parte del cuerpo.



*Figura 10. Bandas sensoriales y motoras asignando la región cerebral para cada parte del cuerpo. Figura adaptada de [8]*



### 8.1.4 Ondas cerebrales

Actualmente se tiene una clasificación por tipos de señales electroencefalográficas que se pueden monitorear y estudiar, estas son:

- Delta: Aparecen especialmente en estado profundo de sueño o durante la meditación, se ubican en el rango de frecuencias entre 0.5Hz y 4Hz con amplitud variable. Los casos en que se presencia en estado de vigilia indican defectos o daños cerebrales. [6]
- Theta: Estas ondas presentan una mayor actividad cuando la persona esta dormida. Tienen un rango de frecuencias que están entre los 4Hz a 8Hz, pueden ser de más de 20 $\mu$ V. [5]
- Alpha: Estas ondas son más visibles para una persona despierta y en estado de relajación. Se encuentran en una frecuencia de 8Hz a 12Hz, describe una actividad eléctrica típicamente de 20 $\mu$ V a 50 $\mu$ V. [5]
- Beta: Se encuentran en el rango de frecuencias entre 12Hz y 30Hz. Su voltaje es usualmente bajo, cercano a los 5 $\mu$ V a 30 $\mu$ V. Beta generalmente se asocia a pensamiento activo, estado de alerta y resolución de problemas. Durante actividades mentales intensas puede alcanzar hasta los 50 Hz. Esta onda ocurre principalmente en el lóbulo frontal y parietal. [6]
- Gamma: Se presentan cuando se está generando actividad neuronal muy rápida, se encuentran en frecuencias superiores a 30Hz.

La figura 11 muestra la forma que tienen estas ondas al ser monitoreadas. Se presentan las ondas Gama, Delta, Theta, Alfa y Beta.

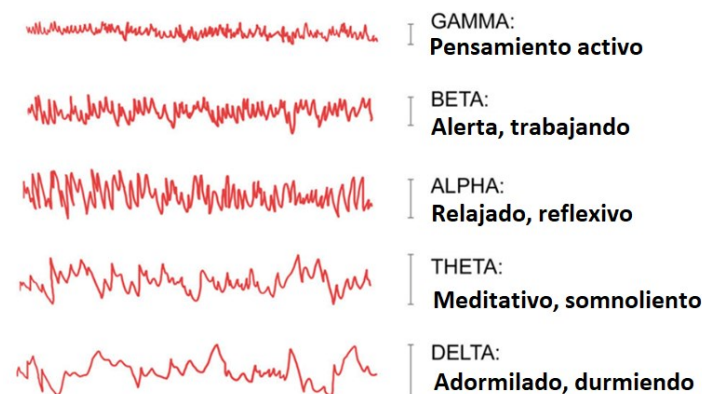
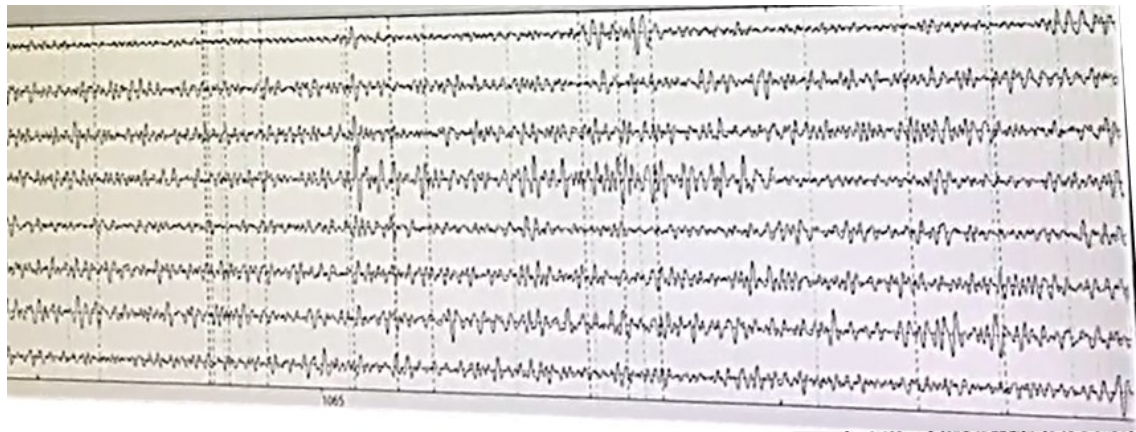


Figura 11. Ondas cerebrales. Figura adaptada de [5]

### 8.1.5 Electroencefalografía (EEG)

La electroencefalografía es el estudio de las señales bioeléctricas del cerebro. Para el caso de la Imaginación Motora, se trabaja con señales electroencefalográficas tomadas a partir de electrodos de superficie colocados en el cuero cabelludo del sujeto en estudio. El método por el cual se toman estas señales es indoloro, no invasivo, de bajo costo y de gran utilidad. Para tomar estas señales, se colocan estos electrodos de acuerdo con el sistema internacional 10-20. La electroencefalografía cuenta con varios registros por canales, cada canal mide la diferencia de potencial entre dos electrodos, uno activo y uno de referencia. Lo más común es que se utilicen entre 16 y 24 canales. En la figura 12 se presenta un ejemplo de registro electroencefalográfico con 8 canales, en la figura, se muestra un registro tomado a un sujeto de estudio en el Laboratorio de Psicología Experimental de la Universidad El Bosque.



*Figura 12. Registro electroencefalográfico por canales.*

Las señales EEG son el producto de la actividad cerebral y se encuentran en un rango de voltaje de  $5\mu\text{V}$  a  $200\mu\text{V}$  y rango de frecuencia entre  $0.5\text{Hz}$  y  $80\text{Hz}$ , de la onda Delta hasta la onda Gamma. Estas señales están presentes aún sin la presencia de estímulos. Normalmente estas señales no se ven afectadas por ruido eléctrico ya que suelen ser de frecuencia menor a la de este ruido ( $60\text{Hz}$ ). [4]

### 8.1.6 Colocación de los electrodos

Para la adquisición y registro de la actividad electroencefalográfica, se utilizan electrodos superficiales sobre el cuero cabelludo. Existen diferentes formas de acomodar estos electrodos, sin embargo, en este documento se hablará sobre la colocación con el estándar internacional 10-20.

El sistema internacional 10-20 es un protocolo normalizado a partir de las referencias anatómicas inión y nasión longitudinalmente y los tragos auriculares transversalmente, asegurando que se coloquen los electrodos sobre las mismas áreas, independiente del tamaño de la cabeza. En la figura 13 se presenta esta colocación de electrodos. Se pueden observar los porcentajes que le dan el nombre al sistema (10% y 20%) y que corresponden con las distancias a las que se colocan los electrodos. El centro es Cz. [10]

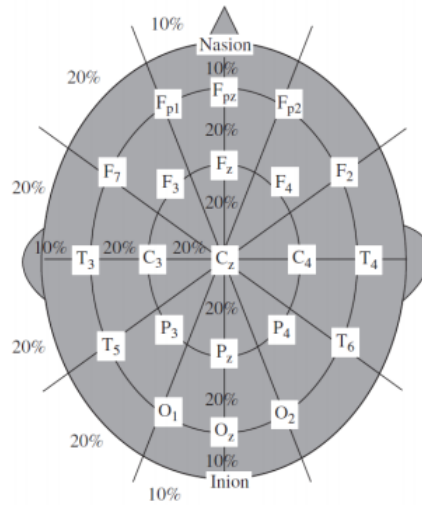


Figura 13. Colocación de electrodos según el sistema 10-20. Figura tomada de [10]

### 8.1.7 Imaginación Motora

La imaginación motora es un proceso cognitivo mediante el cual un sujeto se imagina un movimiento, sin hacerlo realmente, y sus señales de electroencefalografía se comportan como si lo hubiera hecho en realidad. Este proceso requiere de entrenamiento y acelera el aprendizaje de los sujetos que lo practican, del mismo modo, mejora las destrezas motrices de la persona.

La imaginación motora es utilizada en procesos de rehabilitación de pacientes con diferentes tipos de incapacidad. El uso de la práctica mental, incluidas las imágenes motoras para la rehabilitación de pacientes con discapacidades motoras cerebrales, es una de las áreas más activas en el campo de la investigación de imágenes motoras. [7]

### 8.1.8 Reconocimiento de imaginación motora en señales EEG

La extracción de las señales características se lleva a cabo usando dos métodos, cuya explicación y selección se expondrán más adelante: Los modelos autorregresivos AR y los

autorregresivos adaptables AAR que calculan los coeficientes AR para cada instante de tiempo de manera recursiva. [8]

En la figura 14 se muestra un esquema de adquisición de señales de EEG a partir de una interfaz. Se muestra la secuencia que se da al realizarse el trabajo de Imaginación Motora trabajando con una BCI. En el esquema se puede ver que se genera un estímulo visual que el sujeto capta, los electrodos en él transmiten sus señales electroencefalográficas para su adecuación y posteriormente para la extracción, selección y clasificación de sus características. Lo anterior con el fin de identificar y describir el movimiento imaginado. [8]

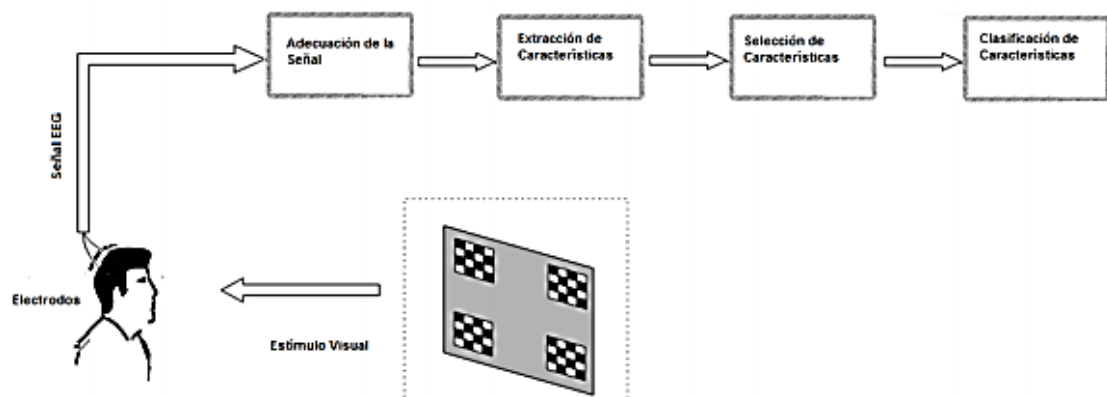


Figura 14. Esquema de trabajo para reconocimiento de imaginación motora de señales EEG. Figura tomada de [8]

### 8.1.9 Tipos de prótesis de miembro superior

Existen muchos tipos diferentes de prótesis de miembro superior, cada una de ellas está diseñada para suplir diferentes tipos de necesidad según la amputación del paciente. Otras difieren según su función. [12]

Algunas de estas prótesis según amputación son:

- Desarticulados (hombro, codo, muñeca).
- Prótesis bajo codo, arriba de codo. Según material constitutivo: mecánicas (convencionales), electrónicas, mioeléctricas, híbridas.

Las prótesis según función son:

- Pasivas (cosméticas).
- Activas (funcionales).

Entre las prótesis según función se encuentran las prótesis activas y las prótesis pasivas, algunas características de las prótesis pasivas son:

- Tipo de prótesis cuya función básica es la estética o la cosmética. [12]
- Sirven para restablecer el aspecto exterior (imagen corporal). [12]
- Deben satisfacer las exigencias del paciente con respecto a la conformación, aspecto, *confort* y peso de la prótesis. [12]



*Figura 15. Prótesis pasiva de miembro superior. Figura tomada de [13]*

La figura 15 muestra un tipo de prótesis pasiva.

A continuación, se presentan ejemplos de prótesis activas.

- Prótesis de brazo activada por tracción:
  - Llamadas prótesis activas de fuerza propia. [12]
  - Utilizan sistemas de cables comandados por movimientos del muñón o de la cintura escapular (antepulsión del hombro, abducción escapular). Está indicada para todos los niveles de amputación. [12]
  - Prótesis de antebrazo: sistema de control acciona solamente el dispositivo terminal (garfio o mano mecánica). [12]
  - Prótesis de brazo: 2 sistemas de control (1) trabe-destrabe de codo (2) cierre y apertura de dispositivo terminal (garfio o mano mecánica). [12]

La figura 16 presenta una prótesis desde el hombro y la 17, una prótesis desde el codo, en cada una se muestra su arnés.

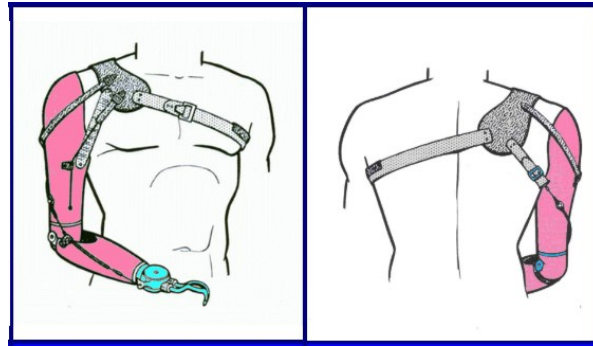


Figura 16. Prótesis de tracción de miembro superior desde el hombro. Figura tomada de [12]

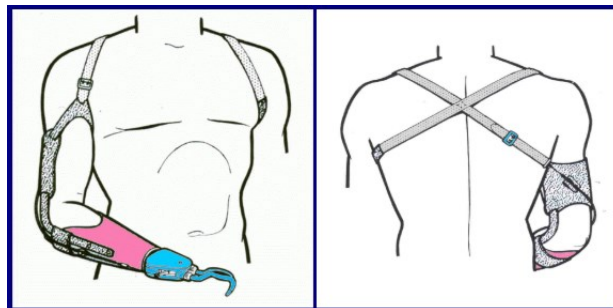


Figura 17. Prótesis de tracción de miembro superior desde el codo. Figura tomada de [12]

- Prótesis de brazo mioeléctrica (figura 18):
  - Son las denominadas prótesis activas de fuerza ajena. [12]
  - Control mioeléctrico, se utilizan potenciales eléctricos (microvoltios) detectables en la superficie de la piel cuando existe una contracción del músculo del muñón. Estos potenciales son recogidos por electrodos, amplificados y enviados como señales de control a los elementos funcionales. [12]
  - En la prótesis de antebrazo se colocan los electrodos de tal forma que los extensores abren la mano y los flexores cierran la mano. [12]
  - En las prótesis de brazo los electrodos van colocados de tal modo que el tríceps abre la mano y el bíceps cierra la mano. [12]
  - Como fuente de energía se utiliza un acumulador de 6V (4,8V en niños). Este está incorporado en el encaje protésico. [12]



*Figura 18. Prótesis mioeléctricas de miembro superior. Figura tomada de [13]*

- Prótesis de brazo híbrida (figura 19):
  - Combinación de sistemas de fuerza propia (corpórea) y de la fuerza ajena (extracorpórea). [12]
  - Una prótesis híbrida combina el poder corporal con el poder mioeléctrico en una sola prótesis. Más comúnmente son usadas por amputados transhumerales. [12]
  - Puede utilizar un codo de control mecánico y un dispositivo terminal (garfio o mano) de control mioeléctrico o un codo controlado eléctricamente y un dispositivo terminal de control mecánico. [12]



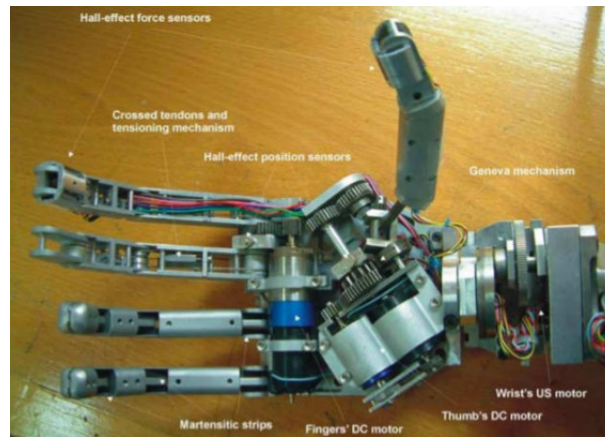
*Figura 19. Prótesis híbrida de miembro superior. Figura tomada de [12]*

- Prótesis de brazo eléctrica:

Las prótesis eléctricas usan motores eléctricos en el dispositivo terminal, la muñeca o codo con una batería recargable. Estas se controlan de varias formas, ya sea esta con un servo-control. Un control con un botón pulsador o un botón con un



interruptor de arnés. En cualquier ocasión se combinan este tipo de formas para su mejor funcionalidad. Este es más costoso a su adquisición y reparación del mismo, también existiendo desventajas y ventajas que son evidentes como es el cuidado a la exposición de un medio húmedo y el peso de la prótesis, como se observa en la figura 20. [16][17]



*Figura 20. Prótesis eléctrica. Figura tomada de [18]*

- Prótesis de brazo neumática (figura 21):

Estas prótesis son accionadas por un tipo de ácido carbónico comprimido, que proporciona una gran cantidad de energía. Un gran inconveniente es la complicación de sus aparatos accesorios y del riesgo del uso del ácido carbónico. Pero esto es transmitido por un sistema de tubo. [19]



*Figura 21. Prótesis neumáticas. [13]*



## 8.2 Tecnología

### 8.2.1 V-Amp - 16.

V-Amp (figura 22) es un hardware especializado para la adquisición de datos electroencefalográficos, es un amplificador EEG que cuenta con 16 canales, y aunque su enfoque es a la electroencefalografía con el V-Amp también es posible capturar señales de ECG Y EMG.

Se alimenta por un puerto USB, y cuenta con una pantalla incorporada, acoplamiento de impedancias, acople AC / DC definido por software, y así mismo la lectura de impedancias. [21] En la tabla 5 se presentan las especificaciones del V-Amp de 8 canales y del V-Amp de 16 canales.

*Tabla 5. Especificaciones técnicas de V-Amp 8 y V-amp 16. Tabla adaptada de [21]*

<b>Canales de EEG</b>	<b>V-Amp de 8 canales</b>	<b>V-Amp de 16 canales</b>
Bits del conversor AD	24 bits	24 bits
Rango de entrada	$\pm 410$ mV	$\pm 410$ mV
Impedancia de entrada	100 M $\Omega$	100 M $\Omega$
Frecuencia de muestreo	2 kHz	2 kHz
Resolución	0.0489 $\mu$ V / bit	0.0489 $\mu$ V / bit
Ancho de banda	0 Hz (DC) a 500 Hz (-3dB)	0 Hz (DC) a 500 Hz (-3dB)



*Figura 22. V-Amp 16. Figura tomada de [60]*

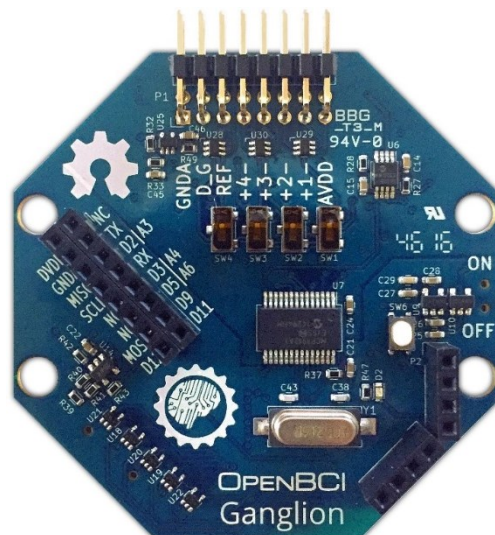
### 8.2.2 Ganglion Board.

El OpenBCI Ganglion (figura 23) es un hardware de adquisición de señales bioeléctricas que cuenta con 4 canales de alta impedancia, entras para la alimentación, para tierra y para los voltajes diferenciales. Con este dispositivo es posible medir EMG, ECG y EEG,

cada uno de los datos recibidos se muestrean a 200Hz. OpenBCI Ganglion es compatible con Arduino y cuenta con un módulo de radio para la transmisión de datos. La tabla 6 presenta las especificaciones técnicas de la Ganglion Board.

*Tabla 6. Especificaciones técnicas Ganglion Board. Tabla tomada de [22]*

Alimentación con 3.3V a 6V DC batería (solamente).
14mA cuando está inactivo, 15mA conectado y transmisión de datos
Módulo de radio BLE de Simblee (compatible con Arduino)
Acelerómetro de 3 ejes LIS2DH
MCP3912 Front End analógico
Dimensiones de la placa 2.41 "x 2.41" (el octágono tiene bordes de 1 ")
Los orificios de montaje son 3/16 "ID, 0.8" x "2.166" en el centro.
Interruptores para conectar / desconectar manualmente las entradas al pin REF.
Ganglion tiene un filtro de pasa banda que corta cualquier frecuencia por debajo de 0,3 Hz.
Pines de E / S digitales: D0, D1, D2, D3, D4, D5, D9, D11, D12, D21, D23, D24
Clavijas de entrada analógica: A3, A4, A5, A6
Pasadores de bus SPI: MOSI, MISO, SCK
Otros Pins: Restablecimiento de Simblee, VDD, GND



*Figura 23. Ganglion Board. Figura tomada de [22]*

### 8.2.3 Prótesis de mano SensorHand Speed y VariPlus Speed

Esta (figura 24) es una de las prótesis del mercado que permite el agarre de objetos de diferente peso y tamaño sin importar si son frágiles o no. Esta prótesis combina las mejores características funcionales de los diferentes tipos de prótesis que están enfocados al agarre de objetos, siendo una de las más funcionales y adaptables a estructuras complementarias. [23] La tabla 7 presenta las especificaciones técnicas del Sensorhand Speed.

Tabla 7. Especificaciones técnicas sensorhand Speed. Tabla adaptada de [23]

Voltaje de operación	6 – 7.2 V
Ancho de apertura	100 mm
Velocidad proporcional	0-100 N
Peso	462 g



Figura 24. Sensorhand Speed y Variplus Speed. Figura tomada de [23]

### 8.2.4 Prótesis de mano Michelangelo

Es una de las prótesis (figura 25) del mercado que en cuenta a funcionalidad se puede decir que se asemeja en 90% a la de un brazo humano natural, cuenta con un peso de aproximadamente 6.5 kg y movimiento en cada una de sus articulaciones, además se puede variar la fuerza de agarre para así poder manipular objetos frágiles y robustos, este tipo de prótesis entra en la categoría de híbrida al mezclar diferentes sistemas mecánicos y bioeléctricos que permiten su activación. La tabla 8 presenta las especificaciones técnicas de la prótesis Michelangelo.

*Tabla 8. Especificaciones técnicas de prótesis Michelangelo. Tabla adaptada de [24]*

Tamaño	M
Peso	420 g
Voltaje de operación	11.1 V
Temperatura de operación	-10° C a 60° C
Temperatura de almacenamiento	-20° C a 40° C
Ancho de apertura	120mm

*Figura 25. Prótesis Michelangelo. Figura tomada de [24]*

### 8.2.5 Prótesis Luke Arm

El brazo Luke es un brazo que cuenta con módulos que se puede adaptar a los diferentes niveles de amputación que tenga un paciente. Tiene 10 grados de libertad en su máxima configuración cumpliendo así con la mayoría de los movimientos posibles en las articulaciones de un brazo humano en su totalidad, además puede mover diferentes articulaciones al mismo tiempo. Esta prótesis brinda una facilidad de uso debido a que permite programar movimientos, su control es neuronal directo contando con retroalimentación para el agarre de objetos. [28] La tabla 9 presenta las especificaciones técnicas de la prótesis Luke Arm.

*Tabla 9. Especificaciones técnicas de la prótesis Luke Arm. Tabla adaptada de [28]*

Peso	1.4kg	3.4kg	4.7kg
Voltaje	14.8V (nominales)		
Tipo de batería	Li-ion (recargable)		
Temperatura de operación	-10° C a 50° C		

La figura 26 presenta la configuración del húmero y del hombro de la prótesis Luke Arm.

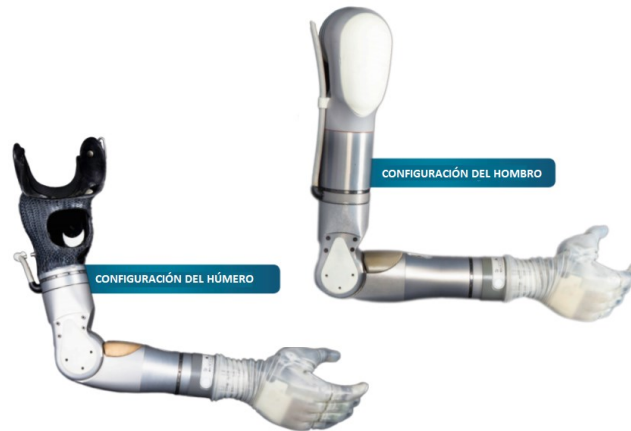


Figura 26. Configuración del húmero y del hombro de la Prótesis Luke Arm. Adaptada de [28]

### 8.3 Glosario de términos

**BCI:** Por sus siglas en inglés *Brain Computer Interface* o interfaz cerebro computador.

**EEG:** La electroencefalografía (EEG) es un método de monitorización electrofisiológico que registra la actividad eléctrica del cerebro. Es una técnica no invasiva, con electrodos colocados sobre el cuero cabelludo y, por tanto, apta para ser utilizada en situaciones diferentes a las típicas de laboratorio.

**Extremidad:** Brazo o pierna, en el ser humano, o parte análoga en los animales.

**Grado de libertad:** Eje de movimiento del prototipo.

**Imaginación Motora:** Es un proceso cognitivo mediante el cual un sujeto logra que se realice un trabajo o movimiento a partir de su imaginación.

**Periférico:** Aparato o dispositivo auxiliar e independiente conectado a la unidad central de procesamiento de una computadora.

**Tarea:** Actividad y praxis compleja relacionada con la aplicación de procesos cognitivos en la Imaginación Motora.

**Potencial de acción:** Cambios rápidos del potencial de membrana que se extienden rápidamente a lo largo de la membrana de la fibra nerviosa.

## 9 DISEÑO FUNCIONAL

En ambas alternativas de Diseño Funcional especificadas a continuación, se tiene en cuenta la Tarea de Imaginación Motora diseñada por profesionales en Psicología de la Universidad El Bosque. De esta tarea dependen los movimientos del prototipo a la salida de la función del diseño.

Esta tarea consiste en:

**Paso 1:** El sujeto se encuentra sentado en estado de vigilia. De este modo, se toman las señales que permanecen sin modo de ERD. La posición de reposo del prototipo robótico de extremidad superior derecha es en  $0^\circ$  (brazo estirado en posición anatómica).

**Paso 2:** El sujeto se imagina el movimiento de cerrar la mano derecha generando ERD. Como resultado, la articulación del codo del prototipo robótico de extremidad superior derecha se mueve  $90^\circ$  en el plano sagital (hacia arriba).

**Paso 3:** El sujeto se imagina el movimiento de cerrar la mano izquierda generando ERD. Como resultado, la articulación del codo del prototipo robótico de extremidad superior derecha se mueve hasta llegar a  $0^\circ$  (brazo totalmente estirado).

### 9.1 Alternativa 1 de Diseño Funcional.

#### 9.1.1 Caja con función, entrada y salida

La figura 27 presenta el sistema de caja con entradas y salidas del diseño funcional para la alternativa 1.

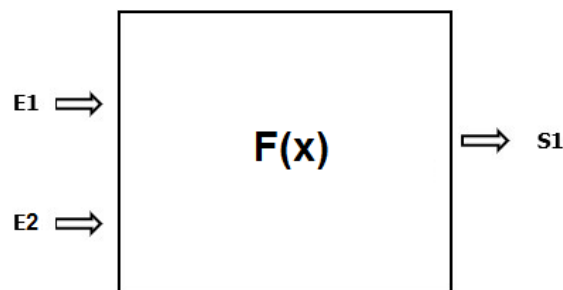


Figura 27. Diseño funcional. Entradas y salidas del sistema.

**Entradas:**

E1: Es la entrada de voltaje, representa la alimentación de todo el sistema.

E2: Tarea de Imaginación Motora.

- La entrada es un requerimiento funcional que es el tener una tarea de Imaginación Motora diseñada por profesionales en psicología y enfocada al control de periféricos mecánicos.
- Se trabaja con ondas Mu y Beta del registro electroencefalográfico.
- Se trabaja en Imaginación Motora con frecuencias entre 8Hz y 29Hz.
- La señal electroencefalográfica se encuentra en el rango de microvoltios.

**Salida:**

S1: Tarea de Imaginación Motora Implementada.

- La salida es la tarea de Imaginación Motora implementada a partir de la generación de movimiento en un prototipo robótico.
- El sujeto de estudio activará el brazo robótico según indicaciones de la tarea.
- El sujeto debe entrenarse para activar el brazo robótico.

**Función:**

F(x): La función del sistema es permitir la implementación de una tarea mediante un sistema mecánico, para el caso, un brazo robótico.

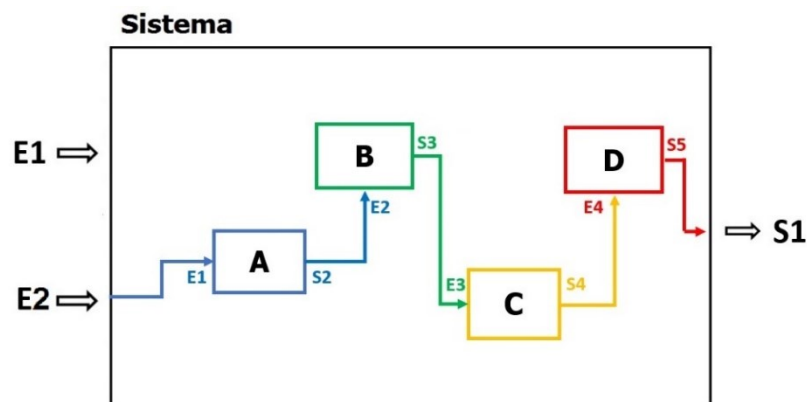
*9.1.2 Nombre de señales entre subsistemas.*

Figura 28. Función del sistema representada por medio de un diseño funcional.

A partir de los bloques mostrados en la figura 28, se realiza el proceso de desarrollo del prototipo robótico de extremidad superior derecha para implementación de tareas de Imaginación Motora. La salida S1 representará el movimiento del prototipo, completándose así la implementación de la tarea.

El sistema se encontrará ubicado en el Laboratorio de Psicología Experimental de la Universidad El Bosque, por lo cual el supersistema será este Laboratorio y las condiciones que tiene y afectan al prototipo.

Este supersistema, es decir el Laboratorio de Psicología Experimental de la Universidad El Bosque, pertenece a la facultad de Psicología de la Universidad y es lugar de trabajo del grupo de investigación Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad y del Semillero de Comunicaciones Cerebrales perteneciente al grupo de investigación Electrónica, Salud y Calidad de Vida. Los investigadores pertenecientes a estos grupos que trabajan en el laboratorio son quienes se han manifestado con la necesidad de este prototipo robótico.

### *9.1.3 Funciones de cada subsistema*

Caja A: Corresponde al trabajo de procesamiento de las señales y su conversión a digital.

- Entra a ella un voltaje en el orden de los microvoltios y es procesado hasta que sale este voltaje amplificado 100 veces. Se logra a partir de la amplificación de la pequeña señal. Se entrega la señal de forma digital.

Caja B: Corresponde a la etapa de obtención de datos a partir de un software.

- Entra la señal digital proveniente de la caja anterior, es recibida por el computador y el software seleccionado y se extrapola la señal para obtener de nuevo una señal graficada con la misma forma de la señal analógica de entrada. Salen de este bloque los datos de 1 y 0 para el control del prototipo.

Caja C: Corresponde al control del actuador.

- A ella llegan los datos digitales provenientes de la caja anterior. En esta se realiza el control del actuador.



Caja D: Corresponde al actuador encargado de mover el prototipo robótico.

- Llega la señal del control y hace que se genere el movimiento en el actuador para mover el prototipo.

## 9.2 Alternativa 2 de Diseño Funcional.

### 9.2.1 Caja con función, entradas y salidas del sistema

A nivel general, la segunda alternativa para el diseño funcional del sistema del prototipo robótico de extremidad superior derecha para implementación de tareas de Imaginación Motora consta de una entrada (E1) y una salida (S1) (figura 29).

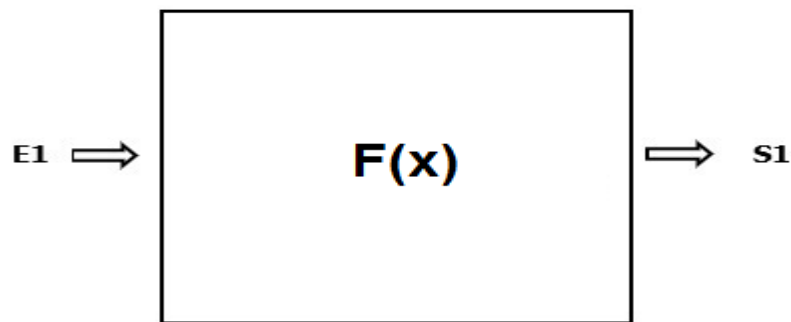


Figura 29. Diseño funcional. Entradas y salidas del sistema.

#### **Entrada del sistema:**

E1: Tarea de Imaginación Motora diseñada.

- La entrada del sistema (E1) corresponde al registro electroencefalográfico de los potenciales de acción generados en la corteza cerebral (en la zona Cz) producido por la ejecución de una tarea de Imaginación Motora enfocada al movimiento de periféricos mecánicos. Estos potenciales serán adquiridos por medio de dos canales para electroencefalografía.
- La tarea de Imaginación Motora es previamente diseñada por profesionales en psicología.
- El registro electroencefalográfico está en el rango de frecuencias de los 8Hz a 29Hz con tensión de 5μV a 200μV.

### **Función del sistema:**

La función del sistema ( $F(x)$ ) corresponde al desarrollo funcional de un prototipo robótico de extremidad superior derecha para implementación de tareas de Imaginación Motora.

### **Salida del sistema:**

S1: Tarea de Imaginación Motora implementada.

- La salida del sistema (S1) corresponde a la implementación de la tarea de Imaginación Motora diseñada por profesionales de psicología para el control de periféricos mecánicos.
- A partir de la tarea previamente diseñada y según lo requiera la misma, el prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá movimientos en los rangos de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  en el plano sagital para la articulación del codo.

#### *9.2.2 Nombre de señales entre subsistemas.*

La segunda propuesta de diseño funcional a nivel de bloques está compuesta por 3 subsistemas que se muestran en el diagrama (figura 30) que contiene de manera general el sistema funcional del proyecto, así mismo, se explica de manera detallada el funcionamiento de cada uno de los subsistemas y señales que permitirán el desarrollo del prototipo robótico de extremidad superior derecha para la validación de tareas de Imaginación Motora.

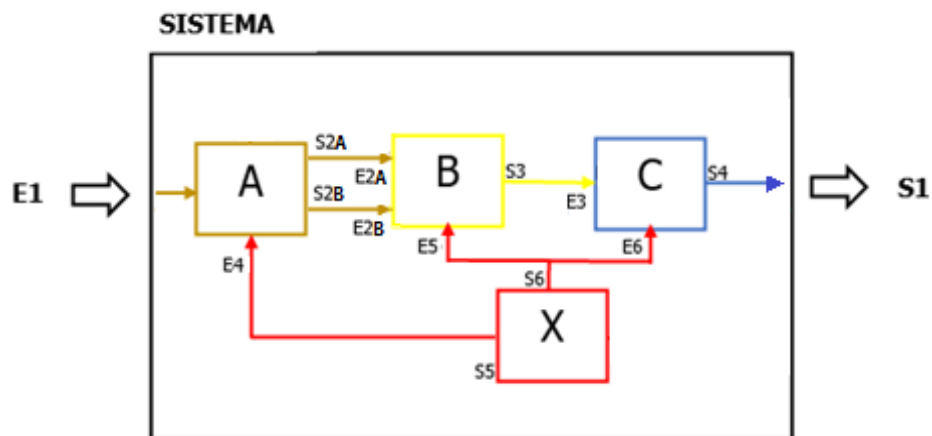


Figura 30. Segunda alternativa de diseño funcional subsistemas. Bloques del sistema.

El sistema estará ubicado en el Laboratorio de Psicología Experimental de la Universidad El Bosque, por lo tanto, las condiciones que afectan al prototipo están dadas por este laboratorio, lugar que se definirá como el supersistema.

El sistema que se muestra en la figura 30 se encuentra parametrizado por unas condiciones dadas por el Grupo de investigación Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad, de la Facultad de Psicología de la Universidad El Bosque.

### 9.2.3 Funciones de cada subsistema.

**Subsistema A:** Acondicionador de la señal nativa de las ondas Mu y Beta con un rango de 8 a 29 Hz y tensión de  $5\mu$  a  $200\mu$  producto de la tarea de Imaginación Motora.

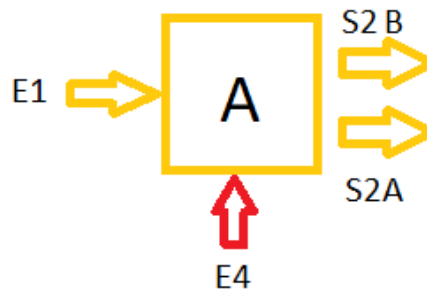


Figura 31. Entradas y salidas del subsistema A.

En la figura 31 se presenta el esquema de entradas y salidas del subsistema A.

**E1:** Señal nativa de las ondas Mu y Beta con un rango de 8Hz a 29Hz y tensión de  $5\mu$ V a  $200\mu$ V producto de la tarea de Imaginación Motora.

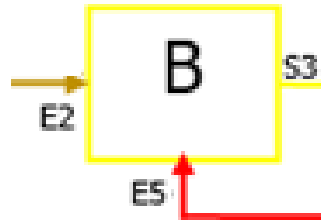
**E4:** Entrada de energía para el subsistema A.

**S2 A:** Señal de la onda Mu amplificada 25000 veces con un rango de 8Hz a 13Hz y tensión de 0.125V a 5V.

**S2 B:** Señal de la onda Beta amplificada 25000 veces con un rango de 14Hz a 29Hz y tensión de 0.125V a 5V.

**Subsistema B:** Procesamiento y digitalización de las señales adquiridas en el subsistema A.

En la figura 32 se presenta el esquema de entradas y salidas del subsistema B.



*Figura 32. Entradas y salidas del subsistema B.*

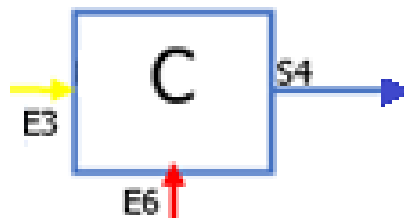
**E2:** Señal análoga de las ondas Mu y Beta amplificada 25000 veces con un rango de 8Hz a 29Hz y tensión de 0.125V a 5V.

**E5:** Entrada de energía para el subsistema B.

**S3:** Señales de las ondas Mu y Beta digitalizadas y filtradas para eliminación del ruido térmico.

**Subsistema C:** Sistema de control y movimiento del prototipo robótico de extremidad superior derecha.

En la figura 33 se presenta el esquema de entradas y salidas del subsistema C.



*Figura 33. Entradas y salidas del subsistema C.*

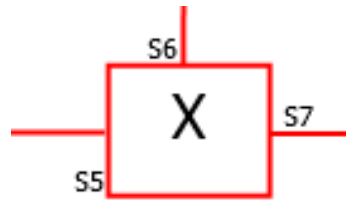
**E3:** Señales de las ondas Mu y Beta digitalizadas.

**E6:** Entrada de energía para el subsistema C.

**S4/S1:** Control y movimiento del actuador del prototipo de robótico de extremidad superior derecha en el rango de 0° a 90° en el plano sagital para la articulación del codo.

**Subsistema X:** Sistema de alimentación.

En la figura 34 se presenta el esquema de entradas y salidas del subsistema X.



*Figura 34. Entradas y salidas del subsistema x.  
S5, S6 Y S7: Salidas del sistema de alimentación para cada uno de los subsistemas.*

### 9.3 Sumatoria de funciones vs función del sistema.

La propuesta de solución obtenida como sumatoria entre las dos anteriores está compuesta por diferentes bloques, etapas o subsistemas que ejemplifican de manera detallada el proceso funcional del prototipo, de manera que en el subsistema A entran las ondas Mu y Beta en el rango de los 8Hz a 29Hz (señal E1), señales que son generadas por la activación de la corteza cerebral del sujeto de estudio al ejecutar tareas de Imaginación Motora, esta señal es adquirida por un sistema de pequeña señal que se encuentra en el subsistema A, aquí la señal es amplificada para obtener a la salida (S2) un registro electroencefalográfico de las ondas mencionadas anteriormente. La salida del subsistema A (S2) se convierte en la entrada (E2) del subsistema B, lugar donde ocurre el procesamiento de las señales para parametrizar la información del movimiento que el sujeto de estudio está imaginando, como los grados y planos; lo que da lugar a la salida del subsistema (S3), una señal digitalizada que se convierte en la entrada del subsistema C (E3). Este subsistema transforma la entrada E3 en una señal de control para activar el sistema de movimiento que generará la salida S1 y así concluir la activación de un periférico mecánico a partir del uso de la Imaginación Motora. Adicionalmente en el diseño funcional planteado se encuentra el subsistema X, el cual actúa como fuente de alimentación por medio de las señales de entrada E5, E6 y E7 de sus respectivos subsistemas (A, B y C).

### 9.4 Selección de alternativa.

Se seleccionó la alternativa 2 debido a que en el bloque C se puede encontrar la unión entre la etapa PWM y el actuador que genera el movimiento del prototipo robótico de extremidad superior derecha. En la alternativa 1 se tiene lo anterior dividido en dos bloques,

pero como se trata de dos procesos únicamente, tanto el bloque C como el bloque D serían subsistemas separados compuestos cada uno por un único componente. Además de esto, las pruebas de subsistema supondrían las mismas pruebas de componentes. Por este motivo, se optó por trabajar con la alternativa número 2, que permite la división del sistema en 3 subsistemas completos, conformados por al menos dos componentes. Se encuentra, también, el subsistema X que corresponde a la alimentación del sistema.

Por otro lado, la etapa de amplificación de pequeña señal brinda un aumento en la potencia de la señal de hasta 25000 veces, permitiendo tener un mejor registro sobre las señales bioeléctricas que se están midiendo, y así mismo, al manejar tensiones entre los rangos de 0.1V a 5V se facilita la implementación de estas señales en las etapas de procesamiento, potencia y control del prototipo robótico.

En la alternativa 2, con el fin de evitar la interferencia de señales no deseadas y eliminar el ruido térmico del sistema, se plantea un proceso de filtrado y digitalización de las señales para que únicamente quede la banda de frecuencia en los intervalos de 8Hz a 29Hz, que corresponde al rango de frecuencias del espectro electromagnético en el que las ondas Mu y Beta se encuentran activas, lo cual lo hace óptimo para la implementación de las señales generadas por la Imaginación Motora.

## **10 DISEÑO DETALLADO**

La realización del diseño detallado se hará teniendo como base la alternativa seleccionada, por lo que en el siguiente capítulo se mostrarán los requerimientos de los subsistemas y componentes correspondientes a la alternativa 2.

En las figuras mostradas en el capítulo anterior, se mostró cada uno de los subsistemas de la alternativa seleccionada. A continuación, se explicarán los requerimientos de cada uno de ellos para el funcionamiento general del sistema.

En el siguiente capítulo se explica de manera detallada cada una de las etapas que conforman los subsistemas A, B, C y X, por lo que se mostrará una comparación entre los componentes electrónicos que cumplan con los requerimientos establecidos para cada subsistema.

Para realizar los movimientos se tiene en cuenta que las instrucciones dadas provendrán de la Imaginación Motora del sujeto en estudio, por este motivo, se diseñan y seleccionan los componentes que permitan obtener las señales, procesarlas e identificar los momentos de ERD y ERS a los cuales se relacionan las intenciones de movimiento y de no movimiento, respectivamente. Por lo anterior, se tiene en cuenta también que es muy importante el entrenamiento del sujeto en Imaginación Motora ya que los potenciales deben ser muy precisos para obtener estos cambios en la señal que permitan diferenciar entre las diferentes intenciones del sujeto en cuanto a generar o no, movimiento.

### *10.1 Subsistema A*

Acondicionador de la señal nativa de las ondas Mu y Beta con un rango de 8Hz a 13Hz y 14Hz a 29Hz respectivamente y una tensión de 5 $\mu$ V a 200 $\mu$ V producto de la tarea de Imaginación Motora.

#### *10.1.1 Requerimientos del subsistema*

##### **Requerimiento funcional general**

El subsistema A realizará el acondicionamiento de la señal nativa.

##### **Requerimientos funcionales**

- El subsistema A realizará el acondicionamiento de la señal nativa de la onda Mu que trabaja con voltajes 5 $\mu$ V y 200 $\mu$ V y frecuencias entre los 8Hz y los 13Hz.
- El subsistema A realizará el acondicionamiento de la señal nativa de la onda Beta que trabaja con voltajes 5 $\mu$ V y 200 $\mu$ V y frecuencias entre los 14Hz y los 29Hz.
- El subsistema A tendrá una ganancia de 25000.
- El subsistema A entregará una señal con un rango de tensión de 0.125V a 5V.

##### **Requerimientos de calidad**

- El subsistema A realizará el acondicionamiento en un rango de 8Hz a 29Hz con tolerancia de  $\pm 1$ Hz.
- El subsistema A entregará una señal con un rango de tensión de 0.125V a 5V con tolerancia de  $\pm 0,1$ V.

##### **Requerimientos de restricción**

- La señal deberá ser generada a partir de Imaginación Motora.

### 10.1.2 Funciones, entradas y salidas del subsistema

En la figura 35 se muestra el esquemático del subsistema de acondicionador de pequeña señal, donde se tiene como entrada la adquisición de las señales bioeléctricas a través de la implementación de electrodos ubicados en la corteza motora. El subsistema A se encargará de amplificar dichas señales 25000 veces para que, en la salida, las ondas Mu y Beta tengan una tensión de 0.125V a 5V.

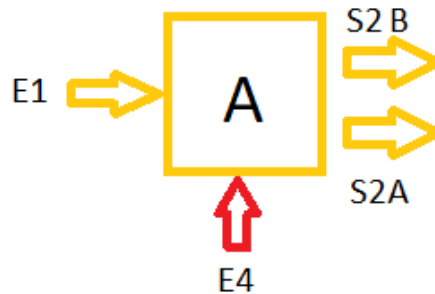


Figura 35. Entradas y salidas del subsistema A.

**E1:** Señal nativa con tensión de  $5\mu\text{V}$  a  $200\mu\text{V}$  producto del registro electroencefalográfico realizado al ejecutar la tarea de Imaginación Motora.

**E4:** Entrada de energía para el subsistema A.

**S2 B:** Señal de la onda Beta amplificada 25000 veces con un rango de 13 a 29Hz y tensión de 0.125V a 5V.

**S2 A:** Señal de la onda Mu amplificada 25000 veces con un rango de 8 a 13 Hz y tensión de 0.125V a 5V.

### 10.1.3 Diseño del subsistema

El subsistema A representa un acondicionador de pequeña señal, donde se tiene como entrada la adquisición de las señales bioeléctricas a través de la implementación de electrodos ubicados en la corteza motora. El subsistema A se encargará de amplificar dichas señales 25000 veces para que, en la salida, las ondas Mu y Beta tengan una tensión de 0.125V a 5V. Para poder realizar este procedimiento, este subsistema se divide en 7 etapas (figura 36) que permiten que se lleve a cabo el acondicionamiento de la mejor manera.



## Esquema de las etapas que componen al subsistema

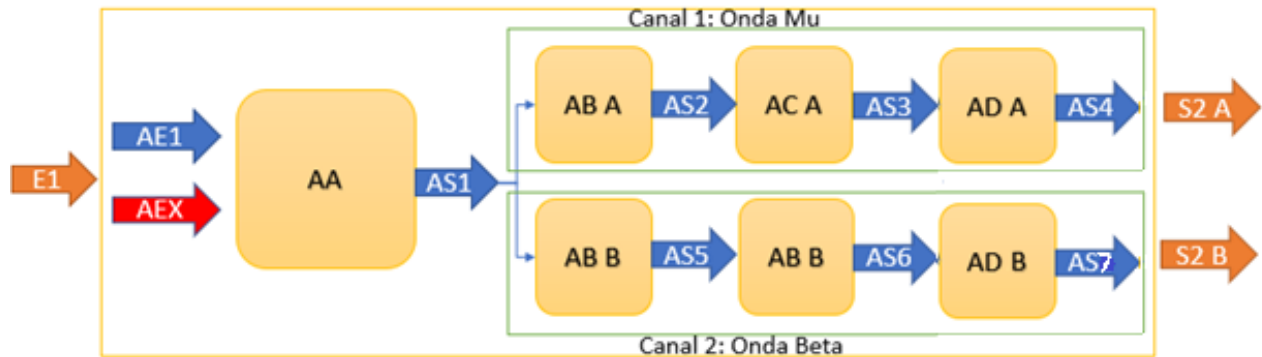


Figura 36. Esquema de las etapas que componen al subsistema A.

Las 7 etapas que componen al subsistema A son:

- AA: Amplificador de señales de ganancia 1000.
- AB A: Filtro pasa bajos con  $f_c$  de 13Hz.
- AC A: Filtro pasa altos con  $f_c$  de 8Hz.
- AB B: Filtro pasa bajos con  $f_c$  de 29Hz.
- AC B: Filtro pasa altos con  $f_c$  de 14Hz.
- AD A: Amplificador de ganancia 25.
- AD B: Amplificador de ganancia 25.

### Requerimientos de los componentes:

#### Componentes de AA (Pre-amplificación):

Para la adquisición de las ondas Mu y Beta, es necesario tener en cuenta que al tratarse de señales bioeléctricas con una diferencia de potencial en el orden de los microvoltios ( $5\mu V$  a  $200\mu V$ ), se requiere de componentes que permitan la amplificación de estas ondas, y además cumplan con características técnicas que faciliten su operación con el menor consumo de corriente y voltaje posible, de manera que los requerimientos y componentes que satisfacen las necesidades de la etapa AA (etapa de pre-amplificación) se muestran en la tabla 10. (En las tablas 10, 12, 13, 14 y 41 se utiliza el punto como separación de los miles para mayor comprensión de estos valores).

Tabla 10. Requerimientos de componentes de la etapa AA (subsistema A).

Selección componente etapa AA				
Entradas	Requerimiento	Componente AD620	Componente INA333	Componente AMPO2
E1: Ondas Mu y Beta 5 $\mu$ V a 200 $\mu$ V	Voltaje de operación min 5V	$\pm 2.3$ V a $\pm 18$ V	1.8 V a 5.5 V	$\pm 5$ V
	Consumo de corriente <3mA	1.3 mA	50 $\mu$ A	5 mA
	Ganancia 1.000	10.000	1.000	10.000
	Precio	COP \$11.500 - \$15.000	COP \$7.400 - \$13.000	COP \$30.000 - \$37.400

En la tabla 10 se observa que los principales requerimientos a considerar para la selección del componente fueron: ganancia de 1000, voltaje de operación mínimo de 5V y consumo de corriente inferior a los 3mA. A partir de estos parámetros se escogió el componente AD620 (figuras 37 y 38), ya que, comparativamente hablando, es el mejor de los tres en términos de beneficio/precio, pues funciona con una única fuente en el rango de 1.8V a 5V, ofrece el menor consumo de corriente y cumple con la ganancia necesaria para esta etapa del subsistema.

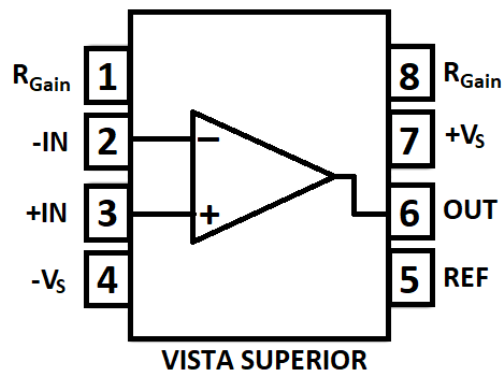


Figura 37. Esquema electrónico del AD620. Adaptada de [48]

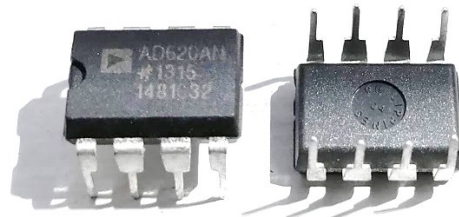


Figura 38. AD620

El dispositivo AD620 básicamente es un amplificador de instrumentación de precisión de baja potencia que ofrece una precisión excelente. Cuenta con un diseño versátil, ya que requiere de solo una resistencia externa para establecer ganancias de 1 a 1000, tiene un tamaño pequeño que lo hace ideal para una amplia gama de aplicaciones portátiles. Funciona con fuentes de alimentación de tan solo 1,3mA, por lo que es ideal para sistemas operados por baterías.

### **Cálculos para el amplificador con ganancia de 1000:**

$$G = \frac{49.4k\Omega}{RG} \quad (2)$$

$$G = \frac{49.4k\Omega}{49.3\Omega - 1}$$

$$G = 1000 \text{ (aprox)}$$

### **Componentes de la etapa AB (filtros pasa bajos):**

La etapa AB perteneciente al subsistema A, es la encargada de filtrar las señales de Imaginación Motora, previamente amplificadas en AA, a través de dos filtros pasa bajos que permitan el paso de las señales por debajo de los 13Hz, para el canal 1 y de 29Hz para el canal 2. De este modo se obtienen las señales deseadas que corresponden a las ondas Mu (pertenecientes a las ondas Alfa) y las ondas Beta. De este modo se descartan las ondas con frecuencias superiores a las de las ondas Beta.

### **Filtros pasa bajos para las ondas Mu y Beta:**

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizan los cálculos para el diseño de dos filtros pasa bajos Chebyshev con frecuencia de corte en 13Hz para la onda Mu y con frecuencia de corte en 29Hz para la onda Beta. Se usa este tipo de filtro debido a que su principal aplicación está en aquellos dispositivos en los que el contenido de frecuencias específicas es más importante que la magnitud. Por otro lado, la topología Sallen-Key (figura 39) permite producir una respuesta óptima en filtros enfocados al trabajo con bajas frecuencias garantizando una buena relación señal a ruido, ya que tiene una selectividad mucho mejor, comparado con las aproximaciones que podrían brindar los Butterworth o Chebyshev.

- Frecuencia de corte en 13Hz.
- Filtro de orden 4.

- Ganancia de 1
- *Ripple* 1 dB

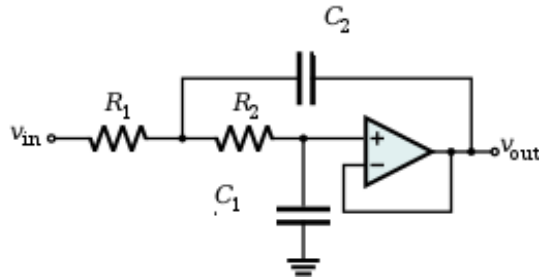


Figura 39. Topología sallen-key de un filtro pasa bajos. Figura tomada de [37]

En la tabla 11 se muestran los coeficientes para filtros de orden 4 con *ripple* de 1dB, a partir de los cuales, se realizarán los cálculos apropiados para la selección de componentes.

Tabla 11. Coeficientes Chebyshev para filtros de orden 4 con ripple de 1dB.

n	i	ai	bi
4	1	2.5904	4.1301
	2	0.3039	1.1697

### Cálculos onda Mu

Formulas:

$$A_1 = 2.5904 \quad B_1 = 4.1301 \quad (1)$$

$$A_2 = 0.3039 \quad B_2 = 1.1697$$

$$C_2 \geq C_1 * \frac{4*1}{a_1^2} \quad (2)$$

$$C_4 \geq C_3 * \frac{4*1}{a_2^2} \quad (3)$$

Polinomio para hallar R1 y R2

$$R_{1,2} = \frac{-a_1 C_2 \pm \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4 C_1 C_2}}{2 * 2\pi * f_0 C_1 C_2} \quad (4)$$

Polinomio para hallar R3 y R4

$$R_{3,4} = \frac{-a_2 C_4 \pm \sqrt{a_2^2 C_4^2 - 4 C_3 C_4}}{2 * 2\pi * f_0 C_3 C_4} \quad (5)$$

Se halla C2 usando la fórmula 2. Se fija el valor de C1 en 1  $\mu F$ .

$$1\mu F * \frac{4 * 4.1301}{2.5904^2} \rightarrow C_2 \approx 2.4619\mu F$$

El valor más aproximado comercial para el condensador C2 es de 2.7  $\mu F$ .

Ahora utilizando la fórmula 4 y 1 se halla R1 y R2

$$R_{1,2} = \frac{(2.5904)(2.7\mu F) \pm \sqrt{(2.5904)(2.7\mu F)^2 - 4(1\mu F)(2.7\mu F)}}{2 * 2\pi * 13Hz * (1\mu F)(2.7\mu F)}$$

$$R_1 \approx 9410.63 \Omega \quad R_2 \approx 22302.82 \Omega$$

De manera que así se obtiene que el valor más aproximado comercial para estas resistencias es de: R1=10K y R2=20K.

Una vez se ha obtenido el valor de las resistencias R1 y R2 y el valor de los capacitores C1 y C2, es posible hallar C4 utilizando la fórmula 3, por lo tanto, se fija el valor de C3 en 1  $\mu F$ .

$$C_4 \geq 1\mu F * \frac{4 * 1.1697}{0.3039^2} \rightarrow C_4 \approx 50.6609\mu F$$

Se encuentran R3 y R4 usando formula 5 y 1

$$R_{3,4} = \frac{(0.3039)(51\mu F) \pm \sqrt{(0.3039)(51\mu F)^2 - 4(1\mu F)(51\mu F)}}{2 * 2\pi * 13Hz * (1\mu F)(51\mu F)}$$

$$R_3 \approx 1.46 K\Omega \quad R_4 \approx 1.72 K\Omega$$

El valor más aproximado comercial es para R3=1.6K $\Omega$  y R4=1.8K $\Omega$

### **Cálculos filtro pasa bajos para la onda Beta**

El filtro pasa bajo de cuarto para la onda Beta utilizará la misma topología que se implementó en el filtro pasa bajos para la onda Mu. A continuación, se mostrarán los cálculos para la frecuencia de corte de 29Hz.

- Frecuencia de corte en 29Hz.
- Filtro de orden 4.
- Ganancia de 1
- *Ripple* 1 dB

Se encuentra C2 usando la fórmula 2. Se fija el valor de C1 en 1μF.

$$1\mu F * \frac{4 * 4.1301}{2.5904^2} \rightarrow C_2 \approx 2.4619\mu F$$

El valor comercial más aproximado es de 2.7μF

Se hallan R1 y R2 usando la fórmula 4 y 1.

$$R_{1,2} = \frac{(2.5904)(2.7\mu F) \pm \sqrt{(2.5904)(2.7\mu F)^2 - 4(1\mu F)(2.7\mu F)}}{(2 * 2\pi * 29Hz)(2.7\mu F)}$$

$$R_1 \approx 4218.5 \Omega \quad R_2 \approx 9997.81 \Omega$$

El valor más aproximado comercial es R1=5.11K y R2=9.53K

Ahora se procede a realizar el cálculo para hallar C4 utilizando la fórmula 3. Se fija el valor de C3 en 1μF.

$$C_4 \geq 1\mu F * \frac{4 * 1.1697}{0.3039^2} \rightarrow C_4 \approx 50.6609\mu F$$

Se hallan R3 y R4 usando la fórmula 5 y 1.

$$R_{3,4} = \frac{(0.3039)(51\mu F) \pm \sqrt{(0.3039)(51\mu F)^2 - 4(1\mu F)(51\mu F)}}{2 * 2\pi * 29Hz * (1\mu F)(51\mu F)}$$

$$R_3 \approx 569 \Omega \quad R_4 \approx 921 \Omega$$

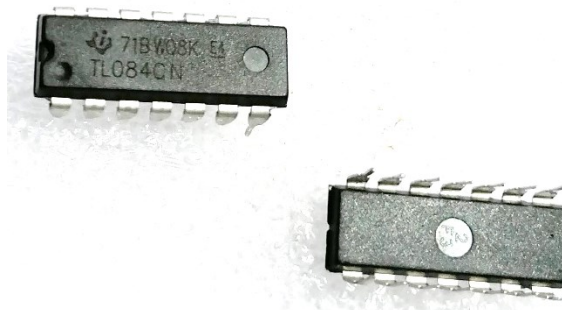
Y de esta manera se obtiene que el valor más aproximado comercial para las resistencias R3 y R4 es:  $R3=787\Omega$  y  $R4=953\Omega$

Partiendo de los cálculos obtenidos anteriormente, y basados en los requerimientos necesarios para la realización de la adecuación de la señal, en la tabla 12 se realiza una comparación de amplificadores operacionales que garanticen un consumo de corriente mínimo, con el fin de que el proceso de acondicionamiento de la señal y el filtrado de las frecuencias establecidas previamente no se vea afectado por el ruido térmico.

*Tabla 12. Requerimientos de componentes de la etapa AB (subsistema A).*

Selección componente etapa AB				
Entradas	Requerimiento	Componente TL084	Componente NE5532	Componente LM324
E1: Ondas Mu y Beta 5mV a 200mV	Voltaje de operación min 5V/±2.5V	±5V a ± 15V	±0V a ±22V	±10V a ±22V
	Consumo de corriente <3mA	2.8mA	16μA	3mA
	Precio	COP \$750 - \$2.000	COP \$700 - \$2.000	COP \$2.000 - \$5.000

En la tabla 12 se observa que los principales requerimientos a considerar para la selección del componente fueron: voltaje de operación mínimo de 5V y consumo de corriente inferior a los 3mA. Basados en estos parámetros se escogió el amplificador operacional TL084, ya que ofrece el menor consumo de corriente para las etapas AB A y AB B del subsistema.



*Figura 40. Componente TL084.*

El TL084, mostrado en la figura 40, es un amplificador operacional de alto rendimiento que combina excelentes características. Cuenta con muy poco ruido haciéndolo ideal para aplicaciones donde se requiera la calidad de la información. Además proporciona baja

distorsión, alta velocidad de rotación, diodos de protección de entrada y protección contra cortocircuito de salida.

### Componentes de ACA y ACB (filtros pasa altos canales 1 y 2):

Las etapas AC A y AC B pertenecientes al subsistema A, se encargan de filtrar las señales de Imaginación Motora, previamente amplificadas en AA y filtradas en AB A y AB B, respectivamente, a través de filtros pasa altos que permitan el paso de las señales por encima de 8Hz, para el canal 1 y de 14Hz para el canal 2.

### Filtros pasa altos para las ondas Mu y Beta:

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizan los cálculos para el diseño de dos filtros pasa altos Chebyshev con frecuencia de corte en 8Hz para la onda Mu y con frecuencia de corte en 14Hz para la onda Beta. Se usa este tipo de filtro debido a que su principal aplicación está en aquellos dispositivos en los que el contenido de frecuencias específicas es más importante que la magnitud. Por otro lado, la topología Sallen-Key (figura 41) permite producir una respuesta óptima en filtros enfocados al trabajo con bajas frecuencias garantizando una buena relación señal a ruido, ya que tiene una selectividad mucho mejor comparado con las aproximaciones que podrían brindar los Butterworth o Chebyshev.

- Frecuencia de corte en 8 Hz.
- Filtro de orden 4.
- Ganancia de 1
- *Ripple* 1 dB

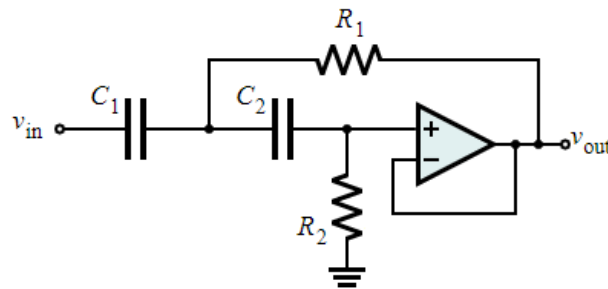


Figura 41. Topología sallen-key de un filtro pasa altos. Figura tomada de [37]

### Cálculos onda Mu

$$A_1 = 2.5904 \quad B_1 = 4.1301$$

$$A_2 = 0.3039 \quad B_2 = 1.1697$$



$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_{o1} a_1 C} = \frac{1}{2\pi(14\text{Hz})(2.5904)(12\mu\text{F})} \approx 640.003 \Omega$$

$$R_2 = \frac{1}{\pi f_{o1} a_1 C} = \frac{1}{\pi(14\text{Hz})(2.5904)(6.2\mu\text{F})} \approx 2177.43 \Omega$$

$$R_3 = \frac{1}{\pi f_{o1} a_2 C} = \frac{1}{\pi(8\text{Hz})(0.3039)(68\mu\text{F})} \approx 1925.39 \Omega$$

$$R_4 = \frac{1}{2\pi f_{o1} b_1 C} = \frac{1}{2\pi(14\text{Hz})(4.1302)(75\mu\text{F})} \approx 60.22 \Omega$$

El valor comercial más aproximado para cada una de las resistencias es de: R1=750  $\Omega$ , R2=1.96k  $\Omega$ , R3=1.96k  $\Omega$ , R4=38.3  $\Omega$ .

### Cálculos onda Beta

$$A_1 = 2.5904 \quad B_1 = 4.1301$$

$$A_2 = 0.3039 \quad B_2 = 1.1697$$

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_{o1} a_1 C} = \frac{1}{2\pi(14\text{Hz})(2.5904)(1.2\mu\text{F})} \approx 3657.16 \Omega$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi f_{o1} b_2 C} = \frac{1}{\pi(14\text{Hz})(1.1697)(620\text{nF})} \approx 13675.66 \Omega$$

$$R_3 = \frac{1}{\pi f_{o1} a_2 C} = \frac{1}{\pi(14\text{Hz})(0.3039)(68\mu\text{F})} \approx 12067.01 \Omega$$

$$R_4 = \frac{1}{2\pi f_{o1} b_1 C} = \frac{1}{2\pi(14\text{Hz})(4.1302)(7.5\mu\text{F})} \approx 367.003 \Omega$$

El valor comercial más aproximado para cada una de las resistencias es de:

$$R1=4.22\text{k} \Omega, R2=11.5\text{k} \Omega, R3=11.5\text{k} \Omega, R4=226 \Omega$$

Partiendo de los cálculos y los requerimientos realizados anteriormente para la implementación de los filtros pasa altos para las ondas Mu y Beta, en la tabla 13 se muestra una comparación de amplificadores operacionales teniendo en cuenta los parámetros más relevantes para garantizar el óptimo acondicionamiento de la señal.

Tabla 13. Requerimientos de componentes de la etapa AC (subsistema A).

Selección componente etapa AC				
Salidas	Requerimiento	Componente TL084	Componente NE5532	Componente LM324
Ondas Mu y Beta 5mV a 200mV con frecuencia entre 8-30 HZ.	Voltaje de operación min 5V/±2.5V	±5V a ±15V	±0V a ±22V	±10V a ±22V
	Consumo de corriente <3mA	2.8mA	16μA	3mA
	Precio	COP \$750 - \$2.000	COP \$700 - \$2.000	COP \$2.000 - \$ 5.000

Como se observa en la tabla 13, para el diseño del filtro pasa altos se requiere que tengan las mismas condiciones de operación que para los filtros pasa bajos de la etapa AB, por lo que la selección del componente para esta etapa del subsistema A es el TL084 (mostrado en detalle en el subcapítulo anterior), ya que cumple con cada uno de los requerimientos eléctricos necesarios para el desarrollo de esta etapa.

#### Componentes de AD:

La etapa AD correspondiente al subsistema A, se encarga de la amplificación de la señal obtenida desde AC que ya fue filtrada y pre-amplificada. En esta etapa se realiza la amplificación de esta señal con una ganancia de 25. Para tener al final una ganancia total de 25000. La tabla 14 muestra los requerimientos de los componentes de la etapa AD. Esta etapa, al igual que las etapas AB y AC, se divide en dos, una para cada canal. Sin embargo, no se realiza esta separación dado que son exactamente iguales, en este caso se duplica el mismo circuito.

Tabla 14. Requerimientos de componentes de la etapa AD (subsistema A).

Selección componente etapa AD A				
Salida	Requerimiento	Componente AD620	Componente INA333	Componente AMP02
Ondas Mu y Beta amplificadas 25000 veces	Voltaje de operación min 5V/±2.5V	±2.3V a ±18V	1.8V a 5.5V	±5V
	Consumo de corriente <3mA	1.3mA	50μA	5mA
	Ganancia 1.000	10.000	1.000	10.000
	Precio	COP \$11.500 - \$15.000	COP \$7.400 - \$13.000	COP \$30.000 - \$37.400

Para la selección del componente de la etapa AD, nuevamente se eligió el amplificador operacional de instrumentación AD620 (explicado de manera detallada en el capítulo 10.1.3), ya que cuenta las mejores características para cumplir con los requerimientos del subsistema.

Cálculos para el amplificador con ganancia de 25:

$$G = \frac{49.4k\Omega}{RG} \quad (6)$$

$$G = \frac{49.4k\Omega}{1.900\Omega - 1}$$

$$G = 25 \text{ (aprox)}$$

#### 10.1.4 Esquemático del subsistema

A partir del diseño funcional escogido, en este capítulo se mostrarán y se explicarán cada uno de los esquemáticos que componen los subsistemas del prototipo de extremidad superior derecha.

##### Esquemático del subsistema A

En la figura 42 se observa el subsistema A con cada una de las etapas que lo componen. Las salidas de la etapa AD del subsistema A se conectarán con la entrada del subsistema B.

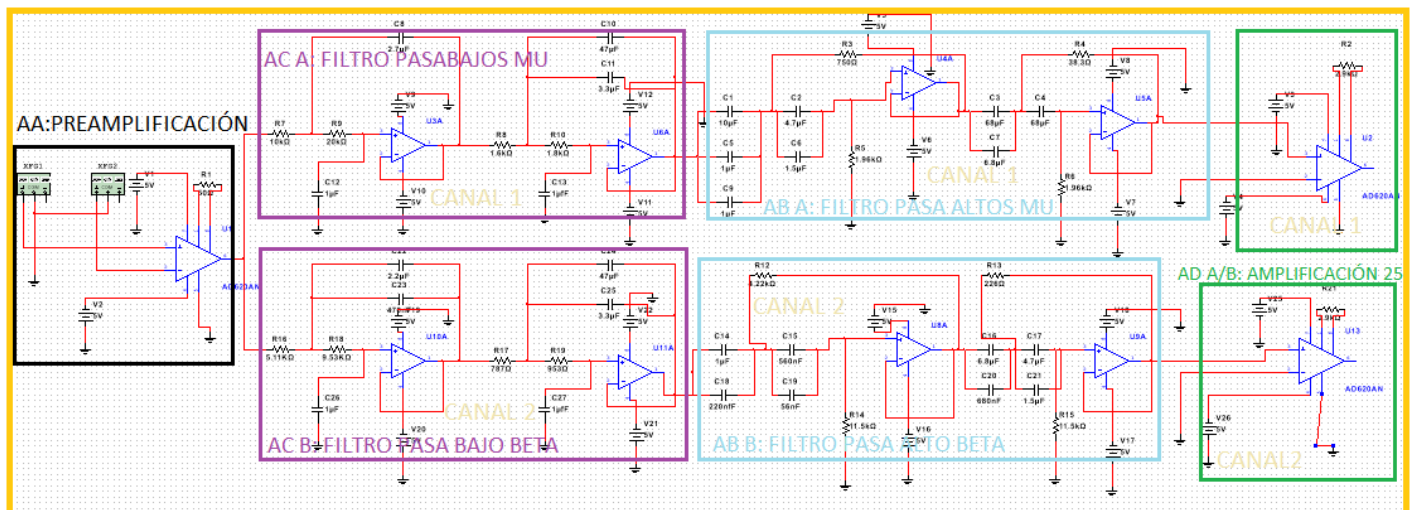


Figura 42. Esquema del subsistema A con las etapas que lo componen.

### 10.1.5 Simulación del subsistema

En la figura 42 se mostraron, a modo de esquemático, las 4 etapas que conforman el subsistema A, y ya que cada una de estas cumple una función diferente a continuación se realiza las simulaciones de los componentes de las 4 etapas (AA, AB, AC y AD).

#### Componente AA:

Para la etapa AA (pre-amplificación) en el capítulo 10.1.3 se realizó la selección del componente, por esta razón en la figura 43 se muestra la simulación del amplificador operacional de instrumentación AD620 en configuración de ganancia de 1000 (ver cálculos capítulo 10.1.3). Como se mencionó en capítulos anteriores, estos componentes del subsistema se replicarán para formar los dos canales que requieren el desarrollo del proyecto.

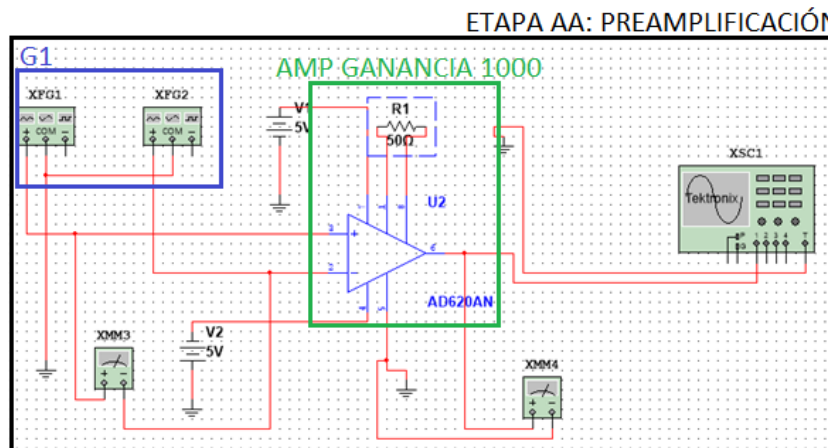


Figura 43. Esquema y simulación del circuito de ganancia 1000.

Para comprobar su funcionamiento se implementaron dos generadores de señales (G1) que simulan el voltaje y frecuencia de una señal nativa de electroencefalografía, siendo en su sumatoria de  $35\mu\text{Vp}$  y una frecuencia de 16Hz.

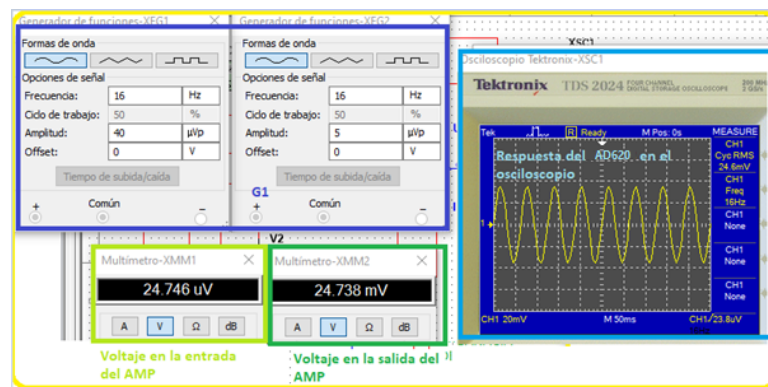


Figura 44. Esquema y simulación del circuito de ganancia 1000.

En la figura 44, en el multímetro XM1 se observa el voltaje que ingresa al amplificador operacional, al mostrar valores RMS se observa un voltaje de  $24.746\mu\text{V}$  o, que es lo mismo,  $35\mu\text{Vp}$ . A la salida del amplificador AD620 en el multímetro XM2 se observa un valor RMS de  $24.738\text{mV}$  de manera que la etapa AA cumple con su función de pre-amplificación con ganancia de 1000. En la figura 45 se presenta un acercamiento de la respuesta.

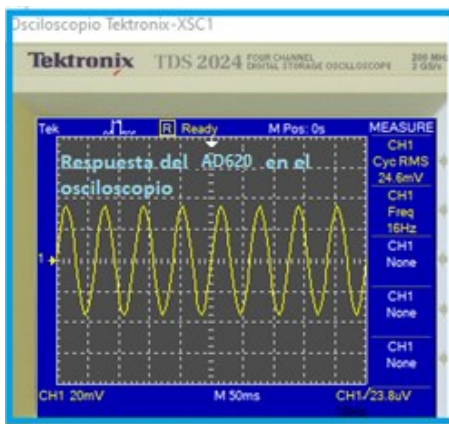


Figura 45. Respuesta del AD620 en el osciloscopio.

### Componente AB:

Las etapas AB A y AB B (filtros pasa bajos) tienen como componente principal el amplificador TL084, por lo que en las figuras 46 y 47 se muestran las simulaciones de estos componentes implementados en el diseño de los filtros pasa altos de cuarto orden (ver cálculos y topología en el capítulo 10.1.3). La simulación de su comportamiento se observa en los diagramas de *bode* en las figuras 48 y 49, de manera que se evidencia que esta etapa (A) y su respectivo componente, cumplen con el requerimiento.

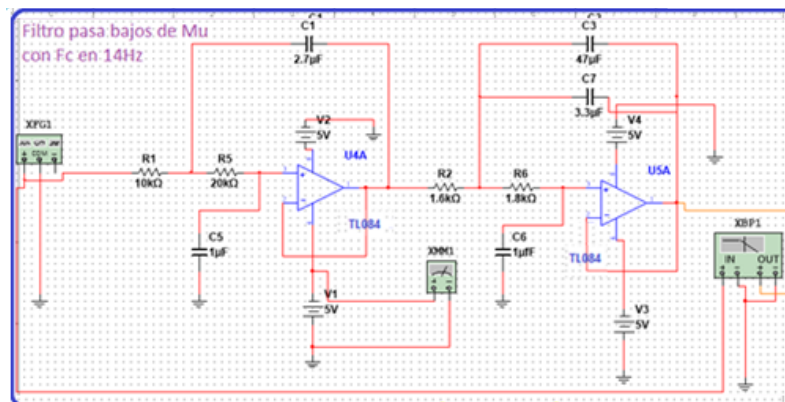


Figura 46. Esquema y simulación del circuito pasa bajos de Mu con  $f_c$  de 14Hz.

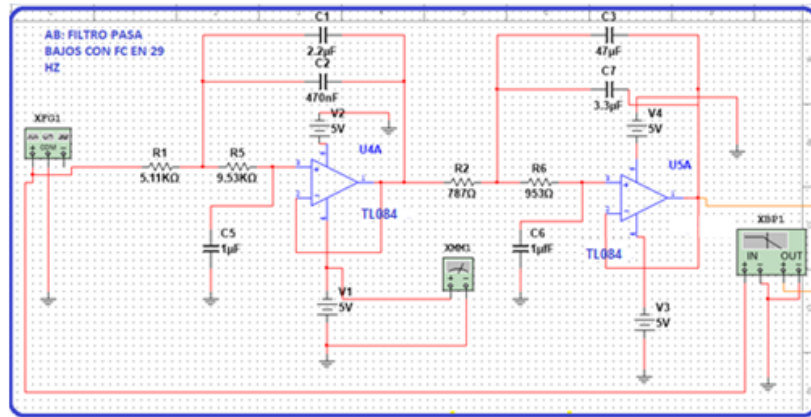


Figura 47. Esquema y simulación del circuito pasa bajos de Beta con  $f_c$  de 29Hz.

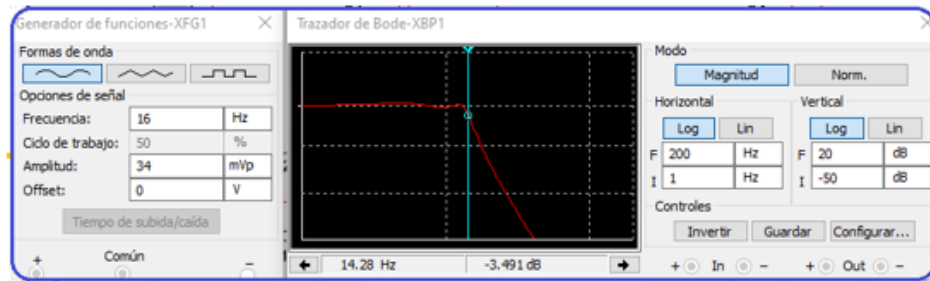


Figura 48. Diagrama de bode para el filtro pasa bajos de la onda Mu, (señal de entrada en XFG1 es la señal de salida de la etapa AA  $34mVp=24mVRms$  con frecuencia de 16Hz).

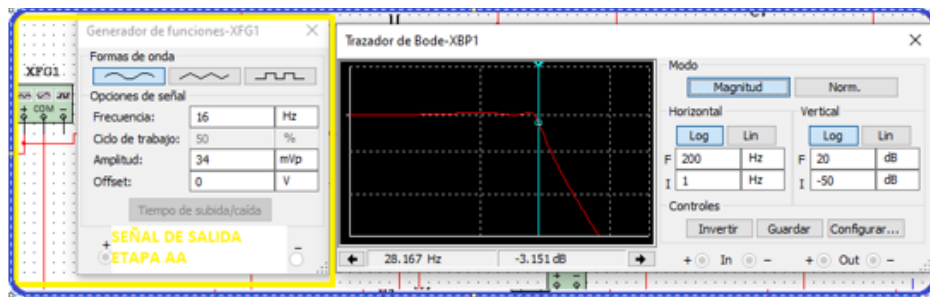


Figura 49. Diagrama de bode para el filtro pasa bajos de la onda Beta, (señal de entrada en XFG1 es la señal de salida de la etapa AA  $34mVp=24mVRms$  con frecuencia de 16Hz).

### Componente AC:

Para las etapas AC A y AC B (filtros pasa altos de Mu y Beta) en el capítulo 10.1.3 se realizó la selección del componente, la topología a implementar y los cálculos correspondientes para el diseño de los filtros con frecuencias de corte en 8Hz y 14Hz, En las figuras 50 y 51 se muestran las simulaciones del amplificador TL084 implementado en la construcción de los filtros. (Ver cálculos capítulo 10.1.3).

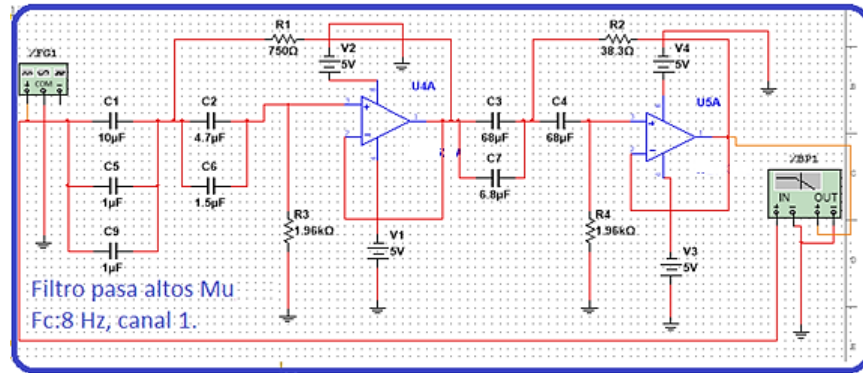


Figura 50. Esquema y simulación del circuito pasa altos con  $f_c$  de 8Hz para la onda Mu.

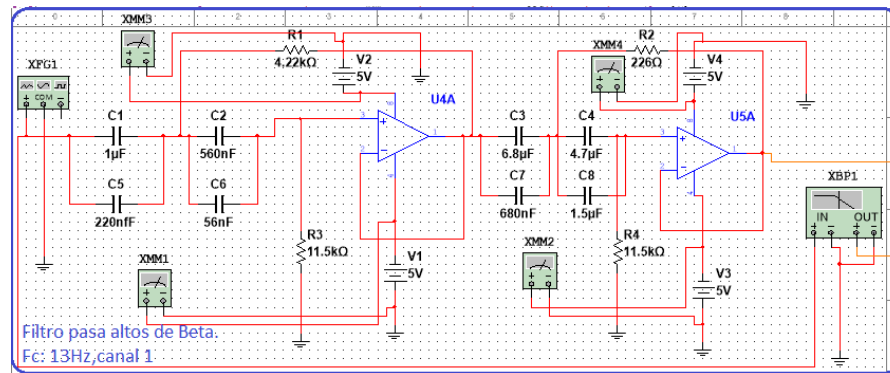


Figura 51. Esquema y simulación del circuito pasa altos con  $f_c$  de 14Hz para la onda Beta.

La simulación de su comportamiento se observa en el diagrama de bode en las figuras 52 y 53, en donde la señal de entrada está dada por el generador XFG1 simulando la señal pre-amplificada en la etapa AA, con tensión de  $34\text{mVp}=24\text{mVRms}$  y frecuencia de 16Hz, de manera que se evidencia que esta etapa y su respectivo componente cumplen con el requerimiento.

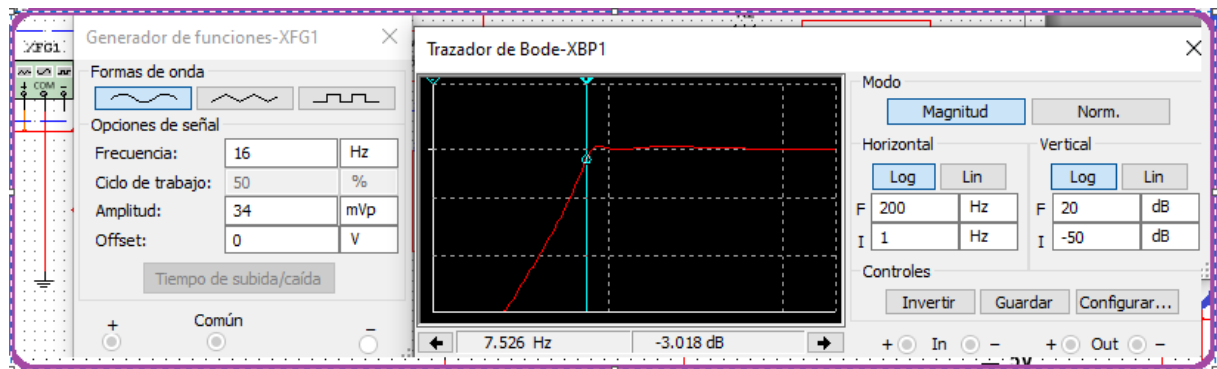


Figura 52. Diagrama de bode 1 y 2, (señal de entrada en XFG1 es la señal de salida de la etapa AA  $34\text{mVp}=24\text{mVRms}$  con frecuencia en 8Hz).



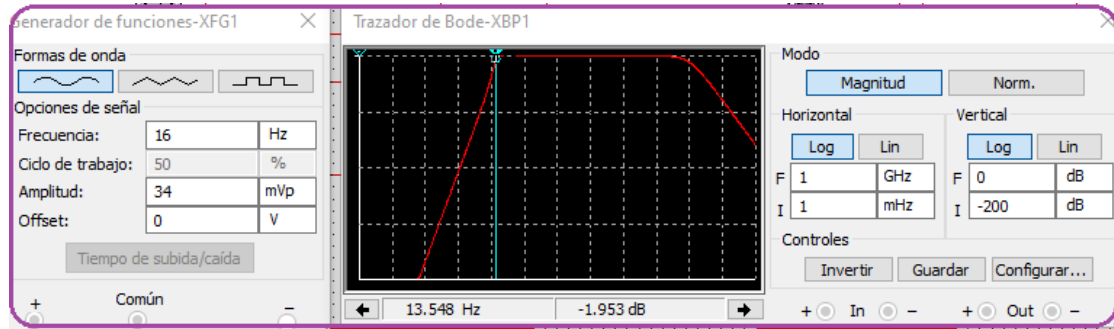


Figura 53. Diagrama de bode 1 y 2, (señal de entrada en XFG1 es la señal de salida de la etapa AA  $34\text{mVp}=24\text{mVRms}$  con frecuencia en 8Hz).

### Componente AD A y AD B:

Para la etapa AD A y AD B (amplificación) en el capítulo 10.1.3 se realizó la selección del componente, de manera que en la figura 54 se muestra la simulación del amplificador operacional de instrumentación TL084 en configuración de ganancia de 25 (ver cálculos en el capítulo 10.1.3).

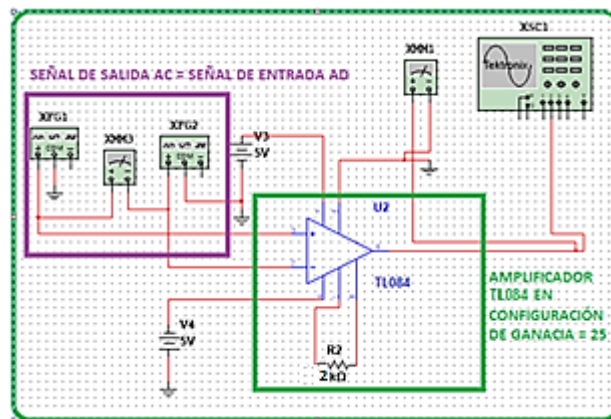


Figura 54. Esquema y simulación del circuito de amplificación con ganancia de 25.

Para comprobar su funcionamiento se implementaron dos generadores de señales que simulan el voltaje y frecuencia de una señal nativa de electroencefalografía amplificada 1000 veces, la cual corresponde a la señal de salida de la etapa AC que es la misma señal de entrada de la etapa AD. De manera que los parámetros de esta señal se definieron en el generador con una tensión de  $24\text{mVRms}$  equivalente  $34\text{mVp}$  con frecuencia una frecuencia de 16Hz.

En la figura 55, en el multímetro XMM3 se observa el voltaje que ingresa al amplificador operacional, al mostrar valores RMS se observa el voltaje mencionado



anteriormente de 24.04mV o que es lo mismo 34mVp, y a la salida del amplificador TL084 en el multímetro XMM1 se observa un valor RMS de 504mV de manera que la etapa AD cumple con su función de amplificación con ganancia de 25.

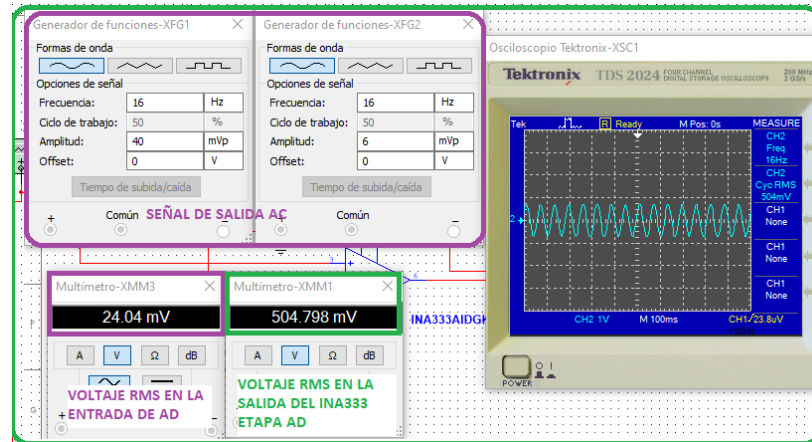


Figura 55. Simulación del circuito de amplificación con ganancia de 25.

#### 10.1.6 Plan de pruebas del subsistema

##### Componente AA:

Pre-amplificación. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 15.

Tabla 15. Plan de pruebas del componente AA.

Prueba	Entrada y Salida del componente
Instrumentos	Osciloscopio con generador
Entrada	Señal sinusoidal de 20mvpp.
Salida esperada	Señal sinusoidal de 20Vpp.
Procedimiento	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la amplificación de 1000. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

##### Componente AB A:

Filtro pasa bajos de Alfa. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 16.

Tabla 16. Plan de pruebas del componente AB A.

Prueba	Entrada y Salida del componente
Instrumentos	Osciloscopio con generador
Entrada	Señal sinusoidal de 20Vpp.
Salida esperada	Señal sinusoidal de 20Vpp filtrada en frecuencias menores e iguales a 13Hz.
Procedimiento	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la filtración como filtro pasa bajos en la frecuencia de 13Hz. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

**Componente AB B:**

Filtro pasa altos de Alfa. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 17.

*Tabla 17. Plan de pruebas del componente AB B.*

<b>Prueba</b>	<b>Entrada y Salida del componente</b>
<b>Instrumentos</b>	Osciloscopio con generador
<b>Entrada</b>	Señal sinusoidal de 20Vpp.
<b>Salida esperada</b>	Señal sinusoidal de 20Vpp filtrada en frecuencias mayores e iguales a 8Hz.
<b>Procedimiento</b>	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la filtración como filtro pasa altos en la frecuencia de 8Hz. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

**Componente AC A:**

Filtro pasa bajos de Beta. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 18.

*Tabla 18. Plan de pruebas del componente AC A.*

<b>Prueba</b>	<b>Entrada y Salida del componente</b>
<b>Instrumentos</b>	Osciloscopio con generador
<b>Entrada</b>	Señal sinusoidal de 20Vpp.
<b>Salida esperada</b>	Señal sinusoidal de 20Vpp filtrada en frecuencias menores e iguales a 29Hz.
<b>Procedimiento</b>	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la filtración como filtro pasa bajos en la frecuencia de 29HZ. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

**Componente AC B:**

Filtro pasa altos de Beta. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 19.

*Tabla 19. Plan de pruebas del componente AC B.*

<b>Prueba</b>	<b>Entrada y Salida del componente</b>
<b>Instrumentos</b>	Osciloscopio con generador
<b>Entrada</b>	Señal sinusoidal de 20Vpp.
<b>Salida esperada</b>	Señal sinusoidal de 20Vpp filtrada en frecuencias mayores e iguales a 14Hz.
<b>Procedimiento</b>	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la filtración como filtro pasa altos en la frecuencia de 14Hz. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

**Componente AD:**

Amplificación. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 20.

Tabla 20. Plan de pruebas del componente AD.

Prueba	Entrada y Salida del componente
<b>Instrumentos</b>	Osciloscopio con generador
<b>Entrada</b>	Señal sinusoidal de 100mVp.
<b>Salida esperada</b>	Señal sinusoidal de 2,5Vp.
<b>Procedimiento</b>	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la amplificación de 25. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

**Subsistema A:**

Acondicionador de pequeña señal Se presenta este plan de pruebas en la tabla 21.

Tabla 21. Plan de pruebas del subsistema A.

Prueba	Entrada y Salida del subsistema
<b>Instrumentos</b>	Osciloscopio con generador
<b>Entrada</b>	Señal sinusoidal de 100μVp.
<b>Salida esperada</b>	Señales sinusoidales de 2,5Vp filtradas en frecuencia entre 8-13 Hz y 14-29 Hz para el primer y segundo canal, respectivamente.
<b>Procedimiento</b>	Se genera una señal y se conecta a la entrada del subsistema. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

**10.2 Subsistema B**

Procesamiento y digitalización de las señales adquiridas en el subsistema A.

**10.2.1 Requerimientos del subsistema****Requerimiento funcional general**

El subsistema B realizará el procesamiento y digitalización de las señales adquiridas del subsistema A.

**Requerimientos funcionales**

- El subsistema B realizará la digitalización de las señales adquiridas en el subsistema A.
- El subsistema B realizará el procesamiento de las señales adquiridas en el subsistema A.
- El subsistema B realizará el acondicionamiento de la señal con tensión de 0.125V a 5V.

**Requerimientos de calidad**

- El subsistema B realizará el acondicionamiento de la señal con tensión de 0.125V a 5V con tolerancia de  $\pm 100\text{mV}$ .

**Requerimientos de restricción**

- El subsistema B trabajará con señales análogas de las ondas Mu y Beta amplificadas 25000 veces.
- El subsistema B trabajará con señales análogas con un rango de frecuencia de 8Hz a 29Hz.
- El subsistema B trabajará con señales análogas con un rango de tensión de 0.125V a 5V.

*10.2.2 Funciones, entradas y salidas del subsistema*

El subsistema B (figura 56) procesará la información brindada por el subsistema A, con el fin de reconocer los movimientos que el usuario desea realizar partiendo de la implementación de la tarea de Imaginación Motora. El proceso de reconocimiento del movimiento que deberá realizar el prototipo robótico de extremidad superior derecha se hará a través del software que permitirá realizar un análisis de amplitud y frecuencia de las señales registradas anteriormente. Por lo tanto, la salida del sistema entregará la señal digitalizada para activar la etapa de control.

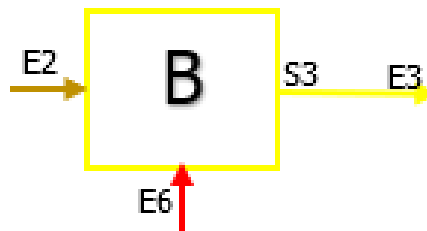


Figura 56. Entradas y salidas del subsistema B.

**E2:** Señal análoga de las ondas Mu y Beta amplificada 25000 veces con un rango de 8Hz a 29Hz y tensión de 0.125V a 5V.

**E6:** Entrada de energía para el subsistema B.

**S3:** Señales de las ondas Mu y Beta digitalizadas y filtradas para eliminación del ruido térmico.

### 10.2.3 Diseño del subsistema

El subsistema B está encargado de realizar el procesamiento de la información brindada por el subsistema A. En este sistema se tendrá la digitalización de las señales obtenidas a partir de la Imaginación Motora en A. Como se mencionó anteriormente, el proceso de reconocimiento del movimiento que deberá realizar el prototipo robótico de extremidad superior derecha se hará a través del software que permitirá realizar un análisis de amplitud y frecuencia de las señales registradas anteriormente. Por lo tanto, la salida del sistema entregara la señal digitalizada para activar la etapa de control.

#### Esquema de las etapas que componen al subsistema B:

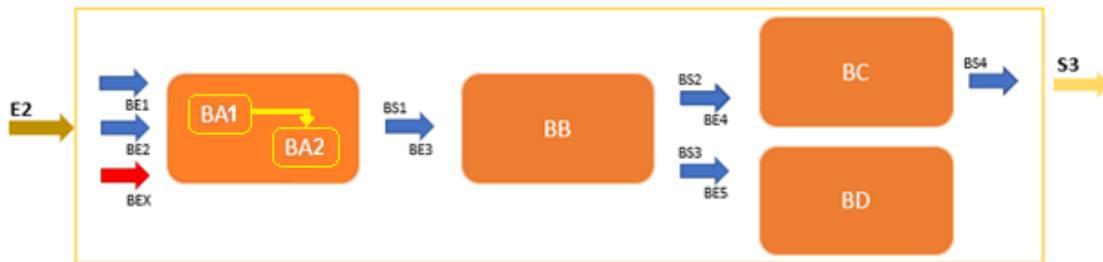


Figura 57. Esquema de las etapas que componen al subsistema B.

En la figura 57 se muestra el esquema de las etapas que componen al subsistema B (sistema de procesamiento y digitalización), el cual obtendrá las señales de las ondas Mu y Beta amplificadas por los dos canales del subsistema A (entrada BE1 y BE2).

Recordando que E2 en el sistema es la señal análoga de las ondas Mu y Beta amplificada 25000 veces con un rango de 8Hz a 29Hz y tensión de 0.125V a 5V, y S3 son las señales de las ondas Mu y Beta digitalizadas y filtradas para eliminación del ruido térmico.

Las 4 etapas que componen al subsistema B son:

- BA: Digitalización y procesamiento de las señales.
  - a. BA1: Transmisión de datos del subsistema A al proceso de digitalización del subsistema B.
  - b. BA2: Procesamiento de las ondas Mu y Beta amplificadas.
- BB: Etapa de digitalización.
- BC: Instrucciones de los movimientos que deberá realizar el prototipo (bits).
- BD: Etapa de visualización

## Requerimientos de los componentes de B:

### Componentes de BA:

La etapa BA del subsistema B, se divide en dos subetapas en la que una se encargará de procesar la información enviada por el subsistema A con el fin de que en la siguiente etapa sea posible su digitalización. Por lo tanto, el desarrollo funcional de esta subetapa se realizará por medio de un computador teniendo en cuenta que la manera en la que el computador va a adquirir estas señales análogas será por medio de la implementación de un microcontrolador que correspondea la primera subetapa de BA.

### Componente de BA1:

Teniendo en cuenta lo anterior, en la tabla 22 se pueden observar los requerimientos necesarios para la selección del componente de la primera subetapa, dónde se ve la necesidad de implementar un controlador que sea capaz de recibir las señales análogas del subsistema A y trasmitirlas al subsistema B.

*Tabla 22. Requerimientos de la primera subetapa de la etapa BA (subsistema B).*

Selección componente subetapa BA1		
Requerimiento	ATMEGA328P	ATMEGA8
Voltaje de operación 5V	1.8V a 5.5V DC	3V
Frecuencia de operación mínima de 10MHz	20MHz	16MHz
ADC mínimo 2 canales	10	8
Memoria flash	Sí	Sí
Memoria RAM	Sí	Sí

En la tabla 22 se observan que los criterios para la selección del componente de la primera subetapa de la etapa BA, para esta etapa se elige el microcontrolador Arduino UNO (este Arduino viene con el microcontrolador atmega328P incorporado, figura 58) para que funcione como puente entre las señales análogas adquiridas por el subsistema A y el subsistema de procesamiento B. El componente se elige debido a la alta compatibilidad que tiene para a la adquisición y transmisión de estas señales, además de contar con especificaciones técnicas que permiten como una buena frecuencia de

operación, memoria *flash* y memoria RAM que garantizan que la información en ella no sea volátil y, además, tiene un voltaje de operación adecuado.

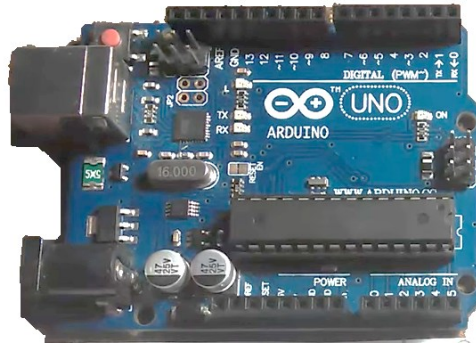


Figura 58. Arduino UNO con el microcontrolador atmega28P incorporado.

### Componente de BA2:

Para la subetapa BA2, se requiere un componente capaz de recibir las señales y procesarlas de manera digital.

Tabla 23. Requerimientos de componentes de la subetapa BA2 (subsistema B).

Selección componente subetapa BA2		
	Requerimiento	ACER ASPIRE 3
Sistema operativo	Windows 10	Sí
Procesador	Superior a 2GHz	3.1GHZ
Puertos USB	2	3
Software	Matlab	Matlab 2016B
	OpenVibe	Sí
Memoria RAM	Mínimo 4GB	4GB

En la tabla 23 se observa que los principales requerimientos a considerar para la selección del dispositivo en el que se trabajará con el software seleccionado para el funcionamiento de la segunda subetapa de la etapa BA, por lo que este debe tener como mínimo: sistema Windows 8.1 o 10 o superior, procesador superior a 2GHz, más de 2 puertos USB, instalado el software Matlab un mínimo de memoria RAM de 4GB. Basados en estos parámetros y a partir de los dispositivos poseídos, se escogió el Acer Aspire 3 (figura 59) como dispositivo de trabajo.



Figura 59. Dispositivo portátil Acer Aspire 3 y sus características. Tomada de [52]

### Componentes de BB:

Esta etapa del subsistema B, permitirá digitalizar las señales adquiridas por medio de la implementación de un software con el fin de realizar un análisis en términos de frecuencia y amplitud, y así establecer la intención de movimiento que esté llevando a cabo el usuario a partir de la tarea de Imaginación Motora, por lo anterior, el componente requerido para el desarrollo de la etapa BB será un Software. En la tabla 24 se presentan los requerimientos de componentes de la etapa BB.

Tabla 24. Requerimientos de componentes de la etapa BB (subsistema B).

Selección componente etapa BB		
Requerimiento	OpenVibe	Matlab
Permite analizar señales	Sí.	Sí.
Permite conocer la frecuencia	Sí.	Sí.
Permite hallar la amplitud	Sí.	Sí.
Compatibilidad con Windows 10	Sí.	Sí.
Visualización de señales adquiridas	Sí.	Sí.

Teniendo en cuenta el gran potencial que tiene Matlab para la adquisición, el análisis y el procesamiento de señales y para los algoritmos que permiten la lectura de señales bioeléctricas, se opta por escoger este software para realizar los análisis de señales requeridos.

### Componentes de BC

La etapa de visualización BC, permitirá observar las señales bioeléctricas de las ondas Mu y Beta que se están midiendo, esto, con el fin de brindar una retroalimentación al usuario, por lo que el componente para mostrar este registro será la pantalla del computador ACER Aspire 3 (dispositivo mostrado en 10.2.2.).



### Componentes de BD

Esta etapa permitirá enviar al subsistema C (subsistema de control) las instrucciones de los movimientos, que el usuario propone realizar a partir de la implementación de la tarea de Imaginación Motora, por lo tanto, el componente necesario deberá ser un software. En la tabla 25 se presentan los requerimientos de componentes de la etapa BD.

*Tabla 25. Requerimientos de componentes de la etapa BD (subsistema B).*

<b>Selección componente etapa BD</b>	
<b>Requerimiento</b>	<b>Matlab</b>
Enviar datos digitalizados.	Sí.

Esta etapa se realizará a partir de la utilización del software Matlab debido a que este permite la digitalización y el envío de los datos.

#### 10.2.4 Esquemático del subsistema

A partir del diseño funcional escogido, en este capítulo se mostrarán y explicarán cada uno de los esquemáticos que componen el subsistema B del prototipo robótico de extremidad superior derecha.

#### Esquemático del subsistema B

Para el desarrollo de este subsistema se plantearon 4 etapas diferentes, correspondientes a BA (procesamiento de las ondas Mu y Beta), BB (etapa de digitalización), BC (instrucciones de los movimientos que debe realizar el prototipo) y BD (etapa de visualización). En el capítulo 10.2.3 se especificaron los componentes que cumplen con los requerimientos de cada una de las etapas, y ya que para cada uno de ellos se requiere de la implementación de un único computador el esquemático para este subsistema se muestra de la siguiente manera en la figura 60.

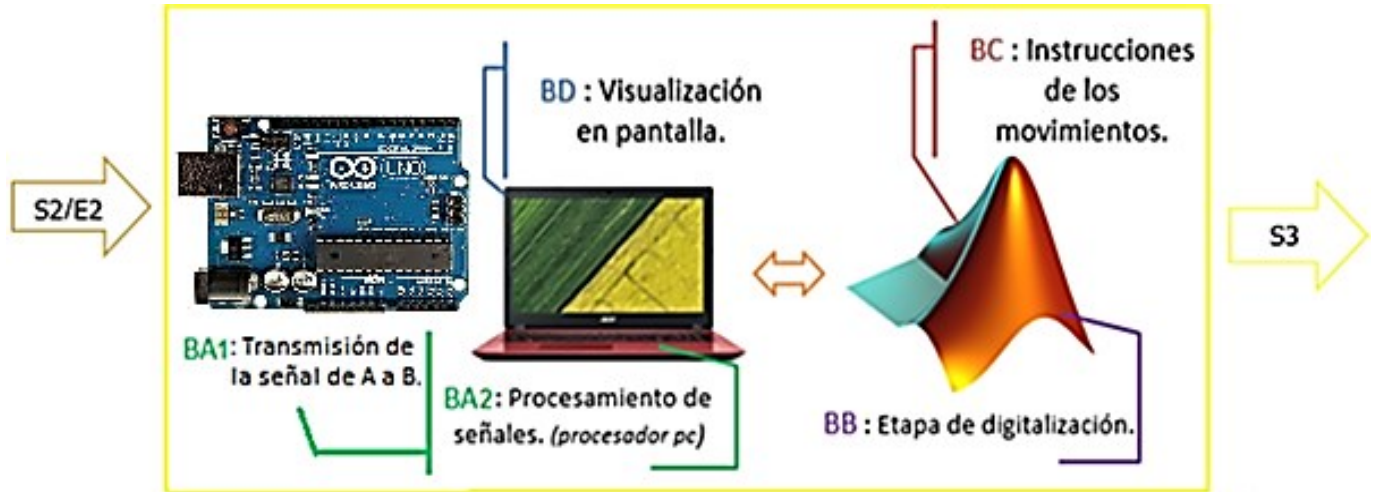


Figura 60. Esquema del subsistema B con las etapas que lo componen.

### 10.2.5 Simulación del subsistema

En la figura 60 se mostró, a modo de esquemático, el subsistema B con las 4 etapas que lo conforman, y ya que cada una de estas depende del computador seleccionado, únicamente se mostrara el esquemático del procesador requerido para el desarrollo de las etapas (BA, BB, BC, BD).

#### Componentes BA, BB, BC, BD:

##### Componentes BA:

Esta etapa se encuentra dividida en 2 partes. La primera corresponde a el componente que permite que las señales filtradas analógicamente sean enviadas a la segunda subetapa, es decir al computador, para que después puedan ser adquiridas por el software Matlab en la etapa BB.

Por lo anterior, se presentó en la figura 58, el Arduino UNO que contiene el microcontrolador atmega38p que permitirá que el computador lea y procese estas señales.

La segunda parte del subsistema BA corresponde a establecer la comunicación entre el microcontrolador y el software de Matlab a través del puerto serial del computador, por lo que para comenzar se crea una función en Matlab en donde se fija un parámetro correspondiente al número de muestras que se desean tomar, de manera que, si se desean n muestras, la estructura del código sería la mostrada en las figuras 61, 62, 63, 64 y 65.

```
function Matlab_Arduino(numero_muestras)
```

Figura 61. Estructura del código para la comunicación en el Arduino UNO y Matlab.

Teniendo en cuenta esto, en el *script* se declara un vector que se encargará de almacenar los datos obtenidos de la comunicación entre el microcontrolador y Matlab, por lo que en el código se fijan puertos a utilizar (COM3, COM4 etc.).

```
close all;
clc;
y=zeros(1,1000); %Vector donde se guardarán los datos

%Inicializo el puerto serial que utilizaré
delete(instrfind({'Port'},{'COM6'}));
puerto_serial=serial('COM6');
puerto_serial.BaudRate=9600;
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');

%Abro el puerto serial
fopen(puerto_serial);

%Declaro un contador del número de muestras ya tomadas
contador_muestras=1;
```

Figura 62. Estructura del código para la comunicación en el Arduino UNO y Matlab.

### Componente BB:

En este componente se realiza la digitalización de las señales adquiridas previamente, por lo que el primer paso para ello es asegurarse de que las señales de las ondas Mu y Beta se encuentran en los rangos normales, de manera que en las siguientes figuras se muestra la estructura del *script* a implementar en Matlab para poder hacer una pequeña digitalización y previsualización de estas señales.

A continuación, se crea la ventana para la señal que se quiere visualizar:

```
%Creo una ventana para la gráfica
figure('Name','Serial communication: Matlab + .
title('SERIAL COMMUNICATION MATLAB+ARDUINO');
xlabel('Número de muestra');
ylabel('Voltaje (V)');
grid on;
hold on;
```

Figura 63. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab.

Se configuran los datos que se van a mostrar y, se crea un bucle *While* para que se realice el muestreo y se represente en la gráfica.

```

%Bucle while para que tome y dibuje las muestras que queremos
while contador_muestras<=numero_muestras
    ylim([0 5.1]);
    xlim([contador_muestras-20 contador_muestras+5]);
    valor_potenciometro=fscanf(puerto_serial,'%d');
    y(contador_muestras)=(valor_potenciometro(1))*5/1024;
    plot(contador_muestras,y(contador_muestras),'X-r');
    drawnow
    contador_muestras=contador_muestras+1;
end

```

Figura 64. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab.

Con *ylim* y *xlim*, es posible dar el rango de valores que se mostrarán en la gráfica. Teniendo en cuenta que por el tipo de señal que se maneja y la ganancia que se les ha dado a las ondas Mu y Beta estas no van a estar por debajo de los 0 Voltios, y tampoco van a subir de 5V, de manera que se pueden representar en 0V y 5V, y en el eje de las x sucede lo mismo. Se representan 20 muestras anteriores y la actual, dejando un pequeño intervalo de 5 para las que vienen a continuación. El eje x será dinámico e irá en función del número de muestras que se quieren tomar.

```

%Cierro la conexión con el puerto serial y elimino las variables
fclose(puerto_serial);
delete(puerto_serial);
clear all;

end

```

Figura 65. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab.

Por último, en la figura 65, con las últimas tres declaraciones se muestra cómo, de ser necesario, se cierra conexión con el puerto serial y se eliminan las variables creadas.

### Componente BC:

Esta etapa nos permitirá empezar a tomar las decisiones del movimiento que espera realizar el sujeto de estudio basados en el análisis de amplitud y frecuencia de las ondas Mu y Beta, por lo que a continuación, se muestra una descripción del algoritmo a implementar, aquí se realiza integración de tecnología basada en el uso de algoritmos existentes.

En el algoritmo propuesto para el reconocimiento de Imaginación Motora en EEG se evidencian cuatro etapas:

- Pre-procesamiento.
- Adquisición de parámetros o características de la señal.
- Selección de características.
- Clasificación.

En primer lugar, se procede a realizar un preprocesamiento que consiste en aplicar un filtro para eliminar las componentes de frecuencias fuera de los rangos de 8 Hz a 30 Hz por medio de un filtrado espacial llamado Laplacian Filter [8]. El segundo bloque de esta etapa es el correspondiente a la adquisición de características donde se van a comparar dos métodos, AR y AAR [8]. El tercero es la selección de características por medio del método de Fisher's Linear Discriminant Analysis FLDA, el cual elimina características que pueden introducir ruido para el proceso de clasificación de los movimientos esperados por el sujeto de estudio. Por último, el proceso de clasificación mostrado en el cuarto bloque de esta etapa permite determinar la intención del movimiento del usuario de mano derecha o mano izquierda a partir de los potenciales evocados usando la función conocida como Fold Cross Validation. Es importante resaltar que gran parte de este algoritmo y lógica está basado en los resultados obtenidos por la tesis "Ms. David Felipe D'Croz Barón. *"Reconocimiento de Imaginación Motora de Señales EEG en el Dominio Temporal aplicando Modelos Paramétricos. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). 2011"* (figura 66). [8]



Figura 66. Algoritmo para el reconocimiento del movimiento imaginado de la mano izquierda y derecha. Tomada de [8]

### Componente BD:

Para la etapa BD, se requiere que el computador seleccionado (ACER Aspire 3) cumpla con las especificaciones necesarias para que ejecute el software Matlab y, así mismo, la visualización final, por lo tanto, el componente más relevante es el procesador con el que cuenta el equipo, un procesador Intel CORE i5 de séptima generación.

### 10.2.6 Plan de pruebas del subsistema

#### Componente BA1:

Procesamiento de las ondas Mu (Alfa) y Beta amplificadas. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 26.

*Tabla 26. Plan de pruebas del componente BA1.*

Prueba	Entrada y Salida del componente
<b>Instrumentos</b>	Microcontrolador Arduino y PC.
<b>Entrada</b>	Señal bioeléctrica entre 0V y 5 V, 8Hz y 30 Hz
<b>Salida esperada</b>	Señal registrada.
<b>Procedimiento</b>	Se conecta la salida del subsistema A, a la entrada analógica del microcontrolador, este servirá como ADC y puente para comunicarse de manera serial con el PC y posteriormente poder verificar el estado de la señal.

#### Componente BA2:

Se presenta este plan de pruebas en la tabla 27.

*Tabla 27. Plan de pruebas del componente BA2.*

Prueba	Entrada y salida del componente
<b>Instrumentos</b>	PC con procesador.
<b>Entrada</b>	Señal bioeléctrica analógica.
<b>Salida esperada</b>	Señal procesada.
<b>Procedimiento</b>	Se conecta la salida del subsistema A, a la entrada del PC y se verifica que se procese la señal.

#### Componente BB:

Etapas de digitalización. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 28.

*Tabla 28. Plan de pruebas del componente BB.*

Prueba	Entrada y Salida del componente
<b>Instrumentos</b>	PC y Matlab.
<b>Entrada</b>	Señal pre-digitalizada de las ondas Mu y Beta.
<b>Salida esperada</b>	Señal digitalizada de las ondas Mu Beta.
<b>Procedimiento</b>	Se verifica que se tenga la señal de electroencefalografía digitalizada en el PC a través del software Matlab.

En la siguiente figura, se observa la señal analógica obtenida en los componentes anteriores una vez se ha digitalizado a través de la implementación de un *script* en el software Matlab. Los picos mostrados en la figura 67 corresponden al momento en el que la onda alfa se activa cuando el sujeto parpadea.

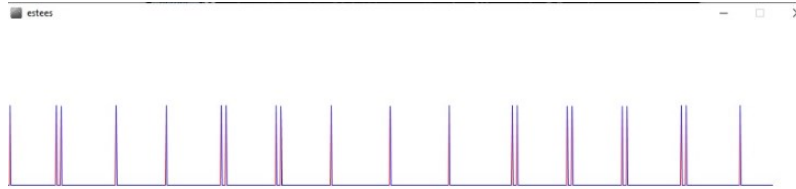


Figura 67. Registro de la señal análoga digitalizada.

### Componente BC:

Instrucciones de los movimientos que deberá realizar el prototipo (bits). Se presenta este plan de pruebas en la tabla 29.

Tabla 29. Plan de pruebas del componente BC.

Prueba	Entrada y Salida del componente
<b>Instrumentos</b>	PC.
<b>Entradas</b>	Señal electroencefalográfica amplificada 25000 veces, filtrada entre 8Hz y 13Hz (canal 1) y entre 14Hz y 29Hz (canal 2) y digitalizada. Tarea de Imaginación Motora.
<b>Salida esperada</b>	Instrucciones para el movimiento del prototipo según la Tarea en bits.
<b>Procedimiento</b>	Se conecta al sujeto y se le pide que piense en ciertos movimientos, luego se observa si se están generando las instrucciones correctas en bits según la tarea.

### Componente BD:

Etapa de visualización. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 30.

Tabla 30. Plan de pruebas del componente BD.

Prueba	Entrada y Salida del componente
<b>Instrumentos</b>	PC.
<b>Entrada</b>	Señal sinusoidal analógica de electroencefalografía.
<b>Salida esperada</b>	Visualización de la señal bioeléctrica digitalizada.
<b>Procedimiento</b>	Se verifica en la pantalla del PC que se esté obteniendo la salida esperada.

### Subsistema B:

Procesamiento y digitalización. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 31.

Tabla 31. Plan de pruebas del subsistema B.

Prueba	Entrada y Salida del subsistema
<b>Instrumentos</b>	PC con procesador.
<b>Entrada</b>	Señal electroencefalográfica digitalizada.
<b>Salidas esperadas</b>	Visualización en el tiempo de la señal electroencefalográfica digitalizada. Señal de electroencefalografía procesada y digitalizada.
<b>Procedimiento</b>	Se verifica que se tenga la señal de electroencefalografía procesada y digitalizada en el PC. Se verifica en la pantalla del PC que se esté obteniendo la salida esperada.

### 10.3 Subsistema C

Sistema de control y movimiento del prototipo robótico de extremidad superior derecha.

#### 10.3.1 Requerimientos del subsistema

##### **Requerimiento funcional general**

El subsistema C controlará el prototipo robótico de extremidad superior derecha.

##### **Requerimientos funcionales**

- El subsistema C realizará el control del prototipo robótico de extremidad superior derecha.
- El subsistema C entregará una señal de potencia para el control del actuador.
- El subsistema C generará los movimientos esperados en el prototipo robótico de extremidad superior derecha.
- El subsistema C activará el movimiento del prototipo de robótico de extremidad superior derecha en el rango de 0° a 90° en el plano sagital para la articulación del codo.

##### **Requerimientos de calidad**

- El subsistema C realizará el control del prototipo robótico de extremidad superior derecha con 3% de probabilidad de error.
- El subsistema C activará el movimiento del prototipo de robótico de extremidad superior derecha en los rangos de 0° a 90° en el plano sagital para la articulación del codo con una tolerancia de  $\pm 8^\circ$ .

#### 10.3.2 Funciones, entradas y salidas del subsistema

Este subsistema (figura 68) tendrá como entrada (S3), es decir la señal de las ondas Mu y Beta digitalizadas con las instrucciones de los movimientos que deberá realizar el prototipo, por lo que tendrá como función convertir la señal digital suministrada por el subsistema B, en una señal de potencia que permitirá indicar la posición angular en la que deberá estar cada uno del actuador del sistema. De este modo, se encargará de realizar el movimiento del sistema, permitiendo la activación del actuador para el rango angular establecido en los requerimientos para la articulación del prototipo.



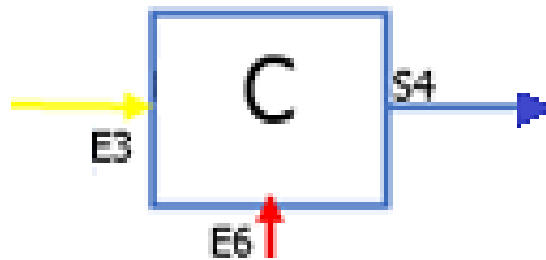


Figura 68. Entradas y salidas del subsistema C.

**E3:** Señales de las ondas Mu y Beta digitalizadas.

**E6:** Entrada de energía para el subsistema C.

**S4:** Activación del movimiento del prototipo de robótico de extremidad superior derecha en los rangos de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  en el plano sagital para la articulación del codo.

### 10.3.3 Diseño del subsistema

El subsistema C, mostrado en la figura 69, tiene como función primaria, recibir las señales digitalizadas que entrega el subsistema B. Una vez tomadas estas señales, el subsistema C tendrá dos etapas; en la primera, CA, se tomará la señal y se transformará en una señal de potencia para enviarla al actuador con las instrucciones de los movimientos que deberá realizar el prototipo, indicando la posición angular en la que deberá estar el actuador del sistema. La segunda etapa, CB, será la encargada de generar el movimiento del sistema, a partir de la activación del actuador para el rango angular establecido en los requerimientos para la articulación del prototipo robótico de extremidad superior derecha.

#### Esquema de las etapas que componen al subsistema:

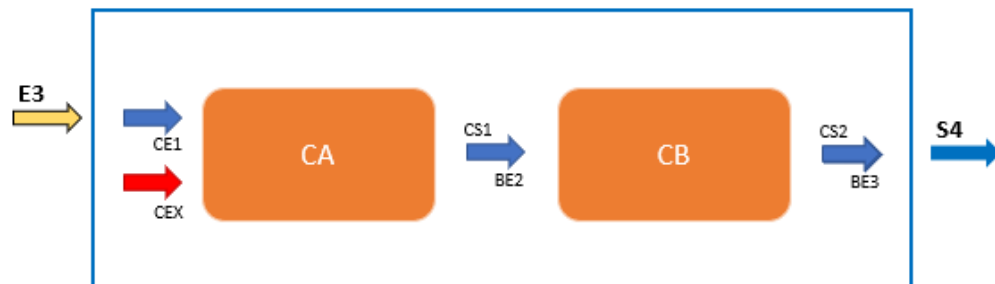


Figura 69. Esquema de las etapas que componen al subsistema C.

En la figura 69 se muestra el esquema de las etapas que componen al subsistema C (sistema de conversión de señales a potencia), el cual obtendrá los datos de las instrucciones de movimiento en bits enviados por B y para transformarlos en datos de potencia y, posteriormente generar los movimientos del prototipo. Este activará el movimiento del prototipo de robótico de extremidad superior derecha en el rango de 0° a 90° en el plano sagital para la articulación del codo.

Recordando que, en el sistema, E4 es la señal de potencia para el control del actuador, y S1 es la activación del movimiento del prototipo de robótico de extremidad superior derecha. Además, en el sistema, E3 son señales de las ondas Mu y Beta digitalizadas.

Las 2 etapas que componen al subsistema B son:

- CA: Transformación de señal en bits a señal de potencia y envío de señal de potencia al actuador del sistema para movimiento del prototipo.
- CB: Generación de movimiento en el actuador del prototipo.

### **Requerimientos de los componentes de C:**

#### **Componentes de CA:**

La etapa CA se encargará de recibir la señal que envía B a modo de bits de información y la transformará en señales de potencia que contengan dicha información.

Se tiene en cuenta que lo que recibe el subsistema C y, por lo tanto, el componente CA, son las instrucciones de movimiento del actuador en bits. Para poder realizar la conversión de estas instrucciones digitalizadas a instrucciones de potencia, el componente CA debe ser capaz de recibir las instrucciones en bits, y transformarlas a PWM (*Pulse Width Modulation*). Esto último es modulación por ancho de pulsos y lo que se hace a partir de este método es que, según la longitud del pulso en 1, se da un porcentaje de potencia al actuador a modo de instrucción.

Para realizar modulación PWM, se toma entonces un valor conocido como *duty cycle*, que calcula la proporción o el porcentaje de tiempo que deben estar encendidos los motores, según el pulso recibido en bits. De modo que, si se tienen más bits en 0 que en 1, el porcentaje de tiempo de encendido de los motores será menor al 50%. A este porcentaje se le asigna una proporción de giro en grados de los motores, que será evaluado en el subsistema D.

El cálculo de *duty cycle* es:

$$DC = 100 \cdot \frac{V_{medio}}{(V_{cc+} - V_{cc-})} \quad (7)$$

Para realizar el cálculo de los ángulos que deben girar los motores, se tiene en cuenta que un DC de 100% será equivalente al máximo número de ángulos posible, en este caso, el máximo ángulo de giro es de 180°. Para este proyecto, el cálculo se debe realizar de la manera opuesta, dado que se tienen establecidos los ángulos de movimiento y se debe hallar entonces el porcentaje de DC necesario para poder realizar estos movimientos. Estos cálculos son realizados a continuación:

$$DC = \frac{100 \cdot \text{grados de giro}}{180^\circ}$$

#### Articulación del codo:

Plano sagital: 0° a 90°.

$$DC = \frac{100 \cdot 90^\circ}{180^\circ}$$

$$DC = 50 \%$$

Los voltajes que se van a transmitir son de

$$\text{Resolución} = \frac{V_{iFS}}{2^n - 1}$$

$$\text{Resolución} = \frac{5}{2^4 - 1}$$

$$\text{Resolución} = 0,039 \text{ V}$$

$$\text{Resolución} = 39,37 \text{ mV}$$

Tabla 32. Requerimientos de componentes de la etapa CA (subsistema C).

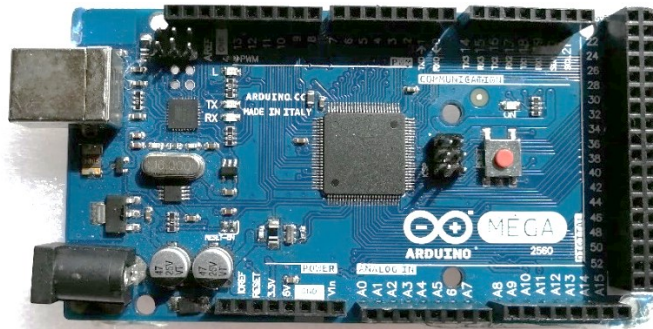
# de bits del ADC	Resolución
4 bits	15 voltios / 15 = 1V
8 bits	15 voltios / 255 = 58.8mV
16 bits	15 voltios / 65.536 = 0.23mV
32 bits	15 voltios / 4.294'967.296 = 0.0000035mV

Por este motivo, si se tiene en cuenta la tabla 32, se necesitaría una resolución en bits de cerca de 8 bits (comerciales). En la tabla 33 se realiza la selección de componente CA, teniendo en cuenta lo anterior y los componentes Arduino MEGA y PIC18F2550.

*Tabla 33. Requerimientos de componentes de la etapa CA (subsistema C).*

<b>Selección componente CA</b>		
<b>Requerimiento</b>	<b>Arduino MEGA</b>	<b>PIC18F2550</b>
Por lo menos 4 entradas	54 pines entre entradas y salidas digitales.	16 pines entre entradas y salidas digitales.
Por lo menos 4 salidas analógicas	15 pines entre entradas y salidas analógicas.	18 pines entre entradas y salidas analógicas.
Resolución	8 bit	10 bit

En la tabla 33 se pueden observar los criterios de selección para el componente de transformación de señal de bits a potencia. Luego de analizar estos criterios, se seleccionó el Arduino MEGA para la realización de dicha transformación.



*Figura 70. Arduino MEGA.*

El Arduino Mega 2560, mostrado en la figura 70, es una placa de microcontrolador basada en el ATmega2560. Tiene 54 pines de entrada / salida digital (de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para soportar el microcontrolador.

### **Componentes de CB**

Este componente deberá ser capaz de activar el movimiento del prototipo de robótico de extremidad superior derecha en los rangos de 0° a 90° en el plano sagital para la articulación del codo. La tabla 34 presenta los requerimientos del componente de la etapa DA.

Tabla 34. Requerimientos de componentes de la etapa DA (subsistema D).

Requerimiento	Motor MG996R (servomotor)	Motor Paso A Paso Nema 17 SI42sth34-	12GA/N20-100 Motorreductor
Voltaje de operación de 4.8V a 6V	4.8V a 6V	3.57V	6V a 12V DC
Corriente máxima de 980mA/1100mA	980mA/1100mA	1.8A	0,3A
Rotación de hasta 180°	180°		
Torque de 5kg*cm/6kg*cm	9.4kg*cm/11kg*cm	5.9kg*cm/7.5kg*cm	0,6kg*Cm
Peso de hasta 40g	55g	100g	9,5g
Precio menor a 50 USD	USD \$9.95 - \$29.850	USD \$7.95 - \$30.140	USD \$5.99 - \$20.310

Debido a los requerimientos del proyecto, se optó por utilizar un servomotor (figura 71) dado a las características técnicas que este posee, pues es un tipo de motor que ya cuenta con un *encoder* que permite variar los ángulos de movimiento según se requiera, además cuenta con un consumo de corriente y torque que permiten satisfacer las necesidades del proyecto, pues posee la fuerza para realizar los movimientos que requiere el brazo, teniendo en cuenta el peso que este tendrá (ver capítulo de diseño industrial) y que el consumo de corriente sea proporcional con lo que puede suministrar la fuente del sistema, que anteriormente se seleccionó de 5V y a 2A. Por otro lado, al implementar este tipo de motor, el diseño electrónico de este subsistema puede simplificarse al no ser necesaria la integración de un puente H.

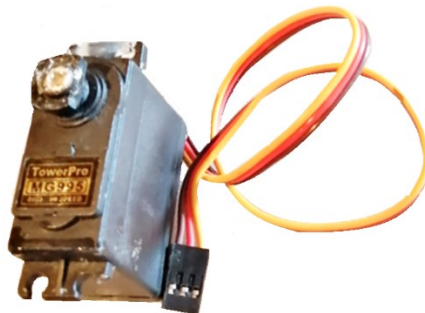


Figura 71. Servo motor de piñonería metálica.

Además de las características mencionadas anteriormente, estos servomotores de piñonería metálica son mucho más resistentes que aquellos de piñonería plástica dado que son más resistentes al calor y, por esto, duran mucho más que un servomotor de piñonería plástica.

### 10.3.4 Esquemático del subsistema

En la figura 70 se observa el Arduino MEGA del subsistema C.

#### Componente CA

El componente CA fue escogido en el apartado 10.3.3, es el Arduino MEGA. El esquemático interno de esta tarjeta es mostrado en el Anexo 2. El esquema de conexiones es el mostrado en la figura 72.

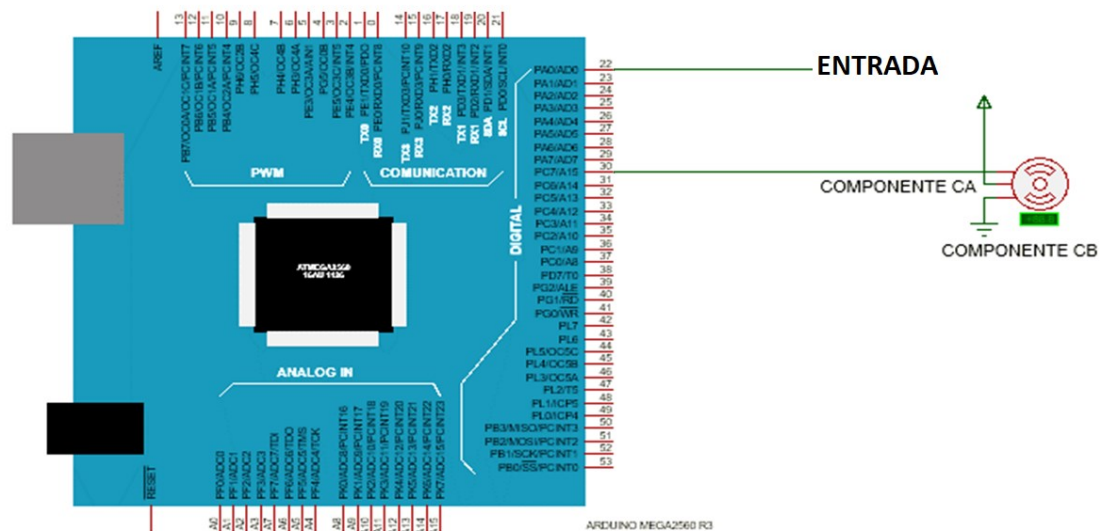


Figura 72. Esquema de conexiones del Arduino MEGA con el motor, el PC y el sistema de alimentación.

Este componente nos permite realizar el proceso de conversión de la señal digital en bits a una señal de tipo PWM, esta conversión la realiza de manera eficiente con una buena resolución y entregándola a partir de sus diferentes salidas al componente CB para que este pueda proporcionar, posteriormente las instrucciones del movimiento a los actuadores del sistema.

#### Componente CB

El componente CB fue escogido en el apartado 10.3.3, es un motor MG996R (servomotor). Sus componentes internos son los mostrados en la figura 73.

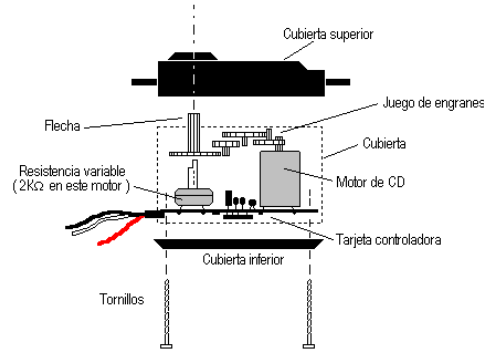


Figura 73. Componentes del servomotor MG995. Tomada de [53]

### 10.3.5 Simulación del subsistema

A continuación, en la figura 74, se muestra la simulación de todo el subsistema C. Este está compuesto por un Arduino MEGA al que se conecta el computador del subsistema B, y por un servomotor como componente CB.

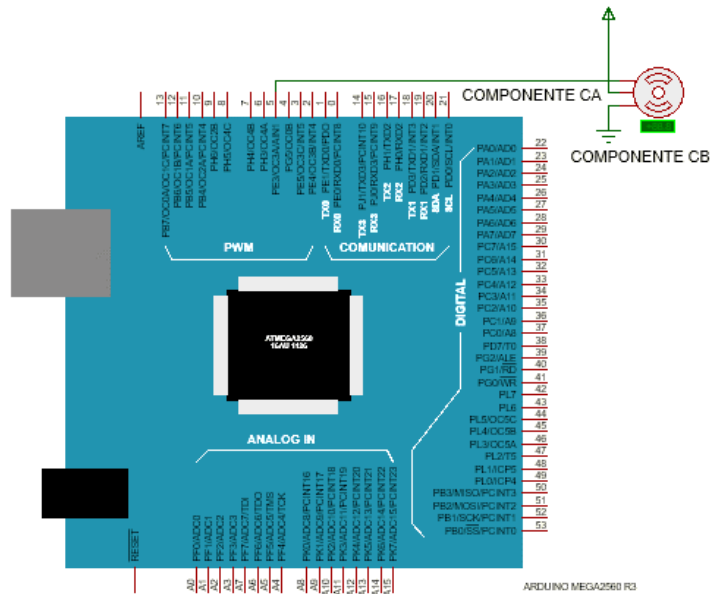


Figura 74. Simulación de CA y CB. Arduino MEGA y motor (actuador).

#### Componente CA

En la figura 74 se puede observar el componente CA. Este es el Arduino MEGA. En ella se puede observar la salida utilizada.

#### Componente CB

En la figura 75, se muestra simulado el servomotor MG996R. Correspondiente al actuador del sistema. Este tiene control PWM.

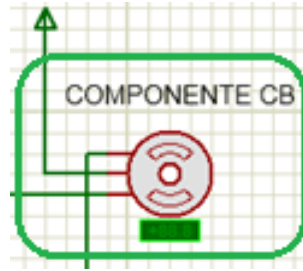


Figura 75. Simulación de CB.

### 10.3.6 Plan de pruebas del subsistema

#### Componente CA:

Transformación de señal en bits a señal de potencia. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 35.

Tabla 35. Plan de pruebas del componente CA.

Prueba	Entrada y Salida del componente
<b>Instrumentos</b>	PC.
<b>Entrada</b>	Instrucciones de movimiento en bits.
<b>Salida esperada</b>	Instrucciones de movimiento en modulación por ancho de pulsos (PWM).
<b>Procedimiento</b>	Se verifica que se realice correctamente la transformación de las instrucciones en bits a PWM.

#### Componente CB:

Generación de movimiento en el prototipo. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 36.

Tabla 36. Plan de pruebas del componente CB.

Prueba	Entrada y Salida del componente
<b>Instrumentos</b>	PC, osciloscopio y transportador.
<b>Entrada</b>	Instrucciones de movimiento en potencia (PWM).
<b>Salida esperada</b>	Giro del actuador en los ángulos esperados según la instrucción.
<b>Procedimiento</b>	Se verifica que se esté obteniendo una señal de potencia adecuada para el movimiento del actuador. Se verifica que los motores estén proporcionando los ángulos de giro esperados según las instrucciones a partir de la medición de los ángulos con un transportador.

## 10.4 Subsistema X

Alimentación del sistema.



#### 10.4.1 *Requerimientos del subsistema*

##### **Requerimiento funcional general**

El subsistema X será la alimentación de todo el sistema.

##### **Requerimientos funcionales**

El subsistema X deberá alimentar a todos los dispositivos del sistema.

##### **Requerimientos de calidad**

El subsistema X deberá alimentar a todos los dispositivos del sistema con máximo 1% de error.

##### **Requerimientos de restricción**

El subsistema X deberá trabajar 20 horas semanales.

#### 10.4.2 *Funciones, entradas y salidas del subsistema*

En la figura 76 se presenta la caja con entradas y salidas del subsistema X.

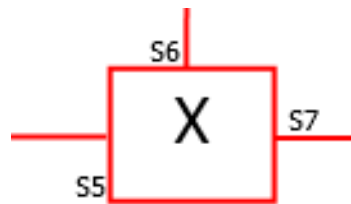


Figura 76. Entradas y salidas del subsistema x.

S5, S6 Y S7: Salidas del sistema de alimentación para cada uno de los subsistemas.

#### 10.4.3 *Diseño del subsistema*

No aplica.

#### 10.4.4 *Esquemático del subsistema*

En la figura 77 se presenta el esquemático del subsistema X.

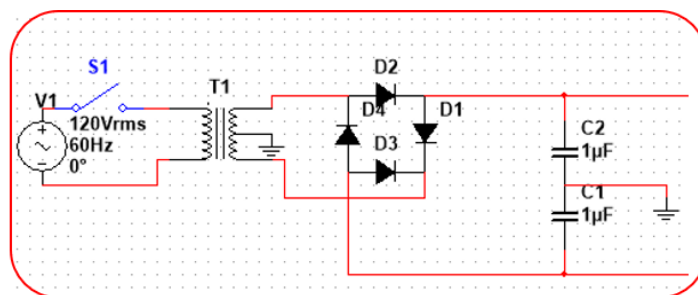


Figura 77. Esquemático de subsistema de alimentación (fuente de poder).

#### 10.4.5 Simulación del subsistema

El subsistema mostrado anteriormente, trabajará como se muestra en la figura 78.

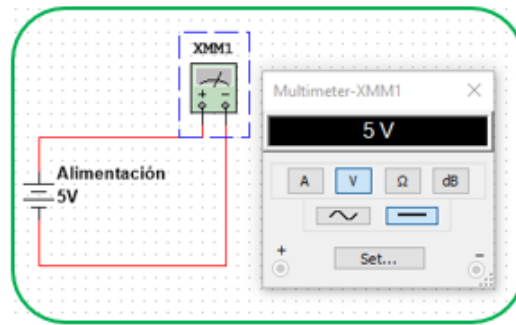


Figura 78. Simulación del subsistema de alimentación.

#### 10.4.6 Plan de pruebas del subsistema

El plan de pruebas de este subsistema se presenta en la tabla 37.

Tabla 37. Plan de pruebas del subsistema X.

Prueba	Entrada y Salida del subsistema
Instrumentos	Multímetro.
Procedimiento	Se conecta el multímetro al sistema de alimentación y se espera que se genere el voltaje de 5V.

#### 10.5 Esquemático del sistema

En este subcapítulo se mostrará de manera general el diseño del esquemático final de la alternativa de solución seleccionado. Se evidenciará la manera en la que cada uno de los subsistemas y etapas se integran para dar forma al sistema del prototipo robótico de extremidad superior derecha. Cada uno de los esquemas mostrados en este capítulo fue calculado, diseñado y simulado de manera detallada en capítulos anteriores.

En la figura 79 se observa el esquema electrónico completo de los 2 canales del subsistema A, cada una de las etapas y subsistemas que lo componen fueron mostradas y explicadas en subcapítulos anteriores (ver capítulos 10.1.1 a 10.5.6). Ya que este es el subsistema más grande se opta por mostrarlo por separado, posteriormente en la figura 80 se observa su integración junto a los demás subsistemas. La entrada E1 corresponde a las ondas Mu y Beta que el sistema deberá medir, las simulaciones del funcionamiento de cada una de estas etapas se encuentran en el subcapítulo 10.1.5.

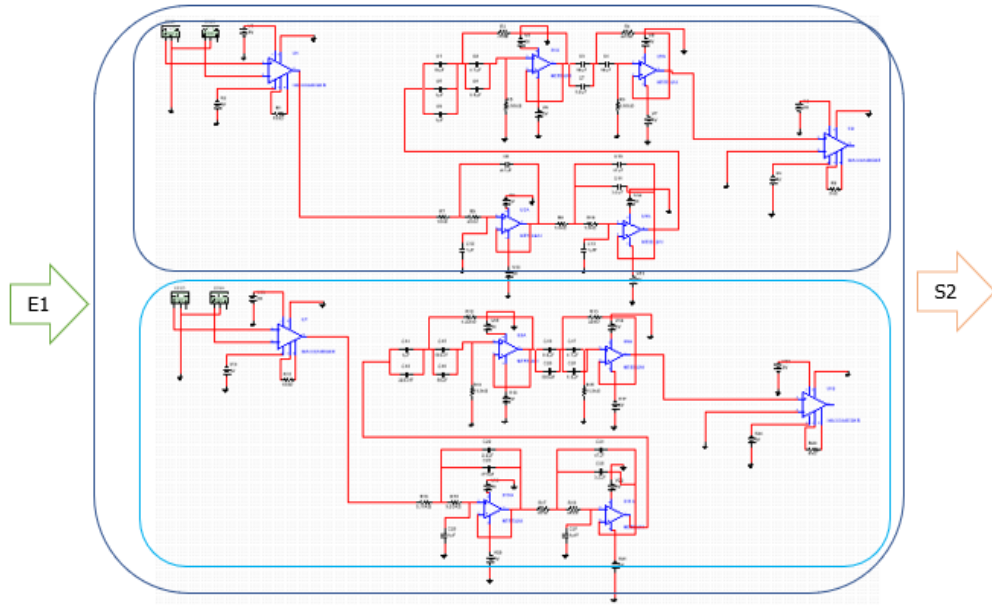


Figura 79. Esquemático electrónico de los 2 canales del sistema.

En la figura 80 se observa el esquema electrónico que muestra la integración de todos los subsistemas que componen el sistema de la alternativa de solución seleccionada, como se mencionó anteriormente cada uno de los subsistemas que se observan en la figura 80 se encuentra explicado y simulado de manera detallada en capítulos anteriores.

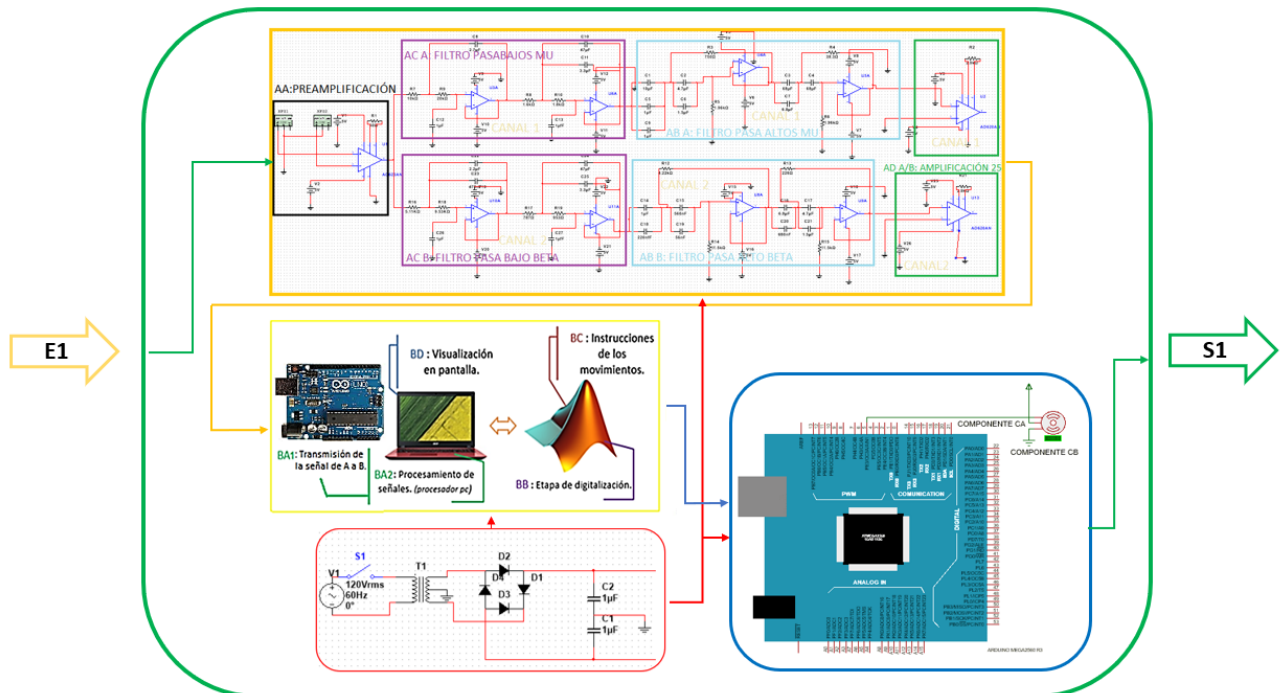


Figura 80. Esquema electrónico de la integración de todos los subsistemas que conforman al sistema.

En la figura 80, la entrada E1 corresponde a las señales nativas de electroencefalografía, es decir a las ondas Mu y Beta generadas por los impulsos eléctricos de la corteza motora, y la salida S1, a la activación del movimiento del prototipo de robótico de extremidad superior derecha en los rangos de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  en el plano sagital para la articulación del codo.

En las figuras 81 y 82 se observa la manera como se verá el subsistema A, conectado a su entrada (señales electroencefalográficas) y a su salida (subsistema B, software).

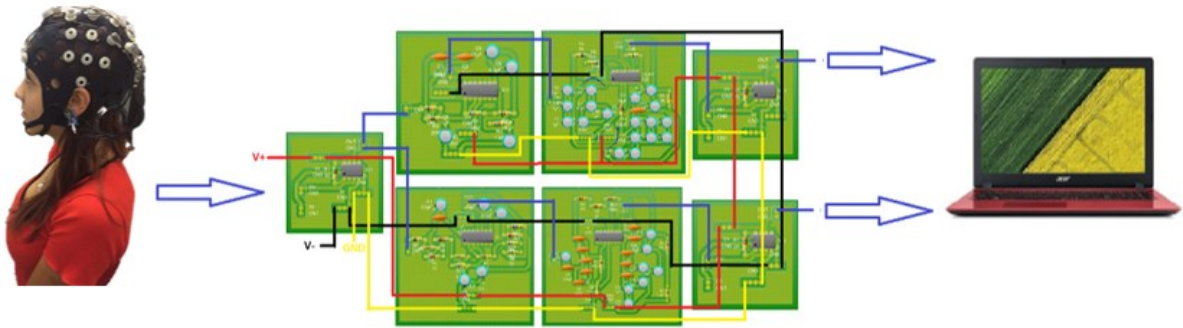


Figura 81. Esquema del subsistema A, conectado a su entrada y salida.

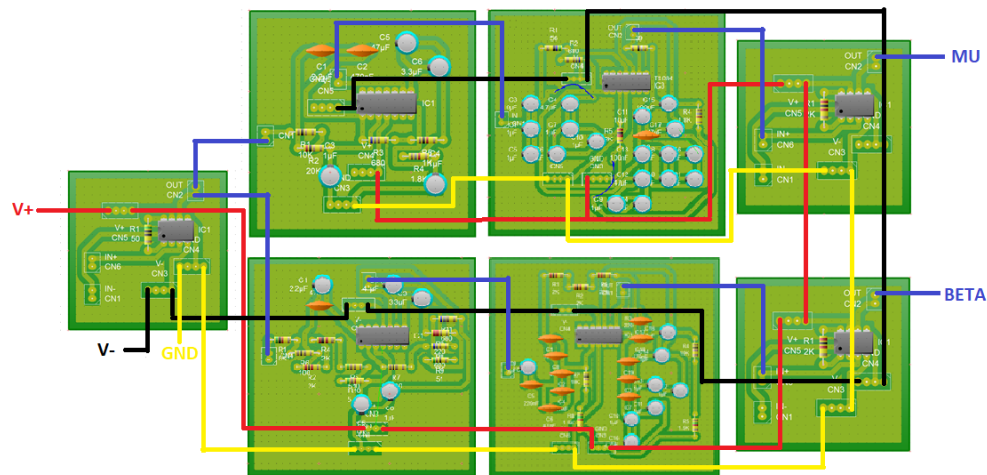


Figura 82. Esquema del subsistema A.

## 10.6 Simulación del sistema

Debido a que el sistema completo contiene, en su segunda etapa, el software, la simulación del sistema completo no se puede realizar debido a que el subsistema B no puede ser simulado junto con los demás subsistemas. Por este motivo, la simulación del sistema completo no se presenta.

## 11 PLAN DE PRUEBAS DEL SISTEMA

### 11.1 Plan de pruebas de componentes

Se presenta el plan de pruebas de cada componente perteneciente a un subsistema en el capítulo 10, en los numerales 10.1.6, 10.2.6, 10.3.6 y 10.4.6.

### 11.2 Plan de pruebas de subsistemas

Se presenta el plan de pruebas de cada subsistema en el capítulo 10, en los numerales 10.1.6, 10.2.6, 10.3.6 y 10.4.6.

### 11.3 Plan de pruebas de integración

A continuación, se presenta el plan de pruebas de cada par de subsistemas que trabajan en cadena para entregar una salida específica. Teniendo en cuenta que el subsistema X representa la alimentación de todo el sistema, se incluye en cada una de las pruebas de integración.

#### 11.3.1 Subsistemas A, B y X

El subsistema A corresponde al acondicionador de la señal nativa de las ondas Mu y Beta con un rango de 8Hz a 13Hz y 14Hz a 29Hz respectivamente y una tensión de 5 $\mu$ V a 200 $\mu$ V, producto de la tarea de Imaginación Motora. El subsistema B corresponde al procesamiento y la digitalización de las señales adquiridas en el subsistema A. En la figura 83 se presenta la caja con la integración de estos subsistemas.

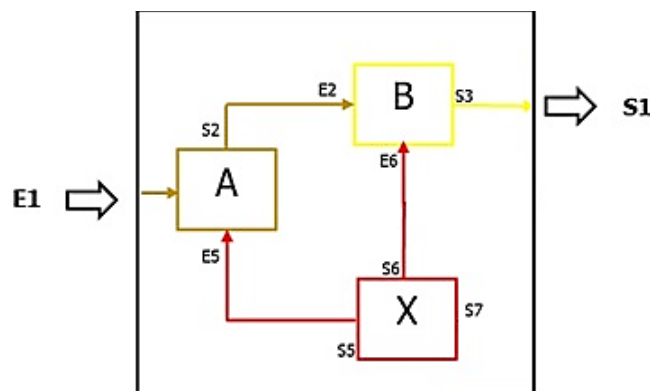


Figura 83. Simulación del subsistema de alimentación.

#### Entrada y salida

**E1:** Señal nativa de las ondas Mu y Beta con un rango de 8Hz a 29Hz y tensión de 5 $\mu$ V a 200 $\mu$ V producto de la tarea de Imaginación Motora.

**S:** Señales de las ondas Mu y Beta digitalizadas y filtradas para eliminación del ruido térmico.

### Prueba

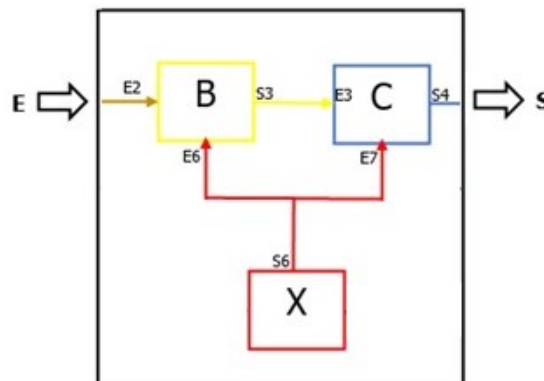
Acondicionador de pequeña señal y etapa de procesamiento y digitalización. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 38.

*Tabla 38. Plan de pruebas de los subsistemas A y B.*

Prueba	Entrada de A y Salida de B
Instrumentos	Osciloscopio con generador y PC con procesador.
Entrada	Señal sinusoidal de 100 $\mu$ Vp.
Salida esperada	Visualización en el tiempo de la señal electroencefalográfica digitalizada. Señal de electroencefalografía procesada y digitalizada.
Procedimiento	Se genera una señal y se conecta a la entrada del subsistema. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada de A, luego se verifica que se tenga la señal de electroencefalografía procesada y digitalizada en el PC. Se verifica en la pantalla del PC que se esté obteniendo la salida esperada.

### 11.3.2 Subsistemas B, C y X

El subsistema B corresponde al procesamiento y la digitalización de las señales adquiridas en el subsistema A. El subsistema C corresponde al control del prototipo robótico de extremidad superior derecha. En la figura 84 se presenta la caja con la integración de estos subsistemas.



*Figura 84. Simulación del subsistema de alimentación.*

### Entrada y salida

**E:** Señal análoga de las ondas Mu y Beta amplificada 25000 veces con un rango de 8Hz a 29Hz y tensión de 0.125V a 5V.

**S:** Señal de potencia para el control del actuador.

### **Prueba**

Etapa de procesamiento, digitalización y señal de potencia para el control del actuador. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 39.

*Tabla 39. Plan de pruebas de los subsistemas B y C.*

<b>Prueba</b>	<b>Entrada de B y Salida de C</b>
<b>Instrumentos</b>	PC con procesador y osciloscopio.
<b>Entrada</b>	Señal electroencefalográfica digitalizada.
<b>Salida esperada</b>	Giro del actuador (motor) en la cantidad de ángulos especificada según las instrucciones.
<b>Procedimiento</b>	Se verifica que se esté obteniendo una señal de potencia adecuada para el movimiento del actuador a partir de la señal en bits que ingresa al subsistema. Se verifica que los motores estén proporcionando los ángulos de giro esperados según las instrucciones a partir de la medición de los ángulos con un transportador.

#### *11.4 Plan de pruebas del sistema*

Se presenta el plan de pruebas funcionales del sistema en el capítulo 5.

## **12 DISEÑO INDUSTRIAL**

### *12.1 Conceptualización y definición de diseño*

#### *12.1.1 Análisis de la actividad y el contexto*

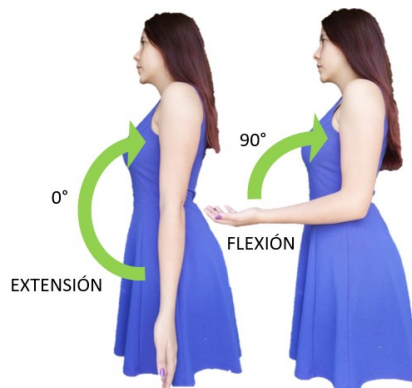
Las tareas y procedimientos que se deben realizar para procurar una buena comunicación de interfaz hombre-máquina son descritas a continuación.

#### **Descripción del contexto**

El Laboratorio de Psicología Experimental de la Universidad El Bosque en su puerta C, es un espacio de aproximadamente 5m x 2m, un espacio cerrado en el que trabajan investigadores de diferentes grupos de investigación como el de Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad de la Facultad de Psicología. Los investigadores trabajan allí con dos computadores, con un gorro de electrodos secos y con el hardware V-Amp 16.

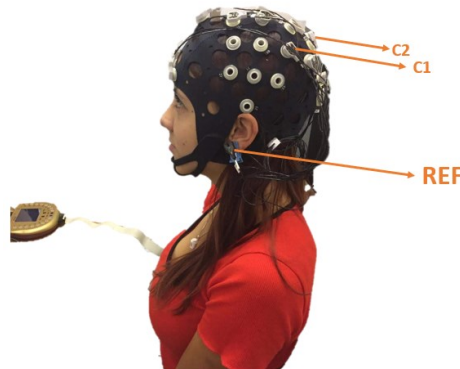
El Laboratorio cuenta con 4 tomacorrientes y está conectado a la red eléctrica de la Universidad. Debido al lugar en el que estará ubicado el prototipo, no se verá afectado por

condiciones ambientales, dado que es un ambiente controlado. A este laboratorio tienen acceso pocas personas de la comunidad educativa y la utilización de los equipos dentro de él es supervisada para los nuevos investigadores. Los investigadores de la facultad de psicología requieren que el prototipo robótico de extremidad superior derecha cuente con 1 grado de libertad que permitirá su movimiento en los rangos de:  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  en el plano sagital para la articulación del codo (figura 85).



*Figura 85. Movimientos de la articulación del codo de  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  (extensión y flexión).*

Los electrodos para la adquisición de las ondas Mu y Beta serán colocados siguiendo la norma 10-20 en las partes específicas de C1, C2 y referencia, mostradas en la figura 86.



*Figura 86. Norma 10-20 para la colocación de electrodos y en C1, C2 y referencia.*

### **Casos de uso:**

- **Casos de uso típicos**

El Prototipo robótico de extremidad superior derecha tiene como propósito la implementación de tareas de Imaginación Motora diseñadas para el control de periféricos mecánicos. El sujeto de estudio, además de estar entrenado en



Imaginación Motora, deberá seguir los siguientes pasos antes de trabajar con el sistema:

- 1.** El usuario se conectará los electrodos en la corteza motora en las posiciones C1, C2, C3, C4 y de referencia para adquirir las señales cerebrales según la norma de posicionamiento 10-20 mostrada en la figura 86.
- 2.** El usuario deberá conectar el prototipo robótico de extremidad superior derecha al computador encendido para iniciar el software de trabajo.
- 3.** El usuario verificará que el sistema de alimentación esté debidamente conectado.
- 4.** El usuario encenderá el prototipo accionando el sistema de encendido.
- 5.** El usuario identificará por medio de un sistema de aviso que el dispositivo está listo para su uso.
- 6.** A partir de la interfaz gráfica, el usuario realizará un testeo del recibimiento de las señales electroencefalográficas provenientes de sus procesos de pensamiento
- 7.** El usuario deberá contar con una tarea de Imaginación Motora previamente diseñada.
- 8.** El usuario a partir de la implementación de la tarea de Imaginación Motora conseguirá que el dispositivo se mueva en los rangos de 0 a 90 grados en el plano sagital para la articulación del codo.

Una vez realizados estos pasos, se procede a la implementación de la tarea que es quien proporciona la secuencia de interacciones que debe tener el sujeto de estudio con el sistema. Estas interacciones son:

- 1.** El usuario deberá implementar la tarea de imaginación motora diseñada para activar los movimientos del prototipo robótico de extremidad superior derecha.

Una vez implementada la tarea de imaginación motora el usuario podrá continuar con su investigación o desactivar el prototipo por medio del interruptor de energía de este. Y deberá seguir los siguientes pasos:

1. El usuario detendrá el recibimiento de datos a partir del software.
2. El usuario apagará el dispositivo con el interruptor On/Off.
3. El usuario cerrará el software en el computador.
4. El usuario desconectará el dispositivo de la fuente de alimentación.
5. El usuario se retirará los electrodos y los dejará de la manera en que los encontró.
6. El usuario limpiará el área de trabajo hasta dejarla como la encontró.
7. El usuario cerrará el Laboratorio y entregará las llaves al encargado.

- **Casos de uso atípicos**

1. En caso de que el área espacial de trabajo tenga un obstáculo.

**Respuesta:** el investigador deberá hacer lo que necesite para trabajar de manera cómoda y apropiada.

2. En caso de que ocurra una falla en los movimientos mecánicos de las articulaciones.

**Respuesta:** El usuario debe solicitar servicio técnico.

3. En caso de que se requiera una actualización de software.

**Respuesta:** El usuario deberá decidir si es pertinente y realizarla.

4. En caso de que el prototipo no se mueva después de implementar la tarea de Imaginación Motora.

**Respuesta:** El usuario deberá verificar si existe un cambio de amplitud en la visualización de las ondas, en caso de que no haya, el usuario deberá reiniciar el sistema.

### 12.1.2 *Requerimientos industriales*

#### **De uso**

1. El prototipo tendrá el tamaño de un brazo derecho de una mujer adulta promedio.

2. Tendrá un peso máximo de 600g.
3. El prototipo debe estar ubicado en un lugar estable y un ambiente controlado.
4. El prototipo debe tener un manual de usuario donde se tiene que especificar el sistema, y el modo de uso, es decir, la relación producto-usuario para evitar daños imprudentes.

### **De función**

1. El prototipo tendrá movimiento en los rangos de 0 a 90 grados en el plano sagital para la articulación del codo.
2. El prototipo tendrá apariencia semejante a la de un brazo humano.

### **De estructura**

Los siguientes requerimientos muestran las características del prototipo robótico de extremidad superior derecha que componen la estructura general del sistema y que definen su configuración general.

1. La estructura del prototipo robótico de extremidad superior derecha será desarrollada en un material rígido y liviano.

### **Técnico Productivos**

Para el desarrollo del prototipo robótico de extremidad superior derecha se requiere que los componentes y/o materiales cumplan con las siguientes características:

1. El material para la estructura del prototipo robótico debe ser lo suficientemente rígido para que soporte el constante uso de este.
2. El material para la estructura del prototipo robótico debe ser liviano para no exceder las capacidades electromecánicas de los motores.
3. La fabricación de la estructura del prototipo se realizará a través de una impresora 3D.
4. Las tarjetas electrónicas (hardware) del dispositivo deberán estar debidamente aisladas para evitar daños internos del sistema.

## **Legales y normativas**

1. Se implementará el uso de las normas IPC para el diseño de los circuitos que requieran reducir los niveles de contaminación electromagnética.
2. Según el artículo 11 de la resolución 8340 del Ministerio de Salud y Protección Social, sobre los riesgos de las investigaciones, este proyecto está en la categoría "sin riesgo", debido a que estos son "*estudios que emplean técnicas y métodos de investigación documental retrospectivos y aquellos en los que no se realiza ninguna intervención o modificación intencionada de las variables biológicas, fisiológicas, psicológicas o sociales de los individuos que participan en el estudio, entre los que se consideran.*"[29]

## **De estética**

1. El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá un aspecto similar en forma y tamaño al de un brazo humano promedio.
2. Los cables de alimentación positiva y referencia del prototipo estarán debidamente identificados por los colores rojo y negro respectivamente.

## **De identificación**

1. El dispositivo tendrá etiquetas que permitan identificar la marca o nombres de los desarrolladores.
2. El dispositivo tendrá información de contacto del servicio técnico.
3. El dispositivo tendrá información de las características eléctricas importantes, como tensión y corriente de alimentación.

### **12.1.3 Materiales, procesos y Normativas**

A partir de los requerimientos previamente establecidos, los posibles materiales para la implementación y construcción física del prototipo se encuentran a continuación.

## **Materiales**

Para el prototipo robótico de extremidad superior derecha se realizó una revisión de prótesis existentes en el mercado para determinar el mejor material para la implementación del prototipo.

Entre los materiales más comunes para el desarrollo de prótesis de brazo se encontraron los siguientes:

- **Acero inoxidable**

Se utiliza para fabricar piezas de las prótesis capaces de soportar elevadas cargas cíclicas en medios agresivos. Por ello, nuestros productos poseen una alta resistencia mecánica y anticorrosiva, lo que permite aumentar su ciclo de vida útil y la seguridad de su funcionamiento.

- **Polímeros reforzados con fibra de carbono**

El uso de este material no solo reduce significativamente el peso de la prótesis, sino que, gracias a su especial propiedad elástica, ayuda al paciente a caminar con ahorro de energía, aportando una mejor calidad de vida. También permite crear prefabricados de prótesis de miembros inferiores óptimos en resistencia y peso.

- **Titanio**

El titanio, biológicamente inerte para el cuerpo humano, logra la máxima resistencia de carga con un peso mínimo. Así, los productos fabricados con este material son muy ligeros y presentan una gran solidez y resistencia, ideal para una correcta rehabilitación.

- **Aluminio**

Se utiliza para la fabricación de estructuras de soporte de las cargas más pesadas.

- **Ácido poliláctico (PLA)**

El PLA es un polímero biodegradable hecho de recursos renovables. Y como material versátil que es, está aumentando su uso en la medicina, en las diferentes aplicaciones de la industria textil y del empaquetado. Se utiliza en prótesis por su ligereza y adaptabilidad.

- **Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)**

Es un termoplástico duro, resistente al calor y a los impactos. Es una combinación de diferentes materiales que proporciona resistencia química, alta dureza superficial, fuerza de impacto y dureza total.

### Cumplimiento de requerimientos

A continuación, se presenta la tabla 40 en la que se evalúa el comportamiento de cada uno de estos materiales según los requerimientos previamente establecidos para el desarrollo del prototipo robótico de extremidad superior derecha:

*Tabla 40. Cumplimiento de requerimientos industriales de los materiales.*

<b>Requerimiento</b>	<b>Acero inoxidable</b>	<b>Polímeros con fibra de carbono</b>	<b>Titanio</b>	<b>Aluminio</b>	<b>PLA</b>	<b>ABS</b>
Peso máximo de 600 Kg construido el prototipo.	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Semejante a un brazo humano.	No	No	No	No	No	No
Material rígido que soporte el constante uso.	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Excede las capacidades de los motores.	Sí	No	Sí	No	No	No

A partir de la tabla 40, se puede observar de qué manera hay materiales que cumplen la mayoría de los requerimientos que se establecieron en el subcapítulo anterior. Entre estos, se encuentra el que indica que el prototipo se construirá a partir del método de impresión 3D. Por este motivo, descartaron los materiales que, por sus características, no pueden ser utilizados en este tipo de impresión.

De modo que, entre los materiales comunes para construcción de prótesis, se mantienen entre las opciones para la construcción de este proyecto los materiales PLA y ABS.

Es importante tener en cuenta que ninguno de estos materiales cumple con el requerimiento de asemejarse visualmente a un brazo humano. Sin embargo, esta forma la tomará a partir del diseño y la impresión en 3D que le dará una semejanza en forma y tamaño a la de un brazo humano.

### Procesos

La selección de componentes y de materiales para el desarrollo del prototipo robótico de extremidad superior derecha supone una ardua búsqueda de componentes y materiales en el mercado, de proyectos similares y de análisis de características y de costos. Todo lo anterior, con el fin de seleccionar los materiales y componentes más adecuados que supongan el mejor balance entre calidad y costo.

El desarrollo del prototipo robótico de extremidad superior derecha cuenta con varias etapas. Estas están descritas posteriormente a modo de cronograma.

### Presupuesto

El presupuesto (tabla 41) estipulado para la construcción del prototipo fue de 500mil pesos. Por lo tanto, aunque la diferencia sea poca, se considera mejor realizarlo con PLA.

*Tabla 41. Presupuesto para el desarrollo del proyecto.*

	<b>PLA</b>	<b>ABS</b>
<b>Precio 1Kg y 1,75mm</b>	\$78.750	\$83.600
<b>Costo estimado del diseño</b>	\$0	\$0
<b>Costo estimado de fabricación (impresión 3D)</b>	\$400.000	\$430.000
<b>Total</b>	\$478.750	\$513.600

### Cronograma

El proyecto será desarrollado en 3 fases; la primera será el planteamiento de este junto con su justificación y los requerimientos generales del proyecto, la segunda será el diseño del prototipo y de todos los subsistemas que conforman al sistema, la tercera y última será la fase de implementación, en la cual se construirá todo lo antes diseñado. Por este motivo, el tiempo con el que se cuenta para la construcción del prototipo se muestra en la tabla 42.

*Tabla 42. Cronograma de desarrollo del proyecto. Etapa de implementación.*

<b>Fase</b>	<b>Actividad</b>	<b>Semana</b>	<b>Encargados</b>
<b>Proyecto II</b>	Montaje de componentes	33-36	Valeria Gómez Giraldo y Adrián Javier Jiménez Mojica
	Prueba de componentes	37	Valeria Gómez Giraldo y Adrián Javier Jiménez Mojica
	Prueba de sistema	38-40	Valeria Gómez Giraldo y Adrián Javier Jiménez Mojica
	Puesta en operación	41-43	Valeria Gómez Giraldo y Adrián Javier Jiménez Mojica
	Implementación	44-46	Valeria Gómez Giraldo y Adrián Javier Jiménez Mojica
	Entrega producto final	47-48	Valeria Gómez Giraldo y Adrián Javier Jiménez Mojica

Teniendo en cuenta lo visto en la tabla 42, la construcción e implementación del prototipo serán realizadas en 8 semanas (33-40).

### Calidad de acabados

Como se menciona en los numerales anteriores, se utilizará el método de impresión 3D para la construcción del prototipo. Por este motivo, se realizó una pre-selección de materiales, incluyendo dos que pueden ser utilizados en impresión 3D. Estos materiales son conocidos como PLA y ABS.

Para la definición del mejor material para la construcción del prototipo robótico de extremidad superior derecha, se analizan en la tabla 43, las características de ambos materiales y la calidad de cada uno.

*Tabla 43. Características de los materiales para impresión 3D.*

Característica	PLA	ABS
<b>Material</b>	Termoplástico a base de recursos renovables	Termoplástico a base de petróleo.
<b>Biodegradable</b>	Sí	Sí
<b>Extrusión</b>	Fácil	Intermedia
<b>Temperatura de extrusión</b>	235°C	180°C - 260°C
<b>Pegajoso</b>	Sí	No
<b>Necesita cama caliente</b>	No	Sí
<b>Olor en impresión</b>	Dulce	Apestoso
<b>Humos</b>	Imperceptibles	Intensos
<b>Almacenamiento</b>	Higroscópico	Higroscópico

*Tabla 43. Características de los materiales para impresión 3D.*

<b>Frágil</b>	Sí	No
<b>Ante tensiones</b>	Se rompe	Se dobla
<b>Dureza superficial</b>	Mayor	-
<b>Biodegradable</b>	Sí	No
<b>Altura de capa</b>	100micras	100micras
<b>Aplicación de acetona</b>	No	Sí
<b>De colores</b>	Sí	Sí
<b>Descomposición</b>	50°C – 60°C	-
<b>Reacción ante uso</b>	Intermedia	Buena



## Filamento PLA

La figura 87 nos muestra cómo es el filamento de PLA:



*Figura 87. Filamento de PLA. Figura tomada de [38]*

## Normativas

- **Estándares locales**

El Ministerio de Salud y Protección Social, en su Resolución 1319 de 2010, “Mediante la cual se adopta el Manual de Buenas Prácticas de Manufactura para la elaboración y adaptación de dispositivos médicos sobre medida de prótesis y ortesis ortopédica externa”, se refiere a esta práctica diciendo:

*“El objeto de la presente resolución es adoptar el Manual de Buenas Prácticas de Manufactura para la elaboración y adaptación de dispositivos médicos sobre medida de prótesis y ortesis ortopédica externa, señalar las máquinas, equipos, herramientas e instrumentos con que deben contar los establecimientos en donde se elaboren y adapten dispositivos médicos sobre medida de prótesis y ortesis ortopédica externa y, establecer los procedimientos y requisitos que deben cumplir estos establecimientos, para su inscripción y obtención del Certificado de Buenas Prácticas de Manufactura, ante el Instituto Nacional de Medicamentos y Alimentos - INVIMA.”[36]*

- **Estándares globales**

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre las prótesis y órtesis [35]:

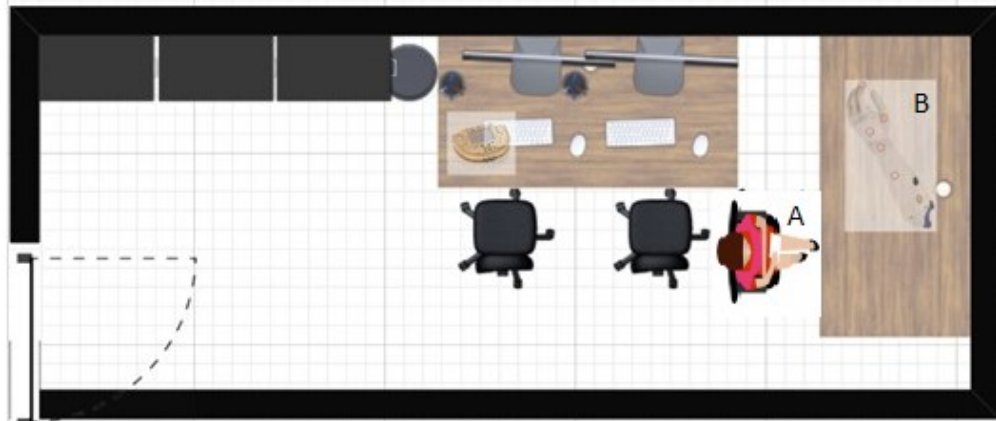
- Los componentes, materiales, artículos de consumo, herramientas, máquinas y otros equipos que se utilizan exclusivamente para fabricar productos ortoprotésicos y que no están disponibles en un país deben estar exentos de derechos de importación y tasas de aduana.
- La reutilización de componentes ortoprotésicos debe estar regulada por una autoridad o un grupo de expertos designados que no tengan conflictos de intereses, tener un control de calidad adecuado y ser documentada.
- La regulación nacional de los productos, componentes y materiales ortoprotésicos deben formar parte del sistema nacional de atención de la salud.
- Los productos ortoprotésicos deben ser sometidos a pruebas estructurales para que se pueda determinar si cumplen con las normas ISO u otras equivalentes antes de que sean vendidos en el mercado. Investigación y desarrollo.
- Se deben realizar investigaciones clínicas y técnicas sobre ortoprotésica, y se deben difundir los resultados a nivel nacional y mundial.
- Se deben crear y facilitar ampliamente productos ortoprotésicos asequibles, que sean eficaces en función del costo, de buena calidad y adecuados al contexto.

## *12.2 Planificación de la producción*

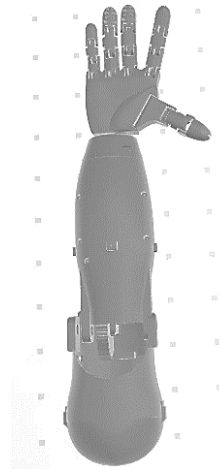
En el siguiente capítulo se plantearán dos alternativas de solución de diseño industrial, donde se explicarán de manera detallada cada una de ellas, la ubicación del prototipo y bosquejos del diseño a implementar. Posteriormente se elegirá la alternativa que brinde la mejor solución para el desarrollo del prototipo robótico de extremidad superior derecha.

### *12.2.1 Alternativas de configuración*

En capítulos anteriores se mencionó que el prototipo robótico de extremidad superior derecha para la implementación de tareas de imaginación motora se encontrará ubicado en el laboratorio de psicología experimental, por lo tanto, en la figura 88 se muestra un diagrama del laboratorio, la ubicación del prototipo (B) y el usuario (A), a su vez el prototipo estará fijo a una estructura que servirá de soporte para el brazo (figura 89).



*Figura 88. Diagrama del laboratorio, ubicación del prototipo (B) y el usuario (A).*



*Figura 89. Bosquejo del prototipo.*

### **Primera alternativa de solución.**

Para el desarrollo de la primera alternativa de solución se optó por implementar la base del diseño del brazo del robot *Inmoov* con algunas modificaciones para adaptarlo a los requerimientos del proyecto [42], se usó como base este diseño ya que al ser de código abierto permite su utilización e impresión 3D libremente. Se plantea el uso de un prototipo de brazo basado en el funcionamiento de los cable-robots, es decir, el movimiento de las articulaciones será accionado por medio de tendones o cables sujetos desde el extremo de la articulación hasta un motor. Los motores se encontrarán en el interior del prototipo ubicados como se muestra en las figuras 90 y 91.

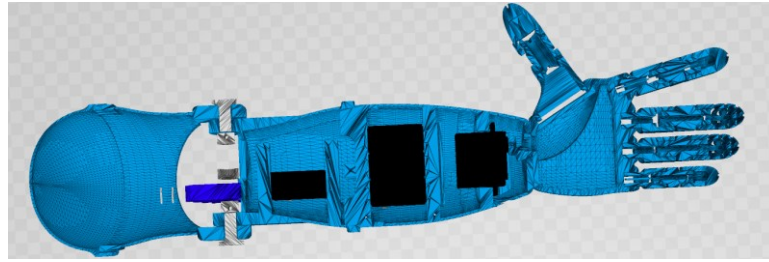


Figura 90. Primera alternativa, prototipo robótico de extremidad superior derecha. Adaptada de [42]

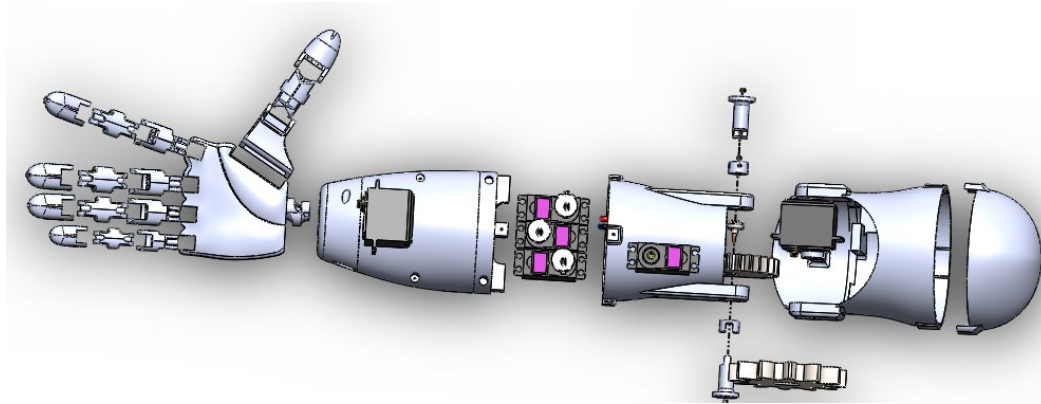
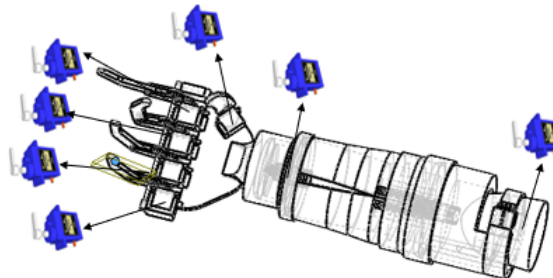


Figura 91. Primera alternativa, prototipo robótico de extremidad superior derecha. Adaptada de [42]

### Segunda alternativa de solución.

Para el desarrollo de la segunda alternativa de solución se optó por implementar la base del diseño del *Prosthetic Arm 7*, por lo cual se plantea el uso de un prototipo de brazo robótico que realiza el movimiento a partir de la implementación de motores integrados directamente en cada articulación, por lo que no se requiere de ningún tipo de cable que sirva como método para contraer las diferentes partes funcionales del prototipo. En la figura 92 se puede observar el diseño y la ubicación de los motores para esta alternativa de solución.



*Figura 92. Segunda alternativa, prototipo robótico de extremidad superior derecha. Tomada de [41]*

### 12.2.2 Evaluación y presentación de la alternativa a desarrollar

Con el fin de establecer la mejor propuesta de solución para el desarrollo del prototipo de extremidad superior derecha, se realizó una tabla comparativa (tabla 44) en la que se evalúan diferentes criterios como: tamaño, peso, apariencia (similitud a un brazo humano), practicidad (que sea de fácil construcción), funcionalidad y costo.

*Tabla 44. Evaluación de las alternativas propuestas.*

Criterio \ Alternativa	Alternativa 1		Alternativa 2		Peso
	Eval.	Pond.	Eval.	Pond.	
Tamaño	5	0,50	5	0,5	10%
Peso	5	0,75	5	0,75	15%
Apariencia	5	1,25	4	1	25%
Practicidad	4,5	0,68	5	0,75	15%
Funcionalidad	5	1,25	4,7	1,175	25%
Costo	5	0,50	5	0,5	10%
<b>Totales</b>		<b>4,93</b>		<b>4,68</b>	<b>100%</b>

Basados en la tabla 44, se determinó que la mejor propuesta de solución para el desarrollo del prototipo robótico de extremidad superior derecha es la primera alternativa, pues supera a la segunda alternativa en la mayoría de los criterios evaluados, ya que al contar con mayor similitud a la apariencia de un brazo humano cumple con uno de los requisitos del proyecto. Por otro lado, en términos de funcionalidad, este prototipo de brazo robótico realiza sus movimientos a partir de la implementación de los *cable-robots*, lo que quiere decir que al accionar cada una de sus articulaciones por medio de tendones o cables que van conectados desde el extremo de la articulación hasta el motor, permite realizar el trabajo con menor esfuerzo, lo que se traduce en menor consumo de corriente para el actuador del sistema, siendo este último uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta para la realización total del proyecto.

### 12.2.3 *Diseño detallado*

A continuación, se presentará la selección final de los materiales que serán utilizados para la construcción y la puesta en funcionamiento del prototipo robótico de extremidad superior derecha.

#### **Selección de materiales**

A partir de las comparaciones entre los materiales para realizar la construcción del prototipo robótico de extremidad superior derecha, se tomó la decisión de trabajar con ABS. Esto debido a que sus características físicas son compatibles con los requerimientos levantados para el funcionamiento de este prototipo.

#### **Selección de sistemas mecánicos**

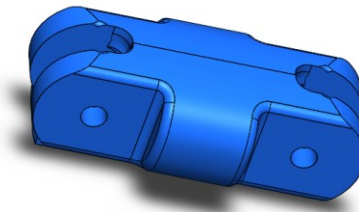
Para el prototipo robótico de extremidad superior derecha se requiere de un sistema mecánico encargado del movimiento de todo el prototipo. Este es el que representa el codo del prototipo, para el cual se utiliza el motor previamente mencionado. Lo anterior con el fin de cumplir el requerimiento que indica que el codo del prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá movimiento en el plano sagital de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

#### **Definición de componentes principales**

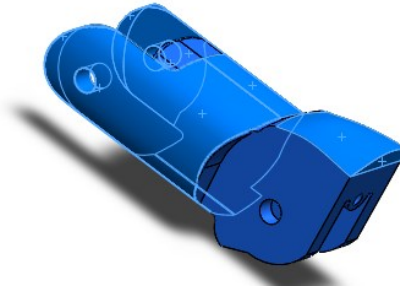
La estructura del prototipo de extremidad superior derecha está compuesta por pequeñas partes que juntas forman el diseño esperado, a continuación, se mostrara cada uno de estas y una pequeña descripción de su función.

- **Piezas de los dedos:**

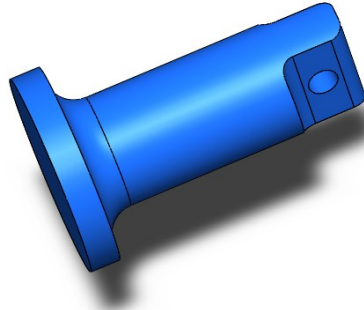
En las figuras 93 a 96 se muestran de las principales piezas que componen los dedos del prototipo.



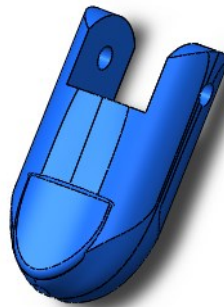
*Figura 93. Pieza unión falanges.[42]*



*Figura 94. Falange proximal de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*



*Figura 95. Pieza union de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*



*Figura 96. Falange distal de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*

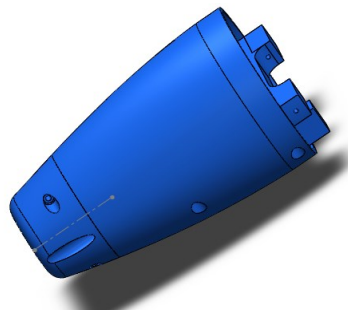
En la figura 97 se observa el dedo compuesto por cada una de las piezas mostradas en las figuras 93-96. Para la construcción de cada uno de los dedos de la mano únicamente se varía el tamaño de las piezas, por lo que en síntesis se repite el diseño mostrado anteriormente.



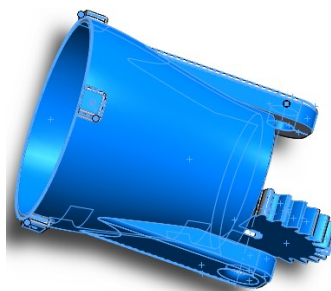
*Figura 97. Dedos de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*

- **Piezas del antebrazo y brazo:**

Para la construcción del antebrazo se requiere de las piezas mostradas en las figuras 98-102, cada una de estas piezas van unidas entre si formando el brazo del prototipo. La unión de estas piezas se realiza de izquierda a derecha en el mismo orden que se muestra a continuación.

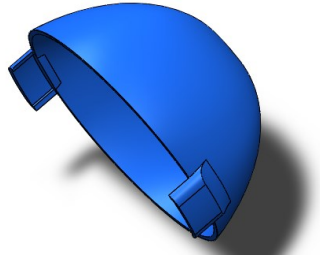


*Figura 98. Pieza antebrazo del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*

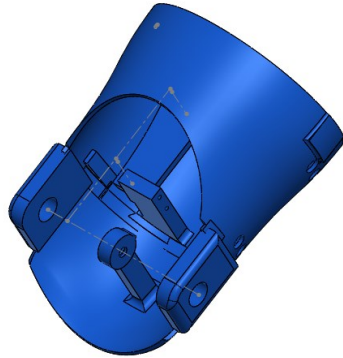


*Figura 99. Pieza de unión de antebrazo y brazo del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*

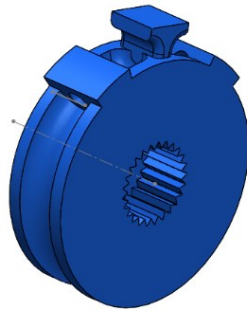




*Figura 100. Pieza de la tapa del brazo del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*



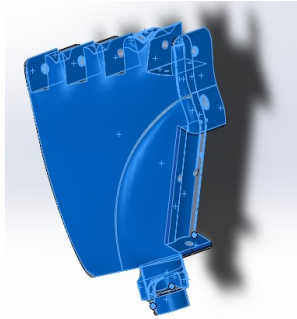
*Figura 101. Pieza unión de la base del antebrazo a la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*



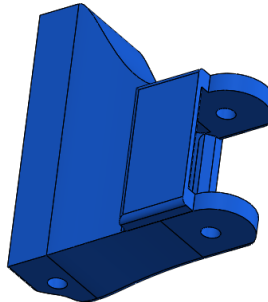
*Figura 102. Pieza que permite le movimiento de la articulación de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*

- **Piezas de la mano (sin incluir dedos):**

La articulación del mano está compuesta por las piezas mostradas en las figuras 103 a 106, cada de una de estas representa una o más partes de la palma de un mano humano real, en la descripción de cada figura se especifica a que parte de la mano corresponde. Los dedos de la mano del prototipo se especificaron el subcapítulo anterior.



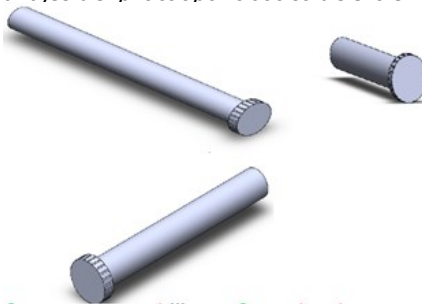
*Figura 103. Palma de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*



*Figura 104. Carpianos 4 y 3 de la mano de la articulación de la mano del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*

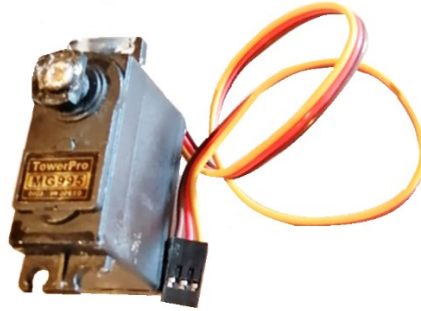


*Figura 105. Engranajes del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*



*Figura 106. Tornillos del prototipo robótico de extremidad superior derecha.[42]*

En la figura 107, se muestra el servomotor MG995 de piñonería metálica.



*Figura 107. Servomotor del prototipo robótico de extremidad superior derecha.*

### **Aplicación de normativas**

Teniendo en cuenta lo mencionado en el subcapítulo 12.1.2, el prototipo robótico de extremidad superior derecha seguirá y cumplirá con los estándares locales, del Ministerio de Salud y Protección Social, y globales de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre las prótesis y órtesis [35].

### **Análisis ergonómico y antropométrico**

El prototipo robótico en si no tendrá contacto directo con el sujeto que ni con los investigadores realizando las mediciones. Estas interacciones con el prototipo serán a partir de las ordenes generadas en el software y que se manifestarán como el movimiento del prototipo según las instrucciones específicas dadas.

El usuario tendrá únicamente contacto con el sistema a partir del sistema de adquisición que se basa en electrodos conectados al cuero cabelludo del paciente sobre su corteza motora (ver subcapítulo 12.1.1). Por otro lado, la interfaz hombre máquina será entendible para el usuario a partir de la utilización del manual que se entregará para que sea comprensible el software y la manera cómo funciona el sistema completo.

## **13 IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE SUBSISTEMAS**

### **13.1 Subsistema A**

Acondicionador de la señal nativa de las ondas Mu y Beta con un rango de 8Hz a 13 Hz y 14Hz a 29Hz respectivamente y una tensión de 5 $\mu$ V a 200 $\mu$ V.

Para lograr el funcionamiento de todos los subsistemas y del sistema en general, es necesario que el subsistema A presente un funcionamiento correcto y preciso, especialmente en frecuencia, para poder conseguir las ondas que se necesitan para los procesos de Imaginación Motora. Dado que estas son las ondas Mu (8Hz a 13Hz) y Beta (14Hz a 29Hz), se diseñaron los circuitos correspondientes en el capítulo de Diseño Detallado, sin embargo, al realizar el montaje de estos circuitos con resistencias y condensadores de valores aproximados, se obtuvieron resultados desfasados en frecuencia con respecto a lo deseado. Por este motivo, se realizó un segundo diseño de estos circuitos, esta vez teniendo en cuenta los valores de condensadores y resistencias comerciales.

A continuación, se presenta la implementación de estos circuitos. Algunos de ellos con modificaciones y con los valores comerciales que, en conjunto, se aproximan más a los valores de los diseños iniciales.

### 13.1.1 Implementación

Al subsistema A lo componen 6 etapas. A continuación, se presenta la implementación de cada una de ellas:

#### a. AA: Amplificador de señales de ganancia 1000.

El componente AA fue diseñado como se presenta en la figura 108.

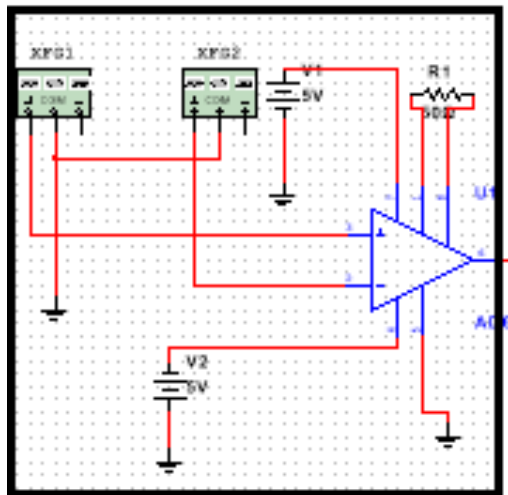


Figura 108. Esquemático del circuito de preamplificación. (Componente AA).

Se realizó, entonces el diseño para PCB, mostrado en la figura 109.

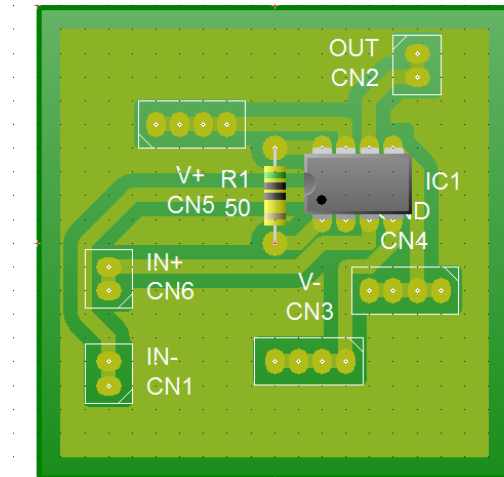


Figura 109. Diseño del componente para impresión en PCB.

El componente AA fue implementado utilizando los siguientes componentes:

- Resistencia de  $50\Omega$
- Amplificador de instrumentación AD620

El resultado de esta implementación fue el mostrado en las figuras 110 a 112:

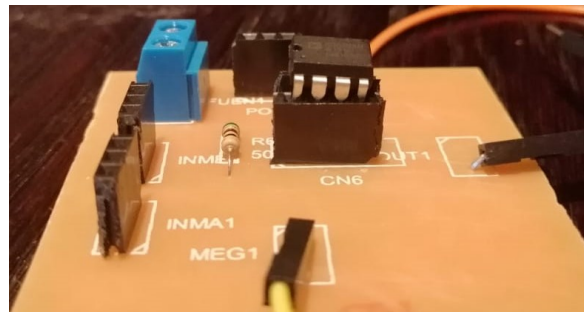


Figura 110. Amplificador con ganancia de 1000.

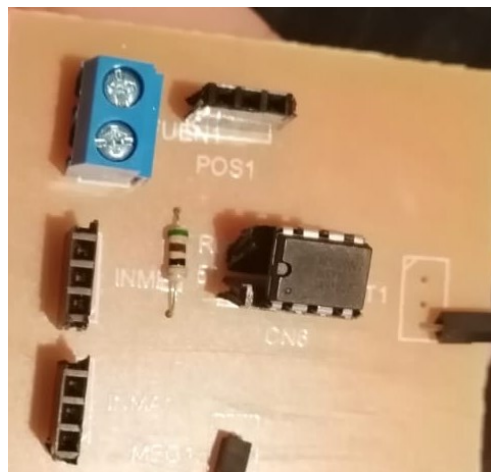


Figura 111. Amplificador con ganancia de 1000. Vista superior.

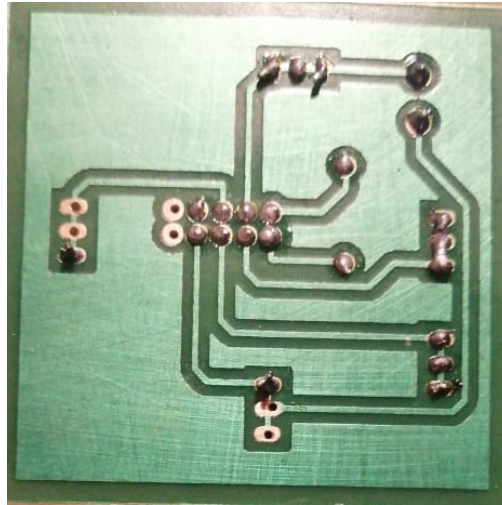


Figura 112. Amplificador con ganancia de 1000. Vista inferior.

**b. AB A: Filtro pasa bajos con  $f_c$  de 13Hz.**

El componente AB A fue diseñado como se presenta en la figura 113.

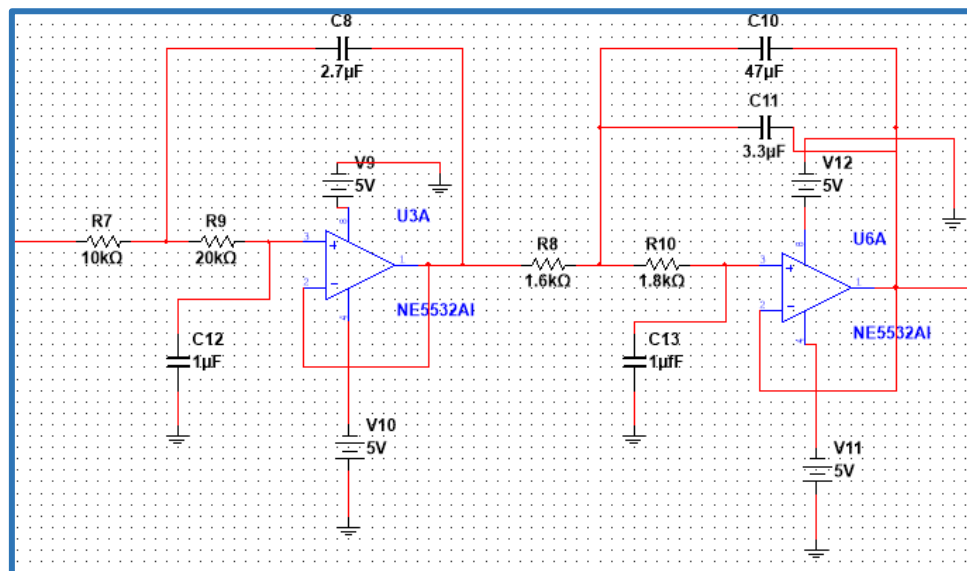


Figura 113. Pasa Bajos de onda Alfa.

Si se observa de manera detallada, se puede ver que en el diseño se tienen condensadores y resistencias que no son de valores comerciales, esto hizo que, al realizarse las pruebas del circuito, se presentaran desfases en frecuencia. Por este motivo, se rediseñó el circuito de la siguiente manera para ser lo más exacto posible (figura 114).

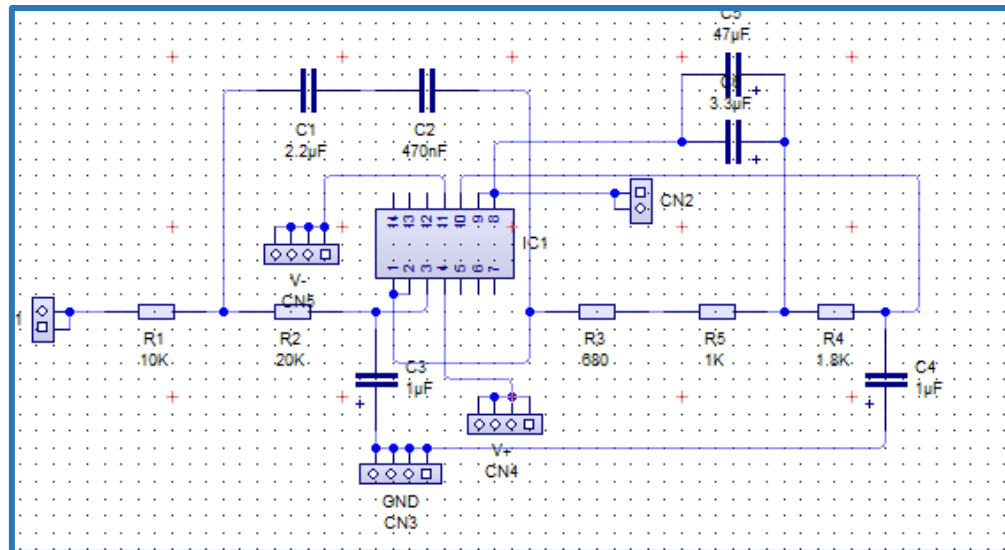


Figura 114. Pasa Bajos de onda Alfa rediseñado con valores exactos.

Se realizó, entonces el diseño para PCB, mostrado en la figura 115.

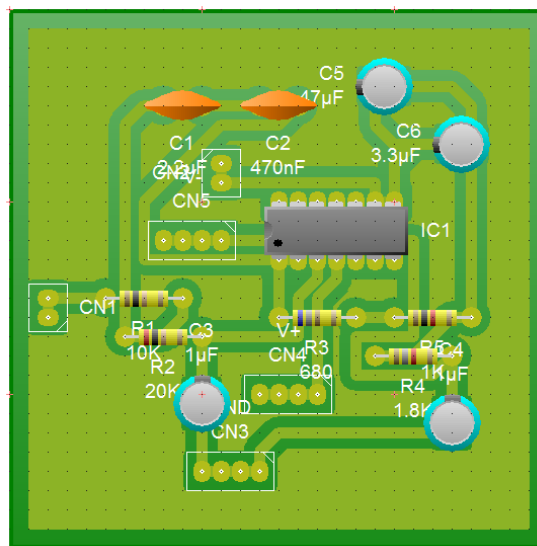


Figura 115. Diseño del componente para impresión en PCB.

Los componentes reemplazados fueron los siguientes:

**Resistencias:**

10k $\Omega$  -> 10k $\Omega$

20k $\Omega$  -> 20k $\Omega$

1.6k $\Omega$  -> 680 $\Omega$  + 1k $\Omega$  = 1.68k $\Omega$

1.8k $\Omega$  -> 1.8k $\Omega$

**Condensadores:**

1 $\mu$ F -> 1 $\mu$ F

1 $\mu$ F -> 1 $\mu$ F

2.7 $\mu$ F -> 2.2 $\mu$ F + 470nF = 2.67 $\mu$ F

47 $\mu$ F -> 47 $\mu$ F

3.3 $\mu$ F -> 3.3 $\mu$ F

El listado completo de componentes con sus especificaciones se encuentra en el Anexo 1.

El montaje del circuito, una vez rediseñado, quedó como se muestra en las figuras 116, 117 y 118.



*Figura 116. Filtro pasa bajos de Alfa con frecuencia de corte 14Hz.*

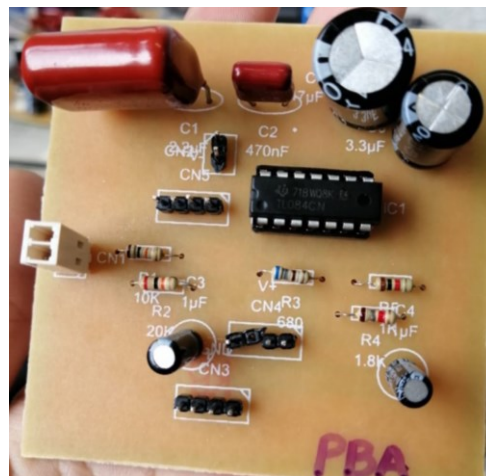
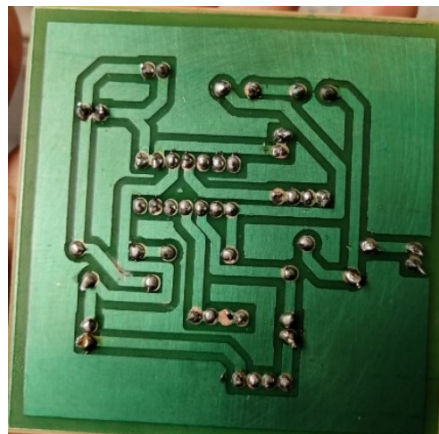


Figura 117. Filtro pasa bajos de Alfa con frecuencia de corte 14Hz. Vista superior.



*Figura 118. Filtro pasa bajos de Alfa con frecuencia de corte 14Hz. Vista inferior.*



### c. AC A: Filtro pasa altos con $f_c$ de 8Hz.

El componente AC A fue diseñado como se muestra en la figura 119.

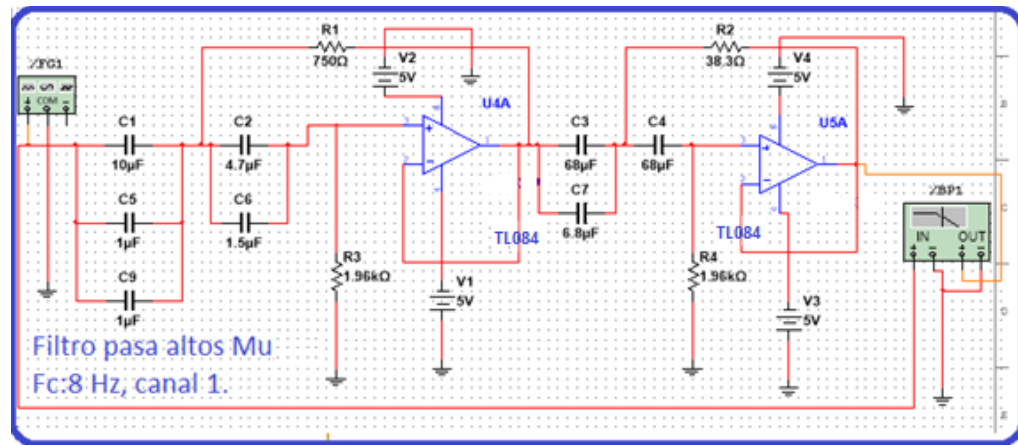


Figura 119. Pasa Altos de onda Alfa (Mu).

Si se observa de manera detallada, se puede ver que en el diseño se tienen condensadores y resistencias que no son de valores comerciales, esto hizo que, al realizarse las pruebas del circuito, se presentaran desfases en frecuencia. Por este motivo, se rediseñó el circuito de la siguiente manera (figura 120) para ser lo más exacto posible.

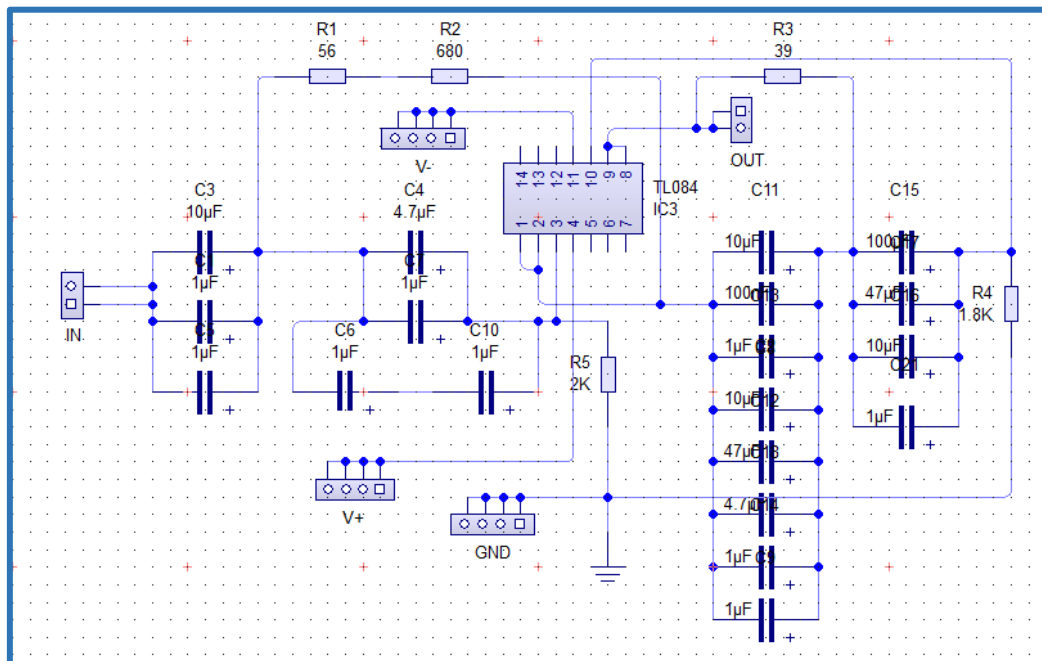


Figura 120. Pasa Altos de onda Alfa rediseñado con valores exactos.

Se realizó, entonces el diseño para PCB, mostrado en la figura 121.

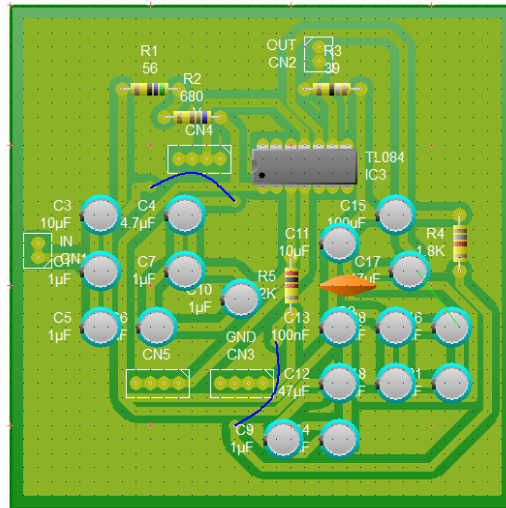


Figura 121. Diseño del componente para impresión en PCB.

Los componentes reemplazados fueron los siguientes:

#### Resistencias:

$750\Omega \rightarrow 56\Omega + 680\Omega = 736\Omega$

$1.96k\Omega \rightarrow 2k\Omega$

$1.96k\Omega \rightarrow 1.8k\Omega$

$38.3\Omega \rightarrow 39\Omega$

#### Condensadores:

$10\mu F \rightarrow 10\mu F$

$1\mu F \rightarrow 1\mu F$

$1\mu F \rightarrow 1\mu F$

$4.7\mu F \rightarrow 4.7\mu F$

$1.5\mu F \rightarrow 1\mu F + (1\mu F + 1\mu F) / 2 = 1.5\mu F$

$68\mu F \rightarrow 10\mu F + 10\mu F + 47\mu F + 1\mu F = 68\mu F$

$68\mu F \rightarrow 10\mu F + 47\mu F + 10\mu F + 1\mu F = 68\mu F$

$6.8\mu F \rightarrow 1\mu F + 4.7\mu F + 1\mu F + 100nF = 6.8\mu F$

El listado completo de componentes con sus especificaciones se encuentra en el Anexo 1.

El montaje del circuito, una vez rediseñado, quedó como se muestra en las figuras 122, 123 y 124.

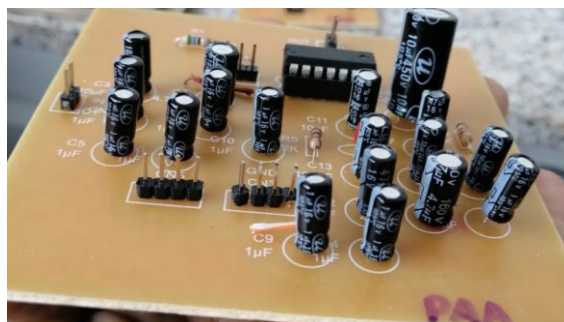


Figura 122. Filtro pasa altos de Alfa con frecuencia de corte 8Hz.



Figura 123. Filtro pasa altos de Alfa con frecuencia de corte 8Hz. Vista superior.

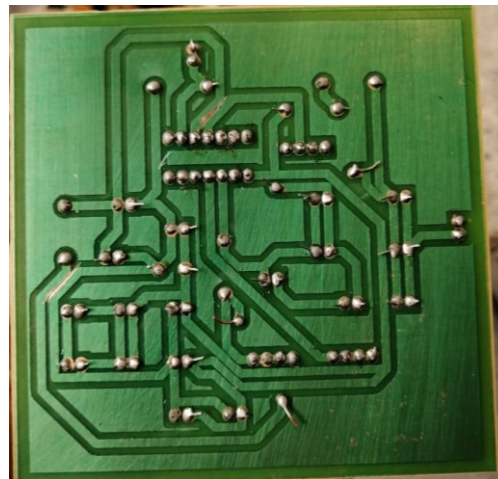


Figura 124. Filtro pasa altos de Alfa con frecuencia de corte 8Hz. Vista inferior.

#### d. AB B: Filtro pasa bajos con fc de 29Hz.

El componente AB B fue diseñado como se muestra en la figura 125.

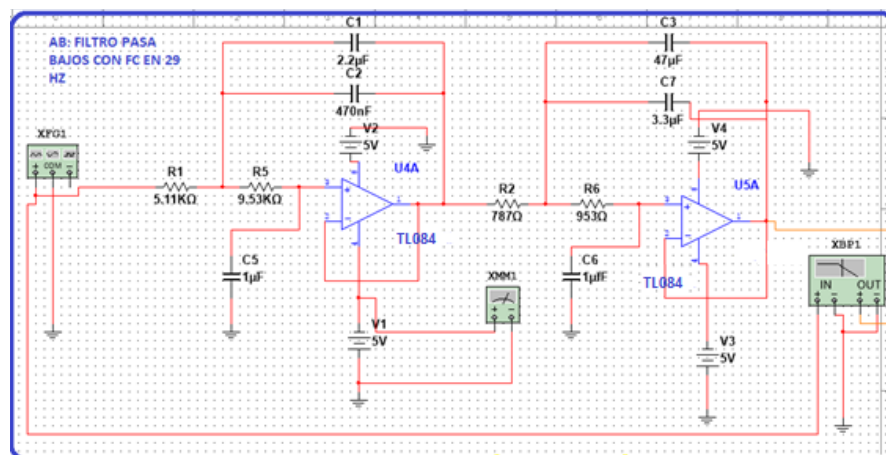


Figura 125. Pasa Bajos de onda Beta.

Se puede observar que se tienen resistencias y condensadores de valores no comerciales. Por este motivo, se rediseñó el circuito de la siguiente manera (figura 126) para ser lo más exacto posible.

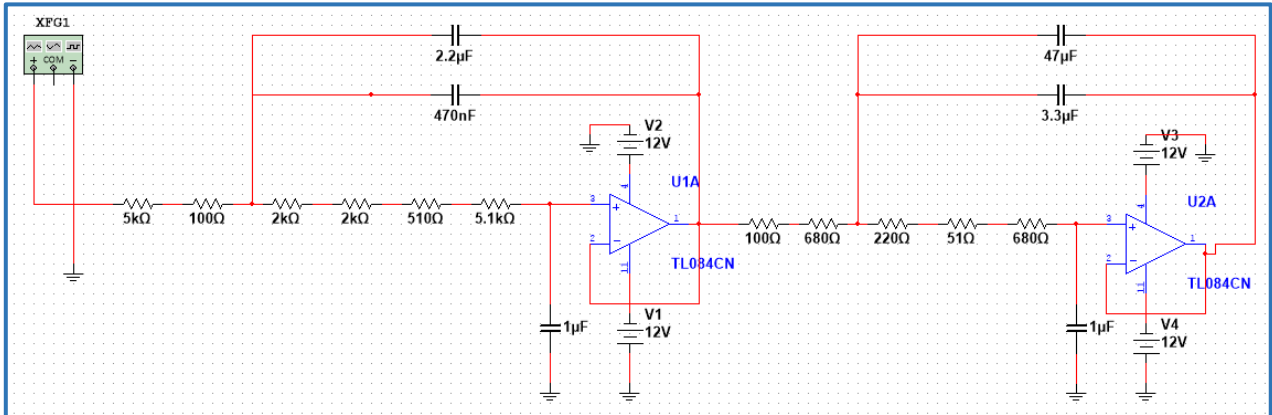


Figura 126. Pasa Bajos de onda Beta rediseñado con valores exactos.

Se realizó, entonces el diseño para PCB, mostrado en la figura 127.

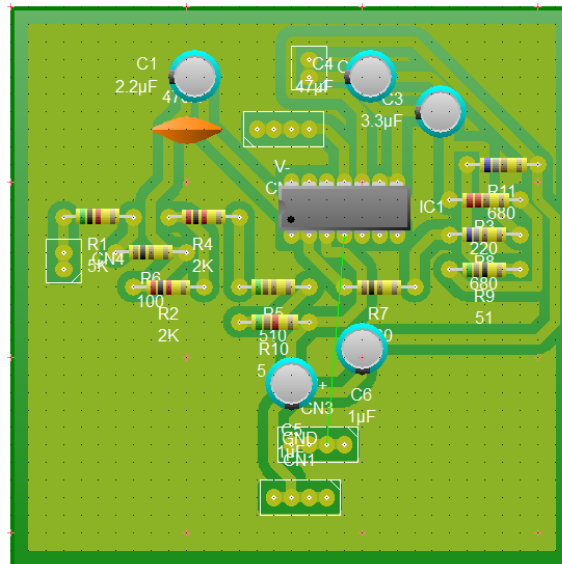


Figura 127. Diseño del componente para impresión en PCB.

Los componentes reemplazados fueron los siguientes:

**Resistencias:**

5,11kΩ -> 5kΩ + 100Ω = 5.1kΩ

9,53kΩ ->

2kΩ + 2kΩ + 510Ω + 5.1kΩ = 9.6kΩ

787Ω -> 100Ω + 680Ω = 780Ω

953Ω -> 220Ω + 51Ω + 680Ω = 951Ω

**Condensadores:**

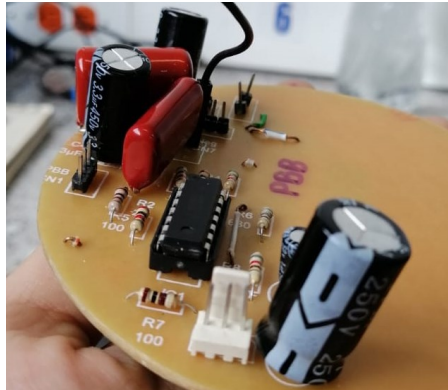
2.2μF -> 2.2μF

3.3 $\mu$ F -> 3.3  $\mu$ F  
47 $\mu$ F -> 47 $\mu$ F

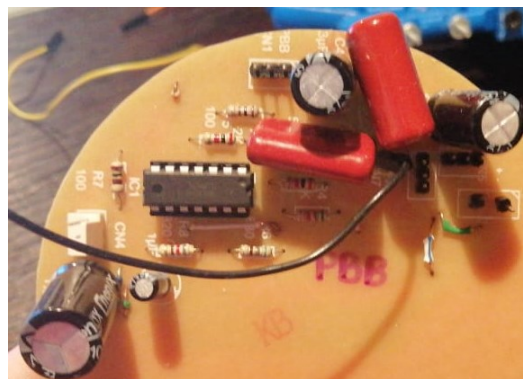
470nF -> 470nF

El listado completo de componentes con sus especificaciones se encuentra en el Anexo 1.

El montaje del circuito, una vez rediseñado, quedó como se muestra en las figuras 128, 129 y 130.



*Figura 128. Filtro pasa bajos de Beta con frecuencia de corte 29Hz.*



*Figura 129. Filtro pasa bajos de Beta con frecuencia de corte 29Hz. Vista superior.*

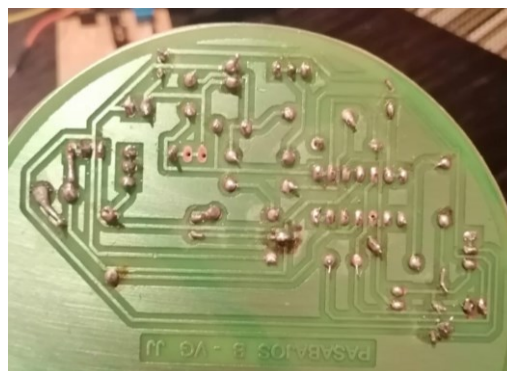


Figura 130. Filtro pasa bajos de Beta con frecuencia de corte 29Hz. Vista inferior.

**e. AC B: Filtro pasa altos con fc de 14Hz.**

El componente AC B fue diseñado como se muestra en la figura 131.

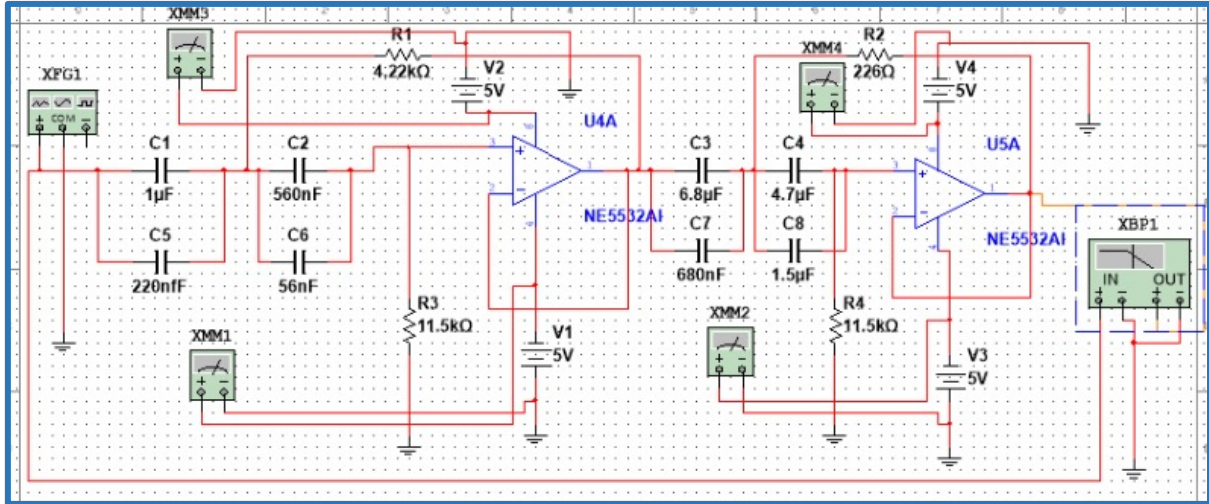


Figura 131. Pasa Altos de onda Beta.

Se puede observar que se tienen resistencias y condensadores de valores no comerciales. Por este motivo, se rediseñó el circuito de la siguiente manera (figura 132) para ser lo más exacto posible.

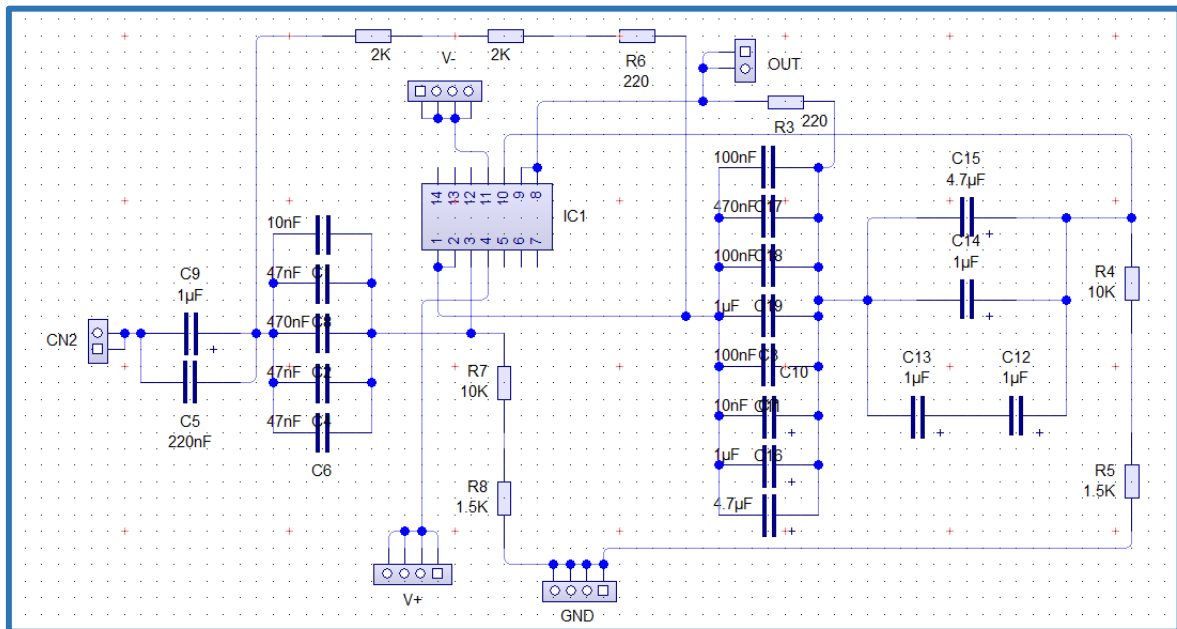


Figura 132. Pasa Altos de onda Beta rediseñado con valores exactos.



Se realizó, entonces el diseño para PCB, mostrado en la figura 133.

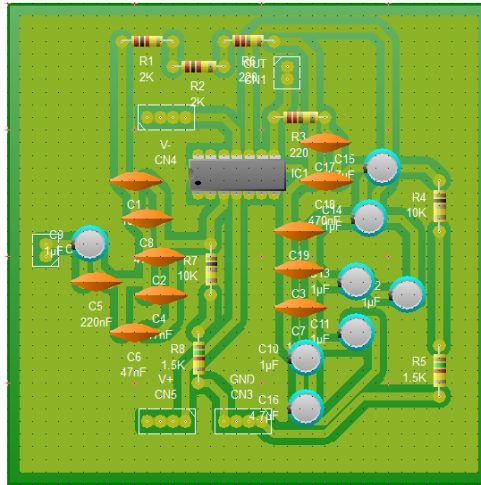


Figura 133. Diseño del componente para impresión en PCB.

Los componentes reemplazados fueron los siguientes:

#### Resistencias:

11,5k $\Omega$  -> 10k $\Omega$  + 1.5 $\Omega$  = 11.5k $\Omega$

11,5k $\Omega$  -> 10k $\Omega$  + 1.5 $\Omega$  = 11.5k $\Omega$

4,22k $\Omega$  -> 2k $\Omega$  + 2k $\Omega$  + 220 $\Omega$  = 4.22k $\Omega$

226 $\Omega$  -> 220 $\Omega$

#### Condensadores:

1 $\mu$ F -> 1 $\mu$ F

220nF -> 220nF

560nF -> 470nF + 47nF + 47nF = 564nF

56nF -> 10nF + 47nF = 57nF

6.8 $\mu$ F -> 1 $\mu$ F + 100nF + 1 $\mu$ F + 4.7 $\mu$ F = 6.8 $\mu$ F

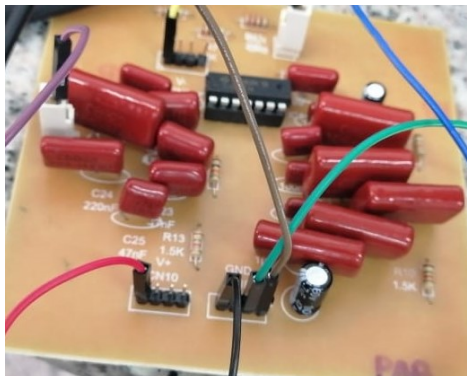
680nF -> 100nF + 470nF + 100nF + 10nF

4.7 $\mu$ F -> 4.7 $\mu$ F

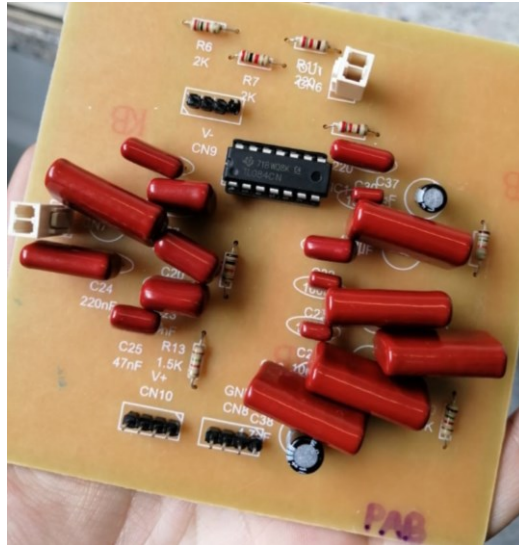
1.5 $\mu$ F -> 1 $\mu$ F + (1 $\mu$ F + 1 $\mu$ F) / 2 = 1.5 $\mu$ F

El listado completo de componentes con sus especificaciones se encuentra en el Anexo 1.

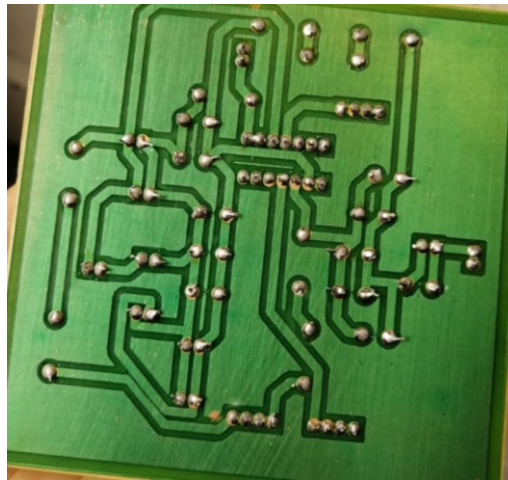
El montaje del circuito, una vez rediseñado, quedó como se muestra en las figuras 134, 135 y 136.



*Figura 134. Filtro pasa altos de Beta con frecuencia de corte 14Hz.*



*Figura 135. Filtro pasa altos de Beta con frecuencia de corte 14Hz. Vista superior.*



*Figura 136. Filtro pasa altos de Beta con frecuencia de corte 14Hz. Vista inferior.*

**f. AD A: Amplificador de ganancia 25.**

El componente AD A, correspondiente a un circuito de amplificación con ganancia 25. Se diseñó e implementó de la misma manera que el componente AD B.

**g. AD B: Amplificador de ganancia 25.**

Los componentes AD A y AD B están conformados de la misma manera. Su diseño es el mostrado en la figura 137.



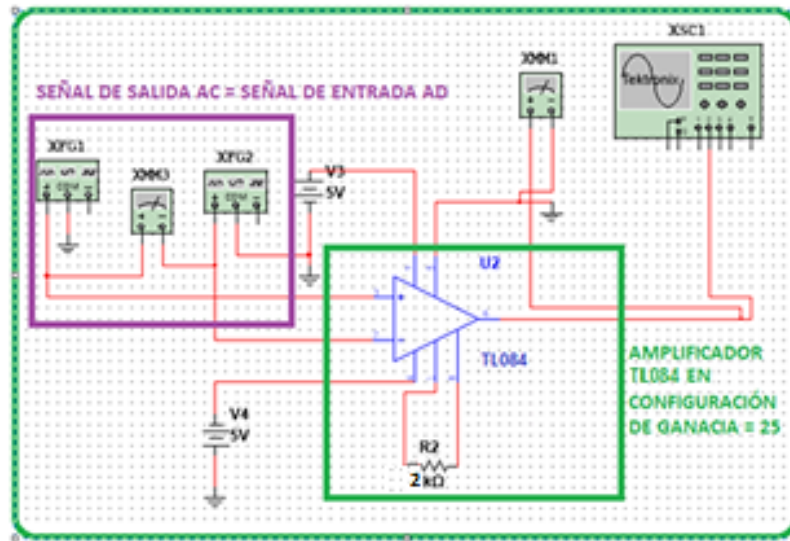


Figura 137. Amplificador con ganancia de 25.

Se realizó, entonces el diseño para PCB, mostrado en la figura 138.

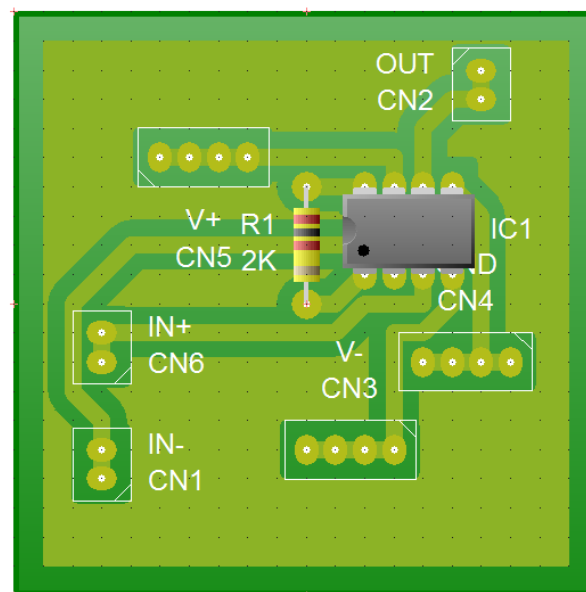


Figura 138. Diseño del componente para impresión en PCB.

Los componentes utilizados fueron los siguientes:

- Resistencia de 2kΩ
- Amplificador de instrumentación AD620

El montaje del circuito quedó como se muestra en las figuras 139 y 140.

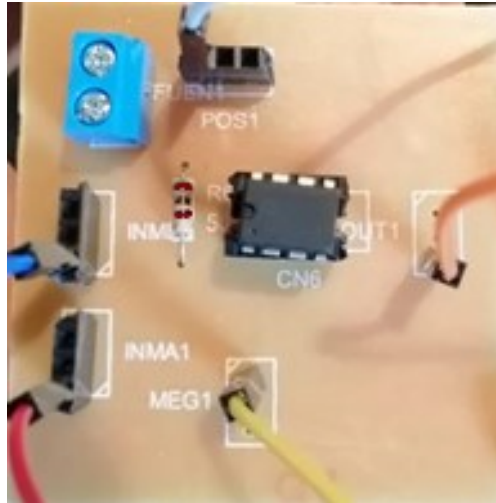


Figura 139. Amplificador con ganancia de 25. Vista superior.

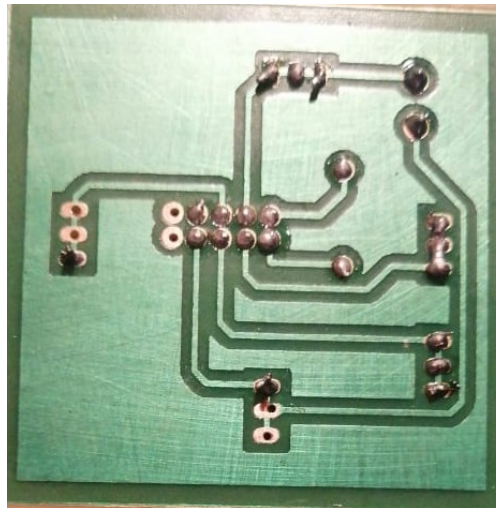


Figura 140. Amplificador con ganancia de 25. Vista inferior.

### 13.1.2 Pruebas

#### Componente AA:

Pre-amplificación. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 45.

Tabla 45. Plan de pruebas del componente AA.

Prueba	Entrada y Salida del componente
Instrumentos	Osciloscopio con generador
Entrada	Señal sinusoidal de 20mVpp.
Salida esperada	Señal sinusoidal de 20Vpp.
Procedimiento	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la amplificación de 1000. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

Las pruebas realizadas a continuación, presentan la verificación del funcionamiento de cada uno de los filtros implementados, en ellas, se trabaja en con señales de 20Vpp, esta señal es una señal previamente amplificada por esta etapa de pre-amplificación con ganancia de 1000. Sin embargo, al momento de realizar las pruebas de los filtros, no se tomaron evidencias del funcionamiento del circuito de amplificación mostrando la entrada y la salida para su verificación. Por motivos de contingencia global debida a la enfermedad por coronavirus (COVID-19), no fue posible realizar una prueba en la que se verifique este funcionamiento del amplificador dado que no se cuenta con ningún equipo que genere voltajes tan pequeños para amplificarlos por 1000 y que otro equipo los pueda medir. Por este motivo, en esta prueba no se tienen las imágenes respectivas, pero si se observan todas las pruebas a continuación, es posible identificar el trabajo con este voltaje de 20Vpp.

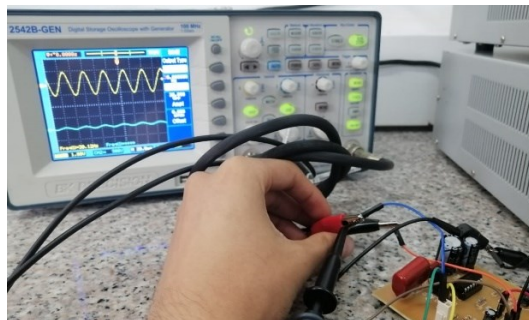
### Componente AB A:

Filtro pasa bajos de Alfa. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 46.

*Tabla 46. Plan de pruebas del componente AB A.*

Prueba	Entrada y Salida del componente
Instrumentos	Osciloscopio con generador
Entrada	Señal sinusoidal de 20Vpp.
Salida esperada	Señal sinusoidal de 20Vpp filtrada en frecuencias menores e iguales a 13Hz.
Procedimiento	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la filtración como filtro pasa bajos en la frecuencia de 13Hz. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

En las figuras 141 y 142 se observa el comportamiento del filtro al aplicarle una señal sinusoidal con frecuencia de 30Hz. Se puede observar que, tal como se espera, el filtro impida que esta señal pase, debido a que su frecuencia es muy superior a los 13Hz.



*Figura 141. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 30Hz.*



Figura 142. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 30Hz.

En las figuras 143 y 144 se observa el comportamiento del filtro al aplicarle una señal sinusoidal con frecuencia de 20Hz. En este caso, se puede observar que la amplitud de la señal sigue siendo muy diferente y esto se debe a que, si bien la frecuencia en este caso no está tan alejada a la frecuencia de corte, es superior a ella y, por lo tanto, esta señal no pasa de manera adecuada. Esto indica un buen funcionamiento del filtro.



Figura 143. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 20Hz.

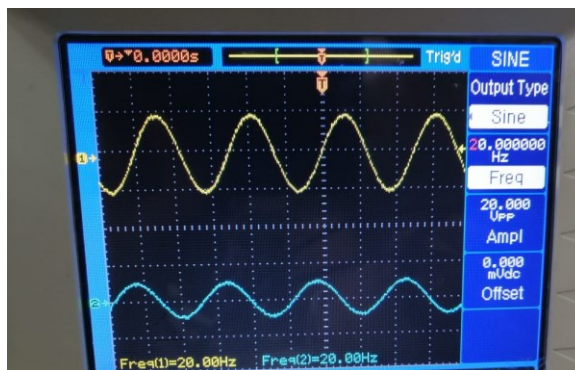


Figura 144. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 20Hz.

Ahora, en las figuras 145 y 146, se muestra el funcionamiento del filtro al recibir una señal sinusoidal con frecuencia de 10Hz. En este caso, se puede observar que la señal pasa completa y de manera adecuada. Esto demuestra un buen funcionamiento del filtro dado que la frecuencia es menor a la frecuencia de corte.



Figura 145. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 10Hz.

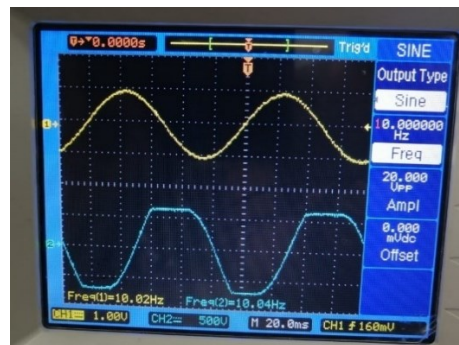


Figura 146. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 10Hz.

En la figura 147 se muestra la respuesta del filtro a una señal sinusoidal con frecuencia de 15Hz. Se puede observar que se permite casi en su totalidad el paso de la señal, esto significa que el filtro está funcionando con un desfase de aproximadamente 2Hz en la frecuencia de corte con la cual se diseñó.

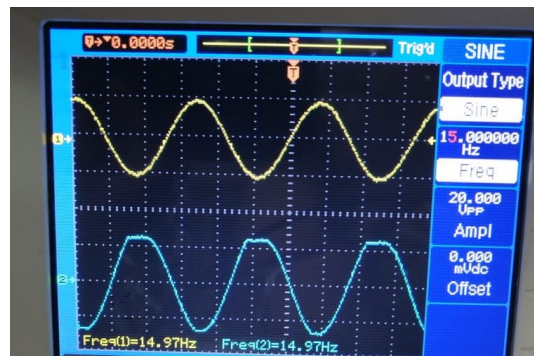


Figura 147. Respuesta del filtro pasa bajos de Alfa al aplicarse una señal sinusoidal con frecuencia de 15Hz.



Es posible evidenciar que el filtro pasa bajos de Alfa tiene un funcionamiento óptimo y cumple con las características y la función para la cual fue diseñado.

### Componente AB B:

Filtro pasa altos de Alfa. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 47.

Tabla 47. Plan de pruebas del componente AB B.

Prueba	Entrada y Salida del componente
Instrumentos	Osciloscopio con generador
Entrada	Señal sinusoidal de 20Vpp.
Salida esperada	Señal sinusoidal de 20Vpp filtrada en frecuencias mayores e iguales a 8Hz.
Procedimiento	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la filtración como filtro pasa altos en la frecuencia de 8Hz. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

En las figuras 148, 149 y 150 se observa el comportamiento del filtro al aplicarle señales sinusoidales con frecuencias de 6Hz y 7Hz. En estas imágenes es posible evidenciar que el filtro impide el paso a estas señales dado que se encuentran en frecuencias inferiores a la frecuencia de corte del filtro y, por lo tanto, al ser un filtro pasa altos, se les debe impedir el paso.

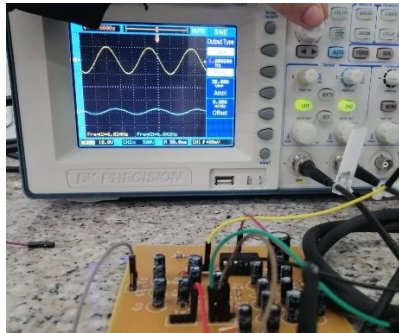


Figura 148. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 6Hz.

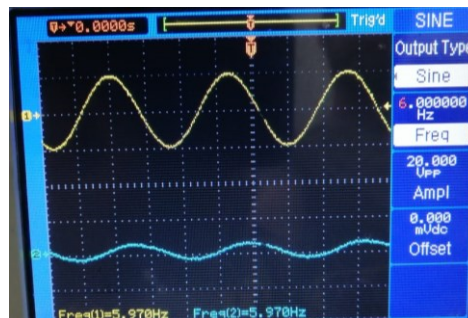


Figura 149. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 6Hz.



Figura 150. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 7Hz.

En las figuras 151, 152, 153 y 154, se muestra la respuesta del filtro a una señal sinusoidal con frecuencias de 12Hz y 9Hz. Al ser estas frecuencias mayores a la frecuencia de corte, el filtro permite su paso, cumpliendo con la función para la cual fue diseñado.

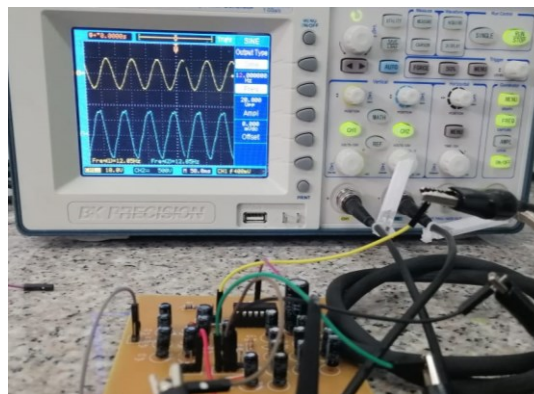


Figura 151. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 12Hz.

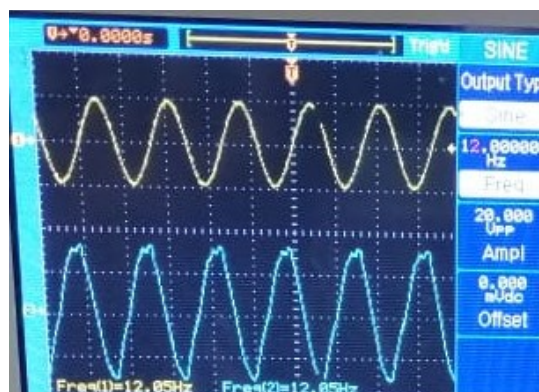


Figura 152. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 12Hz.

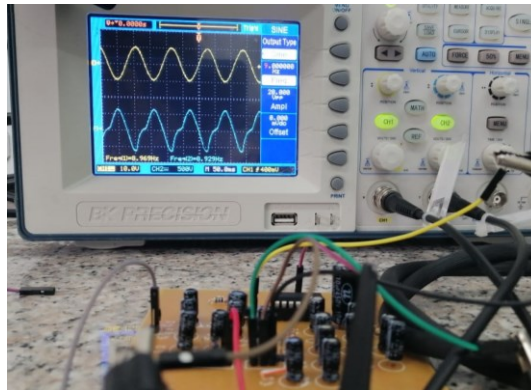


Figura 153. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 9Hz.



Figura 154. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia de 9Hz.

Por último, en las figuras 155 y 156 se observa el funcionamiento del filtro al aplicarse una señal sinusoidal de 8Hz, es decir, igual a la frecuencia de corte. Para este caso el filtro cumple con permitir el paso a la señal.

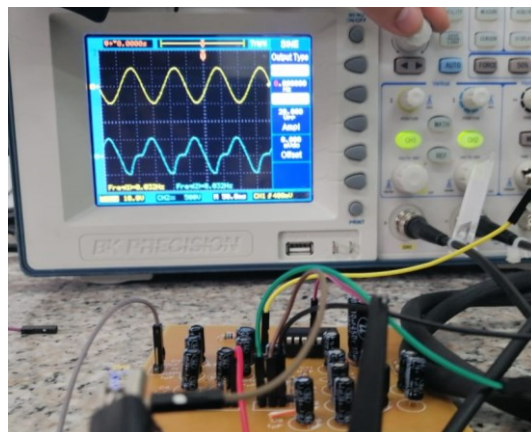




Figura 155. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia igual a la frecuencia de corte.



Figura 156. Respuesta del filtro pasa altos de la onda Alfa, con frecuencia de corte de 8Hz a una señal sinusoidal con frecuencia igual a la frecuencia de corte.

### Componente AC A:

Filtro pasa bajos de Beta. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 48.

Tabla 48. Plan de pruebas del componente ACA.

Prueba	Entrada y Salida del componente
Instrumentos	Osciloscopio con generador
Entrada	Señal sinusoidal de 20Vpp.
Salida esperada	Señal sinusoidal de 20Vpp filtrada en frecuencias menores e iguales a 29Hz.
Procedimiento	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la filtración como filtro pasa bajos en la frecuencia de 29HZ. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

En la figura 157 se observa el comportamiento que tiene el filtro pasabajos de Beta cuando la frecuencia es superior a los 29Hz; la señal amarilla (señal de entrada) corresponde a una señal seno de 34Hz, y la señal azul (señal de salida) muestra una atenuación significativa de la onda al punto en el que la frecuencia obtenida es desconocida, permitiendo observar que el filtro cumple con los requerimientos para los que fue diseñado ya que filtra aquellas señales que están por encima de los 29Hz.

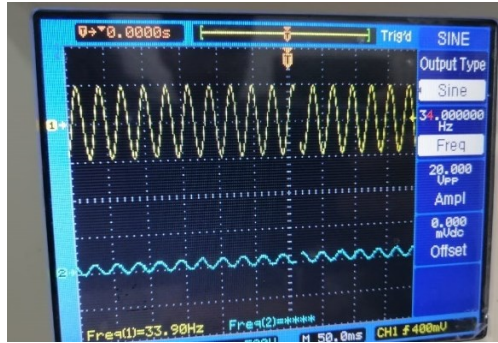


Figura 157. Respuesta del filtro pasa bajos de Beta a frecuencias superiores a la  $f_c$  (29Hz).

En las figuras 158 y 159 se muestra el funcionamiento del filtro pasa bajos ( $f_c$  29 Hz) de la onda Beta para frecuencias inferiores a la  $F_c$ . Se observa detalladamente el comportamiento que tiene para una frecuencia de 14 Hz, en donde la señal amarilla (señal de entrada) corresponde a una señal seno de 14 Hz que simula la frecuencia de la onda Beta, y la señal azul (señal de salida) muestra la misma señal con frecuencia de 14 Hz sin ruido alguno, permitiendo observar que el filtro cumple con los requerimientos para los que fue diseñado ya que deja pasar aquellas señales que están por debajo de los 29 Hz.

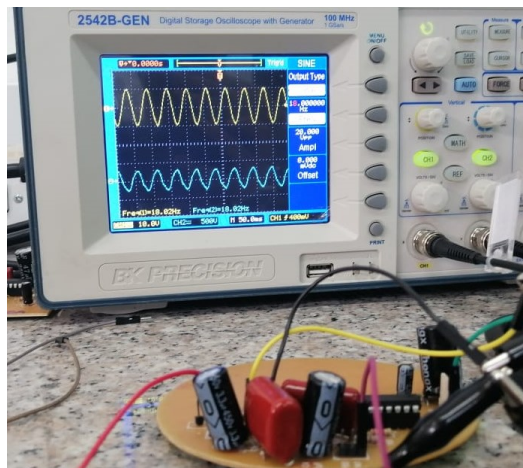


Figura 158. Funcionamiento filtro pasa bajos de Beta ( $F_c$  29Hz).

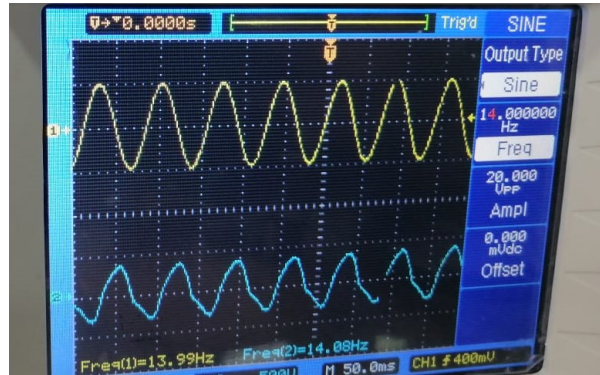


Figura 159. Respuesta del filtro pasa bajos de Beta a frecuencias inferiores a la  $f_c$  (29hz).

En una última prueba realizada al filtro pasa bajos de la onda Beta, en la figura 160 se muestra el funcionamiento de este filtro, y en la figura 161 de manera detallada se observa el comportamiento que tiene para una frecuencia situada justo en la frecuencia de corte, demostrando que esta etapa del subsistema cumple con su requerimiento al empezar a atenuar las señales que se encuentran en frecuencias igual o superiores a 29 Hz.

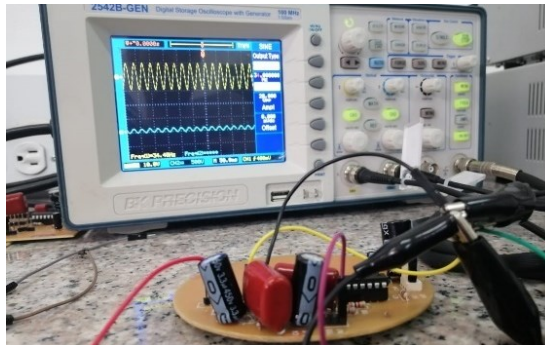


Figura 160. Funcionamiento filtro pasa bajos de Beta ( $f_c$  29hz).

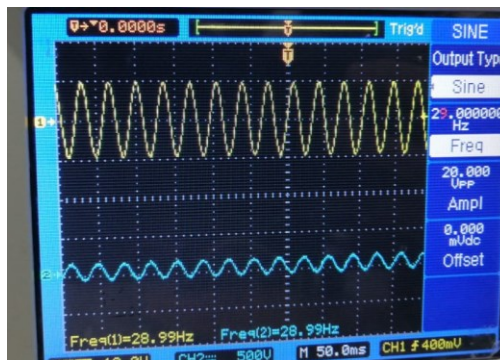


Figura 161. Respuesta del filtro pasa bajos de Beta a frecuencias iguales a la  $f_c$  (29hz).

Las pruebas realizadas demostraron que el sistema funciona de una manera óptima, ya que no hay ruido alguno, y cumple con las características para las que fue diseñado. Estas pruebas se realizaron de acuerdo al plan de pruebas de subsistemas planteado en el capítulo 10.

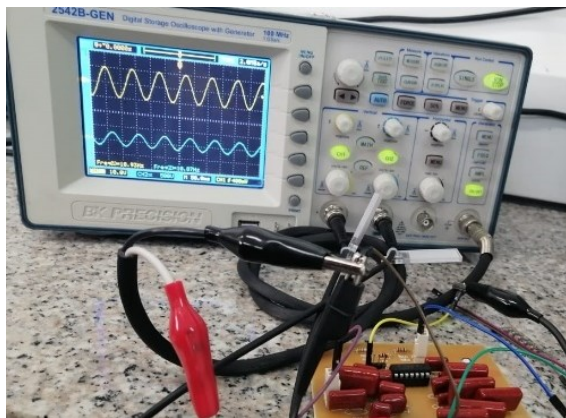
### Componente AC B:

Filtro pasa altos de Beta. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 49.

*Tabla 49. Plan de pruebas del componente AC B.*

Prueba	ENTRADA Y SALIDA DEL COMPONENTE
<b>Instrumentos</b>	Osciloscopio con generador
<b>Entrada</b>	Señal sinusoidal de 20Vpp.
<b>Salida esperada</b>	Señal sinusoidal de 20Vpp filtrada en frecuencias mayores e iguales a 14Hz.
<b>Procedimiento</b>	Se genera una señal y se conecta a la entrada del componente, este debe realizar la filtración como filtro pasa altos en la frecuencia de 14Hz. Se verifica en el osciloscopio conectado a la salida del componente que se esté obteniendo la salida esperada.

En la figura 162 se muestra el funcionamiento del filtro pasa altos de la onda Beta; de una manera más detallada en la figura 163 se observa el comportamiento de este filtro para frecuencias superiores a la frecuencia de corte para la que fue diseñado, en donde la señal de entrada (señal amarilla) corresponde a una onda seno de 24 Hz simulando la frecuencia dentro del rango que se encuentra la onda Beta, y la señal de salida es una onda con 24 Hz, mostrando de esta manera que este filtro cumple con su característica de permitir el paso de aquellas frecuencias que se encuentren por encima de la frecuencia de corte.



*Figura 162. Funcionamiento del filtro pasa altos de Beta con frecuencia de corte en 13 Hz.*



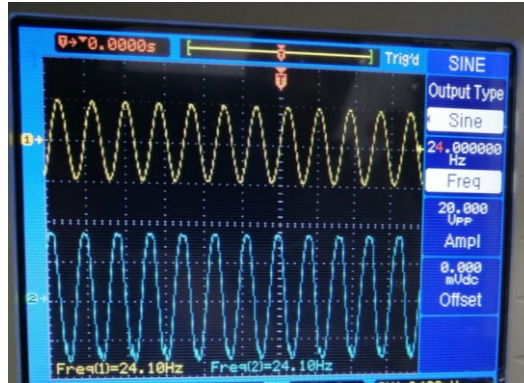


Figura 163. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias superiores a la frecuencia de corte 14Hz.

En la figura 164, 165, 166 y 167 se realiza una prueba al filtro pasa altos para verificar su comportamiento en frecuencias inferiores a la frecuencia de corte del filtro, en donde se observa que a partir de los 13 Hz la señal de salida comienza a atenuarse respecto a la señal de entrada, y este comportamiento es más evidente en frecuencias aún más bajas, cumpliendo de esta manera con requerimiento de impedir el paso de las frecuencias que estén por debajo de los 14 Hz.

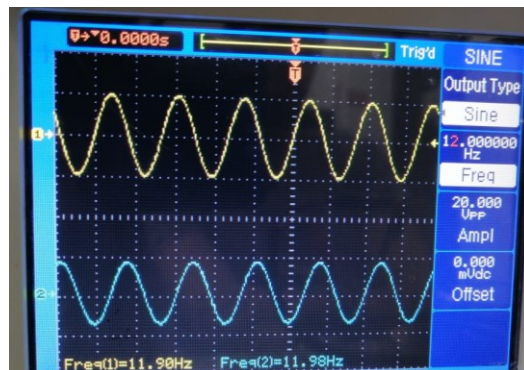


Figura 164. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias inferiores a la frecuencia de corte 14Hz.

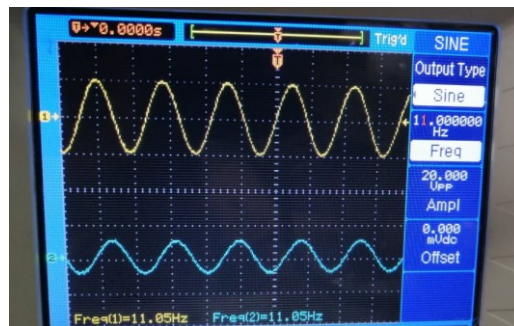


Figura 165. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias inferiores a la frecuencia de corte 14Hz.

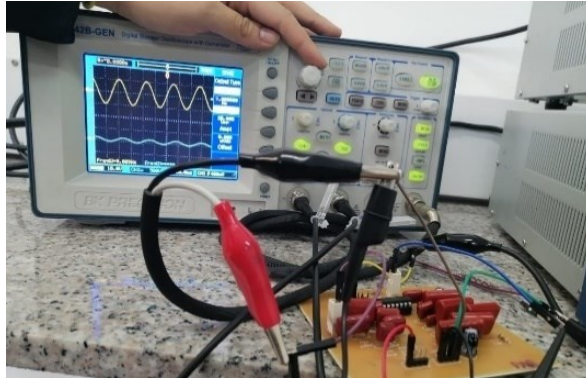


Figura 166. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias inferiores a la frecuencia de corte 14Hz.

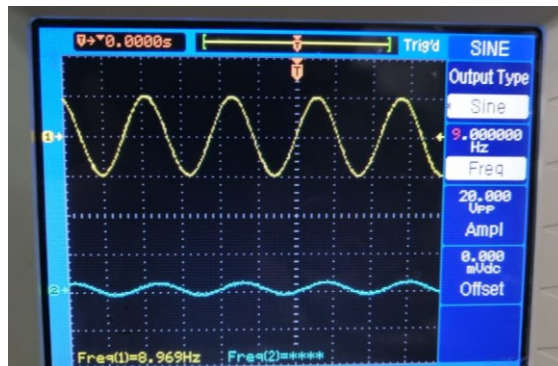


Figura 167. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias inferiores a la frecuencia de corte 14Hz.

Por último, se realizó una prueba para evidenciar el comportamiento del filtro pasa altos de la onda Beta para frecuencias iguales a las frecuencias de corte (figura 168), en dónde se observa que permite el paso de aquellas frecuencias iguales o superiores a los 13 Hz, cumpliendo de esta manera con el requerimiento planteado para la etapa AC B del subsistema A.

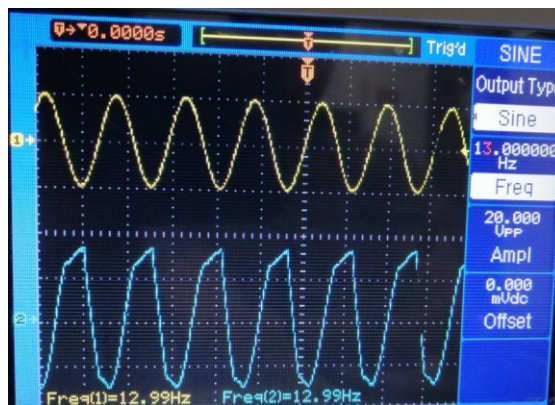


Figura 168. Respuesta del filtro pasa altos de Beta para frecuencias iguales a la frecuencia de corte 14Hz.

De este modo es posible observar que el filtro cumple con la función deseada y realiza en filtrado de las ondas con frecuencias superiores a los 14Hz de manera óptima.

Las imágenes 169 y 170, corresponden a todos los circuitos vistos en conjunto.

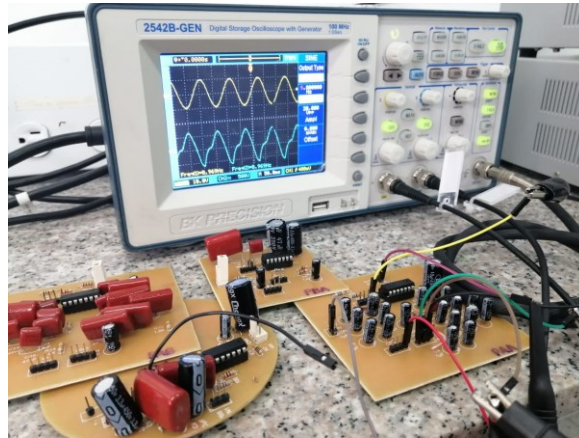
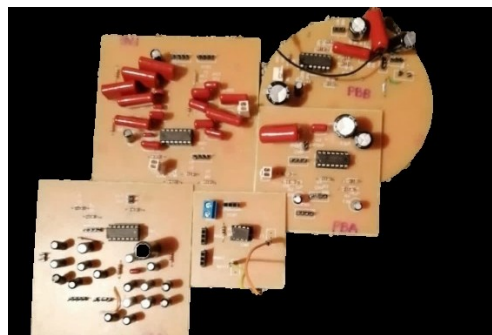
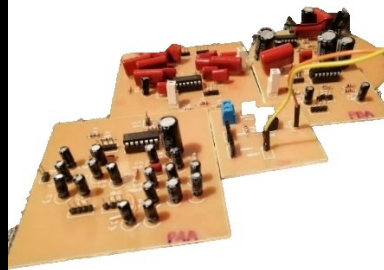


Figura 169. Vista de los 4 filtros. (Las señales en el osciloscopio corresponden a las pruebas del pasa altos de la onda Alfa).



(A)



(B)

Figuras 170 A y B. Vistas de los circuitos.

## 13.2 Subsistema B

Procesamiento y digitalización de las señales adquiridas en el subsistema A.

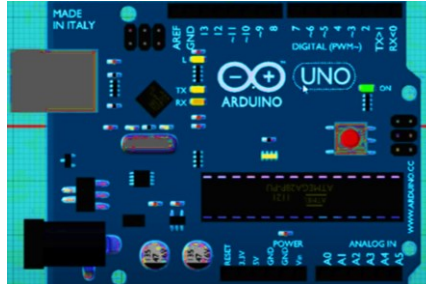
### 13.2.1 Implementación

Al subsistema B lo componen 4 etapas. A continuación, se presenta la implementación de cada una de ellas.

#### a. BA: Digitalización y procesamiento de las señales.

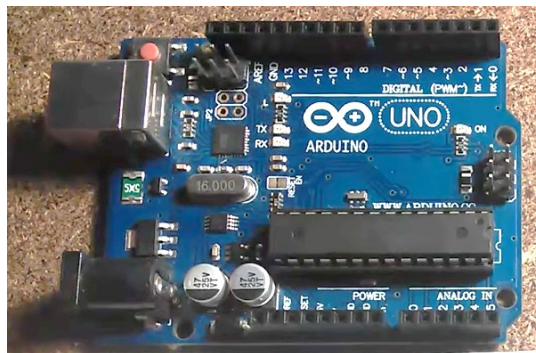
El componente BA se encuentra dividido en dos subetapas, en la que una se encargara de registrar la señal analoga obtenida por el sistema B (BA1) y la otra se encargara de su procesamiento (BA2).

Por lo anterior la implementación del componente de la subetapa BA1 corresponde al mostrado en las figuras 171 y 172.



*Figura 171. Modelo la tarjeta Arduino uno. (Componente BA1).*

En la figura 172 se muestra la tarjeta Arduino uno utilizada como puente entre las señales analógicas obtenidas y la subetapa BA2 que se encargará de su procesamiento.



*Figura 172. Tarjeta Arduino uno. (Componente BA1).*

El componente de la subetapa BA2 que se muestra en la figura 173, se encargará del procesamiento de las señales corresponde a un computador que cumpla con los requisitos mínimos para ejecutar el software de Matlab y Arduino.





Figura 173. Computador para el uso del procesamiento de las señales. (Componente BA2).

### b. BB: Etapa de digitalización.

El componente BB fue diseñado en un *script* implementado en Matlab para la digitalización de las señales, en la figura 174 se muestra cómo se crea la ventana para la señal que se quiere visualizar:

```
%Creo una ventana para la gráfica
figure('Name','Serial communication: Matlab + ');
title('SERIAL COMMUNICATION MATLAB+ARDUINO');
xlabel('Número de muestra');
ylabel('Voltaje (V)');
grid on;
hold on;
```

Figura 174. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab.

Luego se debe configurar los datos que se van a mostrar en la ventana, se crea un bucle *While*, para que realice el muestreo y lo represente en la gráfica (figura 175).

```
%Bucle while para que tome y dibuje las muestras que queremos
while contador_muestras<=numero_muestras
    ylim([0 5.1]);
    xlim([contador_muestras-20 contador_muestras+5]);
    valor_potenciometro=fscanf(puerto_serial,'%d');
    y(contador_muestras)=(valor_potenciometro(1))*5/1024;
    plot(contador_muestras,y(contador_muestras),'X-r');
    drawnow
    contador_muestras=contador_muestras+1;
end
```

Figura 175. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab.

Con *ylim* y *xlim*, es posible dar el rango de valores que se mostrarán en la gráfica. Teniendo en cuenta que por el tipo de señal que se maneja y la ganancia que se la ha

dado las ondas Mu y Beta estas no van a estar por debajo de los 0 Voltios, y tampoco van a subir de 5, de manera que se pueden representar en 0 y 5, y en el eje de las X sucede lo mismo. Se representan 20 muestras anteriores y la actual, dejando un pequeño intervalo de 5 para las que vienen a continuación. El eje X será dinámico e irá en función del número de muestras que se quieren tomar.

```
%Cierro la conexión con el puerto serial y elimino las variables
fclose(puerto_serial);
delete(puerto_serial);
clear all;

end
```

*Figura 176. Estructura del código para la visualización de las señales en Matlab.*

Por último, en la figura 176, de ser necesario, con las últimas tres declaraciones se muestra cómo se cierra conexión con el puerto serial y se eliminan las variables creadas.

El componente BB fue implementado utilizando los siguientes componentes:

- Computador
- Software Matlab

#### **c. BC: Instrucciones de los movimientos de deberá realizar el prototipo.**

Actualmente esta prueba se encuentra en construcción debido la situación actual global del COVID-19. Esta prueba no es posible realizarla ya que es necesario tener una integración del subsistema A y B.

#### **d. BD: Etapa de visualización.**

El componente BD de la etapa de visualización es corresponde a un computador que pueda ejecutar el software de Matlab. (mostrado en la etapa BA).

El componente BD fue implementado utilizando los siguientes componentes:

- Computador
- Software Matlab

### *13.2.2 Pruebas*

#### **Componente de BA1:**

Procesamiento de las ondas Mu (Alfa) y Beta amplificadas. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 50.

Tabla 50. Plan de pruebas del componente BA1.

Prueba	Entrada y Salida del componente
<b>Instrumentos</b>	Microcontrolador Arduino y PC.
<b>Entrada</b>	Señal bioeléctrica entre 0V y 5 V, 8Hz y 30 Hz
<b>Salida esperada</b>	Señal registrada.
<b>Procedimiento</b>	Se conecta la salida del subsistema A, a la entrada analógica del microcontrolador, este servirá como ADC y puente para comunicarse de manera serial con el PC y posteriormente poder verificar el estado de la señal.

En la figura 177 se observa la tarjeta Arduino conectada al pc, la cual está recibiendo señales electroencefalográficas. Se puede observar al sujeto de estudio conectado al dispositivo, y en la pantalla se evidencia el registro de la señal obtenida, en donde cada uno de los picos corresponde a la activación de la onda Alfa en cuanto se abren y cierran los ojos.

Se observa en pantalla que, aunque existe un poco de ruido la prueba realizada es exitosa, ya que el objetivo de esta prueba es verificar que exista un registro en pantalla de una señal analógica bioeléctrica.

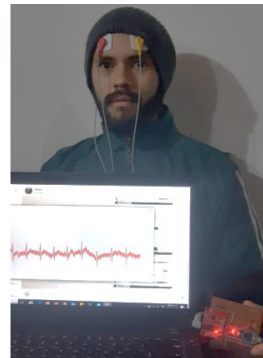


Figura 177. Registro de la señal analógica utilizando Arduino, un computador y Matlab.

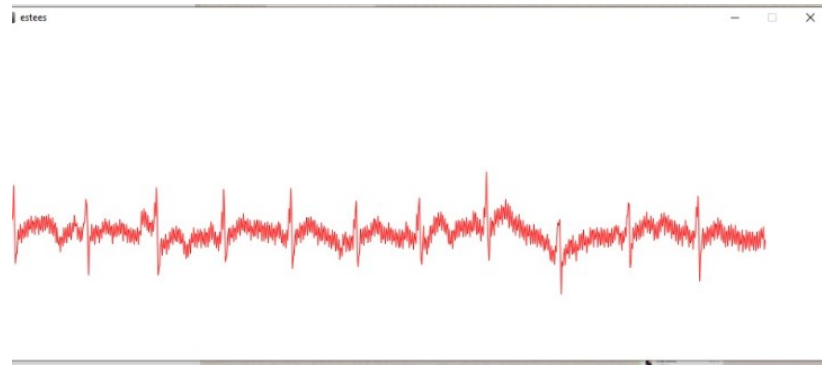
### Componente BA2:

Procesamiento de señales. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 51.

Tabla 51. Plan de pruebas del componente BA2.

Prueba	Entrada y Salida del componente
<b>Instrumentos</b>	PC con procesador.
<b>Entrada</b>	Señal bioeléctrica analógica.
<b>Salida esperada</b>	Señal procesada.
<b>Procedimiento</b>	Se conecta la salida del subsistema A, a la entrada del PC y se verifica que se procese la señal.

En la figura 178 se muestra el resultado de la señal análoga bioeléctrica al ser procesada por el computador, se observa que, a pesar de existir un componente de ruido, es posible realizar el procesamiento de la señal, siendo este el objetivo de la prueba.



*Figura 178. Registro de la señal análoga procesada.*

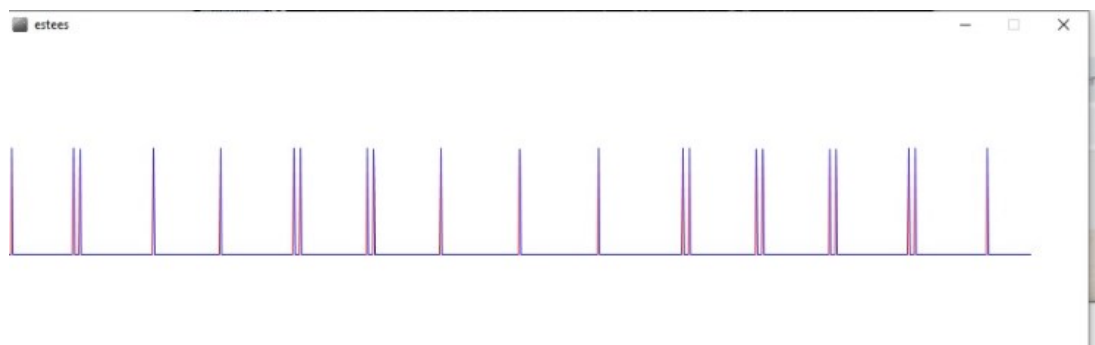
### **Componente BB:**

Etapas de digitalización. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 52.

*Tabla 52. Plan de pruebas del componente BB.*

Prueba	Entrada y Salida del componente
Instrumentos	PC y Matlab.
Entrada	Señal predigitalizada de las ondas Mu y Beta.
Salida esperada	Señal digitalizada de las ondas Mu Beta.
Procedimiento	Se verifica que se tenga la señal de electroencefalografía digitalizada en el PC a través del software Matlab.

En la siguiente figura, se observa la señal análoga obtenida en los componentes anteriores una vez se ha digitalizado a través de la implementación de un *script* en el software de Matlab. Los picos mostrados en la figura 179 corresponden al momento en el que la onda Alfa se activa cuando el sujeto parpadea.



*Figura 179. Registro de la señal análoga digitalizada.*

**Componente BC:**

Instrucciones de los movimientos que deberá realizar el prototipo (bits). Se presenta este plan de pruebas en la tabla 53.

*Tabla 53. Plan de pruebas del componente BC.*

<b>Prueba</b>	<b>Entrada y Salida del componente</b>
<b>Instrumentos</b>	PC.
<b>Entradas</b>	Señal electroencefalográfica amplificada 25000 veces, filtrada entre 8Hz a 14Hz (canal 1) y entre 14Hz a 29Hz (canal 2) y digitalizada. Tarea de Imaginación Motora.
<b>Salida esperada</b>	Instrucciones para el movimiento del prototipo según la Tarea en bits.
<b>Procedimiento</b>	Se conecta al sujeto y se le pide que piense en ciertos movimientos, luego se observa si se están generando las instrucciones correctas en bits según la tarea.

Actualmente esta prueba se encuentra en construcción. Debido la situación actual global del COVID-19, esta prueba no es posible realizarla ya que es necesario tener una integración del subsistema A y B. Los subsistemas se encuentran en ubicados en sitios diferentes.

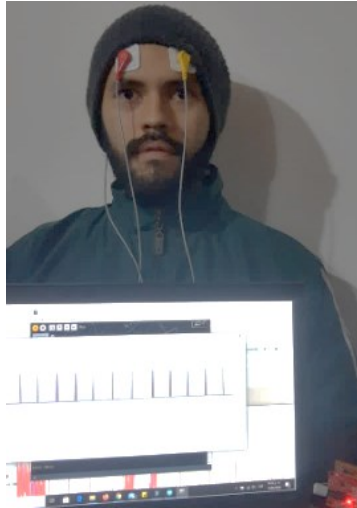
**Componente BD:**

Etapa de visualización. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 54.

*Tabla 54. Plan de pruebas del componente BD.*

<b>Prueba</b>	<b>Entrada y Salida del componente</b>
<b>Instrumentos</b>	PC.
<b>Entrada</b>	Señal sinusoidal analógica de electroencefalografía.
<b>Salida esperada</b>	Visualización de la señal bioeléctrica digitalizada.
<b>Procedimiento</b>	Se verifica en la pantalla del PC que se esté obteniendo la salida esperada.

En la figura 180, se observa la visualización de la señal bioeléctrica digitalizada, se puede evidenciar en la pantalla del equipo que se está obteniendo la salida esperada.



*Figura 180. Registro de la señal análoga digitalizada, visualizada en pantalla.*

### *13.3 Subsistema C*

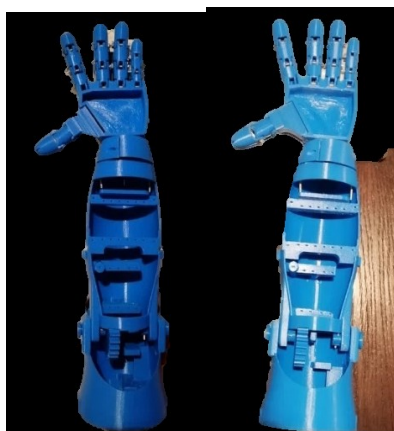
#### *13.3.1 Implementación*

Sistema de control y movimiento del prototipo robótico de extremidad superior derecha.

Para este sistema, se realizó la construcción y el montaje del brazo.

#### **Construcción del brazo.**

A partir de la utilización PLA, se realizó la impresión de cada una de las partes del brazo. Una vez unidas estas partes, se obtuvo el brazo mostrado en la figura 181.

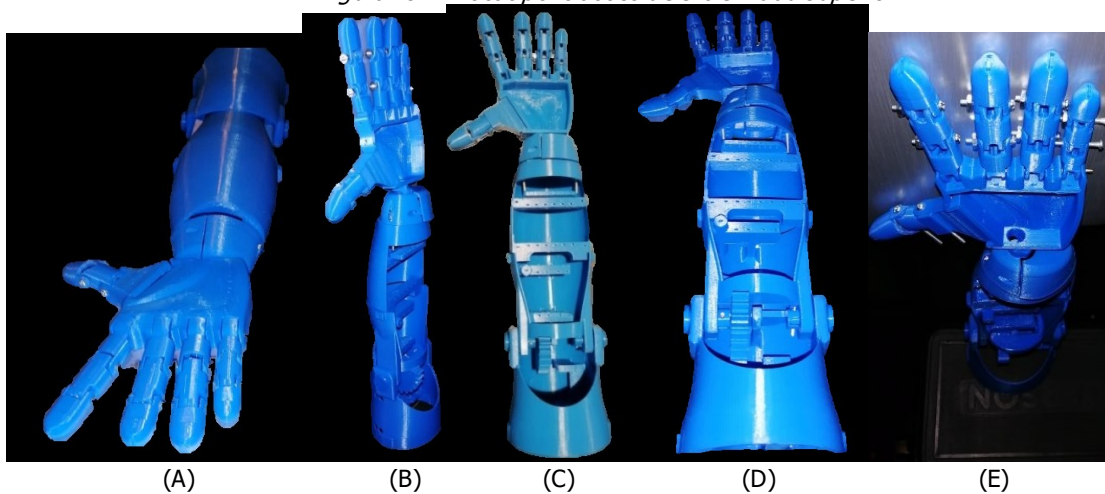


*Figura 181. Prototipo robótico de extremidad superior.*

A continuación, en las figuras 182 y 183, se presentan diferentes vistas del prototipo:



*Figura 182. Prototipo robótico de extremidad superior.*



*Figuras 183 A, B, C, D y E. Prototipo robótico de extremidad superior desde diferentes ángulos.*

Para este subsistema, se realizó también una programación en Arduino, con el fin de probar el movimiento del prototipo. La programación fue la mostrada en la figura 184.

```
SERVO
//PROTOTIPO ROBÓTICO DE EXTREMIDAD SUPERIOR DERECHA PARA
// IMPLEMENTACIÓN DE TAREAS DE IMAGINACIÓN MOTORA

// Incluimos la librería para poder controlar el servo
#include <Servo.h> //Servo library

Servo servo_test;

int angle = 0;

void setup()
{
  servo_test.attach(30);
}

void loop()
{
  for(angle = 0; angle < 180; angle += 1){
    servo_test.write(angle);
    delay(150000);
  };
  for(angle = 180; angle>=1; angle-=5){
    servo_test.write(angle);
    delay(150000);
  }
}
```

*Figura 184. Programa en Arduino para generar movimiento en el motor.*

La figura 185 muestra la conexión del Arduino MEGA con la *protoboard* y la alimentación del sistema.

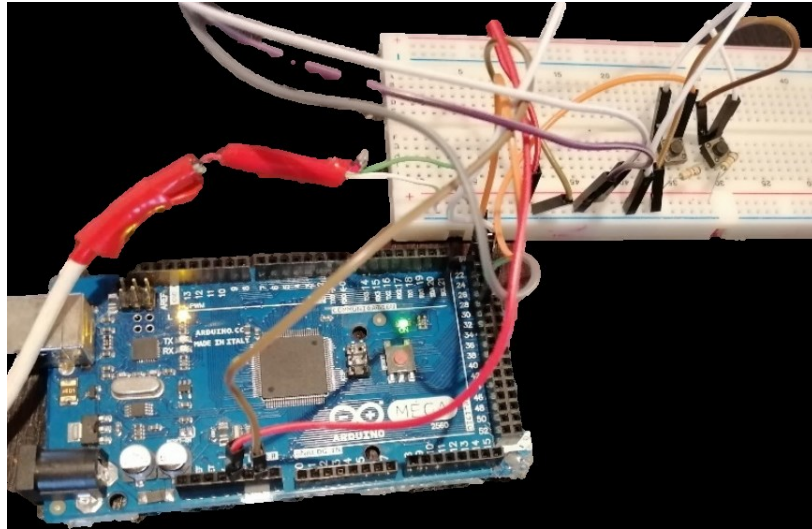


Figura 185. Conexión Arduino con protoboard para generar movimiento en el motor.

### 13.3.2 Pruebas

#### Componente CA:

Transformación de señal en bits a señal de potencia. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 55.

Tabla 55. Plan de pruebas del componente CA.

Prueba	Entrada y Salida del componente
<b>Instrumentos</b>	PC
<b>Entrada</b>	Instrucciones de movimiento en bits.
<b>Salida esperada</b>	Instrucciones de movimiento en modulación por ancho de pulsos (PWM).
<b>Procedimiento</b>	Se verifica que se realice correctamente la transformación de las instrucciones en bits a PWM.

En las figuras 186 y 187 se muestra la prueba de la conexión entre el subsistema B y el subsistema C, en ellas se muestra la conexión entre Matlab y Arduino. El encendido del led representa la correcta conexión. Con estas pruebas se puede comprobar que desde Matlab se proporciona la señal apropiada para generar el movimiento del actuador.



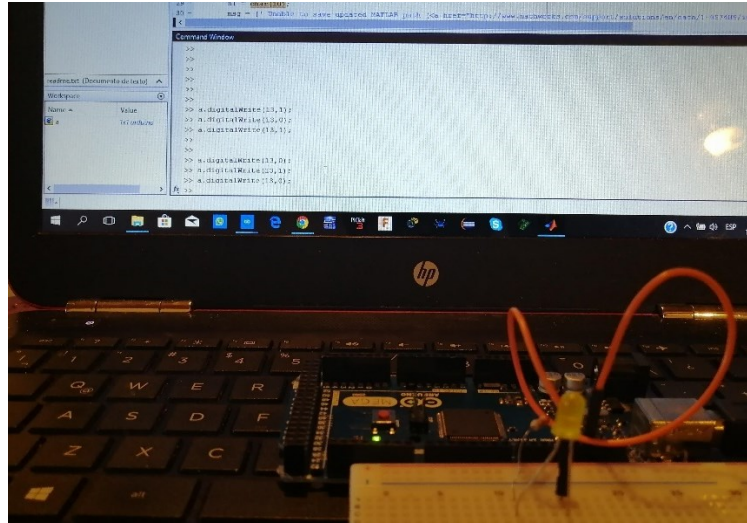


Figura 186. Conexión de Matlab con Arduino y led.

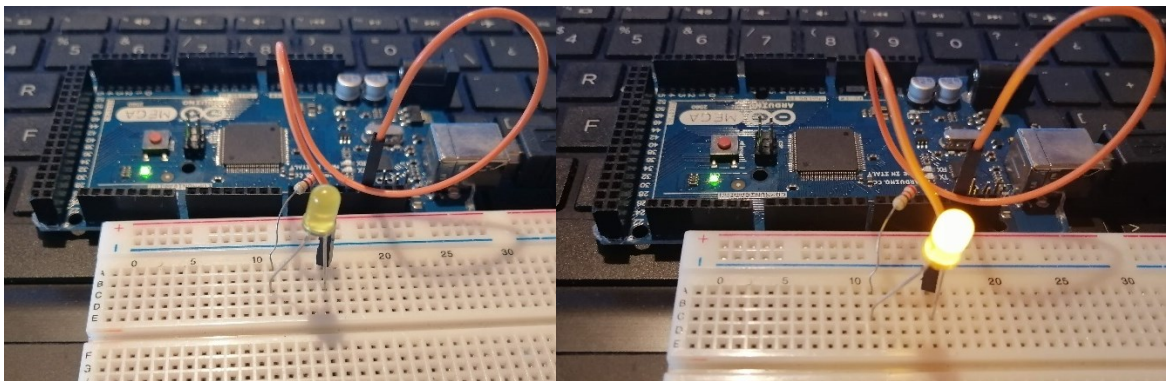
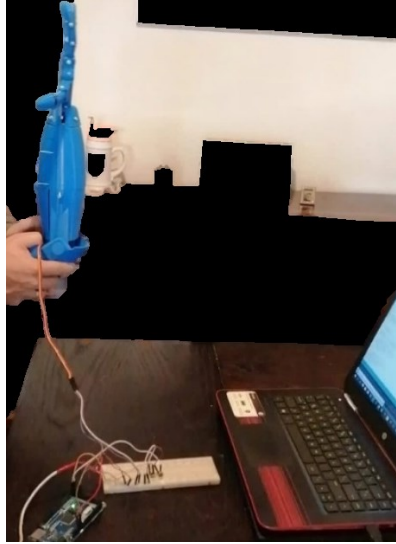
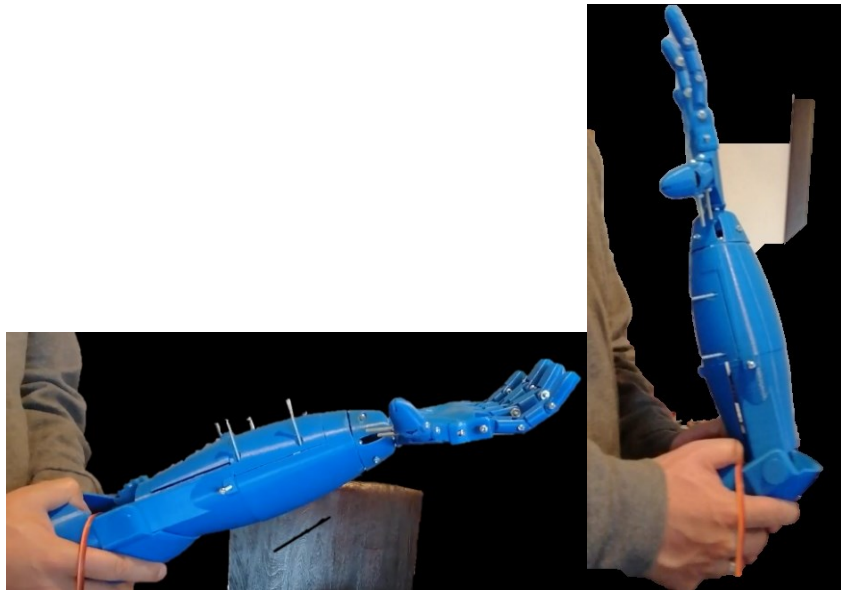


Figura 187. Led apagado y encendido por señal enviada desde Matlab, comprobando la correcta conexión entre este software, Arduino y el led que representa al actuador.

Se presenta, en las figuras 188 y 189, la conexión del computador con el Arduino MEGA, la *protoboard*, la fuente y el motor que se encuentra dentro del prototipo y genera el movimiento.

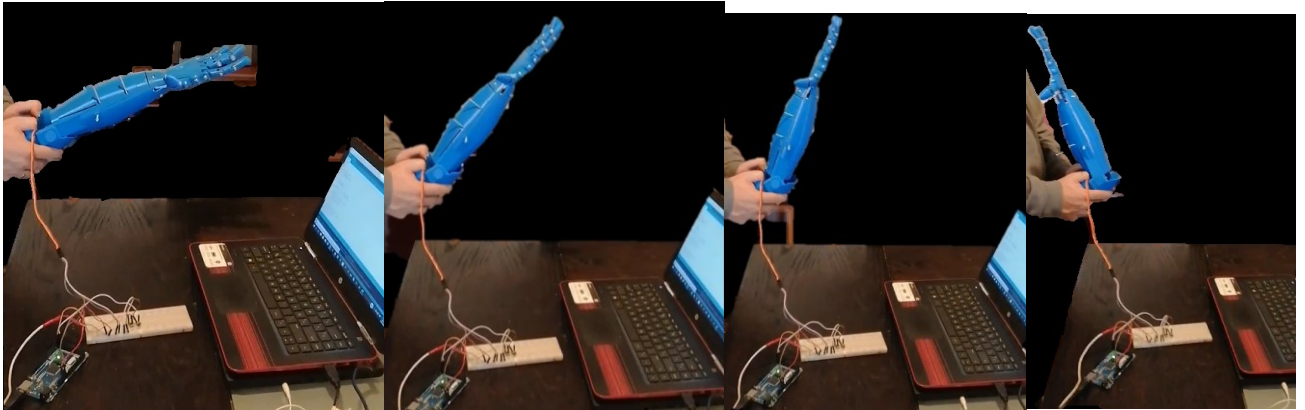


*Figura 188. Conexión Arduino, computador, protoboard y prototipo con motor.*



*Figura 189. Prototipo robótico antes y después de movimiento.*

En la figura 190, se presenta la secuencia de movimiento del prototipo al generarse la señal.



*Figura 190. Conexión Arduino, computador, protoboard y prototipo con motor. Prototipo robótico en movimiento de 0° (izquierda) a 90° (derecha).*

### Componente CB:

Generación de movimiento en el prototipo. Se presenta este plan de pruebas en la tabla 56.

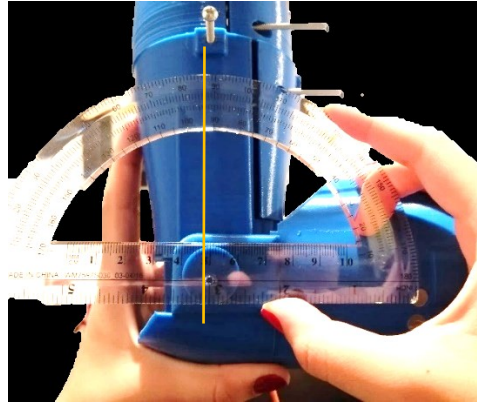
*Tabla 56. Plan de pruebas del componente CB.*

Prueba	Entrada y Salida del componente
Instrumentos	PC, prototipo y transportador.
Entrada	Instrucciones de movimiento en potencia (PWM).
Salida esperada	Giro del actuador en los ángulos esperados según la instrucción.
Procedimiento	Se verifica que el motor esté proporcionando el ángulo de giro esperado según las instrucciones a partir de la medición de los ángulos con un transportador.

Las figuras 191 y 192 muestran el prototipo con giro. Según los requerimientos, el ángulo de giro debe ser de 90° con  $\pm 4,5^\circ$  de tolerancia. Se traza una línea sobre la imagen 189 para observar de manera detallada el ángulo de giro generado.

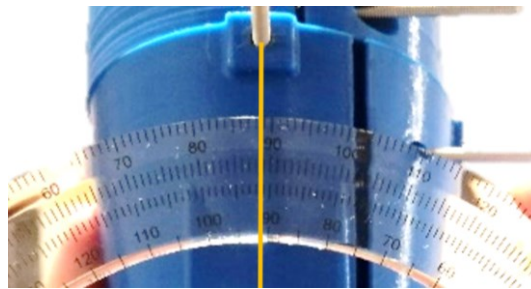


*Figura 191. Prototipo robótico luego de girar la cantidad de ángulos completos. Transportador midiendo los ángulos de giro.*



*Figura 192. Prototipo robótico luego de girar la cantidad de ángulos completos. Transportador midiendo los ángulos de giro. Línea para identificar la cantidad de ángulos girados.*

En la figura 193 se realiza un acercamiento a la figura 192 y se puede ver que se generó un giro de  $88,5^\circ$ , esto se encuentra dentro de la tolerancia esperada de giro.

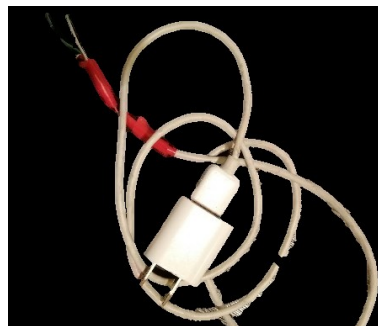


*Figura 193. Conexión Arduino, computador, protoboard y prototipo con motor. Prototipo robótico en movimiento de  $0^\circ$  (izquierda) a  $90^\circ$  (derecha).*

### 13.4 Subsistema X

#### 13.4.1 Implementación

Para realizar las pruebas del subsistema C en casa, se implementó la fuente a partir de un cargador de teléfono celular que entrega 5V (figura 194).



*Figura 194. Cargador utilizado como fuente de voltaje casera.*

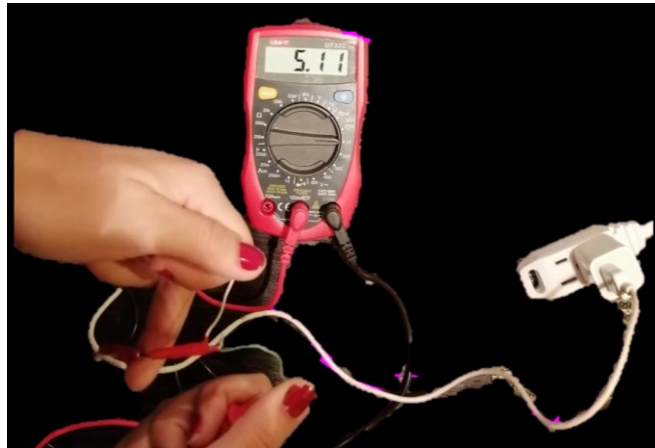
### 13.4.2 Pruebas

En la tabla 57 se presenta el plan de pruebas de este subsistema.

*Tabla 57. Plan de pruebas del subsistema X.*

Prueba	Entrada y Salida del subsistema
Instrumentos	Multímetro.
Procedimiento	Se conecta el multímetro al sistema de alimentación y se espera que se genere el voltaje de 5V.

En la figura 195 se muestra la prueba del subsistema X.



*Figura 195. Prueba de fuente de voltaje con multímetro.*

## 14 INTEGRACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA

Debido a la situación actual que se presenta a nivel mundial por el COVID-19, no es posible realizar la integración y pruebas del sistema, ya que además de la ausencia de los equipos especializados necesarios para realizar este capítulo (osciloscopio, generador, fuentes, equipos de entrenamiento, etc.), los subsistemas que componen la totalidad del sistema se encuentran en ubicaciones diferentes.

## 15 PRUEBAS DEL SISTEMA

Se desarrollan, a continuación, las pruebas establecidas en el capítulo 5.



### 15.1 Prueba 1: Entrada y salida del sistema.

#### Objetivo de la prueba

Comprobar la señal de entrada y de salida del sistema.

Se divide la tabla para mostrar cada requerimiento junto con sus pruebas.

Se presenta la primera prueba del plan de pruebas del sistema de adquisición en la tabla 58.

Tabla 58. Prueba del sistema de adquisición.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El sistema de adquisición de señales Mu y Beta del prototipo robótico de extremidad superior derecha estará diseñado para trabajar con frecuencias entre 8Hz y 29Hz.	Utilizando el generador de señales se genera una señal sinusoidal de 20mvpp. La señal generada se conecta a la entrada del sistema de acondicionamiento de señal. La frecuencia de esta señal sinusoidal se varía, de manera que oscile en frecuencias entre los 2Hz y frecuencias superiores los 29Hz. Se comprueba, a la salida, que el sistema de adquisición permita el paso de la señal en las frecuencias entre 8Hz y 29Hz.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Generador de señales</li> <li>✓ Osciloscopio</li> <li>✓ Fuente de voltaje</li> </ul>

#### Evidencias

Se genera una señal sinusoidal con el generador y se comprueba en el osciloscopio que:

- Se permita el paso de la señal en frecuencias entre 8Hz y 29Hz (figura 196).

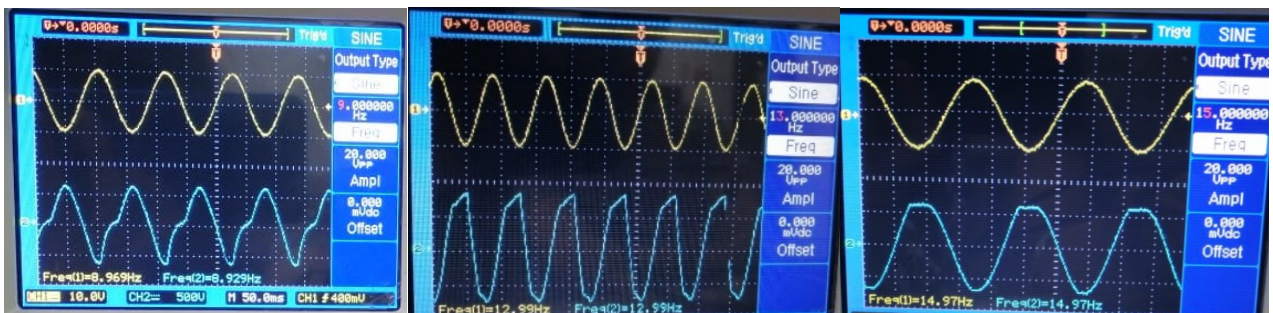


Figura 196. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 9Hz (izquierda), con frecuencia de 13Hz (centro) y con frecuencia de 15Hz (derecha).

- Se niegue el paso de la señal en frecuencias menores a 8Hz y mayores a 29Hz (figura 197).



Figura 197. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 6Hz (izquierda) y con frecuencia de 30Hz (derecha).

Es posible comprobar el cumplimiento de este requerimiento.

Se presenta la segunda prueba del plan de pruebas del sistema de adquisición en la tabla 59.

Tabla 59. Prueba del sistema de adquisición.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El sistema de adquisición de pequeña señal contará con 2 canales (Mu y Beta).	Se verifica que el sistema de adquisición cuente con dos canales, y que estos sean de las señales Mu y Beta, respectivamente. Se deben contar los canales.	✓ Documento

## Evidencias

Se presentan, a continuación, las imágenes de los circuitos de los dos canales.

- Se presentan los circuitos correspondientes al primer canal (Alfa-Mu) (figura 198).

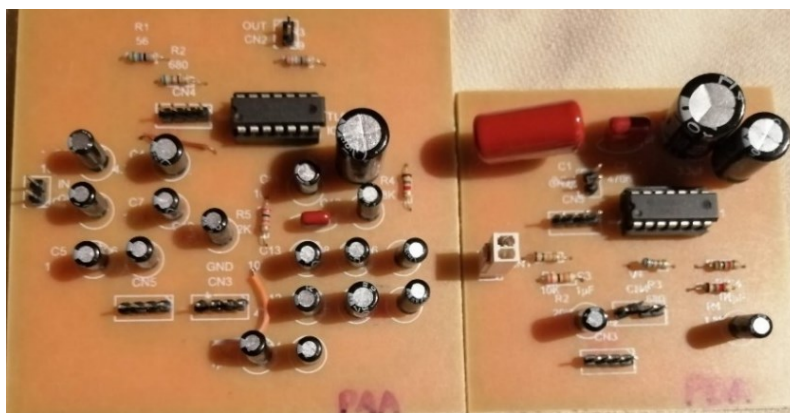
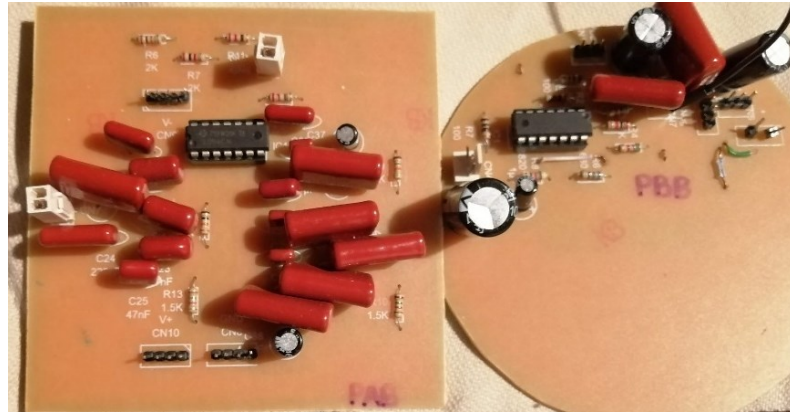


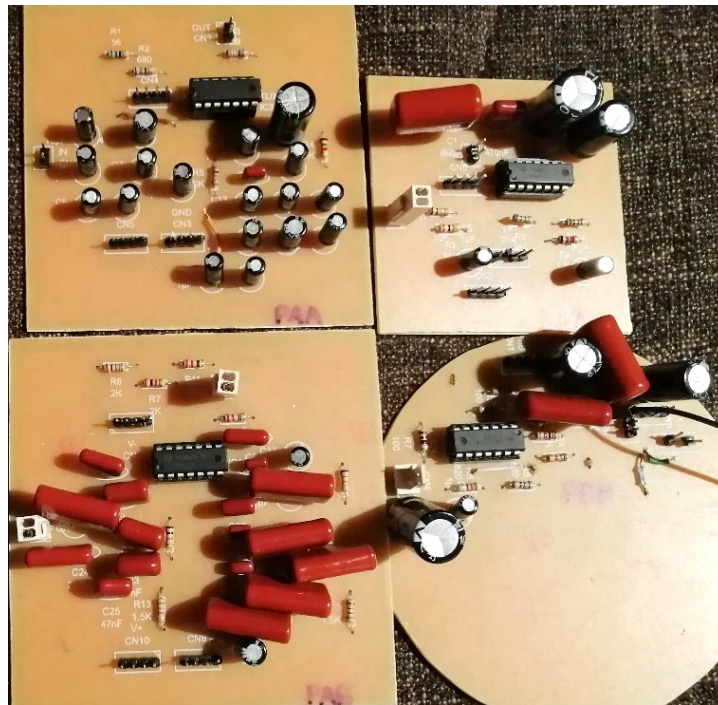
Figura 198. Canal de Alfa. Pasa altos de Alfa seguido de pasa bajos de Alfa. Vista superior del canal.

- Se presentan los circuitos correspondientes al segundo canal (Beta) (figura 199).



*Figura 199. Canal de Beta. Pasa altos de Beta seguido de pasa bajos de Beta. Vista superior del canal.*

- Se presentan los circuitos de ambos canales (figura 200).



*Figura 200. Dos canales. Canal de Alfa arriba y canal de Beta abajo.*

Es posible comprobar el cumplimiento de este requerimiento.

Se presenta la tercera prueba del plan de pruebas del sistema de adquisición en la tabla

60.



Tabla 60. Prueba del sistema de adquisición.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El sistema de adquisición de pequeña señal entregará, en un canal (Mu), señales filtradas entre 8Hz y 13Hz.	Utilizando el generador de señales se genera una señal sinusoidal de 20mvpp. La señal generada se conecta a la entrada del sistema de acondicionamiento de señal. La frecuencia de esta señal sinusoidal se varía, de manera que oscile en frecuencias entre los 2Hz y frecuencias superiores los 29Hz. Se comprueba, a la salida, que el sistema de adquisición permita únicamente el paso de la señal en las frecuencias entre 14Hz y 29Hz.	✓ Generador de señales ✓ Osciloscopio ✓ Fuente de voltaje

### Evidencias

Se genera una señal sinusoidal con el generador y se comprueba en el osciloscopio que:

- Se permita el paso de la señal en frecuencias entre 8Hz y 13Hz (figura 201).

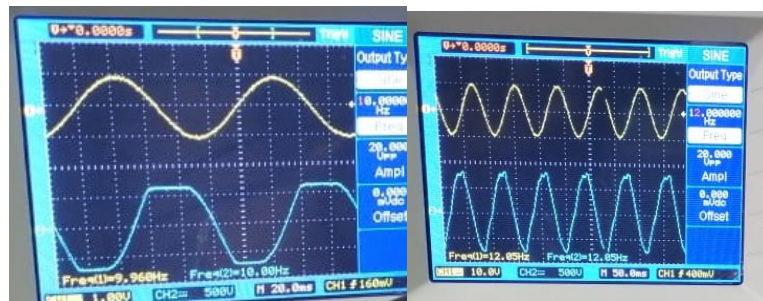


Figura 201. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 10Hz (izquierda) y con frecuencia de 12Hz (derecha).

- Se niegue el paso de la señal en frecuencias menores a 8Hz y mayores a 13Hz (figura 202).



Figura 202. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 6Hz (izquierda) y con frecuencia de 30Hz (derecha).

Es posible comprobar el cumplimiento de este requerimiento.

Se presenta la cuarta prueba del plan de pruebas del sistema de adquisición en la tabla

Tabla 61. Prueba del sistema de adquisición.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El sistema de adquisición de pequeña señal entregará, en un canal (Beta), señales filtradas entre 14Hz y 29Hz.	Se genera una señal sinusoidal como entrada del sistema de adquisición. La frecuencia de esta señal se varía. Se comprueba, a la salida, que permita el paso de la señal en las frecuencias entre 14Hz y 29Hz.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Generador de señales</li> <li>✓ Osciloscopio</li> <li>✓ Fuente de voltaje</li> </ul>

## Evidencias

Se genera una señal sinusoidal con el generador y se comprueba en el osciloscopio que:

- Se permita el paso de la señal en frecuencias entre 14Hz y 29Hz (figura 203).

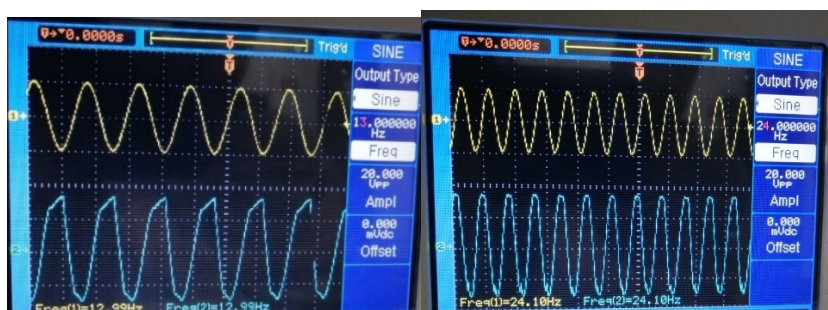


Figura 203. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 13Hz (izquierda) y con frecuencia de 24Hz (derecha).

- Se niega el paso de la señal en frecuencias menores a 14Hz y mayores a 29Hz (figura 204).

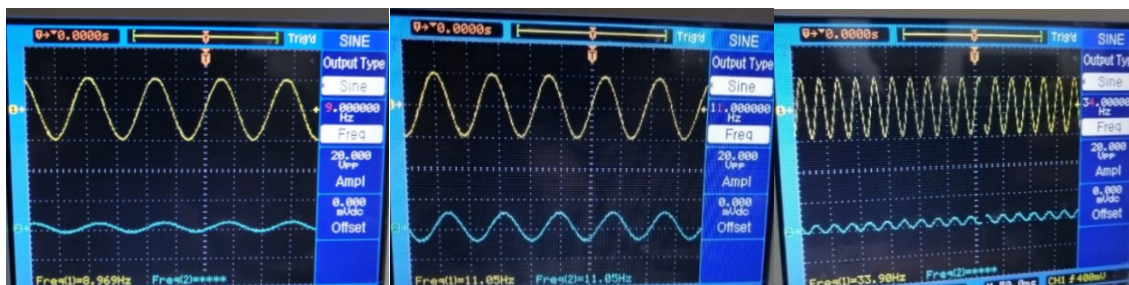


Figura 204. Prueba con una señal sinusoidal con frecuencia de 9Hz (izquierda), frecuencia de 11Hz (centro) y con frecuencia de 34Hz (derecha).

Es posible comprobar el cumplimiento de este requerimiento.

Se presenta la quinta prueba del plan de pruebas del sistema de adquisición en la tabla

62.

Tabla 62. Prueba del sistema de adquisición.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El sistema recibirá señales de electroencefalografía que serán procesadas por un circuito amplificador de pequeña señal que contará con etapas de adquisición, filtrado, amplificación y aplicación de las señales de Imaginación Motora.	Se realiza la conexión del sujeto en estudio al sistema de adquisición y se verifica que se reciba la señal y esa se amplifique y filtre correctamente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Electrodos</li> <li>✓ Cables para electrodos</li> <li>✓ Sujeto entrenado</li> <li>✓ Osciloscopio</li> <li>✓ Fuente de voltaje</li> </ul>

### Evidencias

En este momento, siendo abril de 2020, se está presentando en el mundo un brote de enfermedad por coronavirus (COVID-19), por este motivo, los colombianos se encuentran en cuarentena protegiendo la salud de todos. Esto hace que no sea posible realizar la presente prueba, dado que es necesario realizar la unión de 3 subsistemas (A, B y X) y estos se encuentran en lugares diferentes de la ciudad.

Se presenta la sexta prueba del plan de pruebas del sistema de adquisición en la tabla 63.

Tabla 63. Prueba del sistema de adquisición.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El sujeto de estudio hará que el prototipo robótico de extremidad superior derecha realice movimientos a partir de la tarea. En caso de no realizar los movimientos, el entrenamiento o la tarea no habrá sido correctamente implementada.	El sujeto deberá pensar en un movimiento en específico según la tarea, y el prototipo robótico deberá realizar el movimiento esperado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Electrodos</li> <li>✓ Cables para electrodos</li> <li>✓ Sujeto entrenado</li> <li>✓ Prototipo robótico de extremidad superior derecha</li> </ul>

### Evidencias

Debido a la situación actual que se presenta en el país y en el mundo, no es posible llevar a cabo esta prueba, dado que es necesario contar con los subsistemas unidos, teniendo el sistema completo. En este momento se tienen los subsistemas en lugares separados y, por seguridad y salud, no es posible reunir los subsistemas y realizar esta prueba.

## 15.2 Prueba 2: Software.

### Objetivo de la prueba

Comprobar el funcionamiento del software.

Se divide la tabla para mostrar cada requerimiento junto con sus pruebas.

Se presenta la primera prueba del plan de pruebas de software en la tabla 64.

Tabla 64. Prueba del software.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El software de procesamiento deberá realizar una lectura de las señales electroencefalográficas previamente adquiridas.	Se comprueba que el software permita obtener una lectura de las señales electroencefalográficas previamente adquiridas en el sistema de acondicionador pequeña señal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Computador</li> <li>✓ Tarjeta Arduino</li> <li>✓ Señales bioeléctricas</li> <li>✓ Matlab</li> <li>✓ Arduino</li> </ul>

### Evidencias

En la figura 205 se observa la tarjeta Arduino conectada al pc, la cual está recibiendo señales electroencefalográficas. Se puede observar al sujeto de estudio conectado al dispositivo, y en la pantalla se evidencia el registro de la señal obtenida, en donde cada uno de los picos corresponde a la activación de la onda Alfa en cuanto se abren y cierran los ojos.

Se observa en pantalla que, aunque existe un poco de ruido la prueba realizada es exitosa, ya que el objetivo de esta prueba es verificar que exista un registro en pantalla de una señal análoga bioeléctrica.

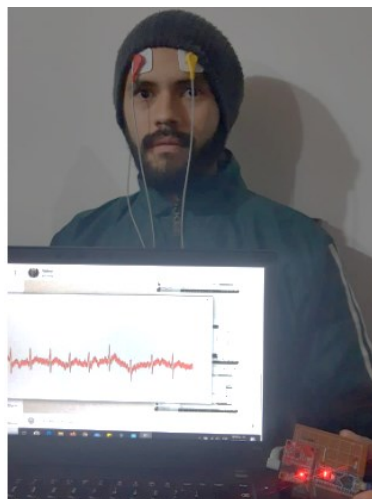


Figura 205. Registro de la señal análoga utilizando Arduino, un computador y Matlab.

Se puede verificar el cumplimiento del requerimiento.

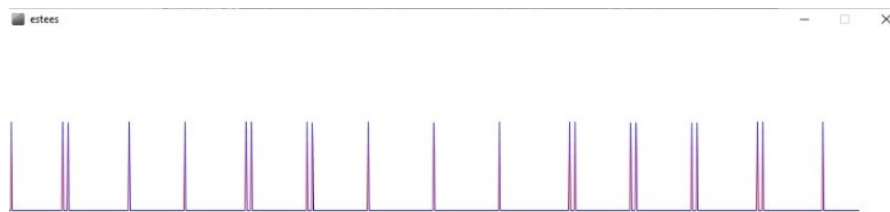
Se presenta la segunda prueba del plan de pruebas de software en la tabla 65.

*Tabla 65. Prueba del software.*

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El software de procesamiento deberá visualizar las señales adquiridas.	Se comprueba que el software de procesamiento permita visualizar las señales adquiridas por el sistema de acondicionador.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Matlab</li> <li>✓ Arduino</li> <li>✓ Computador</li> <li>✓ Tarjeta Arduino</li> <li>✓ Señales bioeléctricas</li> </ul>

### Evidencias

En la siguiente figura, se observa la señal analógica obtenida en los componentes anteriores una vez se ha digitalizado a través de la implementación de un *script* en el software de Matlab. Los picos mostrados en la figura 206, corresponden al momento en el que la onda Alfa se activa cuando el sujeto parpadea.



*Figura 206. Registro de la señal analógica digitalizada.*

Se puede verificar el cumplimiento del requerimiento.

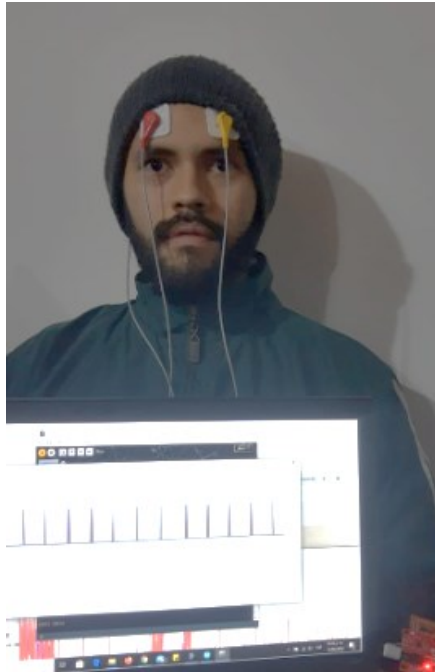
Se presenta la tercera prueba del plan de pruebas de software en la tabla 66.

*Tabla 66. Prueba del software.*

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El software del sistema permitirá enviar las señales de control de los movimientos del prototipo robótico de extremidad superior derecha.	<p>El software deberá junto a su respectiva tarjeta, deberá funcionar como ADC y digitalizar las señales obtenidas para su uso en el sistema de control.</p> <p>Se comprueba que el software utilizado envíe a la salida las señales correspondientes para generar los movimientos del prototipo según la tarea.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Computador</li> <li>✓ Matlab</li> <li>✓ Arduino</li> <li>✓ Tarjeta Arduino MEGA</li> <li>✓ Servomotor MG996R</li> <li>✓ Fuente de voltaje</li> </ul>

## Evidencias

En la figura 207, se observa la visualización de la señal bioeléctrica digitalizada, se puede evidenciar en la pantalla del equipo que se está obteniendo la salida esperada.



*Figura 207. Registro de la señal análoga digitalizada, visualizada en pantalla.*

Se puede comprobar el cumplimiento del requerimiento.

### 15.3 Prueba 3: Periférico mecánico.

#### Objetivo de la prueba

Comprobar el funcionamiento del prototipo robótico de extremidad superior derecha.

Se divide la tabla para mostrar cada requerimiento junto con sus pruebas.

Se presenta la primera prueba del plan de pruebas del periférico mecánico en la tabla 67.

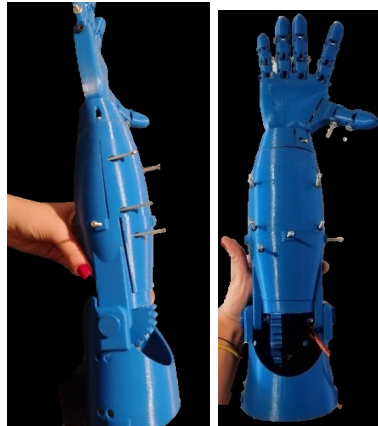
*Tabla 67. Prueba del periférico mecánico.*

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá 1 grado de libertad.	Se comprueba que el prototipo tenga movimiento en al menos un eje.	✓ Prototipo robótico ✓ Fuente de voltaje



**Evidencias**

- Se comprueba que el prototipo tenga 1 grado de libertad (figuras 208, 209 y 210).



*Figura 208. Prototipo estirado. Vista lateral (izquierda), vista frontal (derecha).*



*Figura 209. Prototipo durante la generación de movimiento. Vista lateral.*



*Figura 210. Engranajes de la articulación del codo unidas al servomotor para generar el movimiento del prototipo. Articulación antes de girar (izquierda), articulación después de girar (derecha).*

Se valida el cumplimiento de este requerimiento con las figuras 208, 209 y 210.

Se presenta la segunda prueba del plan de pruebas del periférico mecánico en la tabla

Tabla 68. Prueba del periférico mecánico.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá una articulación, correspondiente a la articulación del codo.	Se comprueba que el movimiento del prototipo se realice en la articulación correspondiente al codo.	✓ Prototipo robótico ✓ Fuente de voltaje

### Evidencias

- Se comprueba que el movimiento del prototipo se realice en la articulación correspondiente al codo (figura 211).



Figura 211. Prototipo de extremidad superior derecha estirado (izquierda), flexionado a aproximadamente 45° en la articulación del codo (centro) y flexionado a 90° en la articulación del codo (izquierda).

Es posible comprobar que la articulación móvil corresponde a la articulación del codo, al ser una representación de un brazo humano.

Se presenta la tercera prueba del plan de pruebas del periférico mecánico en la tabla 69.

Tabla 69. Prueba del periférico mecánico.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El codo del prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá movimiento en el plano sagital de 0° a 90°.	Se comprueba que el prototipo tenga un giro en el plano sagital del codo de 90°.	✓ Prototipo robótico ✓ Fuente de voltaje ✓ Transportador

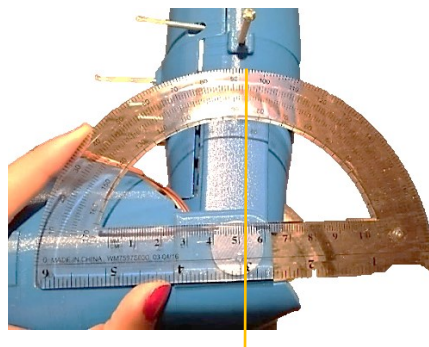


### Evidencias

- Se muestra el prototipo después del movimiento. Se comprueba con un transportador la cantidad de grados de giro del prototipo (figuras 212 y 213).

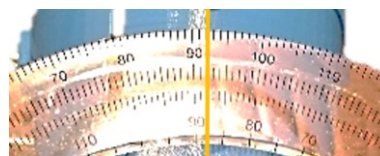


*Figura 212. Prototipo de extremidad superior derecha flexionado y transportador para medir el ángulo de giro.*



*Figura 213. Prototipo robótico luego de girar la cantidad de ángulos completos. Transportador midiendo los ángulos de giro. Línea para identificar la cantidad de ángulos girados.*

En la figura 214, se presenta un acercamiento de la figura 213. Esto con el fin de observar de manera detallada los grados de giro.



*Figura 214. Acercamiento del prototipo y el transportador con la cantidad de grados de giro.*

Es posible comprobar que el prototipo cumple con el requerimiento de tener 90° de giro. Cumple con el requerimiento que le da una tolerancia de 4,5°.

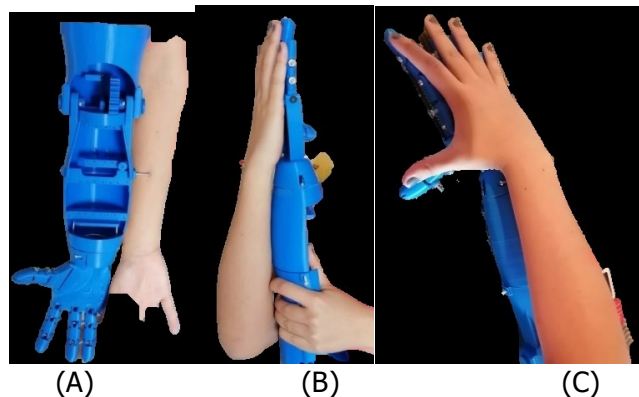
Se presenta la cuarta prueba del plan de pruebas del periférico mecánico en la tabla 70.

Tabla 70. Prueba del periférico mecánico.

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El prototipo tendrá la longitud de un brazo humano de una mujer adulta promedio.	Se comprueba que el prototipo tenga la longitud de un brazo humano de una mujer adulta promedio.	✓ Prototipo robótico ✓ Mujer adulta promedio

### Evidencias

- Se comprueba que el prototipo tenga el tamaño de un brazo humano de una mujer adulta promedio. Se comprueba el tamaño del antebrazo y de la mano (figuras 215 a 218).



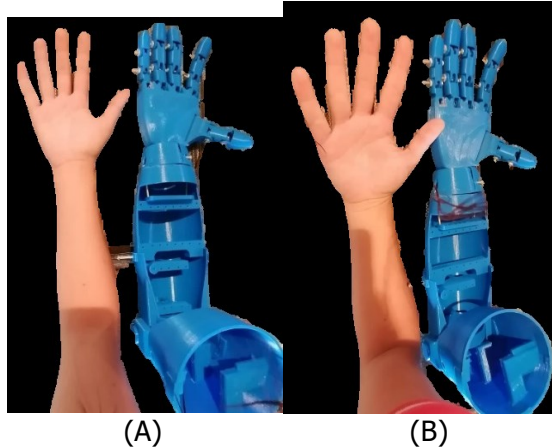
Figuras 215 A, B y C. Prototipo robótico de extremidad superior derecha comparado con la extremidad superior derecha de una mujer adulta promedio.



Figuras 216. Muñeca y mano del prototipo comparadas con la muñeca y mano de una mujer adulta promedio.



Figuras 217. Mano del prototipo comparada con la mano de una mujer adulta promedio. Dorso de la mano (izquierda) y palma de la mano (derecha).



*Figuras 218 A y B. Prototipo robótico de extremidad superior derecha doblado comparado con la extremidad superior derecha de una mujer adulta promedio doblada.*

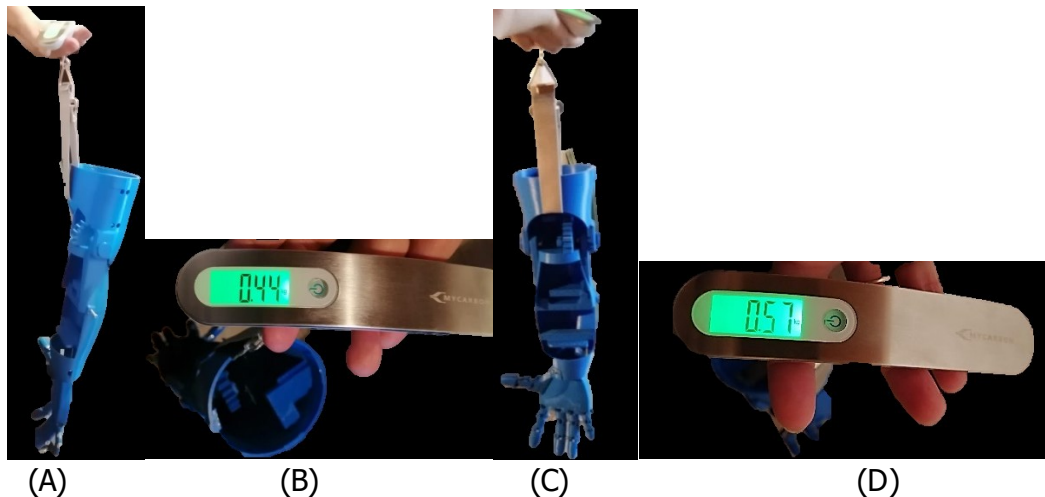
Se presenta la quinta prueba del plan de pruebas del periférico mecánico en la tabla 71.

*Tabla 71. Prueba del periférico mecánico.*

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá un peso máximo de 600g.	Se comprueba que el prototipo tenga peso máximo de 600g.	✓ Prototipo robótico ✓ Báscula digital

### Evidencias

- Se comprueba que el prototipo tenga peso máximo de 600g, utilizando una báscula digital (figura 219).



*Figuras 219 A, B y C. Peso del prototipo con una báscula digital (B) peso sin motor, (D) peso con motor.*

Se puede verificar el cumplimiento del requerimiento teniendo peso de 440g, peso menor a 600g.

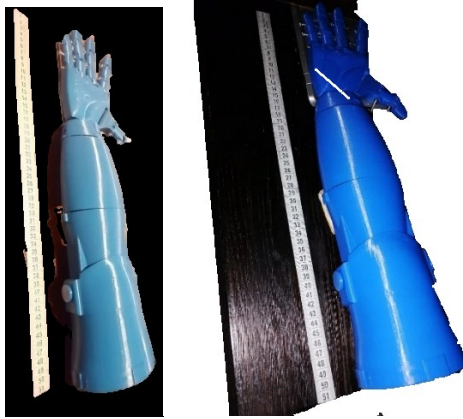
Se presenta la sexta prueba del plan de pruebas del periférico mecánico en la tabla 72.

*Tabla 72. Prueba del periférico mecánico.*

Requerimiento a comprobar	Prueba	Instrumentos
El prototipo robótico de extremidad superior derecha tendrá una longitud de 55cm.	Se comprueba que el prototipo tenga una longitud de cerca de 55cm.	✓ Prototipo robótico ✓ Metro

### Evidencias

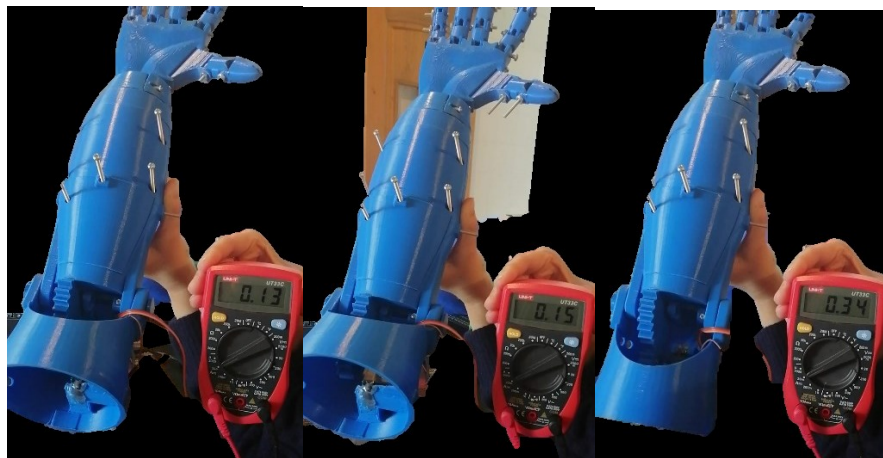
- Se comprueba que el prototipo tenga una longitud de cerca de 55cm (figura 220).



*Figura 220. Prototipo robótico de extremidad superior con longitud de 52 cm.*

Se verifica, entonces, que el prototipo cumple con el requerimiento de longitud establecido, teniendo en cuenta que se tiene una tolerancia de  $\pm 5$ cm.

En la figura 221 se presenta el consumo de corriente del prototipo robótico de extremidad superior derecha a medida que se realiza el movimiento.



*Figura 221. Consumo de corriente del prototipo robótico de extremidad superior derecha.*

## **16 AJUSTES**

Como se mencionó anteriormente, no fue posible terminar el sistema por la situación actual global generada por el COVID-19. Por este motivo, no es posible completar el presente capítulo, correspondiente a los ajustes realizados al sistema para garantizar su correcto funcionamiento. Dado que no es posible culminar la implementación y realizar pruebas del sistema, los ajustes a este no pueden ser realizados.

En el capítulo 13, se presentan los ajustes realizados a los subsistemas que así lo requirieron.

## **17 PRUEBAS DEL SISTEMA**

El capítulo 13 contiene las pruebas realizadas a los subsistemas implementados. En este capítulo, se presentarían las pruebas del sistema luego de hacerse los ajustes correspondientes de él, en el capítulo 16. Sin embargo, dado que no fue posible completar el capítulo 16, no es posible presentar las pruebas realizadas a los ajustes.

## **18 MANUALES**

El Manual de Usuario se presenta en el Anexo 3.

## **19 RESULTADOS**

En el desarrollo del proyecto se cumplió con los objetivos. Entre ellos, con el diseño, las pruebas y la implementación de un prototipo robótico de extremidad superior derecha para la implementación de tareas de Imaginación Motora. Las pruebas realizadas a los subsistemas del prototipo (ver capítulo 15), permitieron evidenciar el funcionamiento de los componentes, etapas y subsistemas que conforman este proyecto, de manera que se comprobó el funcionamiento del diseño del hardware implementado para la adquisición, amplificación y

filtrado de las señales nativas de EEG y, asimismo, el funcionamiento de los subsistemas enfocados en la digitalización de las señales, y en control del movimiento del prototipo.

El hardware diseñado en este documento para el acondicionamiento de la señal permitió realizar el filtrado del ancho de banda en donde se encuentran las ondas Mu y Beta, es decir, las frecuencias propias para el uso e implementación de tareas de Imaginación Motora. Por otro lado, la etapa de computo, realizada en el software Matlab cumple con su propósito final, permitiendo la visualización y digitalización de las señales adquiridas para posteriormente, a través de la tarjeta Arduino Mega, recibir esta información como variables de entrada y enviarlas al servomotor MG995 encargado del movimiento del prototipo robótico de extremidad superior derecha. Asimismo, la manera como fue construido el prototipo y la arquitectura del software en Arduino, permiten su reprogramación para realizar movimientos en diferentes articulaciones, siempre y cuando estén físicamente contempladas por el diseño de la estructura del brazo (ver capítulo 12); el material utilizado para la construcción de la estructura física del brazo fue el PLA impreso en 3D, el cual brindo un peso inferior a los 500g, facilitando así el uso del servomotor MG995 para el movimiento de la articulación del codo del prototipo.

### 19.1 Fichas técnicas de los subsistemas

A continuación, se muestra una ficha técnica por cada uno de los subsistemas que integran la totalidad del proyecto.

#### Subsistema A

El subsistema A, correspondiente al acondicionador de pequeña señal tiene las especificaciones técnicas mostradas en la tabla 73.

Tabla 73. Ficha técnica subsistema A.

<b>Ficha técnica Subsistema A (Acondicionador de pequeña señal).</b>		
<b>Especificaciones/Características</b>	<b>Valor</b>	<b>Observación</b>
Voltaje de operación mínimo del subsistema	-5V y +5V	En la figura 195 se presenta la prueba realizada con un voltaje de 5V.
Voltaje de operación máximo del subsistema	-12V y +12V	En la figura 195 se presenta la prueba realizada con un voltaje de 5V, que se encuentra dentro del rango de -12V y +12V.
Voltaje de operación recomendado	-9V y +9V	En la figura 195 se presenta la prueba realizada con un voltaje de 5V, que se encuentra dentro del rango de -9V y +9V.

Tabla 73. Ficha técnica subsistema A.

Consumo de corriente del subsistema	—	No se pudo realizar esta medición debido a la situación actual de cuarentena. Sin embargo, se comprobó en la simulación, este consumo no supera los 20mA.
Ganancia a la salida del subsistema	25000	n/a
Dimensiones físicas del subsistema	2,5cm x 27,6cm x 19,5cm	Las dimensiones se midieron a todo el hardware desde AA hasta AD.
Cantidad de tarjetas que componen el subsistema	7	Corresponder a un pre-amplificador con ganancia de 1000, un pasa altos de alfa, un pasa altos de beta, un pasa bajos de alfa, un pasa bajos de beta y dos amplificadores con ganancia de 25.
Rango de frecuencias filtradas a la salida del subsistema	8Hz a 29Hz	Se presentan las pruebas en las imágenes de la 141 a la 168.
Precio de todo el subsistema	COP \$100.000 aprox.	El valor por separado de cada uno de los componentes se especifica en capítulos anteriores. El valor puede variar dependiendo del proveedor.

### Subsistema B

El subsistema B, correspondiente al software tiene las especificaciones técnicas mostradas en la tabla 74.

Tabla 74. Ficha técnica subsistema B.

Ficha técnica Subsistema B (Procesamiento de señales).		
Especificaciones/Características	Valor	Observación
Software	Matlab	n/a
Versión del software	Matlab, R2017b	n/a
Procesador del computador	Intel Core i7	n/a
Memoria RAM del computador (min)	4GB	n/a
Sistema operativo	Windows 10	n/a
Tarjeta ADC	Arduino UNO	Se presenta en la figura 58.
Frecuencia de muestreo máxima de la tarjeta ADC	10kHz	n/a
Número de símbolos por segundo en la transmisión digital ( <i>baud rate</i> )	9600	n/a

### Subsistema C

El subsistema C, correspondiente al control del brazo, tiene las especificaciones técnicas mostradas en la tabla 75.

Tabla 75. Ficha técnica subsistema C.

Ficha técnica Subsistema C (Control y brazo).		
Especificaciones/Características	Valor	Observación
Material	Ácido Poliláctico (PLA)	Material mostrado en la figura 87.
Grados de libertad	1	Se presenta esta prueba en las figuras 181 a la 183.
Funciones actuales	Movimiento del codo en el plano sagital en el rango de 0° a 90°	Se presenta esta funcionalidad en la figura 189.
Motor	Un motor MG995	Este motor se muestra en la figura 71.
Consumo de corriente del brazo	Consumo máximo de corriente de 0.34mA en movimiento.	Se presenta esta prueba en la figura 221.
Tarjeta PWM	Arduino MEGA 2560	Se presenta este componente en la figura 70.
Peso sin motor	440g	Se presenta la prueba en la figura 219.
Peso con motor	590g	Se presenta la prueba en la figura 219.
Longitud	52cm	Se presenta la prueba en la figura 220.
Ángulo de giro en la articulación del codo	0° a 90°	Se presenta esta prueba en las figuras 211 a la 214.
Diámetro máximo	10.7cm	n/a
Voltaje de operación	5V	Se aplica el voltaje mostrado en la figura 195.

### Subsistema X

El subsistema X, correspondiente a la alimentación del sistema, tiene las especificaciones técnicas mostradas en la tabla 76.

Tabla 76. Ficha técnica subsistema X.

Ficha técnica Subsistema X (Alimentación)		
Especificaciones/Características	Valor	Observación
Voltaje	-9V a +9V	En la figura 195 se presenta la prueba realizada con un voltaje de 5V, que se encuentra dentro del rango de -9V y +9V.
Corriente Max	2A	No se pudo realizar esta medición debido a la situación actual de cuarentena. Sin embargo, se comprobó en la simulación, este consumo no supera los 20mA.



## 20 DISCUSIÓN

El prototipo de extremidad superior derecha para la implementación de tareas de Imaginación Motora desarrollado a lo largo de este documento, es de gran ayuda para los investigadores del Laboratorio de Psicología Experimental y el Grupo de Investigación Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad, al permitir el acondicionamiento de las señales nativas de electroencefalografía por medio el diseño del hardware realizado en este documento, ya que además de ser de bajo costo permite obtener únicamente las ondas Mu y Beta (necesarias para la implementación, investigación y uso de tareas de Imaginación Motora). Además de ello, el diseño físico de la estructura del brazo realizado, y la lógica del software implementado permite su reprogramación para que posteriormente se estudie la posibilidad de mover más articulaciones a partir de los potenciales de acción evocados.

Dentro de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al sistema acondicionador de pequeña señal, específicamente en la prueba realizada en el capítulo 15.1, es posible observar que existe un desfase al comparar la señal de entrada vs la señal de salida, y aunque el desfase de la señal no significa un problema para la realización del proyecto, este podría ser corregido al momento de digitalizar la señal, teniendo en cuenta que se conoce el cruce por cero de la señal y así mismo el desfase con el que cuenta. Este ajuste no fue posible realizarlo y comprobarlo debido a la situación actual global por el COVID-19. Sin embargo, ya que la variable más importante en las pruebas realizadas en este capítulo es la frecuencia y el ancho de banda en el que se permite el paso de las señales, es posible dar por cumplidos los requerimientos sobre los cuales se realizaron las pruebas, ya que, como se mencionó anteriormente, este desfase al ser conocido no genera problema alguno con el filtrado por frecuencias.

## 21 CONCLUSIONES

- El estudio de la Imaginación Motora orientado al desarrollo de aplicaciones para la generación de movimientos de periféricos mecánicos requiere del análisis detallado de las ondas bioeléctricas Mu y Beta en términos de frecuencia y amplitud, permitiendo de esta manera establecer parámetros fijos para el diseño de circuitos electrónicos basados en la función de adquisición y acondicionamiento de pequeña señal.

- El correcto análisis y procesamiento de señales permite realizar aplicaciones electrónicas en distintos campos como la mecánica, a partir de señales de eléctricas de cualquier tipo, en este caso bioeléctricas.
- Las señales bioeléctricas Mu y Beta generadas por la corteza motora poseen voltajes en el orden de los microvoltios haciendo que la implementación de estas sin ningún tipo de filtrado, amplificación o procesamiento digital sea imposible, por lo que el uso del diseño de circuitos electrónicos es indispensable para cualquier tipo de sistema de procesamiento que utilice señales electroencefalográficas.
- Este prototipo robótico de extremidad superior derecha para implementación de tareas de Imaginación Motora permitirá a los investigadores de los diferentes grupos de investigación interesados en el trabajo en el área, realizar diferentes pruebas según lo que deseen investigar, a partir del diseño de tareas que puedan ser implementadas en este prototipo.
- El Grupo de Investigación Neuropsicología de la Cognición y la Afectividad tendrá la posibilidad de optimizar sus investigaciones en el campo de la rehabilitación de pacientes a partir de la implementación de tareas de Imaginación Motora.

## 22 REFERENCIAS DOCUMENTALES

- [1]. J. M. Ferrero, BIOELECTRÓNICA: "*Señales Bioeléctricas*". Universidad Politécnica de Valencia, 1994.
- [2]. Guyton and Jhon E. Hall. "*Tratado fisiología médica*" de 13ed. 2016.
- [3]. Tatum WO, Husai AM, Benbadis SR, Kaplan PW. Normal EEG. En: Tatum WO, Husai AM, Benbadis SR, PW Kaplan editors. "*Handbook of EEG interpretation*". USA: Demos Medical Publishing 2008: 1-50.
- [4]. J. F. D. Saa, J. R. E. Gutierrez and J. D. M. Rocha, "*Diseño y Construcción de un Electroencefalógrafo de 32 Canales*",.
- [5]. D. L. Bruce, "*Bioelectric potentials*," IEEE Potentials, no. 695-701, December-January 1998-1999.
- [6]. P. A. O. CABALLERO, "*Diseño De Mecanismos De Procesamiento Interactivos Para El Análisis De Ondas Cerebrales*", 2005
- [7]. Collet. C. "*The neurophysiological foundations of mental and motor imagery*", Oxford, 2010.
- [8]. D'Croz. D, "*Reconocimiento de Imaginación Motora de Señales EEG en el Dominio Temporal aplicando Modelos Paramétricos*", M.S. Thesis, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Agosto de 2011.
- [9]. Niedermeyer E, Lopes da Silva F. "Electroencephalography. Basic principles, clinical applications and related fields." 4th ed. Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore. 1999.
- [10]. Sanei S, Chambers J A. "*EEG signal processing. Centre of Digital Signal Processing*", Cardiff University, UK. John Wiley & Sons, Ltd., Pages 1-31, 2007.
- [11]. Bashashati, A., Fatourehchi M., Ward, R. K. "*A survey of signal processing algorithms in brain- computer interfaces based on electrical brain signals*." Journal of Neural Engineering. Vol. 4 No. 2. Pp R32-R57. 2007.
- [12]. Arce. C. Lima-Perú. Enero (2005). "*Prótesis de miembros superiores*." [online] Available: <http://www.arcesw.com/pms1.htm>.
- [13]. Sánchez L. "*Desarrollo de un prototipo de prótesis activa de miembro superior utilizando señales mioeléctricas*". Universidad Tecnológica de la Mixteca. [http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/13886.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/13886.pdf)

- [14]. Sapienza Universidad Roma. "Electroencefalografía (EEG)." <https://www.brainsigns.com/es/science/s2/technologies/eeg>
- [15]. J. Ramírez Díaz de León, R. I. Flores Luna, M. García del Gállego, and J. M. Dorador González, "Rediseño de interfaz para prótesis mecánicatranshumeral," pp. 389–395, Septiembre 2011.[Online].Available:<http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2011/pdfs/A1/A1240.pdf>
- [16]. A. Alonso Alonso, R. Hornero Sánchez, P. Espino Hurtado, R. De la Rosa Steinz, and L. Lip-tak, "Entrenador mioeléctrico de prótesis para amputados de brazo y mano," Mapfre Medicina, vol. 13, no. 1, pp. 11–19, 2002.
- [17]. C. A. Quinays Burgos, "Diseño y construcción de una prótesis robotica de mano funcional adaptada a varios agarres," Tesis de Maestría, Universidad del cauca,Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Popayan,Colombia, 2010.
- [18]. L. Giuseppe, "The study of the electromyographic signal for the control of a prosthetic hand", Master's Degree in Computer Science Engineering Department of Electronics and Computer Science Engineering, Politecnico di Milano, 2009-2010. [Online]. Available: <https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/2282/1/201007Lisi.pdf7>
- [19]. Brain Products. "Brain division. V-Amp". <https://www.brainproducts.com/productdetails.php?id=15>
- [20]. C. A. Silva Castellanos, J. E. Muñoz Riaño, D. A. Garzón Alvarado, N. S. Landinez Parra, y O. Silva Caicedo, "Diseño mecánico y Cosmético De Una prótesis parcial de mano,"Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas, no. 1, p. 25, enero / Mar. 2011.
- [21]. V. Bundhoo, "Design and evaluation of a shape memory alloy-based tendondriven actuation system for biomimetic artificial fingers," Master of applied science i the Department of Mechanical Engineering, University of Victoria, 2009.
- [22]. OPENBCI, "Ganglion". [Online] Available: <https://shop.openbci.com/products/pre-order-ganglion-board?variant=13461804483>
- [23]. Ottobock. PROSTHETICS, "Sensor-hand Speed y Variplus Speed". [Online]. Available: <http://www.dopomoga.biz.ua/userfiles/files/646K6-GB-03-1205w.pdf>

- [24]. Ottobock. PROSTHETICS," Michelangelo". [Online]. Available: <http://www.dopomoga.biz.ua/userfiles/files/646K6-GB-03-1205w.pdf>
- [25]. Ottobock. PROSTHETICS," Prótesis 12K500 AxonArm Hybrid". [Online]. Available: <https://www.ottobock.es/protesica/miembro-superior/sistemas-de-brazo-y-mano/ergoarm/>
- [26]. Anirudh Vallabhaneni. *"Motor imagery task classification for brain computer interface applications using spatiotemporal principle component analysis"*
- [27]. Magdalena Sabaté, Belén González, Manuel Rodríguez. *"Brain lateralization of motor imagery: motor planning asymmetry as a cause of movement lateralization"*
- [28]. Mobius Bionics. "Prosthetic Luke arm". [Online]. Available: <http://www.mobiusbionics.com/wp-content/uploads/2017/08/Mobius-Bionics-LUKE-Product-Spec-Sheet.pdf> .
- [29]. Ministerio de Salud. Resolución 8430 de 1993 *"Por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud. Capítulo 1. De los aspectos éticos de la investigación en seres humanos. Artículo 11. Categorías de riesgo de las investigaciones."*(1993).
- [30]. Unicrom. "Convertidor Analógico-Digital CAD-ADC." <https://unicrom.com/convertidor-analogico-digital-cad-adc/>.
- [31]. Cadgineering Designs. "3D Printing materials." <https://www.cadgineeringdesigns.com/disenio-mecanico-cad?lang=en>
- [32]. Orliman. "Materias primas de primera calidad." <http://www.orliman.com/prosthesis/prosthesis-materia-prima/>
- [33]. Quimi Net. *"Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS): Descripción, propiedades y aplicaciones."* <https://www.quiminet.com/articulos/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-descripcion-propiedades-y-aplicaciones-4433.htm>
- [34]. ALL3DP. *"PLA vs ABS: comparación de filamentos para impresión 3D."* <https://all3dp.com/es/filamento-abs-filamento-pla-comparacion-impresion-3d/>
- [35]. Organización Mundial de la Salud (OMS). *"Normas de Ortoprotésica."* <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259508/9789243512488-part1-spa.pdf;jsessionid=E7A084B498BBB3CAC3E70ACE28E09EF6?sequence=1>

- [36]. Ministerio de Salud y Protección Social. "Resolución 1319 de 2010." [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%205857%20de%202018.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%205857%20de%202018.pdf)
- [37]. I-Ciencias. "¿Cómo reconocer el tipo de filtro analógico dado su topología?". <https://www.i-ciencias.com/pregunta/59881/como-reconocer-el-tipo-de-filtro-analogico-dado-su-topologia>
- [38]. 3D Market. "Filamento 3D PLA Azul". <https://www.3dmarket.mx/p/filamento-3d-pla-azul-1-75mm/>
- [39]. Ottobock, "Sistema de mano protésica" MyoFacil, (2007).
- [40]. Ministerio de Salud. Resolución 8430 de 1993 "Por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud. Capítulo 1. De los aspectos éticos de la investigación en seres humanos. Artículo 11. Categorías de riesgo de las investigaciones."(1993).
- [41]. Gaël Langevin, "Inmoov open-source 3D printed life-size robot". [Online]. Available: <http://inmoov.fr/build-yours/>
- [42]. D. Contreras, A. Ramírez-García, F. Gallegos, I. Bazán, " Prototipo de una Prótesis Mioeléctrica para la Emulación de una Articulación de Codo," Revista mexicana de ingeniería biomédica [Online]. Available: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-9532201500010.0006](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-9532201500010.0006)
- [43]. K. Kimura and A. Lipeles, "Prostetic arm" U. S. Patent 14,860,040, December 14, (1996).
- [44]. Nordin, M., Frankel, V. H., & Forssen, K. "Biomecánica básica del sistema musculoesquelético" 3ed. (2004).
- [45]. Ryo Machida. "Visualization of ERD/ERS on leg Motor Imagery". ISASE-MAICS (2018).
- [46]. G. Pfurtscheller. "Current Trends in Graz Brain-Computer Interface (BCI) Research". IEEE TRANSACTIONS ON REHABILITATION ENGINEERING. VOL 8.
- [47]. M.D. del Castillo. "Evaluación Neurofisiológica del Entrenamiento de la Imaginación Motora con Realidad Virtual en Pacientes Pediátricos con Parálisis Cerebral". Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. (2014).

- [48]. AD620 Datasheet. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>
- [49]. TL084 Datasheet. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/tl084a.pdf>
- [50]. Arduino UNO Datasheet. <https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>
- [51]. Arduino MEGA Datasheet. <https://www.robotshop.com/media/files/pdf/arduinomega2560datasheet.pdf>
- [52]. Intel. *"ACER ASPIRE 3 A315-51-33AM Red Notebook 39.6 CM (15.6") 1920 X 1080 PIXELS 8TH GEN INTEL® CORE™ i3 4 GB DDR4-SDRAM 1000 GB HDD WI-FI 5 (802.11AC) Windows 10"*  
<https://www.intel.la/content/www/xl/es/products/devices-systems/laptops/standard/acer-aspire-a315-51-33am-H67448438.html>
- [53]. Davis. C. *"Partes del servomotor"* <https://www.slideshare.net/CristianDavis/partes-de-un-servo-motor/5>

## 23 ANEXOS

### Anexo 1.

Se presentan los componentes de cada circuito del subsistema A, con sus valores.

Componente AA (amplificador con ganancia de 1000):

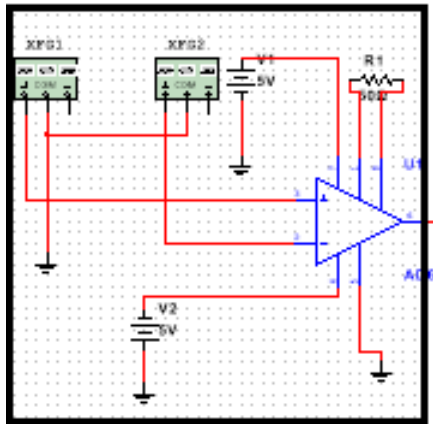


Figura 1. Esquemático amplificador con ganancia de 1000.

Los componentes utilizados fueron:

#### Resistencia:

Tabla 1. Resistencia del componente AA.

En el esquemático	Valor en ohmios ( $\Omega$ )	Valor en vatios (W)
R1	50	1/4

Componente AB A (pasa bajos de Alfa):

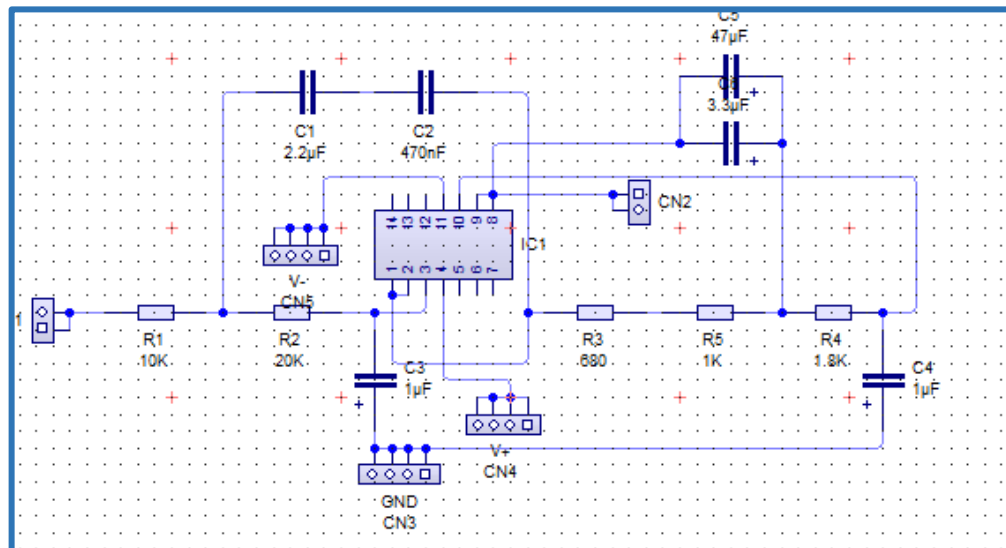


Figura 2. Esquemático filtro pasa bajos de Alfa.



Los componentes utilizados fueron:

### Resistencias:

Tabla 2. Resistencias del componente AB A.

En el esquemático	Valor en ohmios ( $\Omega$ )	Valor en vatios (W)
R1	10k	1/4
R2	20k	1/4
R3	680	1/4
R4	1.8k	1/4
R5	1k	1/4

### Condensadores:

Tabla 3. Condensadores del componente AB A.

En el esquemático	Valor en faradios ( $\mu\text{F}$ )	Valor en voltios (V)	Material
C1	2.2	250	Poliéster
C2	0.47	100	Poliéster
C3	1	50	Electrolítico
C4	1	50	Electrolítico
C5	47	250	Electrolítico
C6	3.3	450	Electrolítico

Componente AB B (pasa altos de Alfa):

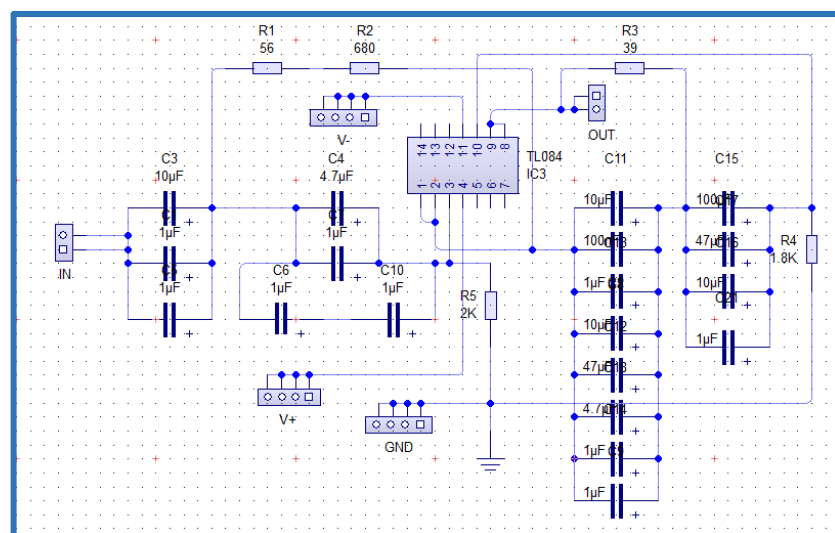


Figura 3. Esquemático filtro pasa altos de Alfa.

Los componentes utilizados fueron:

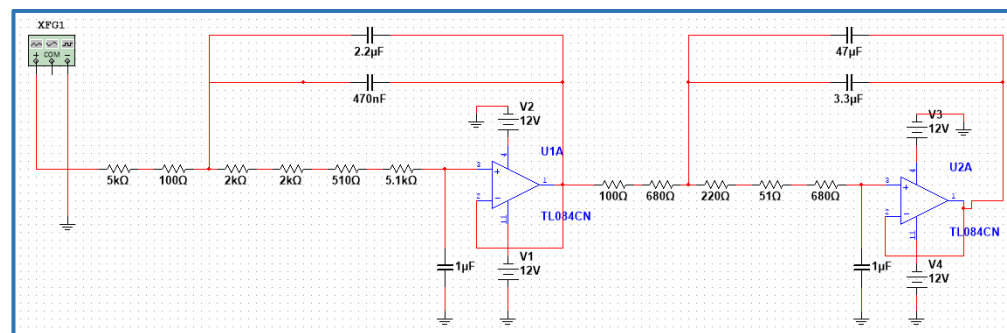
### Resistencias:

Tabla 4. Resistencias del componente AB B.

En el esquemático	Valor en ohmios ( $\Omega$ )	Valor en vatios (W)
R1	56	1/4
R2	680	1/4
R3	39	1/4
R4	1.8k	1/4
R5	2k	1/4

**Condensadores:***Tabla 5. Condensadores del componente AB B.*

En el esquemático	Valor en faradios ( $\mu\text{F}$ )	Valor en voltios (V)	Material
C1	1	16	Electrolítico
C2	1	16	Electrolítico
C3	10	50	Electrolítico
C4	4.7	160	Electrolítico
C5	10	16	Electrolítico
C6	1	16	Electrolítico
C7	1	16	Electrolítico
C8	10	16	Electrolítico
C9	47	16	Electrolítico
C10	1	16	Electrolítico
C11	1	16	Electrolítico
C12	0.1	100	Poliéster
C13	4.7	160	Electrolítico
C14	1	16	Electrolítico
C15	10	450	Electrolítico
C16	1	16	Electrolítico
C17	47	16	Electrolítico
C18	10	16	Electrolítico
C19	1	16	Electrolítico

**Componente AC A (pasa bajos de Beta):***Figura 4. Esquemático filtro pasa bajos de Beta.*

Los componentes utilizados fueron:

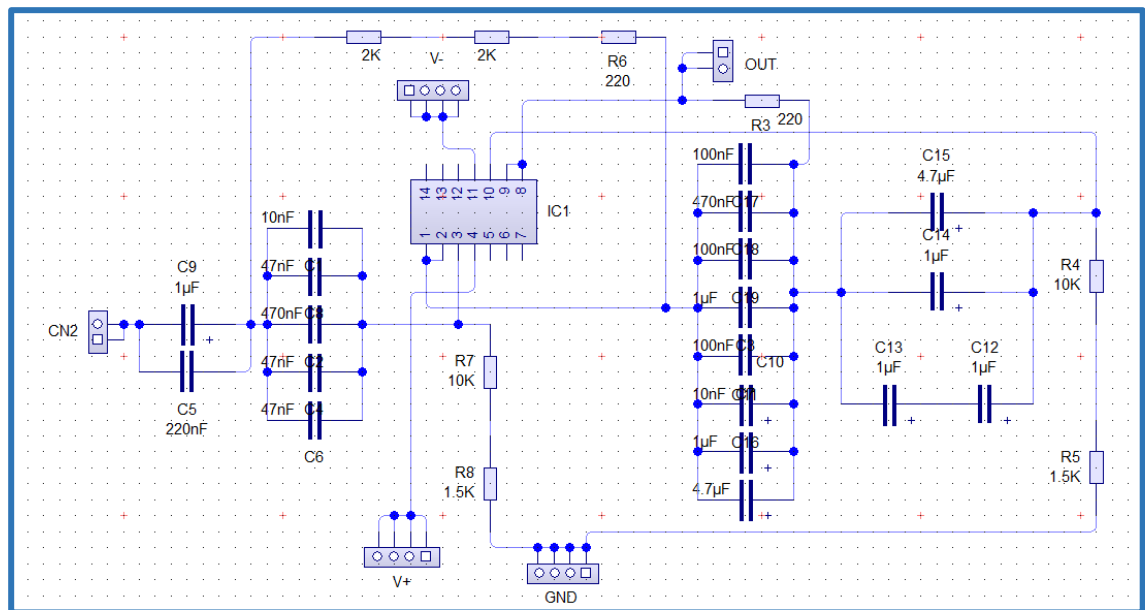
**Resistencias:***Tabla 6. Resistencias del componente AC A.*

En el esquemático	Valor en ohmios ( $\Omega$ )	Valor en vatios (W)
R1	5k	1/4
R2	100	1/4
R3	2k	1/4
R4	2k	1/4
R5	510	1/4
R6	5.1k	1/4
R7	100	1/4
R8	680	1/4
R9	220	1/4
R10	51	1/4
R11	680	1/4

**Condensadores:***Tabla 7. Condensadores del componente ACA.*

En el esquemático	Valor en faradios ( $\mu\text{F}$ )	Valor en voltios (V)	Material
C1	2.2	250	Poliéster
C2	0.47	400	Poliéster
C3	47	250	Electrolítico
C4	3.3	450	Electrolítico
C5	1	50	Electrolítico
C6	3.3	450	Electrolítico

Componente AC B (pasa altos de Beta):

*Figura 5. Esquemático filtro pasa altos de Beta.*

Los componentes utilizados fueron:

**Resistencias:***Tabla 8. Resistencias del componente AC B.*

En el esquemático	Valor en ohmios ( $\Omega$ )	Valor en vatios (W)
R1	2k	1/4
R2	2k	1/4
R3	220	1/4
R4	10k	1/4
R5	1.5k	1/4
R6	220	1/4
R7	10k	1/4
R8	1.5k	1/4

**Condensadores:**

Tabla 9. Condensadores del componente AC B.

En el esquema	Valor en faradios ( $\mu\text{F}$ )	Valor en voltios (V)	Material
C1	1	400	Poliéster
C2	0.22	400	Poliéster
C3	0.01	250	Poliéster
C4	0.047	250	Poliéster
C5	0.47	100	Poliéster
C6	0.047	250	Poliéster
C7	0.047	250	Poliéster
C8	0.1	250	Poliéster
C9	0.47	100	Poliéster
C10	0.1	100	Poliéster
C11	0.01	100	Poliéster
C12	1	400	Poliéster
C13	1	400	Poliéster
C14	1	400	Poliéster
C15	4.7	160	Electrolítico
C16	4.7	25	Electrolítico
C17	1	400	Poliéster
C18	1	400	Poliéster
C19	1	400	Poliéster

Componente AD (amplificador con ganancia 25):

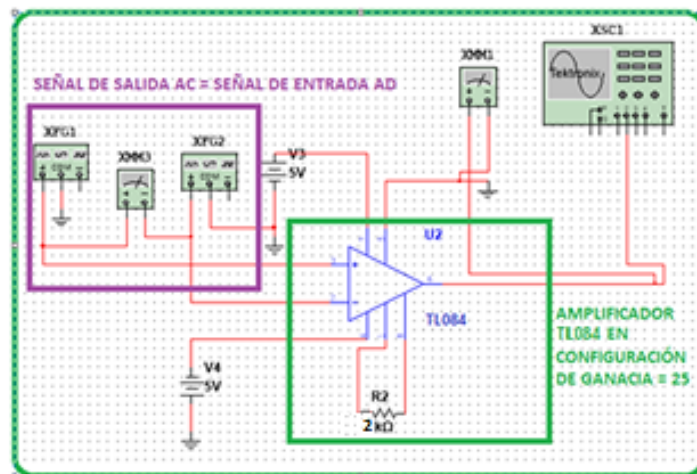


Figura 6. Esquemático del amplificador con ganancia de 25.

Los componentes utilizados fueron:

**Resistencia:**

Tabla 10. Resistencia del componente AD.

En el esquema	Valor en ohmios ( $\Omega$ )	Valor en vatios (W)
R1	2k	1/4

## Anexo 2.

*Datasheets:*

En el link a continuación, se presenta el *datasheet* del AD620, si se desean ver sus características, pueden dirigirse a este *datasheet*.

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>

En el link a continuación, se presenta el *datasheet* del TL084, si se desean ver sus características, pueden dirigirse a este *datasheet*.

<https://www.st.com/resource/en/datasheet/tl084a.pdf>

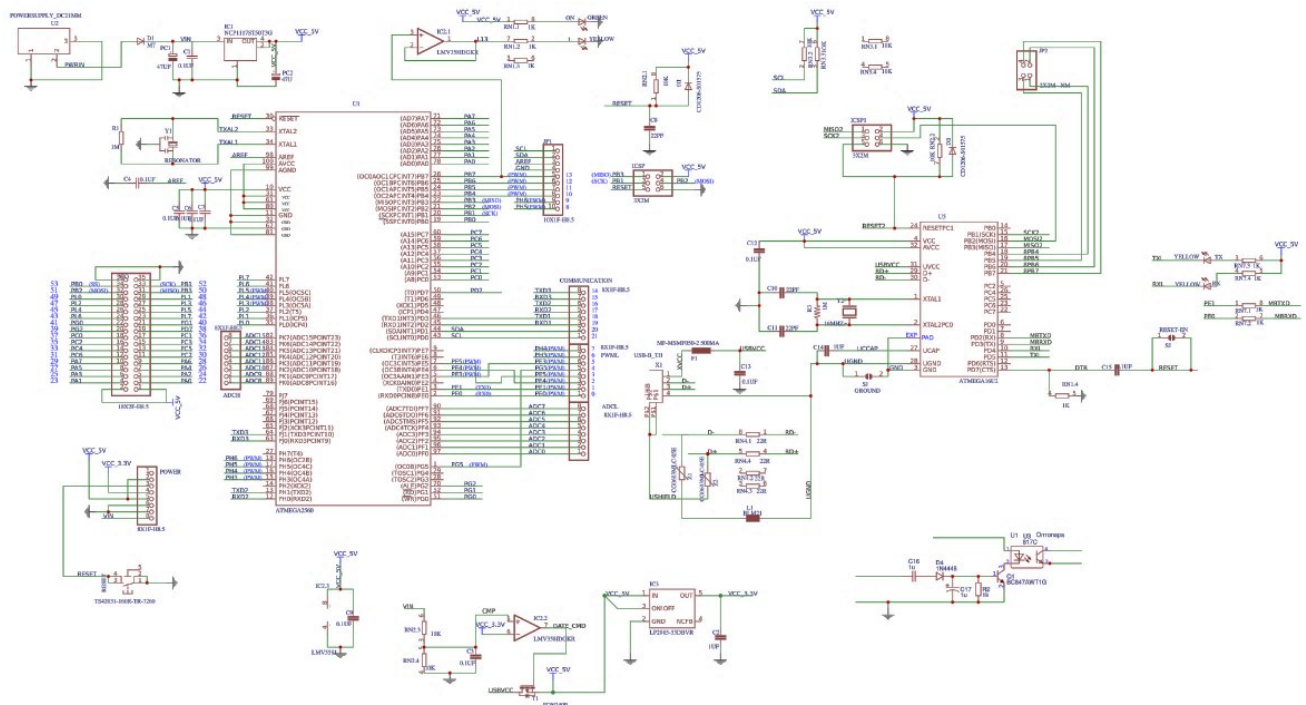
En el link a continuación, se presenta el *datasheet* del Arduino UNO, si se desean ver sus características, pueden dirigirse a este *datasheet*.

<https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>

En el link a continuación, se presenta el *datasheet* del Arduino MEGA, si se desean ver sus características, pueden dirigirse a este *datasheet*.

<https://www.robotshop.com/media/files/pdf/arduinomega2560datasheet.pdf>

La imagen a continuación presenta el esquemático interno del Arduino MEGA, tarjeta utilizada para el componente CA.



*Figura 1. Esquemático del Arduino MEGA 2560.*

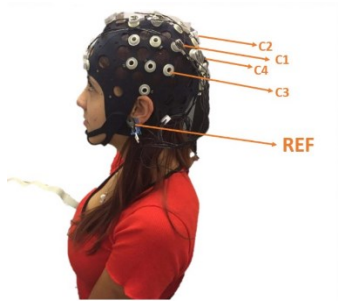
### Anexo 3.

## MANUAL INSTRUCTIVO DEL PROTOTIPO DE EXTREMIDAD DERECHA PARA LA IMPLEMENACIÓN DE TAREAS DE IMAGINACIÓN MOTORA

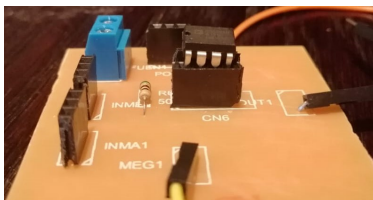
### Manual de operación de usuario



**1** Oprima el botón On/Off para encender el sistema.



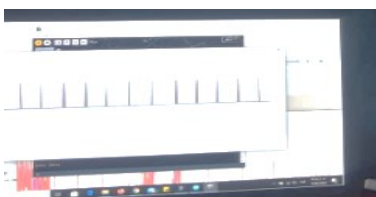
**2** Ubique los electrodos en las posiciones C1, C2, C3, C4 y referencia.



**3** Conecte los electrodos al circuito acondicionador de pequeña señal.



**4** Encienda el computador y ejecute el software Matlab.

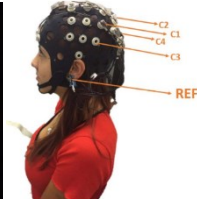


**5** Ejecute el *script* proporcionado por el fabricante.



6

Implemente la tarea de Imaginación Motora. (por defecto, únicamente se moverá la articulación del codo entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  si piensa en mover la mano derecha, y entre  $90^\circ$  y  $0^\circ$  si piensa en mover la mano izquierda).



7

Cierre el programa, desconecte los electrodos y apague el computador.

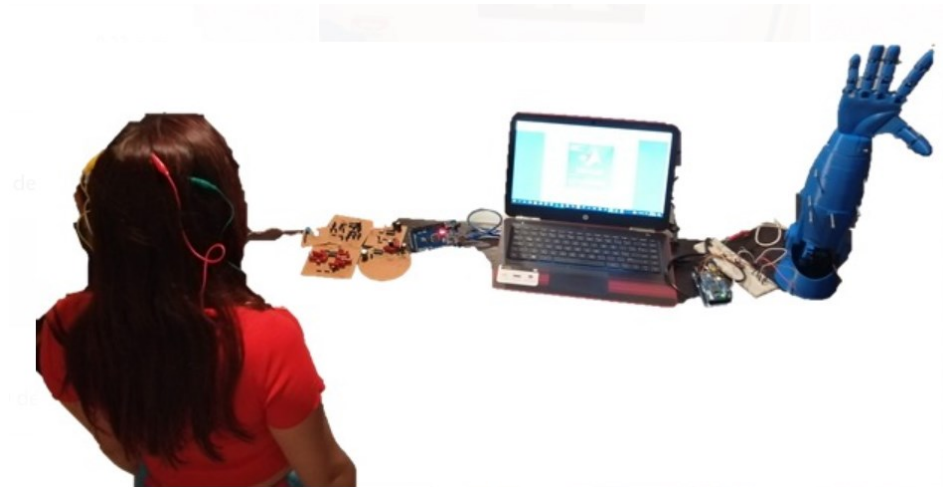


8

Oprima el botón On/Off para apagar el sistema.

**Anexo 4.**

En la siguiente imagen se presenta el ciclo del sistema, comenzando por la toma de señales electroencefalográficas y terminando con el prototipo robótico de extremidad superior derecha para implementación de tareas de Imaginación Motora.



*Figura 1. Imagen de todas las etapas.*