

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Reingeniería de Megaproyectos Fase I
Tomo I

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por los estudiantes Erick Iván Hernández Woc, Johnny Omar del Cid Guzmán, José Javier Mérida Rodríguez para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Mecatrónica; y Otto Guillermo Wantland Conde, Vidal Roberto Villegas Zabala, William Abel Orozco Cifuentes, Rony Andrés Ajtún Bulux para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Electrónica.

Guatemala,
2017

Reingeniería de Megaproyectos Fase I

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



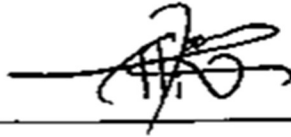
Reingeniería de Megaproyectos Fase I
Tomo I

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por los estudiantes Erick Iván Hernández Woc, Johnny Omar del Cid Guzmán, José Javier Mérida Rodríguez para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Mecatrónica; y Otto Guillermo Wantland Conde, Vidal Roberto Villegas Zabala, William Abel Orozco Cifuentes, Rony Andrés Ajtún Bulux para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Electrónica.

Guatemala,
2017

Vo. Bo.:

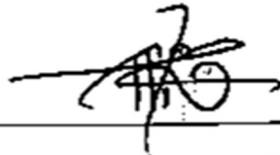
(f)



Ing. Carlos Alberto Esquit Hernández

Director

(f)



Ing. Carlos Alberto Esquit Hernández

Fecha de aprobación:

Guatemala, 27 de noviembre de 2017

PREFACIO

Este trabajo se llevó a cabo en la modalidad de megaproyecto con tal de aplicar los conocimientos multidisciplinarios adquiridos durante la carrera para resolver problemas de la vida real y darle un uso práctico para la proposición de alternativas distintas a métodos convencionales. Por medio de estos proyectos se puede observar y experimentar la cercana relación que tienen distintos ámbitos científicos y tecnológicos para el desarrollo de soluciones eficientes.

Ésta iniciativa comenzó por parte del Departamento de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica con la idea de retomar proyectos realizados en otros años, los cuales han sido descuidados, y restaurar su funcionamiento, así mismo, optimizarlos para mejorar su uso en presentaciones públicas y la difusión de procesos de ingeniería para la resolución de problemas.

Se agradece a la Universidad del Valle de Guatemala por permitirnos ser parte de esa fase; a nuestros profesores, por enseñarnos las herramientas necesarias para obtener el éxito dentro y fuera de la Universidad; a nuestros asesores, quienes con paciencia y arduo trabajo nos orientaron en el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE

	Página
Prefacio	v
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xxv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	2
A. Objetivo general.....	2
B. Prótesis biónica.....	2
1. Generales	2
2. Específicos.....	2
C. Swarm robotics	3
1. Generales	3
2. Específicos.....	3
D. Silla.....	4
1. Generales	4
2. Específicos.....	4
E. Robot explorador	5
1. Generales	5
2. Específicos.....	5
III. JUSTIFICACIÓN	6
IV. MARCO TEÓRICO	7
A. Prótesis biónica.....	7
1. Prótesis.....	7
2. Cinemática articular	10
3. Hilo de pescar	11
4. Análisis de estructuras	15
5. Procesos de manufactura	18
6. Servo motores	20
7. Esquemas de control.....	22
8. Sensores de fuerza	23
9. Microcontroladores.....	26
10. Comunicación digital.....	29
11. Protocolos de comunicación	29
12. Comunicación inalámbrica	32
B. Swarm robotics	34
1. Comunicación digital inalámbrica	34

2. Capas de la arquitectura TCP/IP	34
3. Protocolos de comunicación	35
4. Estándar Wi-Fi.....	36
5. Matlab y sistemas de control digital	37
6. Reguladores de voltaje.....	38
7. Puente doble H.....	41
8. Baterías tipo LiPo	44
9. Diseño asistido por computadora CAD	48
10. Antecedentes de estructuras para robots destinados a trabajar en enjambre	51
11. Recomendaciones para diseño de una placa de circuito impreso.....	52
12. Swarm robotics	57
13. Sensores ultrasónicos de proximidad.....	61
14. Microcontroladores basados en ARM cortex.....	69
15. Manejo de interrupciones en Teensy 3.2 y Teensy LC	77
16. IMU	78
17. Circuito impreso	79
C. Silla.....	87
1. Sistema de control.....	87
2. Cargador de batería.....	92
D. Robot explorador	96
1. Microprocesadores y microcontroladores.....	96
2. Sensores	99
3. Aplicaciones web y comunicación por internet	102
4. Motores de corriente directa y control	104
5. Navegación	107
V. ANTECEDENTES.....	108
VI. METODOLOGÍA.....	111
A. Prótesis biónica.....	111
1. Módulo de estructuras y actuadores.....	111
2. Módulo de restauración y mejora	112
B. Swarm robotics	114
1. Módulo de comunicación electrónica	114
2. Módulo de diseño de estructura e implementación de potencia eléctrica para un robot destinado a trabajar en enjambre.....	116
3. Módulo de instrumentación electrónica.....	117
C. Silla.....	119
1. Módulo de sistema de control.....	119
2. Módulo de carga de batería.....	120
D. Robot explorador	126

VII. PRÓTESIS BIÓNICA	128
A. Desarrollo del módulo de estructuras y actuadores.....	128
1. Diseño de estructuras	128
2. Cambio de hilos	140
3. Módulo de alimentación	142
4. Cambio de pines	143
5. Yemas	144
6. Resultados.....	147
B. Desarrollo del módulo de mantenimiento y mejora.....	153
1. Investigación de métodos de control de prótesis	153
2. Selección y diseño de controlador	156
3. Diseño de antebrazo.....	168
4. Implementación de sensores	180
5. Módulo de comunicación.....	185
6. Fabricación de placas PCBs.....	191
7. Implementación controlador y antebrazo.....	194
8. Resultados.....	198
VIII. SWARM ROBOTICS.....	212
A. Desarrollo del módulo de comunicación electrónica	212
1. Selección del módulo de comunicación.....	212
2. Selección del protocolo de comunicación.....	214
3. Diseño y prueba preliminar.....	215
4. Reducción de retrasos y pruebas finales	225
B. Desarrollo del Módulo de diseño de estructura e implementación de potencia eléctrica para un robot destinado a trabajar en enjambre.	230
1. Estructura.....	230
2. Placa de Potencia eléctrica.....	237
3. Implementación de encoders y de motores.	248
4. Armado de prototipo.....	249
5. Fabricación y diseño de placa de potencia final.....	250
6. Protecciones eléctricas.....	259
7. Ensamblaje final	260
8. Prueba de eficiencia de reguladores y puntos de operación.....	262
9. Pruebas térmicas	264
10. Resultados.....	266
11. Análisis de resultados	272
C. Desarrollo del módulo de instrumentación electrónica.....	274
1. Diseño y pruebas del circuito de control de los sensores ultrasónicos.....	275
2. Diseño y fabricación de PCB del circuito de control de sensores.....	278

3. Programación del microcontrolador para el manejo de sensores.....	286
4. Calibración del conjunto de sensores ultrasónicos.....	286
5. Pruebas con sistemas de control.	287
6. Resultados.....	288
IX. SILLA.....	305
A. Diseño experimental del sistema de control	305
B. Diseño experimental cargador de batería.....	306
X. ROBOT EXPLORADOR	310
A. Diseño experimental del módulo	310
B. Resultados.....	322
C. Análisis de resultados	333
XI. CONCLUSIONES	337
A. Prótesis biónica.....	337
B. Swarm robotics	338
C. Silla.....	339
D. Robot explorador	339
XI. RECOMENDACIONES.....	340
A. Prótesis biónica.....	340
B. Swarm robotics	341
C. Silla.....	344
D. Robot explorador	344
XIII. BIBLIOGRAFÍA.....	345
XIV. ANEXOS	353
A. Prótesis biónica.....	353
A. Swarm robotics	367
B. Silla.....	415
C. Robot explorador	417
D. Código del controlador (arduino).....	418
XV. GLOSARIO.....	430

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Materiales utilizados actualmente para el desarrollo de prótesis.	8
Tabla II. Modelo de arquitectura TCP/IP.....	34
Tabla III. Tabla lógica de funcionamiento.....	43
Tabla IV. Ventajas y desventajas sobre las baterías híbridas de metal de níquel.....	45
Tabla V. Tabla de verdad de una compuerta <i>NOT</i>	63
Tabla VI. Tabla de verdad de una compuerta <i>AND</i> de dos entradas.	65
Tabla VII. Tabla de verdad de una compuerta <i>OR</i> de dos entradas.	66
Tabla VIII. Tabla de verdad de un demultiplexor 74HC138.....	68
Tabla IX. Comparación entre Teensy LC y Teensy 3.2.	76
Tabla X. Relación entre pines del Teensy y puertos del microcontrolador.....	77
Tabla XI. Escala y sensibilidad de giro para los valores de FS_SEL.....	78
Tabla XII. Escala y sensibilidad de aceleración para los valores de AFS_SEL.....	79
Tabla XIII. Pasos para fabricar un PCB.....	85
Tabla XIV. Parámetros para ajuste de constantes PID.....	91
Tabla XV: Clasificación de sensores por el tipo de variable que miden.....	100
Tabla XVI. Cronograma de actividades.....	112
Tabla XVII. Cronograma de actividades del trabajo de graduación.	113
Tabla XVIII. Cronograma de las actividades del trabajo de graduación.....	115
Tabla XIX . Lista de tareas.	117
Tabla XX. Cronograma de actividades del módulo de instrumentación electrónica de Swarm Robotics.....	117
Tabla XXI. Estados de las entradas de la placa de control.....	120
Tabla XXII. Estados del proceso de carga según las salidas de los Latches.	122
Tabla XXIII. Constantes para cálculo de resistencias.	122
Tabla XXIV. Especificaciones de la banda utilizada.	140
Tabla XXV. Valores de corriente por dispositivo.....	142
Tabla XXVI. Comparación de aspectos entre distintas tecnologías para el control de prótesis electrónicas.	158
Tabla XXVII. Valores máximos de un chip nRF24L01+.	159
Tabla XXVIII. Valores típicos de operación de un chip nRF24L01+.....	160
Tabla XXIX. Descripción y función de los pines en un nRF24L01+	161

Tabla XXX. Comparación de diferentes características de microcontroladores.	163
Tabla XXXI. Pines utilizados del microcontrolador Pro Trinket.	164
Tabla XXXII. Medidas obtenidas por el ADC al aplicar distintas fuerzas sobre el sensor FSR. .	182
Tabla XXXIII. Clasificación del pulso de control según la duración.	186
Tabla XXXIV. Código de identificación de los controladores.	186
Tabla XXXV. Codificación de mensajes.	186
Tabla XXXVI. Configuración usada de registros para el manejo de entradas y salidas digitales. .	195
Tabla XXXVII. Selección del canal de lectura usando los bits del 0 al 3 del registro ADMUX. .	195
Tabla XXXVIII. Bits del registro ADCSRA.	196
Tabla XXXIX. Descripción de los bits del registro ADCSRA.	197
Tabla XL. Configuración usada de los registros para la lectura analógica.	197
Tabla XLI. Resultados de las pruebas de agarre.	211
Tabla XLII. Comparación de los protocolos de Bluetooth, UWB, ZigBee, Wi-Fi.	213
Tabla XLIII. Comparación de protocolos TCP y UDP.	214
Tabla XLIV. Comparación entre microcontroladores tipo Teensy.	216
Tabla XLV. Comandos AT reconocidos por el módulo ESP-8266.	217
Tabla XLVI. Funciones para el manejo de comunicación en el microcontrolador.	218
Tabla XLVII. Funciones integradas a la librería de Matlab.	220
Tabla XLVIII. Resultados obtenidos en las pruebas realizadas.	226
Tabla XLIX. Distribución de componentes del robot.	231
Tabla L. Parámetros máximos del módulo DRV8833.	238
Tabla LI Funciones de control PWM para el driver DRV8833.	239
Tabla LII. Corrientes requeridas por el robot.	239
Tabla LIII. Reguladores seleccionados y sus características.	240
Tabla LIV. Resultados de mediciones para regulador de 5V.	266
Tabla LV. Resultados de mediciones para regulador de 3V.	267
Tabla LVI. Puntos de operación del robot.	267
Tabla LVII. Resumen del cálculo de ancho de pistas para el PCB de la falda de sensores.	285
Tabla LVIII. Frecuencias para distancias medidas con una referencia a 4 cm.	293
Tabla LIX. Frecuencias para distancias medidas con una referencia a 10 cm.	294
Tabla LX. Frecuencias para distancias medidas con una referencia a 24 cm.	295
Tabla LXI. Frecuencias para distancias medidas con una referencia a 34 cm.	296
Tabla LXII. Función "motores", entradas y salidas.	305

Tabla LXIII. Resistencias calculadas para circuito de carga de batería.	306
Tabla LXIV: Parámetros para inicio del servidor	316
Tabla LXV: Asignación de pines.....	317
Tabla LXVI: Cases y acciones.....	318
Tabla LXVII: Funciones programadas.....	318
Tabla LXVIII: Potencia consumida sin carga al variar voltaje	322
Tabla LXIX: Potencia al variar la masa alimentando el motor con 4V	323
Tabla LXX: Potencia al variar la masa alimentando el motor con 5V.....	324
Tabla LXXI: Potencia al variar el peso alimentando el motor con 6V	325
Tabla LXXII: Valores de potencia con carga de 30 Kg a diferentes voltajes	326
Tabla LXXIII: Consumo de corriente de los módulos electrónicos.....	327
Tabla LXXIV. Rango de movimiento angular de los servomotores.	357

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (A) Prótesis funcional mecánica; (B) Prótesis mioeléctrica.	9
Figura 2. Potencial eléctrico medido entre dos electrodos.	10
Figura 3. Disposición de los tendones y ligamentos en la mano.	11
Figura 4. Poliolefina hilada en gel.	14
Figura 5. Curvatura esfuerzo-deformación para un polímero.	16
Figura 6. Elementos infinitesimales con la representación de esfuerzos.	17
Figura 7. Proceso aditivo utilizando una impresora 3D.	19
Figura 8. Fresadora CNC.	20
Figura 9. Composición interna de un servo.	21
Figura 10. Comportamiento de un servo ante diferentes señales enviadas.	22
Figura 11. Construcción de un sensor resistivo de fuerza.	24
Figura 12. Comportamiento del elastómero en un FSR al ser aplicada una fuerza.	24
Figura 13. Resistencia entre las terminales de una FSR contra cambios de fuerza.	25
Figura 14. Construcción de un sensor capacitivo.	26
Figura 15. Diagrama de bloques de un microcontrolador PIC16F84A.	27
Figura 16. Presentación PDIP de un microcontrolador PIC16F84A.	28
Figura 17. Presentación de un microcontrolador ATmega328P en su plataforma de prototipado.	28
Figura 18. (A) Topología de conexión SPI entre un maestro y un esclavo. (B) Topología de conexión SPI entre un maestro y tres esclavos.	30
Figura 19. Comunicación SPI entre un dispositivo maestro y un dispositivo esclavo.	30
Figura 20. Rango de voltajes según lógica TTL.	32
Figura 21. Espectro electromagnético.	33
Figura 22. Three-Way Handshake.	35
Figura 23. Modos de operación del estándar IEEE 802.11.	37
Figura 24. Elementos de paso.	38
Figura 25. Diagrama básico de bloques de un LDO.	39
Figura 26. Circuito equivalente de un amplificador operacional.	40
Figura 27. Topología básica de un puente doble H.	42
Figura 28. Flujo de corriente para ambos movimientos del motor.	42
Figura 29. Señal tipo PWM de control.	43
Figura 30. Corto circuito en un puente H.	44
Figura 31. Estructura de una batería tipo LiPo.	44

Figura 32. Principio de carga y descarga de una batería.....	45
Figura 33. Batería tipo LiPo.....	46
Figura 34. Voltajes y capacidad de baterías en una conexión en serie.....	47
Figura 35. Proceso de diseño con una herramienta CAD.....	49
Figura 36. Fases generales de diseño en inventor.	50
Figura 37. Ejemplo de robot 1.....	51
Figura 38. Ejemplo de robot 2.....	51
Figura 39. Ejemplo de robot 3.....	52
Figura 40. Ejemplo de robot 4.....	52
Figura 41. Ejemplo de funcionamiento de un capacitor bypass.	54
Figura 42. Topología de filtro pasa bajas.	54
Figura 43. Diagrama de bode de filtro.	55
Figura 44. Traces en una PCB.....	55
Figura 45. Herramienta para cálculo de ancho de tracks.....	56
Figura 46. Ilustración de las variables del modelo unicycle.	58
Figura 47. Ilustración de los parámetros del robot.....	58
Figura 48. Ilustración del desplazamiento de las llantas y el desplazamiento promedio.	59
Figura 49. Módulo HC-SR04.....	62
Figura 50. Diagrama de <i>timing</i> del módulo HC-SR04.....	62
Figura 51. Diagrama de una compuerta <i>NOT</i>	63
Figura 52. Diagrama de conexión de una compuerta <i>NOT</i> con transistor BJT.	64
Figura 53. Diagrama simplificado del funcionamiento del inversor con transistor BJT.....	64
Figura 54. Diagrama de una compuerta <i>AND</i> de dos entradas.....	65
Figura 55. Diagrama de una compuerta <i>OR</i> de dos entradas.....	65
Figura 56. Diagrama de un decodificador de 3 a 8.	67
Figura 57. Diagrama de bloques general de un microprocesador.	69
Figura 58. Diagrama de bloques general de un microcontrolador.	70
Figura 59. Diagrama básico de una arquitectura Von-Neumann.....	71
Figura 60. Diagrama básico de una arquitectura Harvard.....	71
Figura 61. Ubicación de los pines del Teensy LC.....	73
Figura 62. Esquemático del Teensy LC.	73
Figura 63. Ubicación de los pines del Teensy 3.2.....	74
Figura 64. Esquemático del Teensy 3.2.	75

Figura 65. Ejemplo de empaquetado DIP.	80
Figura 66. Ejemplo de empaquetado SMD	81
Figura 67. Tabla de información de empaquetados en una hoja de datos de Texas Instruments. ...	82
Figura 68. Datos mecánicos de un componente en una hoja de datos de Texas Instruments.....	83
Figura 69. Información del <i>footprint</i> de un componente de Texas Instruments.....	84
Figura 70. Sistema de control en lazo abierto.	87
Figura 71. Sistema de control en lazo cerrado.	87
Figura 72. Diagrama de bloques para determinar el error en estado estacionario.....	89
Figura 73. Error en estado estacionario.....	90
Figura 74. Diagrama de bloques de un controlador PID.....	90
Figura 75. Curva de carga a tensión constante.....	93
Figura 76. Curva de carga a corriente constante.	93
Figura 77. Curva de carga a corriente y voltaje constante.	94
Figura 78. Curva de carga a voltaje creciente.	94
Figura 79. Ciclo de carga de una batería.....	95
Figura 80: Esquema básico general de un microcontrolador.	96
Figura 81: Comunicación serial asíncrona.....	98
Figura 82: Comunicación serial síncrona.....	98
Figura 83: Diagrama de tiempos de un sensor SR04	101
Figura 84: Capas del internet según el modelo ISO OSI.....	102
Figura 85: Arquitectura cliente-servidor	103
Figura 86: Arquitectura Peer-to-Peer	104
Figura 87: Motor DC Simple	104
Figura 88: Puente en H.....	105
Figura 89: Primer sentido de giro.....	106
Figura 90: Segundo sentido de giro	106
Figura 91: Triangulación GPS	107
Figura 92. Mano robótica vendida por Bebionic.....	108
Figura 93. Robots para trabajo de enjambre Kilobot	109
Figura 94. Silla de ruedas TopChair-S capaz de subir y bajar gradas	110
Figura 95. El rover Spirit diseñado para explorar Marte.....	110
Figura 96. División del módulo de estructuras y actuadores del proyecto Protolife	111
Figura 97. Diagrama de flujo para el desarrollo del proyecto.....	112

Figura 98. Diagrama de bloques de los módulos de Swarm Robotics.	114
Figura 99. Controlador motor sin escobillas (brushless).....	119
Figura 100. Conector J2, entradas y salidas de la placa de control.	120
Figura 101. Diagrama de bloques del integrado BQ24450.	121
Figura 102. Circuito del cargador de batería.....	124
Figura 103. Transistor externo, configuración cuasi-darlington	124
Figura 104: Subsistemas del módulo	127
Figura 105. Molde realizado en periódico que tendría la forma de la plantilla.....	129
Figura 106. Plantilla después de haberla cosido y con el sensor dentro de su alojamiento.....	129
Figura 107. Diseño de la base del case.....	130
Figura 109. Diseño de la cubierta del case.....	131
Figura 110. Acople del case cortado en MDF.....	132
Figura 111. Impresión en 3D de la segunda versión del case.	132
Figura 112. Diseño de la parte superior del contenedor.....	133
Figura 113. Diseño de la parte posterior del contenedor.....	134
Figura 114. Diseño de la parte delantera del contenedor.	134
Figura 115. Diseño del lado izquierdo del contenedor.....	134
Figura 116. Diseño del lado derecho del contenedor.	135
Figura 117. Diseño de la base del contenedor.....	135
Figura 118. Diseño del fijador de tuercas para la parte superior.....	135
Figura 119. Diseño del acople para el fijador de tuercas.	136
Figura 120. Pieza en acrílico obtenida después de realizar el proceso de corte.	136
Figura 121. Sección del antebrazo cortada.....	137
Figura 122. Hilo utilizado en fases anteriores.....	141
Figura 123. Hilo utilizado en esta fase.....	142
Figura 124. Fuente de voltaje seleccionada.	143
Figura 125. Pines de reloj utilizados anteriormente para unir las falanges.	144
Figura 126. Pines sólidos utilizados actualmente para unir las falanges.....	144
Figura 127. Moldes de las yemas hechos con arcilla.	145
Figura 128. Yemas obtenidas en silicón.....	146
Figura 129. Silicón utilizado para realizar las yemas.....	146
Figura 130. Segunda versión de la plantilla de los pies.	147
Figura 131. Segunda versión del case del tobillo.....	147

Figura 132. Vista del contenedor armado.	148
Figura 133. Pieza de acrílico doblada.	148
Figura 134. Ensamblaje entre mano y muñeca después de haberse pintado.	149
Figura 135. Base para el Arduino Uno en acrílico.	149
Figura 136. Base para los servos del antebrazo y polea hechas de acrílico.....	150
Figura 137. Unión de los hilos nuevos con los servomotores.	150
Figura 138. Fuente de alimentación colocada en su contenedor.	151
Figura 139. Unión de las falanges con los pines sólidos.	151
Figura 140. Instalación de las yemas con los sensores.....	152
Figura 141. Forma típica de una señal mioeléctrica obtenida por electrodos.	153
Figura 142. Ilustración del mecanismo típico para la obtención de una señal mioeléctrica.....	154
Figura 143. Prótesis biomecánica creada durante el año 1844.....	155
Figura 144. Prótesis biomecánica moderna fabricada con una impresora 3D.....	156
Figura 145. Dimensiones y pines del módulo nRF24L01+.....	161
Figura 146. Configuración de pines para el microcontrolador Pro Trinket.....	164
Figura 147. Circuito divisor de voltaje para la conexión de un sensor resistivo de fuerza.	165
Figura 148. Diagrama de bloques del controlador.	166
Figura 149. Esquema final del controlador.	166
Figura 150. Vista isométrica de la pared 1 del case.	167
Figura 151. Vista isométrica de la pared 2 del case.	167
Figura 152. Vista isométrica de la base de baterías del case.....	168
Figura 153. Vista frontal del antebrazo anterior.....	169
Figura 154. Vista inferior del antebrazo anterior.	170
Figura 155. Divisiones propuestas para el modelo de la prótesis.....	171
Figura 156. Planos de trabajos definidos cada 1cm en inventor.	172
Figura 157. Vista isométrica del primer modelo de la sección superior del antebrazo.	173
Figura 158. Vista superior del primer modelo de la sección alta del antebrazo.	174
Figura 159. Vista inferior del primer modelo de la sección baja del antebrazo.	174
Figura 160. Vista lateral derecha del modelo final de la sección alta del antebrazo.	175
Figura 161. Vista isométrica del modelo final de la sección alta del antebrazo.....	176
Figura 162. Vista isométrica del modelo final de la sección baja del antebrazo.....	177
Figura 163. Vista superior del modelo final de la sección baja del antebrazo.	177
Figura 164. Vista inferior del modelo final de la sección baja del antebrazo.....	178

Figura 165. A) Vista isométrica y B) vista lateral del ensamblaje del modelo final del antebrazo.	178
Figura 166. Ampliación del punto de conexión en la sección alta del antebrazo.....	179
Figura 167. Ampliación del punto de conexión en la sección baja del antebrazo.....	179
Figura 168. Circuito para la lectura de un sensor resistivo.	181
Figura 169. Base impresa en 3D para distribuir pesos sobre el sensor.	181
Figura 170. Gráfica de las mediciones obtenidas de la caracterización del sensor en Excel.	183
Figura 171. Diagrama de flujo del esquema de control del agarre implementado.	184
Figura 172. Diagrama de flujo de la operación del emisor.	187
Figura 173. Diagrama de flujo para la operación del receptor.	189
Figura 174. Diseño de la placa PCB para el controlador.	191
Figura 175. Esquemático del circuito de control de la prótesis.....	192
Figura 176. Diseño de la placa PCB para el circuito principal de la prótesis.....	193
Figura 177. Esquemático del circuito de potencia de la prótesis.....	193
Figura 178. Diseño de la placa PCB para el circuito de potencia de la prótesis.....	194
Figura 179. Parte inferior de la placa PCB para el controlador.....	198
Figura 180. Parte superior de la placa PCB para el controlador.....	199
Figura 181. Placa PCB del controlador con los componentes instalados.....	199
Figura 182. Controlador completo final.....	200
Figura 183. Controlador y plantilla.	200
Figura 184. Controlador encendido colocado dentro del case abierto.....	201
Figura 185. Controlador colocado dentro del case cerrado.....	201
Figura 186. A) Resultados desplegados en la terminal serial del controlador y B) resultados desplegados en la terminal serial del circuito principal.....	202
Figura 187. Modelo de la parte alta del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.	203
Figura 188. Vista superior del modelo de la parte alta del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.....	204
Figura 189. Vista inferior del modelo de la parte alta del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.....	204
Figura 190. Modelo de la parte baja del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.	205

Figura 191. Vista superior del modelo de la parte baja del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.....	205
Figura 192. Vista inferior del modelo de la parte baja del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.....	206
Figura 193. Ensamblaje completo del antebrazo.....	206
Figura 194. Ensamblaje del antebrazo y la mano.....	207
Figura 195. Ensamblaje completo de la prótesis.....	207
Figura 196. Parte inferior de las placas PCB. A la izquierda, placa de potencia; A la derecha, placa de control.....	208
Figura 197. Placa de control conectada al Arduino Uno.....	208
Figura 198. Placa de potencia final.....	209
Figura 199. Prueba de la posición 1, indicación con índice.....	209
Figura 200. Prueba de la posición 2, agarre cilíndrico.....	210
Figura 201. Prueba de la posición 3, mano cerrada.....	210
Figura 202. Módulo HC-05 de comunicación inalámbrica con protocolo Bluetooth.....	212
Figura 203. Módulo ESP-8266 de comunicación inalámbrica con protocolo Wi-Fi.....	212
Figura 204. Microcontrolador Teensy LC.....	215
Figura 205. Teensy 3.2.....	224
Figura 206. Primer paso para la creación de la caja de herramientas.....	227
Figura 207. Ubicación de la opción de crear la caja de herramientas en Matlab.....	228
Figura 208. Pantalla para definir las características de la caja de herramientas.....	228
Figura 209. Pantalla de análisis de archivos de la caja de herramientas y características finales.....	229
Figura 210. Primer bosquejo de la estructura del robot.....	230
Figura 211. Hexágono con sus ángulos exteriores e interiores.....	231
Figura 212. Proceso de diseño de pieza para ultrasónicos.....	232
Figura 213. Proceso de diseño de pieza para ultrasónicos.....	232
Figura 214. Proceso de diseño de pieza para ultrasónicos.....	232
Figura 215. Proceso de diseño de pieza para ultrasónicos.....	233
Figura 216. Primer intento de fabricación de módulo hexágono.....	233
Figura 217. Segundo intento de fabricación de módulo hexágono.....	234
Figura 218. Ball Caster utilizado.....	234
Figura 219. Diseño de porta Switch y fusible.....	235
Figura 220. Porta Switch y fusible ya implementado en ensamble.....	235

Figura 221. Diseño de placa base para motores con piezas de MDF que sostiene las baterías tipo LiPo (en verde).	236
Figura 222. Pieza de MDF impresa.	237
Figura 223. Driver doble puente H DRV8833	238
Figura 224. Módulo de carga LiPo.	242
Figura 225. Cableado de baterías y cargadores.	243
Figura 226. Cableado de baterías y cargadores en modo carga.	243
Figura 227. Cableado de baterías y cargadores en modo descarga.	244
Figura 228. Circuito de prueba.	245
Figura 229. Ruido en línea de 5V.	246
Figura 230. Línea de 5 voltios luego de ser filtrada.	247
Figura 231. Diagrama de bode de filtro aplicado.	247
Figura 232. Potenciómetros de precisión de los encoders.	248
Figura 233. Señales de encoders en reversa.	249
Figura 234. Robot prototipo.	250
Figura 235. Creación de librería de esquemático	251
Figura 236. Dibujando símbolo de componente.	251
Figura 237. Colocación de pines.	252
Figura 238. Editando pin.	253
Figura 239. Creación de librería PCB.	253
Figura 240. IPC Compliant Footprint Creator.	254
Figura 241. Selección de empaquetado.	254
Figura 242. Ingresar medidas.	255
Figura 243. Modificación de pad.	255
Figura 244. Agregando footprint al esquemático.	256
Figura 245. Esquemático de circuito.	257
Figura 246. Herramienta para cálculo de ancho de tracks.	258
Figura 247. Diseño de PCB.	259
Figura 248. Tapa del robot.	260
Figura 249. Base del robot con identificación.	261
Figura 250. Armado final de robot.	262
Figura 251. Circuito de prueba para regulador de 5V.	263
Figura 252. Circuito de prueba para regulador de 3V.	263

Figura 253. Robot desarmado para prueba térmica.....	264
Figura 254. Disipador colocado sobre regulador de 5V.....	265
Figura 255. Disipadores nuevos colocados.....	266
Figura 256. Eficiencia de regulador de 5V y de 3V.....	268
Figura 257. Temperatura en operación baja.....	268
Figura 258. Temperatura en operación alta.....	269
Figura 259. Temperatura con disipador en operación alta.....	269
Figura 260. Disipadores nuevos a carga baja.....	270
Figura 261. Disipadores nuevos con carga alta.....	270
Figura 262. Disipación de calor por medio de la placa.....	271
Figura 263. Respuesta de motores.....	271
Figura 264. Decodificador de 3 a 8.....	275
Figura 265. Lógica combinacional para simplificar los pines de Echo de los sensores ultrasónicos.....	276
Figura 266. Circuito para probar el funcionamiento de la falda de sensores ultrasónicos.....	276
Figura 267. Placas para el prototipo de la falda de sensores.....	277
Figura 268. Prototipo de la falda de sensores.....	277
Figura 269. Prototipo ensamblado.....	277
Figura 270. Ejemplo de la librería esquemáticos de componentes, para un circuito integrado.....	278
Figura 271. Ejemplo de la librería esquemáticos de componentes, para un transistor npn.....	279
Figura 272. Ejemplo de la librería esquemáticos de componentes, para un capacitor.....	279
Figura 273. Esquemático del sensor ultrasónico HCSR04.....	279
Figura 274. Ejemplo de la librería de <i>footprints</i> , para un circuito integrado.....	280
Figura 275. Ejemplo de la vista 3D del componente en la librería de <i>footprints</i>	281
Figura 276. <i>Footprint</i> añadido en la librería de esquemáticos, para el sensor ultrasónico HCSR04.....	281
Figura 277. Diseño del PCB de la placa de la falda de sensores ultrasónicos.....	283
Figura 278. Vista 3D del PCB de la falda de sensores ultrasónicos.....	283
Figura 279. Diseño del PCB de la placa de módulos.....	284
Figura 280. Vista 3D del PCB de módulos.....	284
Figura 281. Diseño experimental para la calibración de la falda de sensores.....	287
Figura 282. Superficie para las pruebas del algoritmo de control.....	287
Figura 283. PCB de la falda de sensores ultrasónicos, después de ser fresados.....	288

Figura 284. PCB de módulos, después de ser fresado.....	288
Figura 285. Primera etapa de soldadura del PCB de sensores ultrasónicos.	289
Figura 286. Sensores ultrasónicos y pieza de soporte montados sobre el PCB.....	289
Figura 287. Parte inferior del PCB de sensores ultrasónicos.	290
Figura 288. PCB de módulos, con el Teensy, la IMU y el ESP8266.....	290
Figura 289. Parte inferior del PCB de módulos.	291
Figura 290. PCB de módulos montado sobre PCB de sensores ultrasónicos.....	291
Figura 291. Vista final del robot, con los PCB montados sobre la estructura.....	292
Figura 292. Tiempos medidos por los ultrasónicos, referencia a 4 cm.	293
Figura 293. Tiempos medidos por los ultrasónicos, referencia a 10 cm.	294
Figura 294. Tiempos medidos por los ultrasónicos, referencia a 24 cm.	295
Figura 295. Tiempos medidos por los ultrasónicos, referencia a 34 cm.	296
Figura 296. Prueba 1 controlador proporcional.....	297
Figura 297. Secuencia de imágenes de la trayectoria seguida durante la prueba 1 de control proporcional.....	298
Figura 298. Prueba 2 controlador proporcional.....	298
Figura 299. Secuencia de imágenes de la trayectoria seguida durante la prueba 2 de control proporcional.....	299
Figura 300. Prueba 3 controlador proporcional.....	299
Figura 301. Secuencia de imágenes de la trayectoria seguida durante la prueba 3 de control proporcional.....	300
Figura 302. Prueba 4 controlador proporcional.....	300
Figura 303. Secuencia de imágenes de la trayectoria seguida durante la prueba 4 de control proporcional.....	301
Figura 304. Prueba 5 controlador proporcional.....	301
Figura 305. Secuencia de imágenes de la trayectoria seguida durante la prueba 5 de control proporcional.....	302
Figura 306. Prueba 6 controlador proporcional.....	302
Figura 307. Secuencia de imágenes de la trayectoria seguida durante la prueba 6 de control proporcional.....	303
Figura 308. Diagrama de flujo de las rutinas de los triángulos.	306
Figura 309. Esquemático del circuito de carga de batería.....	307
Figura 310. PCB Top Layer.....	308

Figura 311. PCB Bottom Layer.	308
Figura 312. Placa soldada, top layer.	309
Figura 313. Placa soldada, bottom layer.	309
Figura 314: Subsistema de control.....	311
Figura 315: Conexión realizada para comunicación con Raspberry Pi.....	313
Figura 316: Código para la instalación de agente en Raspberry Pi.....	314
Figura 317: Sesión iniciada en la Raspberry Pi desde Dataplicity.....	314
Figura 318: Módulo de cámara V2 para Raspberry Pi.....	315
Figura 319: Conexión del módulo de cámara a Raspberry pi.....	315
Figura 320: Driver para motor DC.....	319
Figura 321: HC-SR04.....	320
Figura 322: FONA808.....	320
Figura 323: Potencia vs. voltaje.....	323
Figura 324: Potencia al variar la masa alimentando el motor con 4V.....	324
Figura 325: Potencia al variar la masa alimentando el motor con 5V.....	325
Figura 326: Potencia al variar la masa alimentando el motor con 6V.....	326
Figura 327: Relación voltaje-potencia con 30Kg de carga.....	327
Figura 328: Activación del servidor Mjpg-Streamer.....	328
Figura 329: Controles e interfaz de usuario.....	328
Figura 330: PWM con valor de 128, ciclo de trabajo del 50%.....	329
Figura 331: PWM con valor de 255, ciclo de trabajo de 100%.....	329
Figura 332: Verificación de conexión con FONA.....	330
Figura 333: Verificación de estado de red (registrado).....	331
Figura 334: Coordenadas GPS según mapas de google.....	331
Figura 335: Coordenadas GPS según FONA808.....	332
Figura 336: Obtención de mediciones sensores ultrasónicos.....	332
Figura 337: Diseño de placa para interconexión entre Arduino y el módulo de potencia, FONA y la unidad de medición inercial.....	333
Figura 338: Diseño de placa para colocar sensores ultrasónicos HC-SR04.....	333
Figura 339. Eficiencia de TPS54308.....	342
Figura 340. Eficiencia para LM2596.....	343
Figura 341. Ejemplo de una PCB con multi capas.....	344
Figura 342. Poses de la mano.....	358

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se retomaron diferentes megaproyectos realizados entre los años 2008 y 2012 dentro del Departamento de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica de la Universidad del Valle de Guatemala. Previo a aplicarles reingeniería para su optimización, se investigó sobre ellos, para tener una visión global y tomar un camino para optimizarlos y dejarlos 100% funcionales. En algunos casos se tomaron elementos anteriores para integrarlos en el nuevo diseño, y se descartaron componentes que se consideraron prescindibles.

Los megaproyectos contemplados son: Silla profectus, un diseño para personas discapacitadas; Prótesis biónica transhumeral, que replica el brazo y la mano de un humano; Sistema explorador robotizado y autárquico, que es capaz de navegar por un terreno; y Swarm robotics, que es una plataforma de bajo costo para probar algoritmos de navegación automática y robótica de enjambre. Se logró que cada megaproyecto esté disponible para demostraciones públicas, y pueden ser utilizados para realizar investigaciones. La Silla Profectus está lista para movilizarse y subir gradas con un control alámbrico e inalámbrico, y un circuito de carga de batería. La Prótesis biónica transhumeral fue restaurada y se diseñó un controlador para manejarla con el pie. El Sistema explorador robotizado y autárquico se restauró y es capaz de recibir instrucciones de control de motores, video *streaming* y enviar información de sus sensores a través de internet. La plataforma Swarm Robotics presenta un diseño de bajo costo, escalable, y lo más importante, es versátil al ser utilizable en demostraciones públicas, en | como Sistemas de Control y Robótica.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo global de la tecnología nos invita a estar en constante cambio y en búsqueda de nuevas soluciones a problemáticas cotidianas. Es un hecho que esta ha evolucionado de una manera muy acelerada en los últimos años y es nuestra responsabilidad adaptarnos y unirnos a ese crecimiento. Con sus avances nos brinda herramientas cada vez más potentes, que nos proveen de medio para la obtención de soluciones más óptimas y eficaces. La Universidad del Valle de Guatemala, comprometida con la innovación, permite a sus estudiantes utilizar la modalidad de “Megaproyecto” como método para optar al título de la licenciatura. Este consiste en integrar grupos de trabajo que tienen como propósito desarrollar soluciones a retos planteados.

En muchas ocasiones, estos proyectos no sufren cambios sustanciales ni transformaciones, por lo que algunos pierden funcionalidad al paso del tiempo. Es por esto que se implementó reingeniería a los proyectos desarrollados en el departamento de Ingeniería de Electrónica y Mecatrónica de la universidad, en los años del 2008 al 2012, con el objetivo de tener proyectos completamente funcionales y optimizados para su utilización en demostraciones y actividades diversas. Los proyectos contemplados para este megaproyecto son:

- Prótesis Biónica Transhumeral
- Silla Profectus
- Sistema Explorador Robotizado y Autárquico
- Swarm Robotics

Cada uno de estos proyectos, estructurados en sub módulos, presentó una serie de fortalezas y debilidades, que se tomaron en cuenta al momento de implementar la reingeniería. Se hizo un profundo análisis del estado actual de los sistemas, para poder establecer las mejoras y cambios a ejecutar.

II. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Retomar diversos megaproyectos realizados entre los años 2008 a 2012 dentro del departamento de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica de la Universidad del Valle de Guatemala y aplicarles Re-Ingeniería de tal forma que puedan estar 100% funcionales y optimizados para su utilización en demostraciones y actividades diversas.

B. PRÓTESIS BIÓNICA

1. Generales

- Restaurar el funcionamiento de los dedos, los sensores y la muñeca de la prótesis.
- Realizar una mejora en la apariencia, actuadores y sensores de la prótesis de brazo transhumeral.
- Implementar un módulo de alimentación de la prótesis a fin de que posea su propia fuente de voltaje.
- Diseñar e implementar un sistema de control para el movimiento de la mano de forma inalámbrica utilizando plantillas en los pies.

2. Específicos

- Sustituir el hilo utilizado en el accionamiento de las falanges por uno que no sufra estiramiento.
- Diseñar una estructura de acrílico que contenga al microcontrolador junto a los servomotores y una compuerta que facilite el acceso a los servos ubicados en el antebrazo.
- Permitir que el movimiento realizado por la muñeca no interfiera con la tensión de los hilos conectados en los servos del antebrazo.
- Reemplazar las yemas de los dedos junto a los sensores que se encuentren dañadas.
- Cambiar los pines utilizados para unir las falanges entre ellas y a la mano por unos de tipo sólido.
- Hacer una plantilla para los pies donde se ubicará el sensor de presión.
- Diseñar e imprimir un case que contenga la PCB del circuito de control de la plantilla de los pies.
- Diseñar una base en la que se unirá el antebrazo para fines demostrativos.
- Cambiar el color de la mano y la muñeca para mejorar su apariencia y evitar que se ensucie.
- Diseñar y fabricar un antebrazo que mejore la apariencia física y proteja los circuitos y actuadores.

- Analizar e implementar microcontroladores apropiados, según la aplicación, y desarrollar la programación para su funcionamiento.
- Implementación de sensores resistivos de fuerza en la yema de los dedos para indicar la cantidad de fuerza aplicada por cada dedo, utilizando esta señal para mejorar el agarre y proteger los servomotores de una fuerza mayor de la soportada.
- Diseñar e implementar un sistema de control de movimiento, ubicado en los tobillos, utilizando sensores resistivos de fuerza en plantillas colocados en los pies
- Implementar una comunicación de forma inalámbricamente entre el sistema de control de movimiento y el microcontrolador de los actuadores en el antebrazo.
- Diseñar y fabricar placas PCB para el módulo de control (emisor) y el módulo de actuadores (receptor).

C. SWARM ROBOTICS

1. Generales

- Desarrollar e implementar un protocolo de comunicación inalámbrica y una librería de Matlab que permitan la implementación de sistemas de control en un robot capaz de funcionar por su cuenta o como parte de un enjambre.
- Recopilar datos de proximidad, aceleración y giro, utilizando sensores ultrasónicos y una IMU, para un robot destinado a trabajar en enjambre.
- Desarrollar una estructura modular de fácil armado, rápida fabricación y bajo costo para un robot destinado a trabajar en enjambre.
- Diseñar y fabricar un circuito PCB de potencia que suministre energía a todos los componentes eléctricos para un robot destinado a trabajar en enjambre.

2. Específicos

- Desarrollar un protocolo de comunicación robusto que permita controlar los robots inalámbricamente desde Matlab utilizando el módulo WIFI ESP-8266.
- Diseñar una librería de Matlab que sea eficiente y fácil de usar para la implementación de sistemas de control.
- Programar un sistema de control que permita tomar y enviar datos sin interrumpir el movimiento del robot.

- Armar un sistema que sea económico y fácil de replicar para el departamento de ingeniería electrónica y mecatrónica.
- Diseñar y fabricar el PCB para montar la lógica de control de los sensores ultrasónicos.
- Programar un microcontrolador para gobernar la toma de datos de los sensores ultrasónicos y de la IMU, y tener información disponible para transmisión.
- Calibrar las mediciones de los sensores ultrasónicos con referencias radialmente simétricas.
- Realizar pruebas con teoría de control para verificar la funcionalidad del robot, operando individualmente.
- Programar un microcontrolador para controlar los dos motores DC e interpretar sus encoders.
- Diseñar e implementar una PCB de potencia para suministrar energía a todos los componentes eléctricos
- Diseñar y construir en MDF la base de la estructura del robot donde irán los motores DC con sus encoders.
- Diseñar y fabricar por medio de impresión 3D la estructura que albergará los seis sensores ultrasónicos.

D. SILLA

1. Generales

- Diseñar un sistema de control, tal que la silla suba cualquier tipo de gradas.
- Implementar un sistema de carga de batería interno, específicamente para baterías de ácido-plomo.

2. Específicos

- Diseñar rutinas que reciban como parámetros la dirección de giro de los triángulos y así subir gradas.
- Diseñar el método adecuado para cargar la batería de la silla e implementarlo.
- Replicar el ciclo de carga de una batería.
- Realizar un diseño eficiente para el PCB del cargador de batería.

E. ROBOT EXPLORADOR

1. Generales

- Controlar el robot explorador de manera remota desde una estación de control fija, a través de una aplicación web.

2. Específicos

- Implementar el robot explorador en playas guatemaltecas en donde exista recepción de la red GSM/GPRS.
- Conectar al robot explorador con la estación de control fija a través de Internet, por medio de la red GSM/GPRS.
- Transmitir video desde el robot explorador a la estación de control en tierra fija.
- Implementar un control eficiente de potencia de los motores del robot explorador.
- Reportar a la estación de control fija la orientación del robot en el espacio, su geolocalización, temperatura interna y la distancia entre dicho robot y objetos cercanos a través de sensores dedicados.

III. JUSTIFICACIÓN

El propósito del megaproyecto Reingeniería de Megaproyectos Fase I es retomar algunos de los proyectos de graduación entre los años 2008 a 2012, los cuales en su tiempo funcionaron de forma adecuada pero que por el tiempo y la falta de mantenimiento dejaron de funcionar correctamente, y trabajar con la base fundamental de los megaproyectos. Haciéndolos funcionar nuevamente y agregándole mejoras ya sean de tecnología o de funcionamiento general.

A estos proyectos se les ha invertido una cantidad considerable de dinero, pero sobre todo se le han invertido una gran cantidad de horas de trabajo por parte de varios estudiantes que en su momento realizaron estos proyectos con el fin de poder terminar la carrera de ingeniería. Además, contienen conocimientos que en su época fueron novedoso, pero que con el pasar del tiempo se han vuelto obsoletos, por lo cual se busca actualizar todos estos conocimientos introduciendo nuevas tecnologías como es en el caso de los controladores que se utilizan, hacer cambios sustanciales en la electrónica de todos los proyectos y mejorar la parte mecánica de cada uno de ellos.

Entre los megaproyectos a renovar se encuentran la silla profectus, la prótesis biónica, el robot explorador y swarm robotics. En el caso de la silla profectus, es un proyecto interesante e innovador debido a que es una silla de ruedas con la capacidad de subir gradas. La prótesis biónica, conlleva investigación sobre sensores que leen señales producidas por los músculos del cuerpo e implementa formar alternar de poder controlar una prótesis. En el caso del robot explorador toma en cuenta la comunicación inalámbrica por medio de wifi y comunicación remota por medio de una cámara, se le implemento nueva electrónica de potencia.

El megaproyecto swarm robotics busca crear nuevos proyectos de bajo costo y que sirvan para demostraciones públicas, además de ser un proyecto interesante ya que la idea es que trabajen en conjunto comunicándose entre varios robots.

IV. MARCO TEÓRICO

A. PRÓTESIS BIÓNICA

1. **Prótesis.** El término prótesis proviene del griego prós (πρός) ‘por añadidura’, ‘hacia’ y thé-sis (θεσις) de ‘disposición’. La Real Academia Española (2016) tiene la siguiente definición: Aparato destinado a utilizarse en el procedimiento a través del cual se repara, de forma artificial, la falta de un órgano o parte de él. Con el avance de la tecnología y la incorporación de elementos que proveen una realimentación al usuario o a la misma prótesis se puede agregar lo siguiente: Se considera como prótesis a aquel objeto con procedencia artificial, que puede poseer autonomía y cierta inteligencia al agregársele dispositivos como sensores, procesadores, actuadores, etc., y realiza la función de aquella parte que sustituye o reemplaza. [23]

Los desarrollos aplicados a estos artefactos han llevado una fusión de conocimientos de fisiología y biomecánica humana, mecanizado de materiales y prototipado de mecanismos, sin dejar a un lado la implementación de interfases hombre-máquina. Tan solo la mano humana posee, a grandes rasgos, dos funciones; la prensión y el tacto. A través del sentido del tacto se obtiene información del medio como la fuerza, temperatura, etc., además el dedo pulgar representa aproximadamente el 40% de la funcionalidad de la mano. El brazo humano, por su parte, posee 25 GDL y una alta destreza. Con esta información es fácil imaginar el porqué de la inclusión de diferentes campos para el desarrollo de estos artefactos. [23]

Con la evolución de la tecnología y la incursión de diferentes países para mejorar los diseños de prótesis ya existentes o crear algunos innovadores, en los últimos 20 años se ha logrado contar con los recursos, técnicas, metodologías, tecnologías de materiales y de control, incluyendo la automatización, suficientemente avanzados para realizar grandes avances respecto a los modelos originales. Se incluyen acá las mejoras a las prótesis de gancho por el uso de moldes y la evolución de polímeros, permitiendo que tengan una apariencia más realista. [25]

Para realizar una prótesis que requiera cumplir con las características necesarias de funcionalidad y estética se requiere un gran esfuerzo, tanto por parte del campo de la mecatrónica como neurociencia, ingeniería eléctrica, ciencias cognitivas, procesamiento de señales, diseño de baterías, nanotecnología y ciencias del comportamiento. Dichas características que emularían de manera correcta la dinámica del miembro amputado vendrían siendo las siguientes:

- Tamaño y masa: Las dimensiones y el peso deben ser lo más parecidas al del miembro real. Esto permitirá una mejor adaptación y manipulación por parte del usuario. Lo que conlleva a una reducción en el riesgo de daño de los músculos conectados a la prótesis.
- Velocidad y torque: Debe capturar de manera correcta el comportamiento del miembro que sustituye.
- Baterías: Tiempo de alimentación que sea lo más grande posible. Con esto se evitan inconvenientes durante la ejecución.
- Ancho de banda del torque: La frecuencia del movimiento debe ser lo más cercano a una natural.
- Realimentación al Usuario: Debe de proveérsele avisos al usuario del contacto con el medio por parte de la prótesis y la información que ha recolectado. Algunas posibles soluciones son: interfaces hápticas o señales eléctricas. [25]

Se tienen otros elementos que vale la pena resaltar: Agarre seguro y estable, fácil de alinear para tomar algún objeto, buena visibilidad al hacerlo, mínima cantidad de acciones para alinear la muñeca y la capacidad de sostener objetos en diferentes formas. Otro aspecto importante al tomar en cuenta el diseño o reemplazo de componentes son los materiales y las propiedades que estos deben de tener, en cuanto a aplicaciones de prótesis es preferible que puedan cambiar sus características físicas. Se utilizan principalmente en juntas que son el equivalente a las falanges o hilos equivalentes a los tendones. De estos últimos, alambres musculares, delgados y de alta resistencia mecánica, son elaborados con aleaciones de Níquel y Titanio llamadas “Nitinol”, las cuales son aleaciones de memoria y las más utilizadas. En general, se buscan materiales con buena respuesta, compatibilidad, resistencia y durabilidad, ver Tabla I.

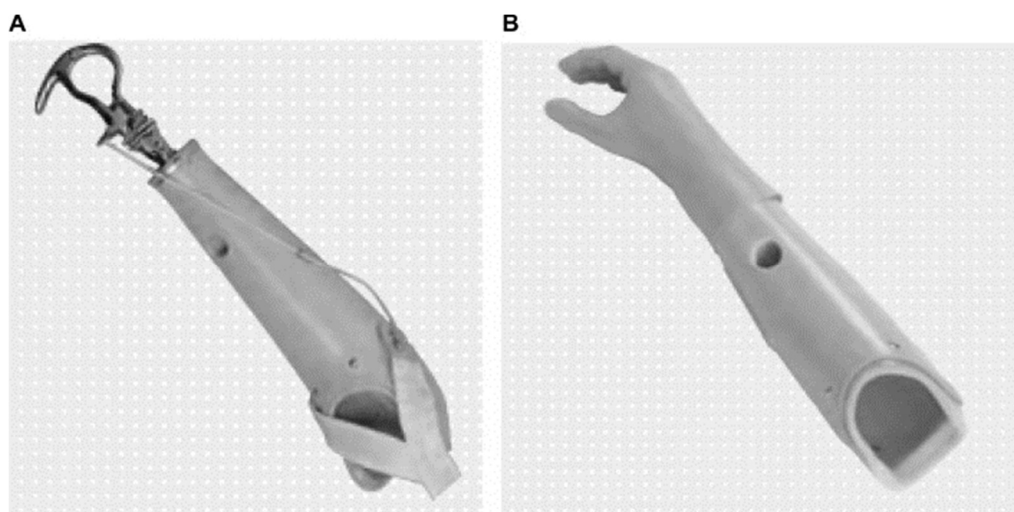
Tabla I. Materiales utilizados actualmente para el desarrollo de prótesis.

Materiales con memoria de forma	Aleaciones con memoria de forma: NiTi, CuAlTi, NiTiCu [2, 51]
	Polímeros con memoria de forma: SMP, Veriflex [2, 52]
	Cerámicos con memoria de forma [2, 53]
	Aleaciones con memoria de forma ferromagnética [2, 51, 53]
Materiales electro y magneto activos	Materiales piezoeléctricos [2, 53, 54]
	Materiales electro y magneto restrictivos [2, 53]
Materiales foto y cromo activos	Electroluminiscentes [2, 54]
	Fluorescentes [2, 54]
	Foto cromáticos [2, 54]
	Termo cromáticos [2, 54]
	Electro cromáticos [2, 54]

[38]

Existen tres tipos de prótesis disponibles para personas que han perdido parcial, o por completo, un miembro: prótesis cosméticas, las cuales están diseñadas principalmente para restaurar la apariencia y la simetría; prótesis funcionales mecánicas, las cuales usualmente son controladas por cables o hilos y las prótesis funcionales electrónicas, las cuales son alimentadas de energía por medio de baterías y sus actuadores son de origen electrónico. Las prótesis eléctricas usualmente son controladas por señales mioeléctricas obtenidas de músculos o nervios funcionales cerca de la localidad de amputación por medio de electrodos. Estas señales pueden ser obtenidas por métodos invasivos, colocando los sensores quirúrgicamente en el músculo o por medios no invasivos usando electrodos de superficies.

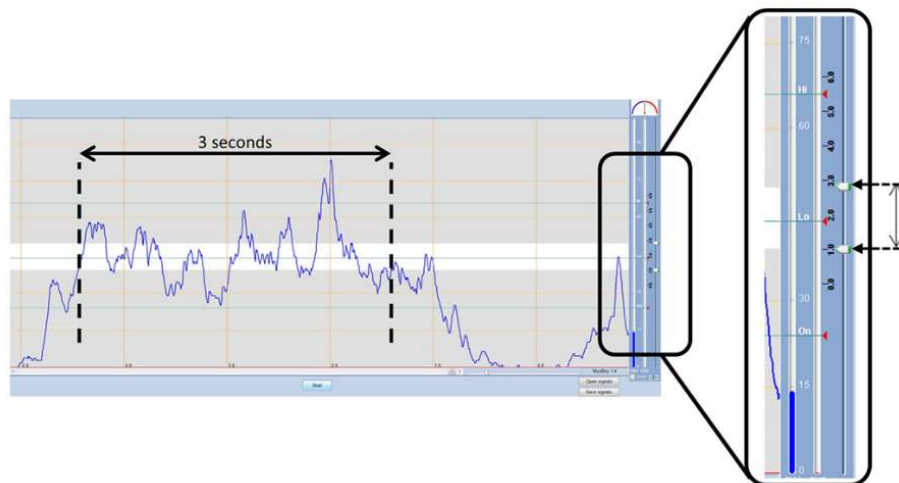
Figura 1. (A) Prótesis funcional mecánica; (B) Prótesis mioeléctrica.



[19]

El principio de obtención de señales mioeléctricas se basa en la medición de un diferencial de potencial entre una señal muscular y un punto neutro. El control más básico consiste en únicamente dos electrodos, un lector y un base, colocados en distintos lugares. Cuando una señal eléctrica enviada por el sistema nervioso central pasa por el músculo, el diferencial de potencial entre el electrodo lector y el electrodo base aumentará, y se podrá observar y medir tal como se ve en la Figura 2. Un sistema más completo integra varios electrodos lectores para obtener varias lecturas de potenciales y así controlar distintos grados de libertad en la prótesis.

Figura 2. Potencial eléctrico medido entre dos electrodos.



[1]

Dentro del aspecto de las prótesis mioeléctricas existen varios esquemas para el control con estas señales. El uso y aplicación de estos dependerán de la cantidad de grados de libertad a controlar, capacidad de procesamiento de la unidad central en la prótesis y otras características.

2. Cinemática articular. La mecánica articular posee las siguientes características: Son desplazamientos angulares de los segmentos articulares, no existen ejes fijos y existen rotaciones sobre los tres ejes del espacio y traslaciones sobre los mismos (6 grados cinéticos). Para lograr los diferentes movimientos se utilizan dos componentes, de manera principal, los ligamentos y los tendones. Estas son estructuras suaves con tejido conjuntivo y sus características mecánicas dependen de: Los tipos de fibras, los cuales son elásticas (tal como lo dice su nombre son elásticas y frágiles), colágenas (poseen tenacidad y son dúctiles) y reticulina (no posee alguna propiedad mecánica solo da volumen); la proporción entre estas fibras, en los ligamentos sobresale la presencia de las de tipo elásticas, como resultado se obtienen tejidos elásticos con poca deformación y frágiles. Por su parte los tendones poseen más fibras colágenas lo que les da la característica de ser conectivos flexibles, tenaces y dúctiles; la última característica es por la disposición en que estas fibras se encuentran en las estructuras, en los ligamentos sobresalen de tipo espiral y paralelo, aunque poseen orientaciones distintas o según cada articulación. En los tendones se tiene disposición de tipo longitudinal y paralela a este eje respecto del tendón. [7]

Dicho lo anterior es posible definir los comportamientos de cada uno. Los ligamentos se destacan por guiar el movimiento normal, prevenir las anomalías y mantener la presión intraarticular que permite la

correcta nutrición del cartílago. En contraparte, la función principal del tendón es transmitir fuerzas, estas provienen del músculo y van al hueso o viceversa (tracción). Ambas poseen comportamiento mecánico de tipo anisotrópico. En cuanto a su deformación se puede mencionar que en los ligamentos existe reclutamiento de las fibras de elastina, una tensión creciente de las fibras una vez reclutadas y puede darse el caso de alguna ruptura sin la necesidad de que se absorba o exista gran cantidad de energía. Los tendones poseen un comportamiento lineal o telescopaje de la cadena, lo que implica que las fibras se abren o cierran en grupos. Según el tipo de fuerza aplicada pueden ser viscosas. Ante alguna tracción lenta o cíclica se puede dar una rotura a nivel de la unión hueso-tendón y una tracción rápida puede ocasionar una lesión interna al tendón. Es dúctil, flexible y resistente a la tracción. La tensión que puede soportar puede llegar a ser el doble o más de la que puede generar el músculo. En la Figura 4 se puede observar cómo estos se distribuyen en la mano. [7]

Figura 3. Disposición de los tendones y ligamentos en la mano.



[22]

3. Hilo de pescar. En la actividad de la pesca, un componente de suma importancia es el hilo que se utiliza para ejercerla. Su principal función es lograr soportar las altas tensiones a las que, los peces, ejercen para intentar soltar el anzuelo que contiene la carnada. Los materiales que se utilizan para su creación son distintos y el procedimiento utilizado determina sus características mecánicas y físicas. [13]

Estas líneas son filamentos, de forma general, son hechas de cadenas basadas en polietileno o propileno. Poseen un peso molecular de al menos 400,000, una tenacidad de al menos 15 gramos por denier (g/d), un módulo de tensión de al menos 500 g/d (los monofilamentos de nylon tienen un promedio de 20 a 50 g/d) y un punto de fusión de por lo menos 140°C. Poseen como características una alta resistencia a la

abrasión, un bajo estiramiento, alta tenacidad, buenas dimensiones (en cuanto a pesca) y estabilidad hidrolítica, sin dejar a un lado la resistencia que posee a la fluencia bajo la aplicación de cargas constantes. Inicialmente son de color blanco y opacos. [13]

Como componente inicial se tiene a la poliolefina hilada en gel, Figura 5, cuando se agrega un solvente adecuado se hila a filamentos de polietileno de alto peso molecular. Al retirar el solvente el hilo obtenido es estirado en una o más etapas. Esta poliolefina hilada en gel posee alto peso molecular. Si se tuvieran hilos muy delgados, estos no permitirían una buena eficiencia y tampoco un buen acabado del proceso de removido del solvente. Agregado a esto, existiría preocupación por el grado de holgura que estas líneas podrían tener, así como las características de desempeño que desarrollarían bajo condiciones de pesca reales. Estas líneas de pesca deben ser razonablemente holgadas o flojas para ser efectivas bajo las condiciones normales de las aguas saladas donde se acostumbra a pescar. [13]

Un monofilamento es aquella línea que solo posee una hebra de hilo. Su módulo de elasticidad se encuentra en el rango de 15 a 50 g/d. Los monofilamentos de estos materiales, polímeros, no se enrollarían de manera fácil en un carrete convencional y sería difícil realizar ataduras en nudos, como los usados para asegurar un extremo de la línea, sin debilitarla y consecuentemente, poniendo en peligro la calidad del nudo. Sería deseable tener una línea de pescar de poliolefinas que fueran lo suficientemente holgadas como los monofilamentos. Estas son generalmente preferibles para la colada de cebo, hilado y centrifugado. Tienen una estructura firme que las hace más fácil de maniobrar. Por su naturaleza rígida y la suavidad que llegan a tener en la superficie externa reducen el arrastre durante el lanzado y permiten que estos sean más lejanos mientras que se provee una mejor liberación del carrete de pesca. Las líneas de un solo filamento no atrapan agua y no presentan una superficie que sea vulnerable a engancharse. [13]

Las líneas trenzadas pueden tender a deshilarse en su final de sección. Cuando son atadas en un nudo, este tipo de final crea una prostrusión que puede afectar la aceptabilidad de un señuelo cuando se pesca. Es necesario que el trenzado sea cortado con una tijera u otro objeto para asegurarse que los filamentos en el trenzado tengan un final adecuado. De nueva cuenta, sería deseable tener una línea con la alta tenacidad de una línea de poliolefinas hiladas en gel, que es más parecido a un monofilamento por sus características. Ejemplo de estas son una estructura firme, la exhibición de un diámetro menor que la del trenzado, no existe saturación con el agua y reduce los problemas asociados con el deshilado y las dificultades de cortar la línea. Las líneas trenzadas también se caracterizan por un color opaco lechoso. [13]

El procedimiento en el que se obtienen los resultados deseados a partir de la poliolefina es el siguiente. Los hilos de polímero son enlazados formando una sola línea y luego son sometidos a fuertes

estiramientos y a temperaturas elevadas, cercanas al punto de fusión del material del que están hechos los filamentos, el cual es suficiente o al menos de manera parcial para fundir las superficies en contacto de los filamentos individuales con el hilo en una línea para obtener las características de un monofilamento. Las superficies que no logran fundirse permiten a la línea retener la movilidad del filamento y la holgura, mientras que las que sí lo logran, aseguran los filamentos individuales de prevenir deshilarse y permiten su fácil corte con algún dispositivo cortante. Las condiciones de los procesos de fusión son seleccionadas para ser lo suficientemente altas y para un tiempo adecuado de estancia con el fin de suavizar los filamentos y permitirles unirse en una estructura lineal trenzada. [13]

Para el proceso de fusión de la superficie se debe seleccionar una temperatura o series de temperatura de calentamiento cercanas al punto de fusión del polímero del que está hecho el filamento, lo que permite una adecuada fusión durante el período de exposición. Es preferible que esté en el rango de 150°C hasta 157°C para obtener un alto peso molecular, los hilos de polietileno hilados en gel muestran un rango de fusión de 138°C hasta 162°C a una tasa de 20°C/minuto. El tiempo de residencia durante el cual la línea es expuesta a la temperatura de fusión se encuentra en un rango de 6 a 150 segundos. Existe una correspondiente pérdida de la tenacidad conforme la temperatura de fusión es incrementada. Durante la realización de este proceso, es notorio que el efecto de incrementar la temperatura pareciera predominar sobre la longitud del tiempo de estadía de los hilos. En otras palabras, un cambio de temperatura del horno tendrá un efecto más pronunciado que un cambio en el tiempo durante el cual se calienta el material. Siguiendo el proceso de fusión, las líneas cambian su color inicial, opaco con color característico de los filamentos vírgenes, en uno con apariencia más clara. Toman el color translúcido, lechoso, o substancialmente transparente teniendo un rango de transmisibilidad de la luz de 1% a alrededor del 100%, preferiblemente entre el rango de 2% a uno de 50%. El cambio en la transmisión de luz es visible para un observador conforme la línea sale del horno, entre rodillos de estiramiento sin calentar o cuando deja un rodillo de estiramiento calentado. La línea se vuelve más rígida y más parecida a un monofilamento. [13]

La línea es también calentada mientras se estira, se le aplica tensión que es preferiblemente continua. Esta tensión de estiramiento provee algunos beneficios: La tensión previene pérdida de tenacidad en la temperatura de fusión. La tensión preserva o incrementa la tenacidad de la estructura fundida, parecida a la de los hilos sin fundir o a la línea trenzada. Adicionalmente, ayuda a comprimir la estructura radialmente para una mejor fusión y previene el derretimiento. De preferencia, la temperatura, el tiempo de estadía y la tasa de estiramiento a la temperatura seleccionada son elegidas para proveer a la línea con algunos grados de transmisión de luz y un módulo de tensión entre 230 g/d a 780 g/d con una tenacidad de al menos 15 g/d, y más preferiblemente de al menos 25 g/d. Una significativa reducción en la tenacidad indica que la combinación de temperatura y tiempo de estadía son demasiado altos y está resultando en pérdida de orientación del filamento. Se pueden hacer pruebas para saber si las superficies se están fusionando, una de

ellas incluye utilizar un microscopio óptico para observar las regiones de los hilos cuando estén sujetos a compresión. Las condiciones de fusión también incluyen una tasa en general de estiramiento de una o más etapas para preservar o incrementar la orientación de la cadena. Tales tasas se encuentran entre 1.01 a 2.5 y preferiblemente una tasa entre 1.35 a 2.2. [13]

El proceso de fusión coloca a las superficies externas de los filamentos cerca del punto de fundición de los polímeros en los filamentos, es por eso que estas empiezan a suavizarse y fundirse en puntos de contacto alrededor de dichas superficies. Estas condiciones se eligen para mantener la tensión reflectiva de la línea y evitar pérdidas de orientación del filamento. Los hilos de poliolefina utilizados son hechos de filamentos de alto peso molecular, polietileno de alta tenacidad o polipropileno. Tales filamentos son caracterizados por un peso de al menos 400,000 y más preferiblemente de al menos 800,000, una tenacidad de 15 g/d; un módulo de tensión de 500g/d y un punto de derretimiento de al menos 140°C. Estas líneas pueden estar realizadas en estructuras de 2 a 4 capas, con un torque equilibrado. El entrelazado es preferible que contenga un tamaño entre el rango de 100 denier hasta 3000 denier. Uno o más materiales de revestimiento externo pueden ser aplicados a la superficie para asegurar el proceso de fusión entre la fibra de polímero o los filamentos adyacentes. Estos aceites que revisten al hilo actúan como plastificante que asegura la eficiencia del proceso y permite trabajar a más bajas temperaturas. Este comportamiento es exhibido sin importar la estructura en la que estén hechos los hilos. [13]

Figura 4. Poliolefina hilada en gel.



[48]

4. **Análisis de estructuras.** Para obtener un comportamiento y funcionamiento adecuado de los componentes y sistemas mecánicos que se diseñen, es necesario evaluar el comportamiento del material seleccionado y en la forma elegida bajo las condiciones de trabajo a las que estarán sometidas. Por lo regular estos comportamientos se reflejan en las propiedades intrínsecas de cada material y son determinadas a partir de pruebas hechas en laboratorio. Algunas de estas se definen a continuación. [32]

a. **Resistencia a la tensión, s_u .** Es, en apariencia, el último esfuerzo que soportaría un material o el máximo valor. Después de este punto la curva de deformación contra el esfuerzo descendería drásticamente. Esto es debido a que existe una disminución en el diámetro de la probeta utilizada, mientras que el esfuerzo sigue aumentando hasta llegar a la ruptura. En la práctica es raro poder seguir la disminución del radio durante este proceso. [32]

b. **Resistencia a la fluencia, s_y .** Cuando se realiza el diagrama de esfuerzo-deformación existe una región en donde para cambios de esfuerzo relativamente bajos existen grandes deformaciones y estas son en la región plástica y permanentes. Normalmente, a este punto se le ubica a través del método de compensación donde esta es de un 0.20% de la deformación unitaria. [32]

c. **Límite elástico.** El límite elástico no es más que una división entre el comportamiento del material ante los esfuerzos. Por encima de este, cualquier deformación que se obtenga será permanente y se le denominará plástica, implica que no regresará a su forma original. Por debajo, las deformaciones sufridas no tendrán efecto prolongado haciendo que la probeta vuelva a sus dimensiones originales con el pasar del tiempo y al liberarla del estrés, en otras palabras, se comporta elásticamente. [32]

d. **Módulo de elasticidad en tensión, E .** Este valor indica la resistencia a la deformación del material, también conocido como rigidez. Es una constante de proporcionalidad entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria resultante en el material. Se obtiene en la parte elástica, lo que implica que hay una relación de tipo lineal entre ambas variables. La Ecuación 1 nos indica la expresión para calcular este valor. [32]

$$E = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación unitaria}} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Figura 5. Curvatura esfuerzo-deformación para un polímero.



[47]

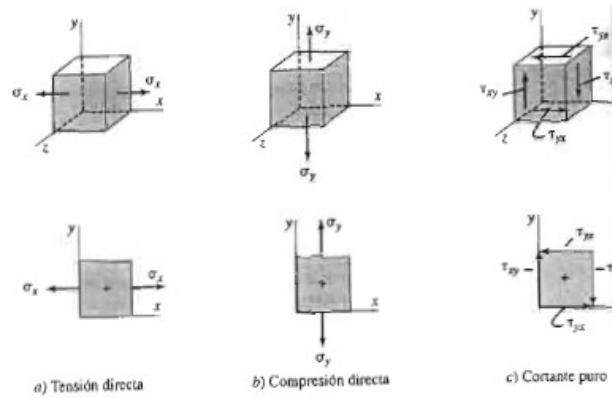
Al diseñar, además de tener en consideración las propiedades o comportamiento de los materiales seleccionados, se debe ser responsable de la seguridad de los componentes y sistemas. Uno de los factores más complicados del diseño se basa en el nivel de esfuerzo al que estará sometido el componente, este debe ser el adecuado, bajo ciertos criterios razonables. Implica que nada debe de fallar o romperse. Más aun, debe de tenerse un límite de deformación permitida para los sistemas que se utilizarán o podría comprometerse el funcionamiento y más aún la seguridad que este brindaría. [32]

Entre los pasos para realizar este tipo de análisis estructural se encuentran el analizar las fuerzas que se ejercerán sobre cada miembro portátil mediante la estática, identificar los tipos de esfuerzos a los que es sometido el o los componentes como resultado de las fuerzas aplicadas, proponer una geometría o forma provisional del elemento para su evaluación de seguridad y de cumplir con ciertos factores y criterios se aceptará, de lo contrario se deberá de replantear su forma y dimensión. [32]

Durante el análisis, es de suma importancia lograr visualizar el punto, dentro de un elemento sometido a fuerzas, que posee el máximo nivel de esfuerzo. Para ello es necesario visualizar un elemento de esfuerzo, el cual es un cubo del elemento en tamaño infinitesimal dentro de una zona de mucho esfuerzo, además de conocer los diferentes vectores que representan a los esfuerzos. Existen tres tipos fundamentales de esfuerzos: tensión, compresión y cortante. A los primeros dos se les conoce como esfuerzos normales y actúan perpendicularmente sobre caras opuestas del elemento de esfuerzos. Los de tensión estiran el elemento mientras que los de compresión lo comprimen. Los esfuerzos de tipo cortante son el resultado de un par de fuerzas dirigidas en la misma dirección, pero actuantes en caras opuestas y su efecto no es otro que el que

realiza un par de tijeras o una navaja. Sin embargo, se debe aclarar que de existir solo este par el cuerpo o elemento tendería a girar bajo la acción de estas fuerzas, así que es necesaria la existencia de un segundo par de esfuerzos sobre las otras dos caras del elemento, pero de dirección opuesta a las que comparten el plano. Su dirección, de forma convencional por diversos textos, es positiva si tienden a hacer girar al elemento en dirección de las manecillas del reloj y negativa si hacen lo contrario. [32]

Figura 6. Elementos infinitesimales con la representación de esfuerzos.



[32]

De una manera más formal, el esfuerzo no solo es aquello que resulta del actuar de una fuerza sobre un cuerpo, más bien es la resistencia interna que ofrece una unidad de área de un material contra una carga externa aplicada y son cantidades vectoriales. Si se tiene una carga la cual se encuentra distribuida de manera equitativa en un área de sección transversal, se puede calcular utilizando la Ecuación 2. [32]

$$\sigma = \text{fuerza}/\text{área} = F/A \quad [\text{Ecuación 2}]$$

El uso de la anterior ecuación posee algunos requerimientos: el elemento debe ser recto, la línea de acción de carga debe atravesar el centroide de la sección transversal, el área transversal del elemento debe ser uniforme, debe estar constituido de material homogéneo y, para los que estén bajo condiciones de compresión, éste debe ser corto para evitar pandeo. Para calcular el esfuerzo debido al corte se utiliza un método similar, debido al supuesto de que la fuerza está distribuida uniformemente en la sección transversal, Ecuación 3. [32]

$$\tau = \text{fuerza de corte}/\text{área al corte} = F/A \quad [\text{Ecuación 3}]$$

Para determinar lo que al inicio se definía como seguridad en un sistema o elemento diseñado, se utiliza lo que se denomina como factor de seguridad. Este depende del material ya que no es más si no el cociente entre el esfuerzo máximo soportado por el material (en zona elástica) y el esfuerzo máximo que alcanzará dicho material en condiciones de trabajo normales, Ecuación 4. [11]

$$F_s = \frac{\sigma_{ultimo}}{\sigma_{admisible}} \quad [Ecuación 4]$$

Existen diversos criterios para considerar aceptable el valor de un factor de seguridad obtenido. Entre ellos se encuentra la experiencia de la persona que realiza el cálculo y diseño, la importancia de la pieza a la que se le obtuvo el factor, incluyendo su localización en toda la estructura, entre otros. Por lo general la decisión se toma en base a presupuesto, dimensionamiento actual o deformación resultante debida al esfuerzo. [32]

5. Procesos de manufactura. Al consolidar el proceso de diseño se debe de elegir el método de manufactura por el que se creará el modelo en forma física. Existen dos procesos, bastante utilizados, los cuales son: proceso aditivo y proceso sustractivo. [32]

La fabricación aditiva, también denominada impresión 3D, prototipado rápido o fabricación digital directa, es un proceso por medio del cual se realiza el traspaso de digital a físico de algún archivo 3D. Se construye mediante la adición capa por capa de algún material, este puede ser plástico, resina, metal, papel, entre otros. [32]

Para poder emplearse se inicia con la creación de un archivo 3D en algún software de modelado, también llamado CAD software (Computer Aided Design). Luego de esto se utiliza otro software el cual se encarga de trasladar en código G las instrucciones necesarias a la impresora o la herramienta que formará las capas, donde se especifica el área en la que se agregará el material. Este método posee algunos beneficios como lo es el bajo costo por pieza y el hecho de que no debe invertirse en herramientas. Normalmente las capas de material poseen un espesor de aproximadamente ciento cincuenta micrones. Durante su fabricación no existe ningún tipo de soporte por lo que, dependiendo de la máquina a utilizar se deberá de considerar la adición de algunos puntos de apoyo para la figura según la complejidad de la geometría. En la Figura 8 se puede apreciar un proceso de este tipo. [32]

Por otra parte, se tiene a la fabricación sustractiva. Para comprender de qué trata esta técnica es necesario dar algunos ejemplos de máquinas que la implementan. Por ejemplo, una fresadora CNC vendría a ser el equivalente de una impresora 3D. Cualquier persona que no esté familiarizada a trabajar con ambos métodos podría afirmar que la fabricación aditiva es mejor por diferentes motivos, entre ellos la viruta que desprende el retirar material de una pieza de metal. El hecho es que la fabricación sustractiva sigue poseyendo una gran ventaja ante la aditiva; su tecnología está completamente madura. Una consecuencia de esto es el poder obtener acabados más finos o precisos. En la Figura 9 se puede apreciar una CNC. [32]

Figura 7. Proceso aditivo utilizando una impresora 3D.



[15]

La elección de entre estos dos métodos la causan distintas características que tendrá el modelo físico. La primera de ellas es si será creado como una sola pieza 3D o varias capas en 2D. Si es la primera, la forma más fácil de realizarlo es por un proceso aditivo. El proceso sustractivo, si bien hay formas que permiten la creación de objetos en 3D, es mucho más caro y difícil de usar. Otro criterio que puede utilizarse es según el material en el que se diseñará, la sustracción tiene la ventaja de poder hacerse ya sea en madera o en metal mientras que el aditivo normalmente se hace agregando capas de plástico. Bajo términos de precios, sale más económico trabajar en madera que en plástico. [32]

Figura 8. Fresadora CNC.



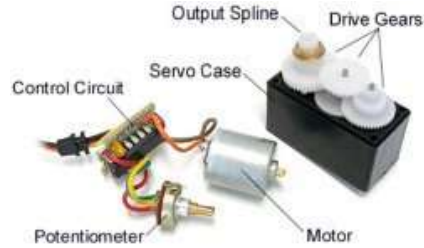
[20]

6. Servo motores. Los servomotores han sido utilizados en diversas aplicaciones debido a su fácil implementación. Son compactos y poseen una muy buena eficiencia. Estas características les permiten ser controlados remotamente o a través de un radiocontrol. Son utilizados también en aplicaciones industriales, ejemplo de ello son en líneas de manufactura, farmacéuticas y servicios de comida. La explicación de su funcionamiento, a continuación. [36]

La circuitería del servo es construida dentro de la unidad del motor y posee un eje movable, el cuál usualmente es equipado con un engrane. El motor es controlado con una señal eléctrica, la cual determina la cantidad de movimiento del eje. [36]

Para comprender de forma completa como trabaja el servo, es necesario entender su funcionamiento interno. Por dentro existe una configuración bastante simple: un pequeño motor dc, un potenciómetro y un circuito de control. El motor se encuentra unido por engranes al disco de control. Mientras el motor gira, la resistencia del potenciómetro varía, así que el circuito de control puede regular de manera precisa que tanto movimiento debe de existir y en qué dirección. En la Figura 10 se muestra la división interna de las partes de un servo. [41]

Figura 9. Composición interna de un servo.



[36]

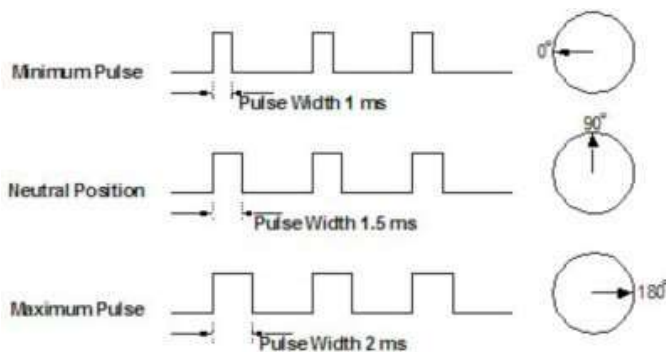
Cuando el eje del motor se encuentra en la posición deseada, la alimentación hacia el motor es detenida. En caso contrario, el motor gira en la dirección apropiada. La posición deseada es enviada a través de pulsos eléctricos a través del cable de la señal. La velocidad del motor es proporcional a la diferencia entre la posición actual y la posición deseada. Así que, si el motor está cerca de la posición deseada, girará lentamente, de lo contrario lo hará rápido. A este tipo de control se le denomina, control proporcional. Esto significa que el motor funcionará de manera abrupta dependiendo de la necesidad de la tarea que tenga para llevar a cabo. [36]

Los servos son controlados al enviarles pulsos eléctricos de un ancho variable, o también llamados pulsos con modulación (PWM), a través del cable de control. Existe un pulso mínimo y un pulso máximo y una tasa de repetición. Un servo motor puede, normalmente, girar noventa grados en cada dirección para un total de ciento ochenta grados de movilidad. La posición neutral del motor está definida como la posición donde el servo posee la misma cantidad de distancia angular ya sea a favor o en contra de las agujas del reloj. El PWM enviado al motor determina la posición del eje y basado en la duración del pulso enviado a través del control el rotor girará a la posición deseada. El servomotor espera un pulso cada veinte milisegundos (en la mayoría de modelos) y la longitud del pulso determinará qué tan lejos debe girar. Por ejemplo, un pulso de 1.5ms hará que el motor gire a la posición de noventa grados. Más corto que este valor hará que se mueva contra las agujas del reloj y cualquier valor más alto causará el movimiento contrario. Cuando estos servos reciben la orden de moverse, lo harán hasta la posición deseada y se mantendrán en su lugar. Si una fuerza externa empuja al servo mientras sostiene su posición, el servo se resistirá a moverse. La máxima cantidad de fuerza que el servo puede ejercer es llamada torque promedio del servo. Los servos mantendrán su posición siempre y cuando el pulso sea el mismo y sea constante. [36]

Existen dos tipos de servomotores: ac y dc. Un servo ac puede manejar altos picos de corriente y tienden a ser usados en maquinaria industrial. Los servos dc no están diseñados para altos picos de corriente

y son usados para aplicaciones pequeñas. De manera general, los motores de son menos costosos que sus contrapartes ac. Existen incluso servos que han sido construidos específicamente para una rotación continua, haciendo de forma más fácil la movilidad de un robot. [41]

Figura 10. Comportamiento de un servo ante diferentes señales enviadas.



[41]

7. Esquemas de control. El esquema más simple es el control ON-OFF. Este se encuentra limitado a el manejo de hasta dos grados de libertad, pero es el más simple, requiere únicamente de dos electrodos y poca capacidad de procesamiento. Consiste en comparar el valor de potencial de voltaje con un valor preestablecido y al superarlo se accionan los actuadores. La velocidad, en este caso, es constante y la dirección de actuación dependerá del estado presente -Si el estado es abierto, se cierra; si el estado es cerrado, se abre-. [19]

En el esquema proporcional de control, el voltaje o potencia aplicado al motor es proporcional a la intensidad leída entre los electrodos. Esto permite una velocidad de movimiento y una fuerza de agarre variable controlada por el usuario. [1]

El esquema de control de estados finitos consiste en tener una cantidad de posiciones predefinidas y transiciones entre ellas [24]. Este método es útil cuando se tiene una cantidad definida de movimientos ya que se pueden lograr posiciones relativamente complejas con menos práctica.

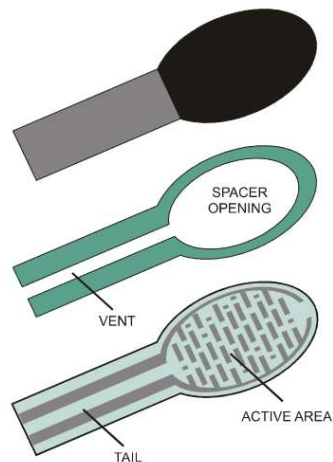
El esquema más complejo, y uno de los más completos en la actualidad, es el control por reconocimiento de patrones. Este extrae información adicional de un segmento de información. Algunas de las características usadas en este método es la extracción de tiempo, frecuencia y una combinación de ambas. [19]

Sin embargo, a pesar del potencial ofrecido por brazos mioeléctricos, muchas personas reportan que estos dispositivos son difíciles de controlar y aún limitados en su función [12]. Adicionalmente, el costo suele ser alto y requieren de constante mantenimiento y cuidado. Por lo tanto, es necesario responder a la necesidad de las personas usando alternativas a los métodos convencionales. Uno de los mayores problemas que limitan la funcionalidad de las prótesis mioeléctricas es el hecho que la mayoría de estas trabajan en ciclo abierto, es decir, el usuario no recibe alguna realimentación de parte de la mano sobre la fuerza que se está realizando. Debido a esto, es necesario buscar distintas opciones para el control.

8. **Sensores de fuerza.** Algunos de los problemas actuales a resolver en la mayoría de las prótesis es la realimentación de las fuerzas aplicadas por la mano al usuario. Una manera de resolverlo es colocando sensores en un área sobre la cual se realice la mayor cantidad de interacciones, por lo general esta es la yema de los dedos. La tecnología usada para medir fuerzas aplicada a una región usualmente es específica para la aplicación en la que se usará, pero se pueden clasificar algunos tipos según el principio detrás de la forma en la que cuantifican la fuerza.

El primer tipo de sensores son los basados en tecnología resistiva. La construcción de este tipo de sensores consiste en una región activa la cual es capaz de delimitar la resistencia entre dos puntos, un elastómero que cambia su conductancia al ser deformado por una fuerza externa y un espaciador entre ambos. La región activa se extiende fuera del área de aplicación de la fuerza y es ahí donde se puede realizar la medición de la resistencia en el sensor.

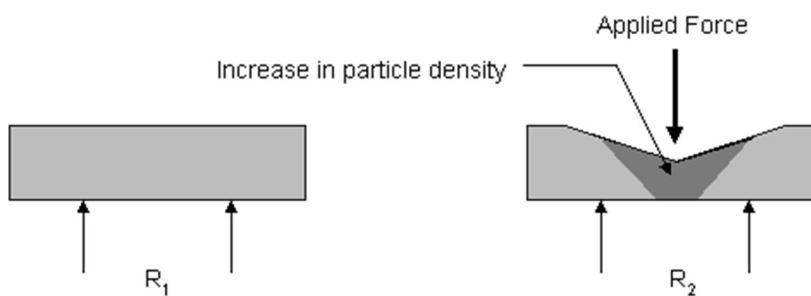
Figura 11. Construcción de un sensor resistivo de fuerza.



[21]

El comportamiento de este sensor se puede comprender debido a la conductancia de un material. La conductancia eléctrica es la facilidad que ofrece una sustancia al paso de corriente eléctrica. La conductancia es el inverso de la resistencia, por lo tanto, a medida que ésta aumenta, la resistencia entre dos puntos disminuye [16]

Figura 12. Comportamiento del elastómero en un FSR al ser aplicada una fuerza.

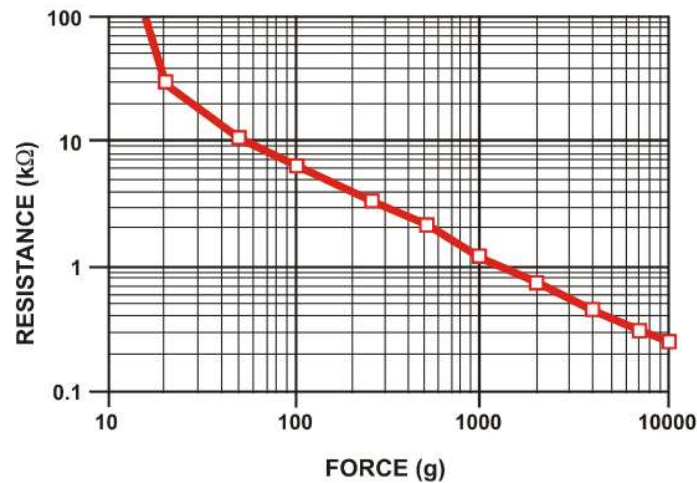


[14]

En la Figura 13 se puede ver cómo se comporta el elastómero del sensor cuando se aplica una fuerza. Los dos puntos marcados con las flechas son dos puntos medidos por la parte activa. El aumento en la densidad de partículas facilita el paso de electrones dentro de la sustancia, por lo tanto, aumentando la conductancia. A mayor fuerza, la materia es compactada en un volumen menor, aumentando así, la densidad

y, por lo tanto, la conductancia. En la Figura 14, se puede observar el valor de resistencia medido en la parte activa del sensor a medida que la fuerza aplicada aumenta. Un problema que se puede observar de la gráfica en la Figura 14 es que la escala es de base logarítmica, por lo tanto, la relación entre fuerza aplicada y resistencia no es lineal. En muchas aplicaciones los sensores poseen un rango intrínseco de operación, el cual hace despreciable esta relación no lineal.

Figura 13. Resistencia entre las terminales de una FSR contra cambios de fuerza.



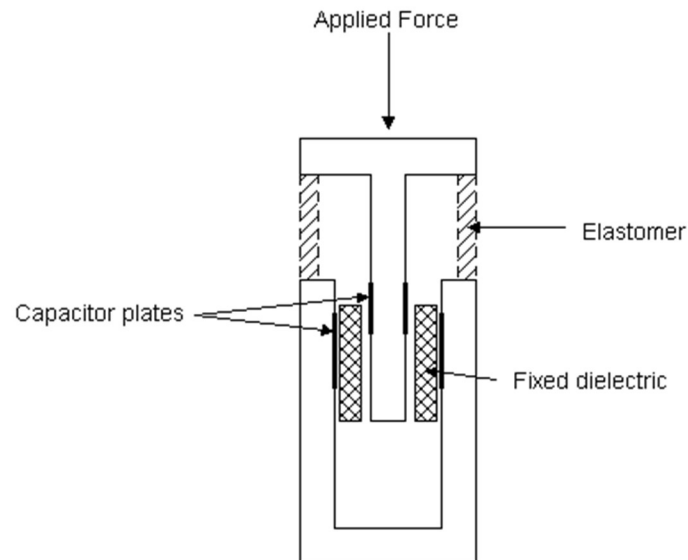
[21]

El otro dispositivo táctil utilizado son los sensores capacitivos. Estos sensores utilizan el mismo principio que los capacitores. Este se construye de dos placas capacitivas separadas por una sustancia dieléctrica. La capacitancia entre ambos puntos se basa en la ecuación:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad [\text{Ecuación 5}]$$

En esta, el símbolo A es el área de las placas, d es la distancia entre ellas y ϵ es la permitividad del material dieléctrico. Por lo tanto, si se instala un actuador separado con un elastómero que permita modificar la distancia entre placas, se puede cambiar la capacitancia entre dos puntos, permitiendo así medir la fuerza [14]. La construcción de un sensor de esta forma se puede observar en la Figura 15.

Figura 14. Construcción de un sensor capacitivo.



[14]

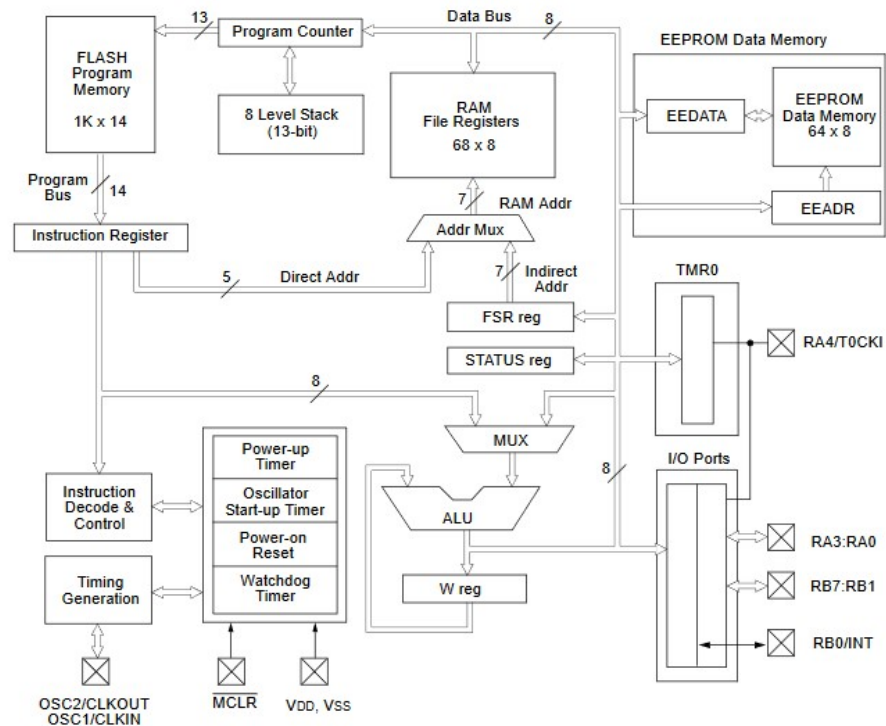
Para medir la capacitancia existen varias técnicas, la más popular consiste en usar una fuente de corriente de precisión. Una segunda forma, radica en usar el sensor como parte de un circuito LC, ajustado con anterioridad, de manera que se pueda medir la respuesta en frecuencia causado por el cambio en la capacitancia. Uno de los mayores problemas con los dispositivos de este tipo es la sensibilidad a ruido debido a capacitancias parásitas en el ambiente, y esto es aún peor cuando se acerca a estructuras metálicas aterrizadas [14]. A pesar de que existan más tipos de sensores como magnéticos, ópticos, entre otros, estos se encuentran fuera del alcance de este trabajo. Su aplicación, con la tecnología actual, es impráctico para el uso que se requiere como realimentación de la prótesis. Por lo tanto, no se entrará a detalle.

9. Microcontroladores. Ahora que ya se tienen métodos prácticos para la obtención de señales de control, así como esquemas para su procesamiento y dispositivos para la obtención de fuerzas de realimentación, se necesita de una computadora capaz de procesar esta información y hacer de ella algo útil, para mejorar la utilidad de la prótesis. Estas características se encuentran en los microcontroladores y los microprocesadores. Diseñar un sistema completo usando un microprocesador sería impráctico. Por esto, los microcontroladores son perfectos para la aplicación de prótesis.

Un microcontrolador es una computadora la cual integra todos los componentes necesarios para su operación dentro de un solo circuito integrado o microchip. En su forma más básica, un microcontrolador

posee lo mínimo necesario para funcionar independientemente: un procesador, memoria de distintas volatilidades, registros y unidades lógicas aritméticas. Los microcontroladores actuales son más complejos y poseen varias características adicionales las cuales ayudan en aplicaciones específicas y los distinguen de otros.

Figura 15. Diagrama de bloques de un microcontrolador PIC16F84A.



[29]

Existe decenas de compañías que fabrican microcontroladores, y aún más modelos distintos entre cada fabricante, pero en general existen dos presentaciones para los microcontroladores: microchips y plataformas de prototipado. Cada presentación tiene sus ventajas y desventajas. Los microchips suelen ser más baratos, pequeños y con mucha flexibilidad, pero a cambio de esto su implementación es tardada, se debe diseñar un circuito completo para su funcionamiento, cada compañía y en algunos casos entre distintos modelos de la misma empresa, poseen instrucciones distintas o requieren de cierta configuración específica para operar. Esto hace que esta presentación de microcontroladores sea poco amigable para diseñar y/o reparar. En la Figura 17 se puede ver una de las presentaciones disponibles para un microcontrolador popular de la compañía Microchip.

Figura 16. Presentación PDIP de un microcontrolador PIC16F84A.



[30]

Para programar un microcontrolador en esta presentación es necesario software especializado y equipo físico para realizar la comunicación entre el microcontrolador y la computadora. A diferencia de los microchips, los microcontroladores en plataforma de prototipado ya incluyen todo lo necesario para operar. A pesar de que cada plataforma varía según el fabricante, en general estas vienen listas con una conexión USB para conectar a una computadora y, con el software adecuado, programar directamente.

Figura 17. Presentación de un microcontrolador ATmega328P en su plataforma de prototipado.



[5]

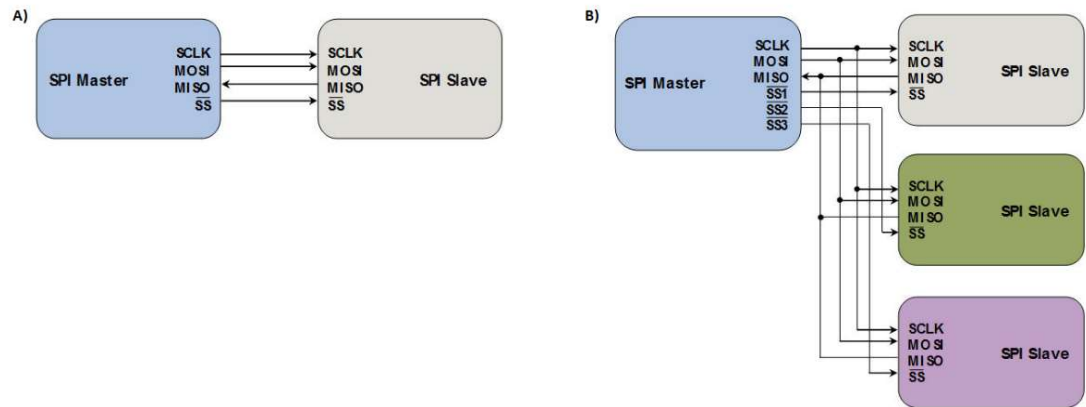
Los microcontroladores trabajan al seguir las instrucciones a nivel máquina, pero un programador no trabaja a un nivel tan bajo de programación. En caso se necesite programar en nivel bajo, este se realiza usando lenguaje ensamblador. Por lo general, el programador escribe su código en alto nivel, usa un compilador para traducirlo a nivel máquina y luego usa un software especial para guardarlo en la memoria interna del microcontrolador.

10. Comunicación digital. Una característica importante que todos los microcontroladores poseen es la capacidad de comunicarse con otros dispositivos electrónicos, como sensores, circuitos integrados u otros microcontroladores. La información puede ser transmitida de forma paralela o de forma serial. En el método paralelo de comunicación, la información binaria es transmitida sobre distintas conexiones o cables para cada bit de información. En la comunicación serial, se utiliza únicamente una línea para transmitir el mensaje, pero este se realiza bit por bit. Este tipo de comunicación se puede dividir en dos categorías: síncrona y asíncrona.

En la comunicación asíncrona, el dispositivo transmisor y el dispositivo receptor no suelen estar sincronizados por ningún método. El dispositivo transmisor puede enviar uno o más unidades de información cuando tiene datos disponibles. Por esto, cada unidad de datos debe tener bits de inicio y final para distinguir cada mensaje. [39] La comunicación síncrona se basa en comunicar la información usando una señal de reloj. Luego de decidir una velocidad de transmisión, el dispositivo envía los datos con cada pulso del reloj. Para que el receptor pueda entender el mensaje enviado, este no solo debe coincidir con la velocidad de transmisión, sino que, además debe saber cuál es el inicio y el fin del mensaje, el cual se puede determinar conociendo el tamaño del mensaje y usando bits de paridad [39]. Una de las grandes ventajas de la comunicación serial síncrona es que requiere menos cableado que una comunicación en paralelo, pero aún existen algunos detalles que faltan por definir, por ejemplo, como le indicamos a los dispositivos cual será la velocidad de comunicación o qué pasa cuando se tiene varios dispositivos comunicando. Para solucionar esto, existen dos protocolos de comunicación para los cuales muchos microcontroladores poseen pines y partes dedicadas.

11. Protocolos de comunicación. El primer protocolo es conocido como interfaz periférica serial (SPI por sus siglas en inglés). Dentro de este método se le asigna el nombre de maestro al dispositivo encargado de iniciar la comunicación, y, él es el encargado de indicar quien recibirá el mensaje y establecer la velocidad de comunicación. Se designa como esclavo a los dispositivos que se conectarán al maestro para recibir y compartir información. Los esclavos no se comunican entre sí, la comunicación se realiza únicamente entre el dispositivo maestro y los esclavos. Esta interfaz requiere de 4 líneas: una señal de reloj designada como SCLK, un pin selector de esclavo SS, por cada dispositivo esclavo en la red, una línea de comunicación entre maestro y esclavo -MOSI- y una línea de comunicación entre esclavo y maestro -MISO-

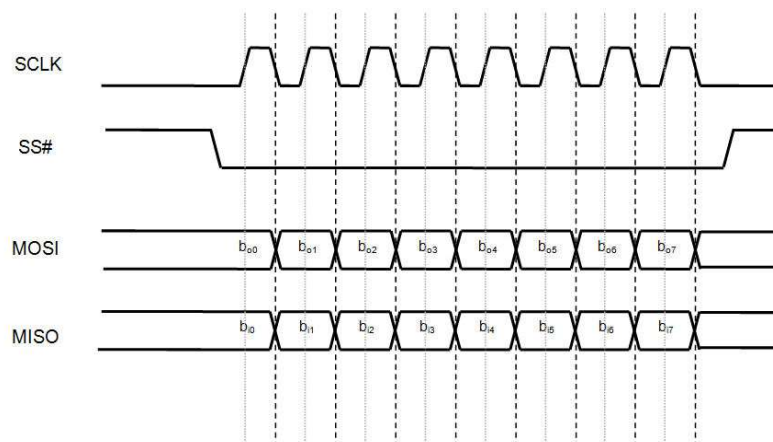
Figura 18. (A) Topología de conexión SPI entre un maestro y un esclavo. (B) Topología de conexión SPI entre un maestro y tres esclavos



[11]

Para la comunicación, el dispositivo maestro debe seleccionar qué esclavo debe leer la información por lo que debe poner la línea SS en un voltaje lógico bajo y luego escribir el mensaje en la línea MOSI. Si el dispositivo esclavo posee un mensaje que debe transmitir al maestro, la información se debe enviar en este momento [11]. En la Figura 20 se puede observar como sucede esta interacción. Cuando el maestro selecciona el dispositivo por medio de SS, los bits son enviados durante cada pulso de reloj en SCLK.

Figura 19. Comunicación SPI entre un dispositivo maestro y un dispositivo esclavo.



[11]

El según método de comunicación serial es conocido como I2C. Este método es un protocolo multi-maestro que usa dos líneas de señal. Las señales son conocidas como datos seriales (SDA por sus siglas en ingles) y reloj serial (SCL por sus siglas en ingles). En este caso no es necesario un selector de esclavos SS. Virtualmente, se pueden conectar cualquier cantidad de maestros a estas dos líneas de comunicación [11].

La comunicación de un mensaje comienza con el dispositivo maestro enviando una condición de inicio. Este funciona como una señal de atención a todos los dispositivos conectados. Cuando se recibe esta señal, todos los demás sistemas conectados comienzan a escuchar el bus de información. Luego, el mismo maestro, envía la dirección del dispositivo al cual desea acceder y la indicación de si el dispositivo debe leer o escribir. Una vez recibida la dirección, todos los demás dispositivos la compararan con su dirección propia. Si esta no es igual, ignoraran lo enviado en el bus hasta recibir la condición de fin. Si la dirección es igual, el receptor producirá una respuesta llamada señal de reconocimiento. Una vez recibida la señal de reconocimiento por parte del maestro, la transmisión de información comenzará. [11] Conocer el método de comunicación SPI e I2C nos será útil, ya que muchos dispositivos y circuitos integrados poseen -y en algunos casos es necesario- uno de estos protocolos para su integración en un sistema. En nuestro caso será necesario transmitir la información desde el sistema de control hacia la prótesis por lo que, dependiendo de los dispositivos instalados, se usará alguno de estos protocolos de comunicación.

Ahora que ya se conoce el método de comunicación entre dispositivos y una forma de enviar realimentación sobre la fuerza aplicada por la mano al usuario, queda definir el medio por el cual se transmitirá esta información a la computadora central de la prótesis. En general hay dos formas de realizarlo: por medio de cables y de forma inalámbrica.

Cuando se hace una conexión por medio de cables, el conductor se encarga de transmitir el voltaje aplicado en un lado al extremo opuesto. Este es la forma más simple de conexiones ya que solo requiere de conectar ambos puntos a los dispositivos que se desean comunicar. Las consideraciones que se deben tomar en cuenta son la compatibilidad en voltaje, corriente e impedancia entre ambos dispositivos. Para poder discernir entre un valor bajo, considerado un 0 lógico, y un valor alto, considerado un 1 lógico, los chips deben poder recibir una señal de voltaje y clasificarla según su magnitud. Existen varias convenciones de este tipo. Una de las más populares son la TTL y CMOS. Ambas establecen rango de valores para los cuales se considerará como un 1 o 0. Es necesario comparar los niveles de voltaje máximo y voltajes lógicos entre componentes antes de realizar su conexión para evitar dañar el equipo.

Figura 20. Rango de voltajes según lógica TTL.



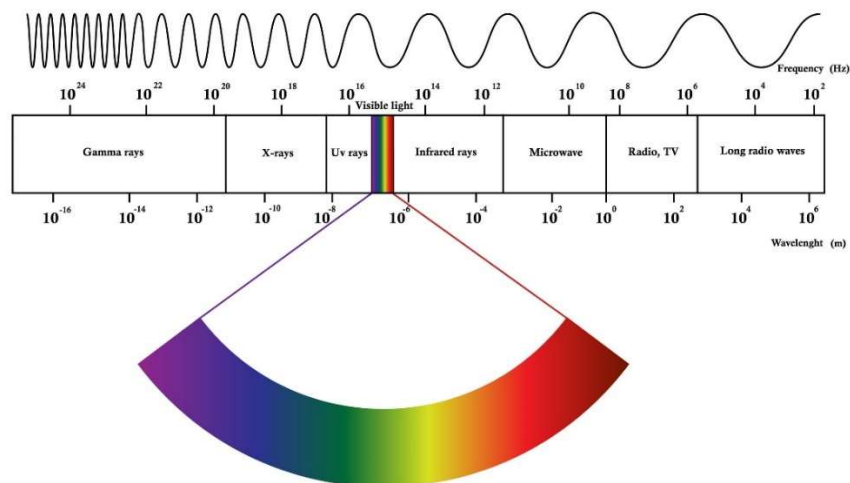
[43]

Sin embargo, la conexión por cables conlleva una preocupación: la señal debe ser de buena calidad. Para poder realizar una comunicación útil es necesario que, si se coloca una señal cuadrada de un lado del conductor, la misma señal debe aparecer en el otro extremo. El principal problema de la conexión por cable es la pérdida de potencial [42]. Usualmente este problema surge en distancias de transmisión largas. En esencia, un conductor es un material con una alta conductancia eléctrica y, como se sabe, la conductancia se relaciona inversamente a la resistencia. A mayor conductancia la resistencia es menor. Por este motivo, en tramos cortos de cobre, la resistencia causada por el cable es despreciable, pero cuando se consideran distancias relativamente más largas con señales de voltajes bajos, es necesario considerar el posible efecto del conductor sobre la señal.

12. Comunicación inalámbrica. El otro método de comunicación es por medio inalámbrico. Este se basa en la transmisión de información, o potencia, entre dos puntos sin ningún conductor entre ambos. El principio de esta tecnología se basa en el uso de radiación electromagnética. Este tipo de radiación ocurre cuando una partícula atómica, como un electrón, es acelerado por un campo eléctrico haciendo que este se mueva. Este movimiento produce oscilaciones eléctricas y campos magnéticos los cuales viajan de forma perpendicular entre ellos en forma de energía llamada fotones. [26]

La mayoría de comunicación inalámbrica ocurre dentro del rango de frecuencias conocidas como frecuencias de radio. Estas son las frecuencias más bajas en el espectro electromagnético y se extienden hasta los 30GHz [26]. Radiación electromagnética en otros rangos de frecuencia tienen aplicaciones distintas que la comunicación de información.

Figura 21. Espectro electromagnético.



[26]

Específicamente, las ondas de radio electromagnéticas se usan como ondas portadoras. Las ondas portadoras como tal no contienen información. Estas se modifican para que lleven la información que deseamos transmitir. Esto se realiza por medio de la modulación. [31]

La modulación por amplitud, popularmente conocida como AM, es la forma de transmisión en la cual se modifica la amplitud de las ondas portadoras con el nivel que se desea transmitir. Este tipo de modulación se usó popularmente para la radiodifusión de audio y aún se usa en algunos casos. Existe una versión moderna similar conocida comúnmente como FM, modulación de frecuencia. Este método transmite la información al hacer un cambio de frecuencia en la onda portadora. Otro método moderno de modulación es conocido como FSK (Frequency Shift keying). Este método envía datos binarios en una forma similar al código morse. En lugar de apagar y encender la onda portadora, la tecnología FSK la enciende al inicio de la transmisión y luego cambia la frecuencia de acuerdo con la información que se desea enviar. Este cambio en la frecuencia permite transmitir más que 0 y 1 lógicos ya que el desplazamiento se puede decodificar de manera distinta. La tecnología FSK permite enviar paquetes de información los cuales pueden ser recibidos y decodificados al mismo tiempo. Esto nos permite adquirir más información y enviarla en un solo recorrido, haciendo la transmisión más eficiente [31]. En conjunto con el aumento en popularidad de los microcontroladores, este tipo de tecnologías se ha puesto al alcance de los desarrolladores por medio de módulos. Un ejemplo de esto es el componente nRF24L01+ el cual es un circuito integrado fabricado por Nordic Semiconductor que cumple la función de transceptor de radio frecuencia que permite comunicarse en la banda de 2.4Ghz usando modulación FSK. Algunas de sus características es su bajo consumo de potencia, capacidad de tres diferentes velocidades de comunicación, regulador de voltaje incluido, entre otros. [33]

B. SWARM ROBOTICS

1. **Comunicación digital inalámbrica.** La comunicación digital inalámbrica se ha extendido a tantos dispositivos de nuestro día a día que se ha tornado en algo casi trivial para la mayoría de las personas. Asumimos que nuestros dispositivos van a lograr comunicarse los unos con los otros sin problemas, dando por sentado la variedad de protocolos de seguridad y estabilidad que permiten esta aplicación.

2. **Capas de la arquitectura TCP/IP.** Los protocolos encargados de mantener nuestras conexiones activas funcionando sin problemas componen lo que se denomina como el modelo de arquitectura digital TCP/IP. Este modelo está conformado por cinco capas diferentes cada una dedicada a uno de los conjuntos de tareas necesarias para lograr la interconexión de diversos dispositivos electrónicos. Las cinco capas se denominan como: capa Física, encargada de definir las características del equipo conectado a la red, capa de enlace de datos, encargada de la transferencia de información a través de los medios en la red, capa de red, encargada del direccionamiento de datos y la entrega de los mismos a través de distintas redes, capa de transporte, la cual maneja la transferencia de información y cerciora que lo enviado sea igual a lo recibido en las redes, y la capa final de aplicación, la cual se encarga de la interacción con el usuario y define los servicios estándares de internet que cualquiera puede utilizar. [68]

Tabla II. Modelo de arquitectura TCP/IP

OSI Ref. Layer No.	OSI Layer Equivalent	TCP/IP Layer	TCP/IP Protocol Examples
5,6,7	Application, Session, Presentation	Application	NFS, NIS+, DNS, telnet , ftp , rlogin , rsh , rcp , RIP, RDISC, SNMP, and others
4	Transport	Transport	TCP, UDP
3	Network	Internet	IP, ARP, ICMP
2	Data Link	Data Link	PPP, IEEE 802.2
1	Physical	Physical Network	Ethernet (IEEE 802.3) Token Ring, RS-232, others

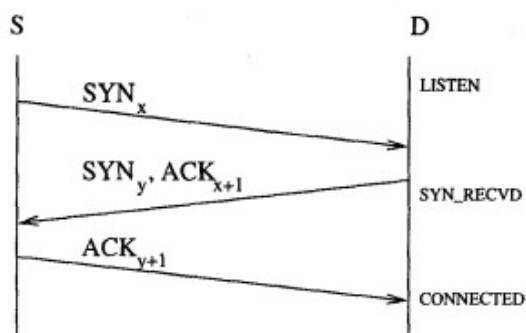
[68]

De las cinco capas que componen el modelo TCP/IP el módulo de comunicación se dedicó en su totalidad a trabajar con la capa de transporte. La capa de transporte en la arquitectura digital es la capa dedicada al envío de información entre dos equipos en una red de manera segura y confiable. Esta capa se aprovecha de los servicios provistos por la capa de red, la cual se encarga de dirigir los paquetes de datos enviados a través de múltiples redes interconectadas, guiando a la información a través de una ruta compuesta por enrutadores, conmutadores y demás dispositivos de interconexión. Esto permite que la capa de transporte se encargue de obtener y entregar los paquetes de datos a las aplicaciones que los requieren. Estos servicios son realizados a través de la aplicación de uno de los dos protocolos principales de transporte, TCP o UDP. [55]

3. Protocolos de comunicación. El protocolo de control de transmisión (TCP por sus siglas en inglés) es una de las tecnologías claves de la capa de transporte y de la familia de protocolos de internet en su totalidad. El protocolo ofrece una entrega ordenada, segura y confiable de datos utilizados por aplicaciones comunicándose a través de una red IP. Este enfatiza la confiabilidad de sus entregas sobre todo lo demás empleando una variedad de algoritmos de seguridad. En primer lugar, TCP utiliza un apretón de manos de tres vías para establecer una conexión segura entre equipos.

Un apretón de manos de tres vías es un algoritmo de seguridad aplicado para asegurar una conexión confiable entre dos equipos en una red. Este consiste en el intercambio de tres señales claves entre ambos equipos, SYN, SYN-ACK y ACK. El equipo que desea entablar una conexión envía la señal de SYN al servidor, la cual consiste en un número aleatorio que denominaremos A. El servidor responde a través de una señal SYN-ACK que contiene el número A recibido más uno, A+1, además de un segundo número aleatorio que denominaremos B. Para finalizar el cliente confirma su conexión con el servidor enviando una señal ACK, que contiene nuestro número A+1 y el segundo número B+1 indicando así que la conexión es segura. [14]

Figura 22. Three-Way Handshake.



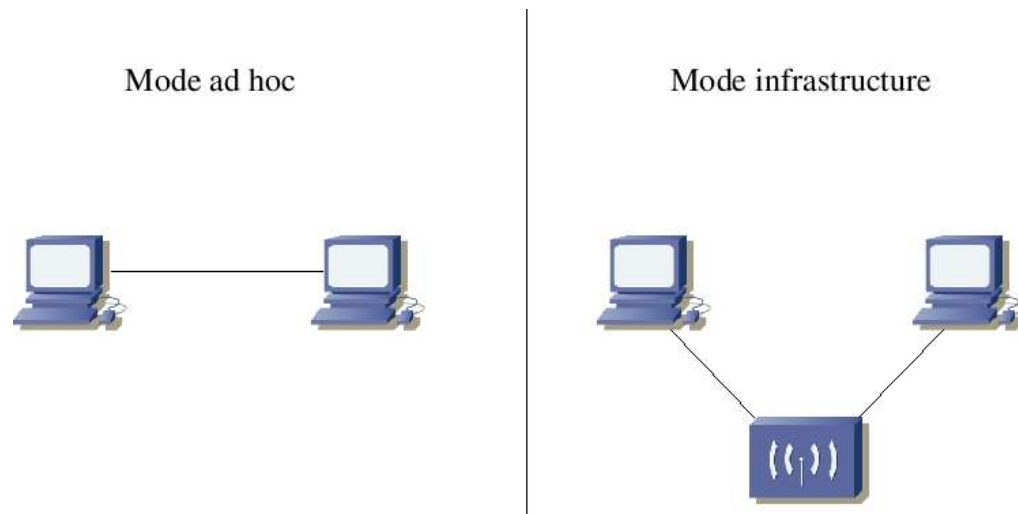
[112]

Además de esto, el protocolo TCP utiliza una secuencia de números para identificar cada byte de información transmitido, asegurando que pueda ser reconstruido en orden por el equipo que lo recibe o que una pérdida de información pueda ser detectada por el mismo. Cualquier información no recibida es retransmitida hasta que el equipo indica que la obtuvo. Asimismo, el protocolo utiliza algoritmos de control de flujo y congestión para enviar los datos a un ritmo moderado para la red previniendo así problemas de conexión. Todas estas características hacen de TCP el protocolo más confiable en el envío de datos, pero terminan representando una pérdida en la velocidad de transmisión de la información. [58]

El segundo protocolo que conforma la capa de transporte es el de datagrama de usuario (UDP por sus siglas en inglés). Al igual que el protocolo TCP, UDP se encarga de manejar el envío de datos de una aplicación a otra comunicándose a través de una red IP. A diferencia de TCP UDP enfatiza la velocidad y la eficiencia sobre la confiabilidad de entregas removiendo muchos de los componentes de seguridad esenciales de TCP. Al remover los servicios de análisis de congestión de red, el apretón de manos de tres vías y los métodos de identificación de paquetes perdidos UDP logra mejorar considerablemente la velocidad de transmisión de un sistema. Esto hace que UDP sea sumamente efectivo en aplicaciones como transmisión de multimedia en tiempo real, donde se necesita una respuesta alta y la pérdida de paquetes no presenta un problema grave. [58]

4. Estándar Wi-Fi. Si bien estos protocolos se encargan de enviar la información entre aplicaciones estos requieren de un estándar que dicte la manera de entablar una comunicación entre los dispositivos como, por ejemplo, el método de conexión Wi-Fi. Wi-Fi (Wireless Fidelity) es el nombre comercial de la tecnología de red de área local inalámbrica utilizada por múltiples equipos electrónicos que se basa en el estándar IEEE 802.11. Este cuenta con dos modos esenciales de operación: *Ad hoc* y modo de infraestructura. En modo *ad hoc* los equipos son capaces de conectarse directamente entre sí sin necesidad de un equipo intermediario permitiendo así una transmisión de información directa. El modo más común de esta tecnología es el de infraestructura, en el que una estación base funciona como un punto central de conexión con una unión física a la red a través de un cable de fibra óptica o similar. La estación base se encarga de asignar direcciones IP identificadoras a cada equipo conectado a la red y ayuda a entablar la conexión entre los equipos con la red, así como conexiones entre pares. [47]

Figura 23. Modos de operación del estándar IEEE 802.11.



[2]

Existen una variedad de dispositivos dedicados a permitir la conexión de equipos a una red Wi-Fi, uno de estos es el módulo ESP-8266 elegido para el proyecto. El ESP-8266 es un módulo de comunicación Wi-Fi de bajo costo diseñado para su uso e integración en equipos portátiles o de baja potencia. Este equipo es controlado a base de instrucciones transmitidas a través de comunicación serial con un microcontrolador y es capaz de transmitir mensajes y datos inalámbricamente a través de los protocolos TCP y UDP de acuerdo con lo elegido por el encargado. Uno de los principales beneficios de este módulo es su bajo precio, el cual radica alrededor de los \$3, y la variedad de información que se puede encontrar sobre su funcionamiento en internet.

5. Matlab y sistemas de control digital. El propósito de este módulo es permitir la conexión entre un robot destinado a operar en enjambre con el programa Matlab, permitiendo así la programación de algoritmos de control para el manejo del robot. Matlab es un ambiente de programación especializado en el manejo y procesamiento de datos numéricos. Este permite realizar operaciones como manipulación de matrices, graficar datos y funciones, implementar algoritmos de alto nivel y crear interfaces capaces de interactuar con el usuario, así como con programas escritos en otros lenguajes como Python, Java y C. Para este proyecto se buscó utilizar Matlab como el centro de procesamiento de datos obtenidos por el robot que será capaz de implementar algoritmos de control digital para dictar sus movimientos y demás acciones en respuesta a su entorno.

El control digital es una categoría del campo de teoría de control que utiliza sistemas digitales como controladores para un sistema. Esta rama del control se ha popularizado sobre el control analógico en gran parte debido a la reducción en el costo de equipos electrónicos y cuenta con una variedad de beneficios. Entre estos se encuentran su bajo costo, flexibilidad, escalabilidad, adaptabilidad y su resistencia a problemas

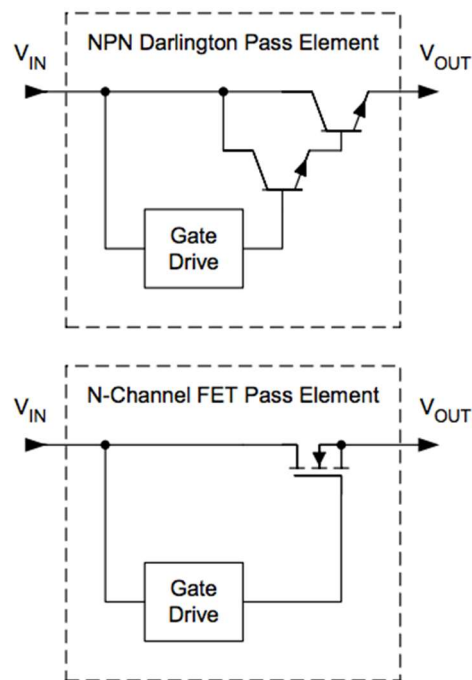
externos. Estos sistemas tienden a funcionar con algoritmos similares a los utilizados en los sistemas analógicos con la diferencia importante de que los algoritmos digitales deben tomar en cuenta la naturaleza discreta de los sistemas electrónicos. Esto se puede notar en la manera en la que los sistemas digitales reemplazan la transformada de Laplace con el uso de la transformada Z para generar sus sistemas.

6. Reguladores de voltaje

a. Regulador de bajo voltaje de caída. Los reguladores lineales de bajo diferencia de voltaje son soluciones sencillas y económicas para regular un voltaje de salida desde un voltaje más alto de entrada, incluso cuando estos dos voltajes son muy parecidos. Estos reguladores tienen la ventaja de no tener ruido de switcheo que tienen un convertidor buck y que son fáciles de implementar ya que la mayoría solo requieren un circuito con dos capacitores de paso y una referencia.

b. Diferencia con un regulador lineal. La diferencia de los LDO's con un regulador lineal estándar es que los lineales estándares requieren una mayor cantidad de voltaje entre la entrada y salida para lograr la regulación, esto se debe a que los lineales estándares, como podemos ver en la Figura 24, usualmente utilizan como elemento de paso transistores NPN o PNP en configuración Darlington que provoca un voltaje colector-emisor más alto. Estas bajas de voltaje pueden llegar a ser de 2V. [26]

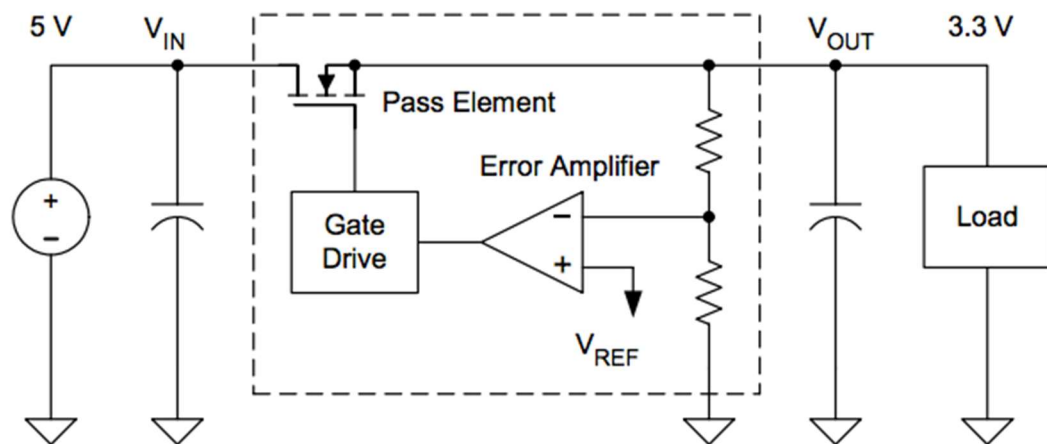
Figura 24. Elementos de paso



[26]

c. Diagrama de bloques y sus componentes. El regulador LDO en su más sencilla versión consiste en los siguientes componentes: un elemento de paso, un amplificador de error, un driver para el transistor, un divisor de voltaje y un voltaje de referencia.

Figura 25. Diagrama básico de bloques de un LDO

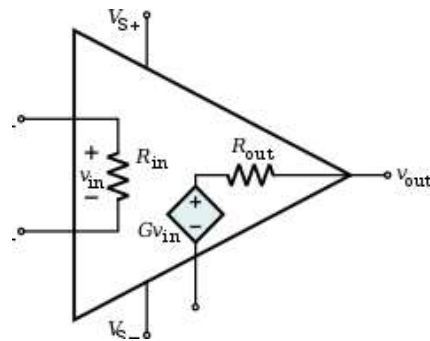


[26]

d. Transistor FET. Es un transistor que utiliza los efectos del campo eléctrico para controlar la conductividad eléctrica entre sus terminales *drain* y *source*, esto resulta en tener una corriente de salida proporcional al voltaje a diferencia de un BJT que su corriente de salida depende de la corriente de entrada en su base. Esto se debe a que el FET controla el tamaño y la forma del canal conductivo creado por el voltaje o su ausencia del entre Gate y cuerpo. [142]

e. Amplificador diferencial. Es un dispositivo DC de alta ganancia de voltaje con una entrada diferencial y generalmente una salida. Se le denomina un amplificador diferenciado ya este amplifica la diferencia de sus potenciales en sus dos entradas por una ganancia y tal resultado lo coloca en su pata de salida. En el caso de un LDO es utilizado en una configuración de “loop cerrado” ya que el circuito provee al op-amp de una retroalimentación negativa, lo que provoca esta configuración es justamente lo descrito anteriormente: la amplificación de un diferencial de voltaje para que tal diferencial llegue a ser 0 V en algún momento. Estos loops cerrados son utilizados bastante como controladores análogos sencillos.

Figura 26. Circuito equivalente de un amplificador operacional.



f. **Funcionamiento.** Este regulador funciona mediante un loop cerrado de control proporcional, el amplificador de error obtiene el V_{out} mediante un divisor de voltaje para luego ser comparado con la referencia, el voltaje a el cual se quiere llegar el divisor de voltaje. Como sabemos el op-amp hará lo necesario para que la diferencia entre estos dos voltajes sean 0 V, por lo tanto, inyectara al elemento (transistor FET) el necesario voltaje par que esto se cumpla lo anterior. Esto significara que el amplificador operacional modulara el canal entre emisor y colector del transistor tipo FET para que en V_{out} haya el voltaje necesario que cause que el error sea 0 V. Este loop cerrado de control tendrá una ganancia definida por su divisor de voltaje, que a su vez nos indicará a que voltaje regulada el LDO.

Ecuación. 1. Función de transferencia del diagrama de bloques básico de un LDO.

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{REF}$$

g. **Eficiencia.** Una de las mayores desventajas de este tipo de reguladores es la gran disipación de potencia que este requiere para regular un voltaje, ya que disipa el voltaje excedente en su entrada de forma térmica. Podemos esta potencia disipada con la siguiente formula.

Ecuación. 2. Potencia perdida tomando en cuenta la corriente quiescente.

$$P_{LOSS} = (V_{IN} - V_{OUT}) \times I_{OUT} + (V_{IN} \times I_Q)$$

Ecuación. 3 . Potencia perdida cuando $I_{out} \gg I_q$

$$P_{LOSS} = (V_{IN} - V_{OUT}) \times I_{OUT}$$

Luego podemos calcular su eficiencia η con la siguiente fórmula.

Ecuación. 4 Eficiencia η de un LDO

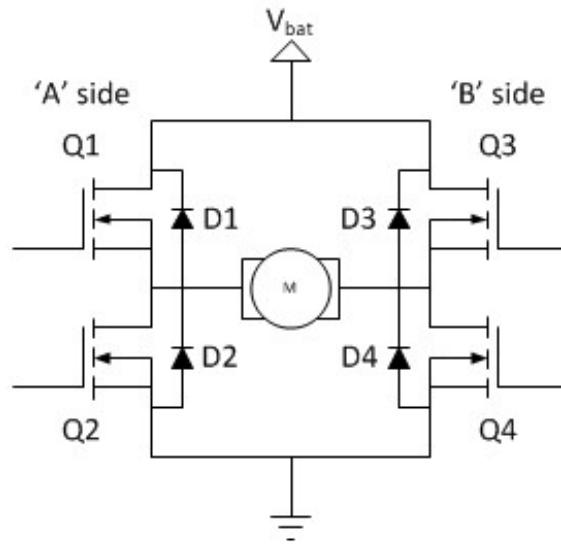
$$\eta = \frac{P_{IN} - P_{LOSS}}{P_{IN}} \quad \text{where} \quad P_{IN} = V_{IN} \times I_{OUT}$$

h. Limitaciones. Al tener como elemento de paso un transistor tipo FET siempre existirá una caída de voltaje entre la entrada del LDO hacia su salida, a pesar de que no será tan grande como la de un regulador lineal estándar si podrá ser una limitación a la hora que la entrada de este no supere cierto voltaje (usualmente 2 V) a su salida.

7. Puente doble H

a. Topología. El circuito básico de doble puente H consta de cuatro elementos de paso (transistores), estos son usualmente de tipo bipolar o FET. Luego los otros cuatro elementos mostrados en la siguiente figura son diodos de captura. [75]

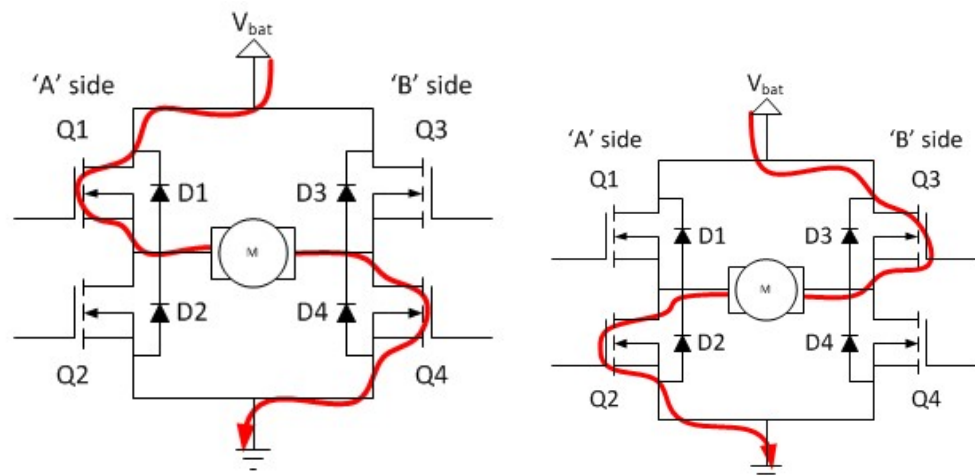
Figura 27. Topología básica de un puente doble H.



[75]

b. Funcionamiento estático. El funcionamiento puede darse en dos casos. El primero es cuando Q1 y Q4 se activan y el segundo es cuando Q3 y Q2 se activan. En ambos casos se formará un camino para que la corriente venga desde la fuente atravesase el motor y luego llegue a tierra. La única diferencia entre ambos funcionamientos es la dirección en la que el motor girará. Si ninguno de los transistores es activado el motor quedará desenergizado. [75]

Figura 28. Flujo de corriente para ambos movimientos del motor.



c. **Funcionamiento con PWM.** Una señal PWM (modulación de ancho de pulso) es un conjunto de pulsos cuadrados donde lo único que se varia es el porcentaje en el cual la señal se encuentra en su voltaje alto, como podemos ver en la figura 6. En esta variación de control en vez de activar el puente con señales constantes, este se activará con señales PWM. Esto nos permite variar la velocidad del motor de una manera proporcional al ciclo de trabajo de la señal de control. Ya que pasara lo mismo que en el funcionamiento estático, pero de manera intermitente. De manera que entre más tiempo este prendida la señal de control más tiempo estará activado el motor y se generara una velocidad más alta. Existen otras maneras de manejar el motor por medio de PWM, estas serán discutirá más adelante.

Figura 29. Señal tipo PWM de control.

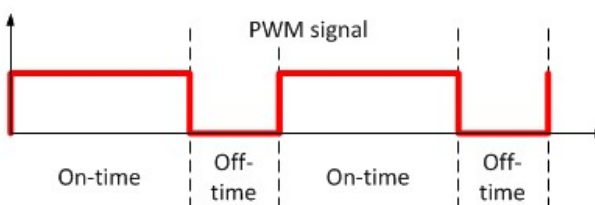
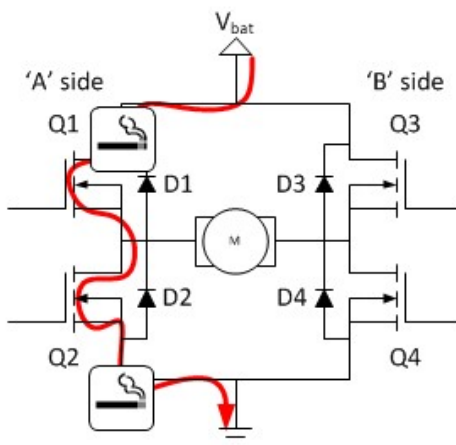


Tabla III. Tabla lógica de funcionamiento.

Entrada		Salida
Q1,Q4	Q3,Q2	
PWM	L	Adelante
L	PWM	Atrás
H	H	Frenado
L	L	Des energizado

d. **Diodos de captura.** Como pudimos ver anteriormente en el funcionamiento estático la corriente siempre pasara o por Q1 y Q4 o por Q3 y Q2. Pero esta afirmación es algo ideal ya que nunca se abrirán y cerraran los elementos de paso en sincronía, en la realidad siempre existirá un retraso entre estos cambios de estado ya que los transistores no se tardan lo mismo en prenderse que en apagarse. Por ello en algún momento podría estar abierta la parte alta y baja al mismo tiempo y provocar un corto circuito a la fuente, como podemos ver en la figura inferior. Por ello se diseña para que no pase esto, sino que ambos transistores estén apagados por ese momento. Pero esto provoca que en ese momento las corrientes del motor no tengan donde algún camino donde llegar a tierra, por ello el voltaje del motor saltara hasta lo necesario para crear un camino para la corriente y este salto de voltaje probablemente quemara los elementos de paso. Es aquí donde entran en juego los diodos de captura, estos proveerán en ese pequeño instante un camino a esta corriente del motor sin que el voltaje de él se eleve.

Figura 30. Corto circuito en un puente H.

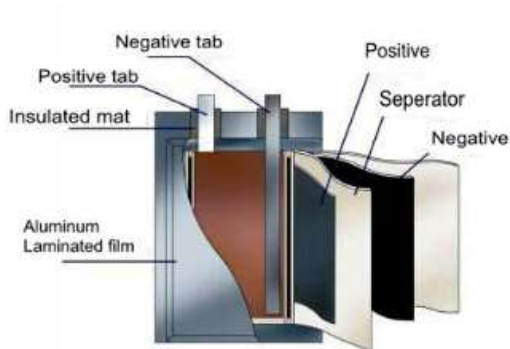


e. Eficiencia. Al utilizar transistores tipo MOSFET existe una baja resistencia en la ruta que toma la corriente por lo tanto abra una baja caída de voltaje y una menor disipación de potencia. Además, si se utiliza el PWM para manejar este circuito la eficiencia mejora ya que solo se toman la potencia necesaria de la fuente.

8. Baterías tipo LiPo

a. Estructura. Todas las celdas constan de tres componentes: un cátodo positivo, un cátodo negativo y un químico llamado electrolito en medio de ambas. Generalmente el electrodo positivo está fabricado de óxido de litio-cobalto y el electrodo negativo de grafito, el electrolito puede variar entre batería.

Figura 31. Estructura de una batería tipo LiPo.



b. Funcionamiento básico. Cuando se está cargando la batería el electrodo positivo da parte de sus iones, estos atraviesan el electrolito y llegan hacia el electrodo negativo donde se combinan con los electrones que atravesaron el circuito de carga. Luego en la descarga pasa lo contrario, en ambos casos el flujo de electrones en circuito al que está dando poder se da al contrario del flujo de iones. Se debe de aclarar que los electrones nunca atraviesan el electrolito sino atraviesan su circuito que le está provocando la carga o descarga. Y con estos movimientos de electrones se produce un corriente que provoca una diferencia de potencial. Cuando ya no existen más iones de litio que se muevan al electrodo negativo se dice que la batería está totalmente cargada (todos los iones de litio están almacenados entre las capas de grafito) y cuando ya no hay más iones que fluyan hacia el electrodo positivo se puede decir que la batería esta descargada. [143]

Figura 32. Principio de carga y descarga de una batería.

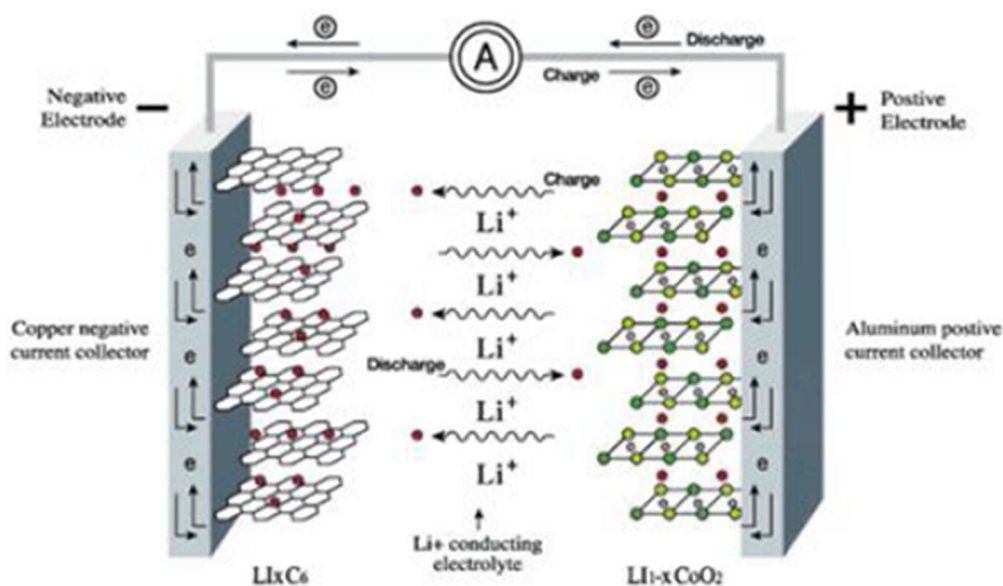
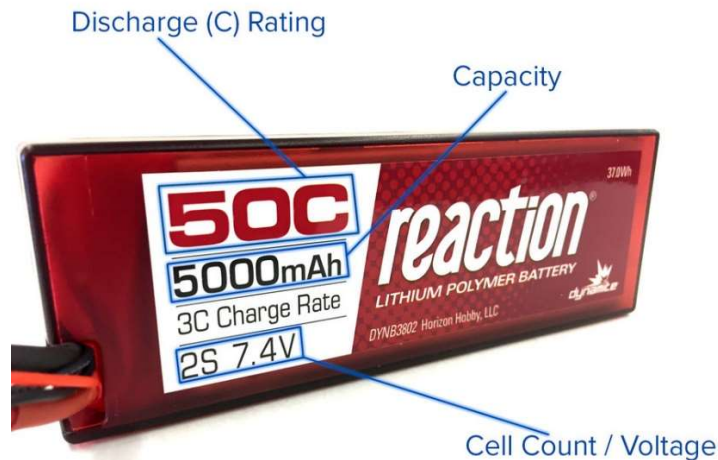


Tabla IV. Ventajas y desventajas sobre las baterías híbridas de metal de níquel.

Ventajas	Desventajas
Son más livianas.	Tiene un tiempo de vida menor, generalmente entre 300 a 400 ciclos.
Pueden ser fabricadas para que tengan casi cualquier forma.	Si son punzadas y tienen contacto con el aire pueden llegar a ser extremadamente volátiles.
Pueden llegar a tener mayor capacidad	Requieren de más tratos especiales, como en su carga, almacenamiento y descarga.
Pueden descargarse a una razón más rápida.	

c. Datos de la batería. Como podemos ver en la figura inferior generalmente las baterías tienen casi toda la información necesaria para su utilización en el empaque.

Figura 33. Batería tipo LiPo.



[111]

1) *Discharge Rating*: Esta franja nos indica que tan rápido se puede descargar o cuanta corriente podemos sacar de la batería sin que esta sufra de algún daño. Este dato es compuesto de un número multiplicado por C, que es la capacidad en amperios.

2) *Capacity*: Usualmente la capacidad de una batería es medida en cuanto corriente se le puede exigir para que se descargue en una hora, a esta capacidad de le llama también C que nos sirve para realizar otros cálculos.

3) *Cell count / Voltage* (Cuento de celda / voltaje): Cada celda tiene un voltaje nominal de 3.7 V y un voltaje máximo de 4.2 V. El número a la izquierda de la S nos indica cuántas celdas tiene la batería por dentro conectadas en serie, este caso es un número 2 y por ello el voltaje de la celda que se indica es $2 \times 3.7 \text{ V} = 7.4 \text{ V}$. (Schneider, 2017)

d. Carga y descarga. La carga de las baterías LiPo debe realizarse con cargadores debidamente diseñados para este tipo de tecnología. Esto se debe que la carga de esta batería especial y se divide en dos fases llamadas CC/CV o *Constant Current / Constant Voltage*. En la primera fase de carga se le suministra a la batería una corriente constante hasta llegar a un voltaje de 4.2 V luego de allí se pasa a la fase de voltaje constante donde se mantiene ese voltaje y se va disminuyendo la corriente hasta que se termine la carga. En los *datasheets* de las baterías también se indica cual es la corriente de carga que soporta adecuadamente la batería, tal corriente también expresado como un múltiplo de la constante C. Una batería al tener energía retirada de ella baja su voltaje, tal descargada no puede llegar hasta los 0 Por esta razón los *datasheets* nos indicas también el voltaje mínimo al cual la batería puede ser descargada. Es importante tener un circuito que proteja a la batería de llegar a un voltaje menor a este, ya que descargar la batería a un voltaje menor a este significaría daños permanentes en las celdas. [111]

En ciertas aplicaciones se requieren voltajes altos que solo una celda no puede proveer, en estos casos se utilizan varias celdas conectas en serie. Tales conexiones resultaran en capacidades y voltajes dados por las fórmulas colocadas al inferior de este texto. Cabe recalcar que para que esta conexión genere el voltaje deseado todas las celdas deben de estar en buen estado. Las ventajas de utilizar estas conexiones no solo residen en que se aumentara el voltaje, sino que también se aumentara la capacidad en general y la corriente.

Ecuación. 5. Voltaje total para celdas en serie.

$$\text{Voltaje total} = \text{Voltaje Celda 0} + \text{Voltaje Celda 0} \dots + \text{Voltaje Celda n}$$

Ecuación. 6. Capacidad total para celdas en paralelo.

$$\text{Capacidad total} = \text{Capacidad Celda 0} + \text{Capacidad Celda 0} \dots + \text{Capacidad Celda n}$$

[13]

Figura 34. Voltajes y capacidad de baterías en una conexión en serie.



[13]

e. Eficiencia. Las baterías tienen una resistencia interna intrínseca que nos hará variar la eficiencia según la corriente que le estemos drenando. Esta resistencia interna cambia dependiendo la temperatura de la batería ya que cuando hablamos de esta resistencia nos referimos a la dificultad que tiene la batería de entregarnos potencia. Al tener una resistencia sabemos que debe de existir una caída de voltaje, como es una caída de voltaje por una resistencia tal caída dependerá proporcionalmente, como nos lo indica la ley de ohm, de la corriente que este fluyendo en ese momento por ello podemos decir que la eficiencia varia y disminuye si la corriente aumenta.

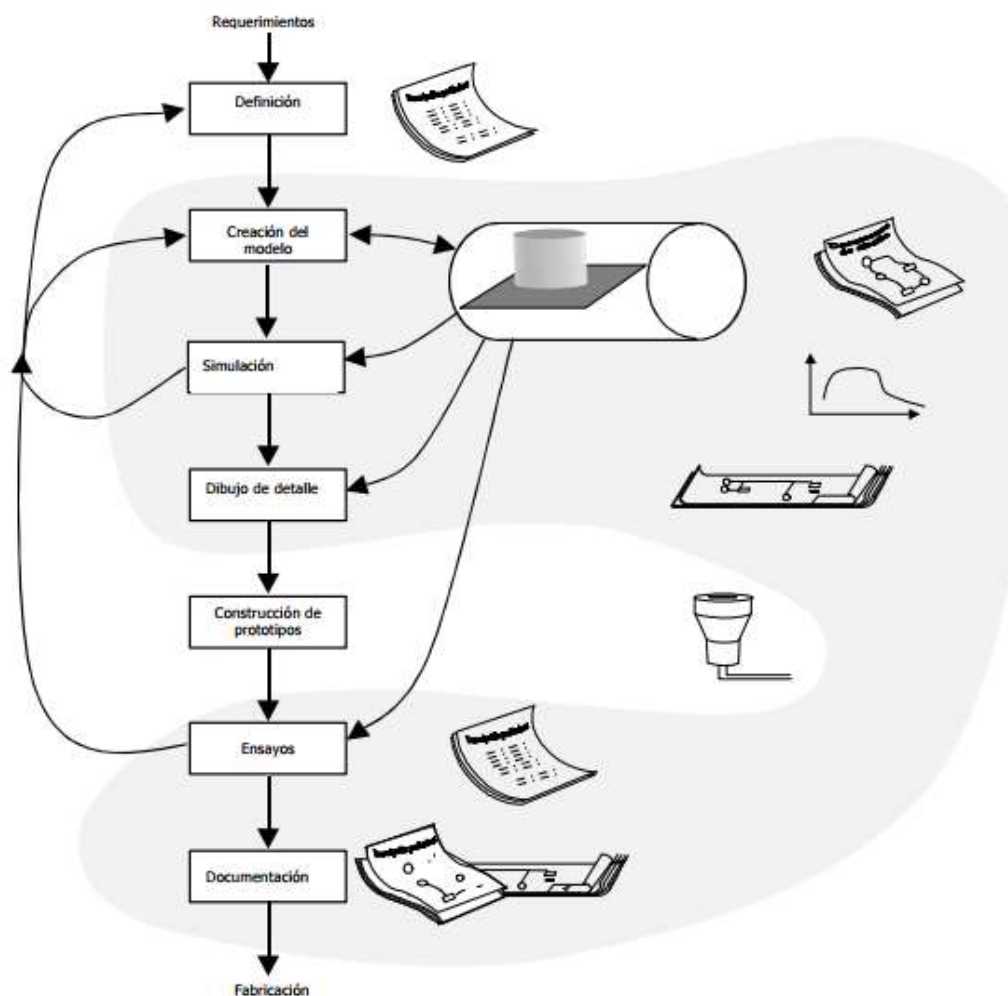
f. Balanceo. Al usar más de dos celdas en serie se empieza a dar un fenómeno de desbalanceo entre las celdas, estas ya no se descargan al mismo nivel. La causa de esto es que la composición química interna de cada celda no es la misma, puede que una tenga una mayor resistencia interna que la otra y cause que se descarguen en diferentes tasas. La solución a esto es utilizar cargadores que tengan la capacidad de balancear las celdas o algún circuito que se encargue de balancear las celdas mientras se descargan. Esto evitará que las celdas sean sobre cargadas o sobre descargadas. Todo esto es necesario solo cuando el desbalanceo es mucho comparado con el voltaje total de las celdas en conjunto y también cuando son cargadas varias celdas en conjunto por el mismo cargador. [143]

9. Diseño asistido por computadora CAD. El diseño asistido por computadora es una herramienta poderosa informática para crear representaciones gráficas de objetos para aplicaciones ingenieriles, arquitectónicas y de diseño. Nos ayuda en el diseño de prototipos, piezas, construcciones, etc. Podemos dividirlo en programas para diseños 2D y/o 3D. [133]

a. Beneficios

- Una visualización exacta del producto final.
- Se trabaja con presiones más alta que no son limitadas por el ser humano sino por la capacidad máquina o del software.
- La herramienta nos puede generar automáticamente una lista de materiales necesarios para llevar a cabo el diseño.
- Se generan los planos de las vistas necesarias de manera más fácil o automática. [133]

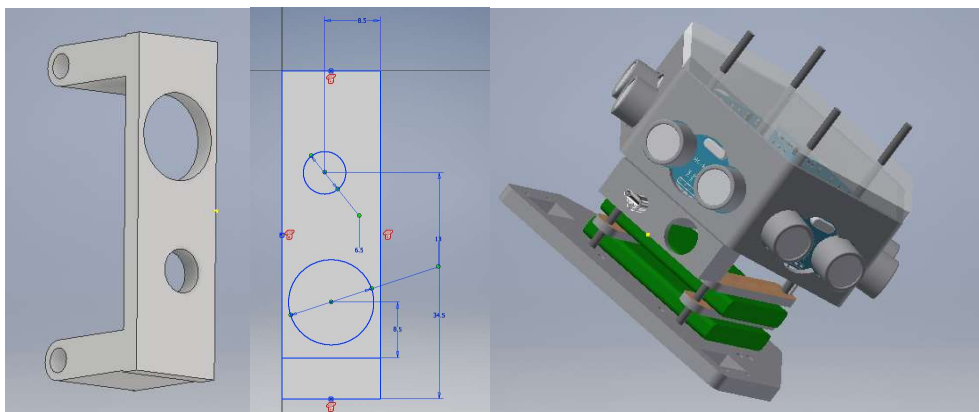
Figura 35. Proceso de diseño con una herramienta CAD.



[133]

b. Autodesk Inventor. Es una herramienta para diseño de piezas 3D desarrollado por la compañía estadounidense Autodesk. Se basa en el modelado paramétrico de sólidos en 3D, es decir utiliza la parametrización de distancias, ángulos, profundidades, etc. para crear sólidos fácilmente modificables sin dañar sus geometrías propias de él diseño. Para crear un diseño se empieza dibujando sobre planos 2D que luego se pueden volver sólidos, después se juntan varios sólidos para formar ya un ensamblaje más complejo como podemos ver en las figuras inferiores. [14]

Figura 36. Fases generales de diseño en inventor.



Además de lo discutido anterior las ventajas de utilizar Autodesk Inventor son:

- Dibujo de vistas automáticas: se puede generar planos de cualquier vista necesaria de manera automática.
- Actualización automática de dibujos: actualización de cambios de dibujos a sólidos se realizan automáticamente, así como de sólidos a ensamblajes. Básicamente los diseños se actualizan cuando los archivos de los que son dependientes se actualizan.
- Lista de materias (BOM): se genera una lista de los materiales necesarios para llevar a cabo la construcción del proyecto.
- Prototipado virtual: al diseñar prototipos con todos los detalles reales podemos detectar de interferencias entre piezas y otros posibles errores sin la necesidad de fabricar el prototipo en físico.
- Documentación técnica: con las vistas del proyecto se puede crear fácilmente dibujos ilustrativos para manuales de ensamblaje. Incluso se pueden generar animaciones y videos instruccionales y representativos.
- Análisis de estrés y simulación: esta herramienta cuenta con un análisis de elementos finitos (FEA) para determinar los estreses y deflexiones bajo una carga. Además, la funcionalidad de simulación dinámica nos ayuda a predecir las fuerzas y aceleraciones que pueden experimentar nuestras piezas bajo condiciones reales. [99]

10. Antecedentes de estructuras para robots destinados a trabajar en enjambre.

Existen muchas estructuras utilizadas para el desarrollo de estos robots. Podemos ver en la siguiente serie de imágenes ubicadas inferior a este texto las siguientes tendencias:

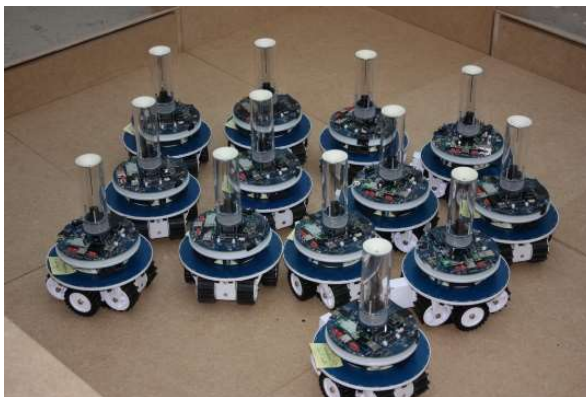
- Entre más números son, más pequeña es su estructura.
- Tienen un contorno circular.
- Poseen de dos a cuatro ruedas.
- No cuentan con una carcasa, sus estructuras solo tienen lo necesario.

Figura 37. Ejemplo de robot 1.



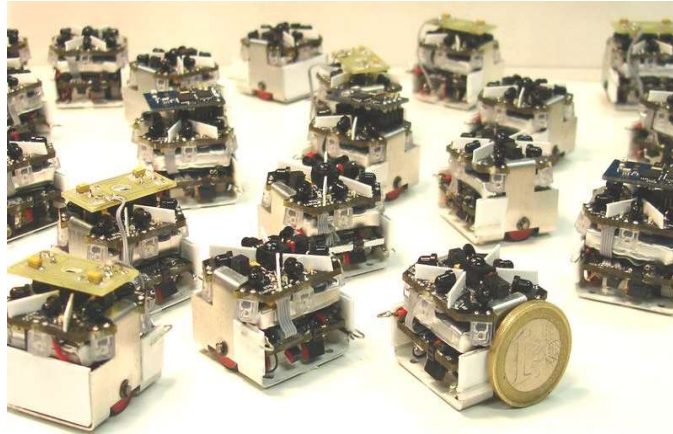
[142]

Figura 38. Ejemplo de robot 2.



[78]

Figura 39. Ejemplo de robot 3.



[53]

Figura 40. Ejemplo de robot 4.



[14]

11. Recomendaciones para diseño de una placa de circuito impreso. Existen ciertas recomendaciones que se deben de tomar en cuenta a la hora de diseñar un circuito en una PCB (*printed circuit board*). Es esencial seguirlas ya que con esto disminuirémos la posibilidad de que nuestra placa tenga algún fallo o no cumpla al 100 % las funciones a las cuales está destinada. En la siguiente lista se enumerarán las recomendaciones y guías necesarias para un diseño exitoso.

- Para circuitos de alta frecuencia se requiere una tierra de buena calidad. La tierra debería de estar en solo un potencial siempre alrededor de todo el circuito, pero en la práctica esto no se da. Cuando la corriente fluye alrededor de un *track* debido a su resistencia existirá una caída de voltaje siempre y por lo tanto no se tendrá siempre el mismo potencial. Para mitigar estos diferentes potenciales se deben agregar planos de tierra para circuitos de control, las conexiones de este plano con los circuitos de control deberán de ser hechos preferiblemente mediante vías.
- Minimizar el área y la longitud de los loops que contengan un switcheo de alta frecuencia.
- Colocar capacitores de *bypass* en los pines de referencia y de voltaje.
- Colocar filtros de capacitores de manera en que sus terminales vayan directamente en los *tracks* que llevan la corriente principal que necesita ser filtrada.
- Elegir los anchos de los *tracks* en base a el incremento de temperatura según el IPC2152.
- No utilizar cruces de 90 grados en los tracks, los ángulos de 90 grados pueden provocar daños en circuitos de alta frecuencia. [108]

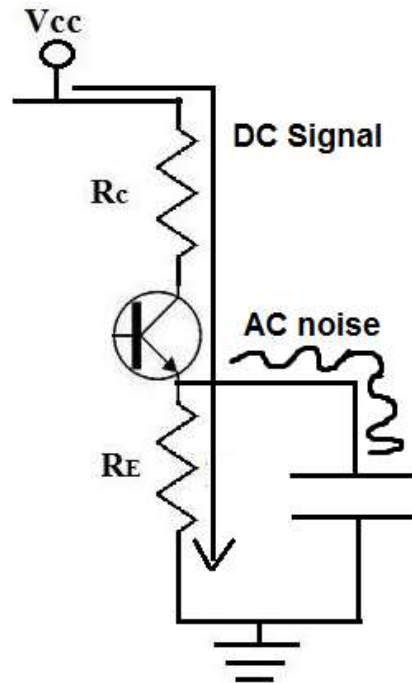
a. Capacitores de paso. Los capacitores de *bypass* anteriormente mencionados son elementos esenciales para la reducción de ruido en aplicaciones que contienen algún elemento de switcheo rápido o motores, especialmente en situaciones como en este proyecto que se manejan elementos de paso (transistores) con señales de mediana frecuencia para controlar motores DC. Los capacitores tienen la propiedad de que su reactancia no es independiente, sino depende de la frecuencia que se le esté aplicando. Es decir, la reactancia podrá disminuir o aumentar inversamente proporcional con la frecuencia, este comportamiento lo podemos ver en la siguiente ecuación. [60]

Ecuación. 7. Reactancia de un capacitor.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c}$$

Se aprovecha este comportamiento característico de los capacitores para mitigar el ruido de manera que si aumentamos la frecuencia aumenta la reactancia y así si disminuye la frecuencia aumenta la reactancia. Esto significa que una señal de alta frecuencia vera en el capacitor algo aproximado como un cable conectado a tierra y para frecuencias altas verá una resistencia de alta impedancia. Lo que nos sirve de esto es que la señal siempre tomará el camino de menos resistencia, por ende, el ruido verá un cable a tierra y la señal DC que nos interesa verá un camino de alta resistividad y no lo tomará. [60]

Figura 41. Ejemplo de funcionamiento de un capacitor bypass.



[60]

Este capacitor también lo podemos por fines prácticos como un filtro pasa bajas, en la Ecuación. 8 podemos ver la fórmula que se utiliza para calcular los valores de la resistencia y capacitor según la frecuencia de corte deseada.

Figura 42. Topología de filtro pasa bajas.

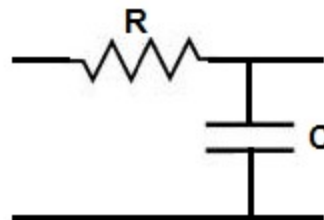
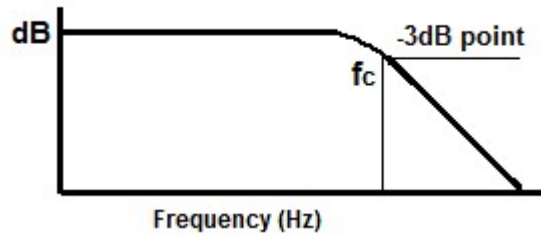


Figura 43. Diagrama de bode de filtro.

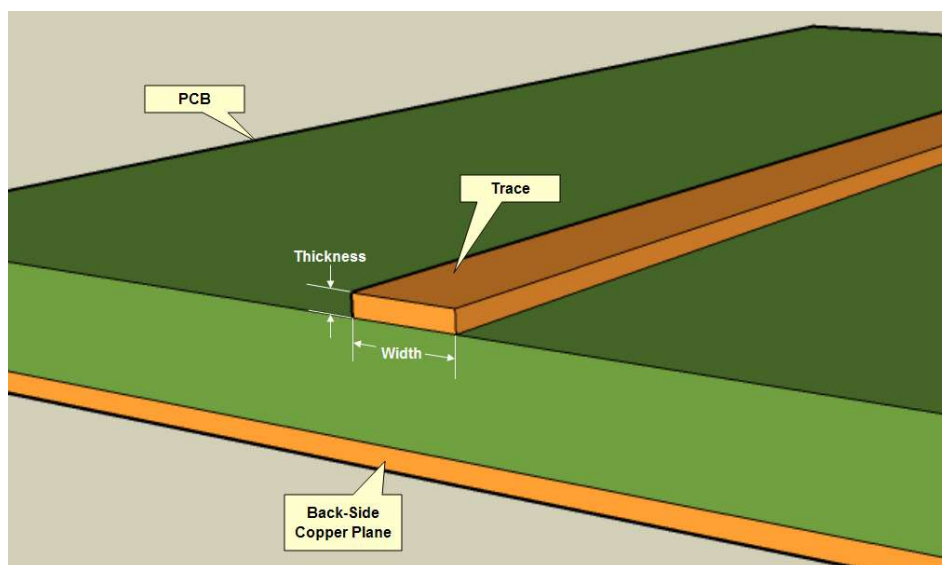


Ecuación. 8. Filtro pasa bajas.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

b. Cálculo de ancho de caminos. Como se ha mencionado anteriormente el cálculo del ancho de los *tracks* es una parte crucial para el diseño correcto de una PCB. Si estos tracks están mal dimensionados puede llegar a existir un calentamiento o incluso fundición del conductor y por consecuencia el circuito podría llegar disminuir su eficiencia por el aumento de resistividad en los conductores o a fallar por completo. Es importante sobredimensionar para asegurar el funcionamiento de la aplicación en los casos más demandantes de corriente, sobre todo en el caso de circuitos de potencia que usualmente manejan corrientes altas.

Figura 44 Traces en una PCB.



El cálculo del ancho proviene de una fórmula de la regulación IPC-2152. Como podemos ver en la ecuación siguiente el ancho del conductor es dependiente de parámetros propios de la aplicación que le demos. Cosas como el área transversal del track podrán ser modificados de manera necesaria para alcanzar la temperatura adecuada para nuestra aplicación, siempre y tanto no se diseñe para una temperatura mayor a 100 grados Celsius. [114]

Ecuación. 9. Corriente para tracks internos.

$$I = 0.024 \times dT^{0.44} \times A^{0.725}$$

Ecuación. 10. Corriente para tracks externos.

$$I = 0.048 \times dT^{0.44} \times A^{0.725}$$

[114]

Donde: dt = aumento de temperatura en grados celsius, A = area transversal del conductor en mils cuadrados e I = corriente en amperios.

Existen varias herramientas que nos pueden facilitar este cálculo y permitir jugar más con estos valores para ver cual nos da mejores resultados. Como podemos ver en la siguiente herramienta en sus entradas se puede ingresar cuando cobre tiene la pcb por unidad de area para saber el área transversal del conductor. Y en su salida no solo nos genera el ancho necesario para cumplir las restricciones sino también nos da otros resultados como acida de voltaje y potencia disipada. Ya con estos resultados se puede elegir un ancho que nos convenga más no solo para la temperatura sino para la eficiencia de nuestros tracks. Cabe mencionar que entre más grande sea el ancho existirá menos resisitividad y, por lo tanto, menor caída de voltaje, esto es otra razón por la que siempre conviene sobredimensionar estas medidas.

Figura 45. Herramienta para cálculo de ancho de tracks.

ANSI PCB TRACE WIDTH CALCULATOR							
Input Data			Results Data				
Field	Value	Units	Trace Data	Internal Traces		External Traces	
				Value	Units	Value	Units
Current (max. 35A)	1	Amps ▼	Required Trace Width	32.75	mil ▼	12.59	mil ▼
Temperature Rise (max. 100°C)	3	°C ▼	Cross-section Area	88.03	mil ² ▼	33.84	mil ² ▼
Cu thickness	2	oz/ft ² ▼	Resistance	0.01	Ω Ohms	0.02	Ω Ohms
Ambient Temperature	28	°C ▼	Voltage Drop	0.01	Volts	0.02	Volts
Conductor Length	1	inches ▼	Loss	0.01	Watts	0.02	Watts
Peak Voltage	5	Volts	Required Track Clearance	24	mil ▼		

[114]

12. **Swarm robotics.** La robótica de enjambre es una disciplina de multi robótica, basada en un conjunto de robots que se coordinan de forma descentralizada. Su diseño es simple, comparado con la complejidad de las tareas que deben realizar. Están inspirados en grupos de insectos que trabajan de forma colaborativa. Los robots deben ser autónomos, capaces de actuar y sensar en un ambiente real. El número de robots debe ser tal que la ley de control pueda manejarlos. El conjunto de robots debe ser homogéneo, y cada uno de ellos debe ser incapaz o ineficiente para resolver la tarea que sí es capaz de resolver el conjunto. Los robots solo tienen comunicación local y capacidad de sensar, de manera que la coordinación se distribuye y la escalabilidad se convierte en una de las propiedades del sistema. [85]

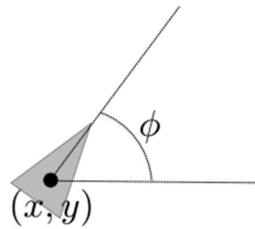
Algunas tareas y comportamientos experimentales que la robótica de enjambre es capaz de realizar son: agregación, dispersión, formación de patrones, movimiento colectivo, asignación de tareas, búsqueda de referencias, transporte colectivo de objetos, mapeo colectivo. Existen diferentes plataformas de robots que se usan para experimentos con robótica de enjambre. Algunas de ellas son: Khepera robot (École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Suiza), Khepera III robot (EPFL en colaboración con K-Team), Jasmine Robot, I-Swarm robot, S-Bot, Kobot. También existen simuladores, como Simulink, Player/Stage/Gazebo, Webots, Microsoft Robotics Studio, SwarmBot3D. [85]

Existen diferentes enfoques para analizar, entender y sintetizar sistemas con un rango ilimitado de modelado matemático, simulación y experimentos. El modelado matemático es la forma que se usa en ingeniería y ciencia para predecir fenómenos, como el comportamiento natural de insectos sociales. Existen dos tendencias matemáticas para modelado, estas son la macroscópica (*top-down*) y la microscópica (*bottom-up*). En la microscópica, el modelo del enjambre se construye sintetizando instintos arbitrarios de robots individuales. El costo computacional es alto, debido al incremento exponencial en la complejidad del modelo, cuando se añaden más robots. El enfoque macroscópico es preferible porque abstrae el comportamiento del enjambre a un nivel alto, ignorando el comportamiento individual de los robots. Es más fácil de implementar, y toma en cuenta influencias externas al sistema en general. El reto es la brecha entre las simulaciones y el mundo real, no todo lo que se diseña se puede replicar en los robots reales. Otro enfoque para modelado es usando simulaciones. [77]

a. **Modelo unicycle.** A largo plazo, se pretende que los robots a construir en el presente megaproyecto se usen como enjambre. En esta primera fase, se prueban algoritmos para robots operando individualmente. Para ello se propone el modelo unicycle, que se muestra en la ecuación (1) y se ilustra a continuación. [33]

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos(\phi) \\ v \sin(\phi) \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

Figura 46. Ilustración de las variables del modelo unicyclo.



[33]

En donde:

x es la coordenada de la posición del robot en el eje horizontal

y es la coordenada de la posición del robot en el eje vertical

ϕ es el ángulo de orientación del robot

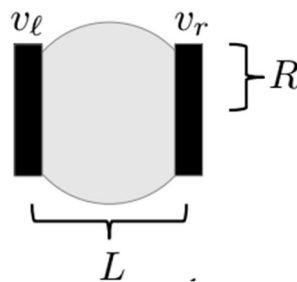
v es la velocidad traslacional

ω es la velocidad angular

Sin embargo, se implementa un robot con dos ruedas, y cada una tiene una velocidad y un desplazamiento. Por ello se propone otra ecuación vectorial que incluye el radio de las llantas, el espacio entre ellas, y sus velocidades, como se observa en la ecuación (2) y se ilustra en la Figura 47. [33]

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2}(v_r + v_l) \cos(\phi) \\ \frac{R}{2}(v_r + v_l) \sin(\phi) \\ \frac{R}{L}(v_r - v_l) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Figura 47. Ilustración de los parámetros del robot.



[33]

En donde:

x es la coordenada de la posición en el eje horizontal

y es la coordenada de la posición en el eje vertical

ϕ es el ángulo de orientación del robot

v_l es la velocidad de la llanta izquierda

v_r es la velocidad de la llanta derecha

R es el radio de la llanta

L es la distancia entre las llantas

Para conocer la información del vector de estado del robot $[x \ y \ \phi]^T$ hay dos posibilidades: sensores externos y sensores internos. Se opta por la segunda opción, específicamente *encoders*. Estos son sensores que devuelven pulsos desfasados entre sí 90° , de tal manera que cada pulso es una cuenta (*tick*), y verificando si un pulso está adelantado o atrasado en fase respecto del otro, se puede determinar si la llanta gira hacia adelante o hacia atrás. Siguiendo esta idea, usando *encoders* en las llantas, la ecuación vectorial (3) muestra la forma en que se actualiza el vector de estados.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \phi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + D_c \cos(\phi) \\ y + D_c \sin(\phi) \\ \phi + \frac{(D_r - D_l)}{L} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D_c = \frac{(D_r + D_l)}{2} \quad (4)$$

En donde:

x es la coordenada actual de la posición en el eje horizontal

y es la coordenada actual de la posición en el eje vertical

ϕ es el ángulo actual de orientación del robot

D_r es el desplazamiento (arco) de la llanta derecha

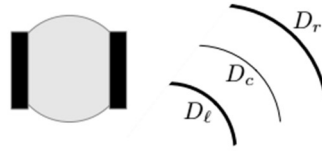
D_l es el desplazamiento (arco) de la llanta izquierda

D_c es el desplazamiento (arco) promedio

L es la distancia entre las llantas

x', y', ϕ' representan el siguiente estado.

Figura 48. Ilustración del desplazamiento de las llantas y el desplazamiento promedio.



[33]

El desplazamiento de cada llanta, en función de la información que proveen los *encoders* (asumiendo que estos devuelven el número total de cuentas desde el inicio), está dada por las ecuaciones (5) y (6).

$$\Delta tick = tick' - tick \quad (5)$$

$$D = 2\pi R \frac{\Delta tick}{N} \quad (6)$$

En donde:

$tick'$ es el número de cuentas actuales que proveen los *encoders*

$tick$ es el número de cuentas anterior

D es el desplazamiento, aplica para ambas llantas

N es el número de cuentas que los *encoders* proveen en una vuelta completa de la llanta

R es el radio de las llantas

Este modelo no toma en cuenta el arrastre (*drift*) que puedan tener las llantas, por lo que hay una fuente de error que no se considera. [33]

b. Sistema de control para llegar a una meta. El comportamiento de llevar a un robot de un punto a otro se conoce como *goal-to-goal*. Para implementarlo, se utiliza control PID (proporcional, integral y derivativo). Sin embargo, también funciona solo con un control proporcional. La referencia es el ángulo deseado respecto del ángulo actual del robot. El error es la resta entre ángulo deseado y ángulo actual, y a este se le aplica control proporcional. La ley de control se muestra en la expresión (10). [33]

$$e = \phi_d - \phi \quad (7)$$

$$\phi_d = \arctan\left(\frac{y_g - y}{x_g - x}\right) \quad (8)$$

$$\omega = PID(e) \quad (9)$$

$$\omega = Ke \quad (10)$$

En donde:

e es el error

ϕ es el ángulo actual del robot

ϕ_d es el ángulo deseado

x, y son las coordenadas de la posición actual del robot

x_g, y_g son las coordenadas de la meta que el robot debe alcanzar

ω es la velocidad angular, PID representa un control Proporcional, integral y derivativo.

K es una constante que se elige para multiplicar el error y obtener ω

En las ecuaciones (7) a (10) se muestra el control a implementar. Solo usando un control proporcional, que se obtiene multiplicando una constante por el error, se obtiene una velocidad angular que ya se puede mandar al robot, para que rastree la referencia y llegue a ella. La referencia es el ángulo deseado, que está dado en función de las coordenadas del punto al que se desea llegar y de las coordenadas iniciales del robot. Se sabe que los ángulos son periódicos. Cada 2π radianes, un ángulo termina en la misma posición, y es equivalente a su valor actual más cualquier múltiplo de 2π radianes. Sin embargo, el procesamiento de información en el sistema de control no tiene la capacidad de entender la naturaleza de los ángulos. Por ello es necesario manipularlos antes de hallar el error, asegurándose de que el error se ubique en el rango $[-\pi, \pi]$. Con la función de Matlab atan2 se logra que el error quede en este intervalo de valores. [33]

El error queda de la siguiente manera:

$$e' = \text{atan2}(\sin(e), \cos(e)) \quad (11)$$

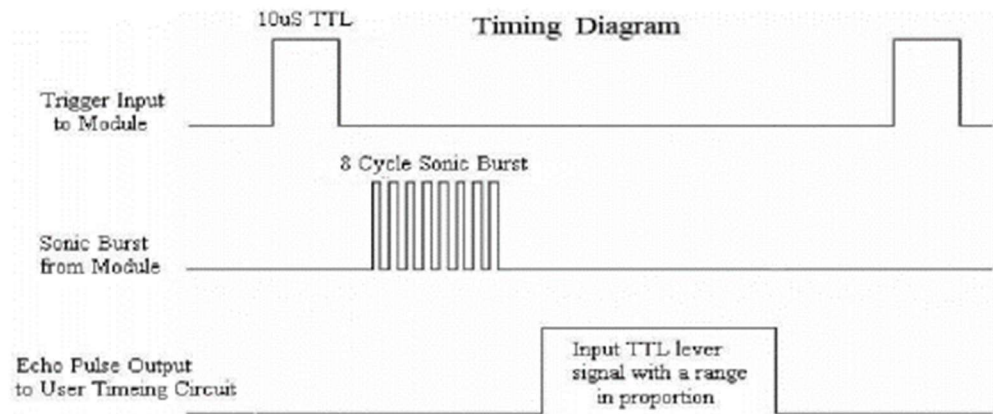
13. Sensores ultrasónicos de proximidad

a. Sensor ultrasónico HC-SR04. El sensor ultrasónico HC-SR04 es un módulo que mide proximidad que puede leer valores entre 2 cm y 400 cm, con una precisión de hasta 3mm. Posee 4 pines que son voltaje, *trigger*, *echo*, y tierra. A continuación, se muestra el módulo en la Figura 49 y el diagrama de *timing* en la Figura 50.

Figura 49. Módulo HC-SR04.



[34]

Figura 50. Diagrama de *timing* del módulo HC-SR04.

[34]

Su voltaje de operación es de 5VDC, consume una corriente de 15mA. Trabaja a una frecuencia máxima de 40 Hz, y sus mediciones son válidas en un ángulo de 15°. Se recomienda usarlo en un área no mayor a 0.5m², con superficies planas, sólidas. El módulo funciona con una señal de *trigger* (en el pin del mismo nombre) en nivel alto de por lo menos 10µs. Luego envía automáticamente 8 pulsos de 40 kHz. Si detecta una señal de rebote, la duración del pulso (en nivel alto) de *echo* es el tiempo que tarda la señal ultrasónica en retornar. Por tanto, la distancia entre el módulo y el objeto está dada por la ecuación (12). [34]

$$d = \frac{v_s \cdot t_{echo}}{2} \quad (12)$$

En donde:

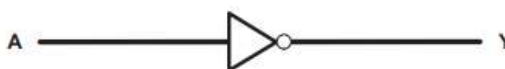
d es la distancia entre el objeto y el módulo, en metros.

v_s es la velocidad del sonido, que se puede tomar como 340 m/s.

t_{echo} es la duración del pulso que recibe el módulo en el pin *Echo* en segundos.

b. Compuerta lógica *NOT* y circuito integrado 74HC04. La compuerta *NOT* es una función lógica también conocida como inversor. Posee una entrada y una salida que es el complemento del valor en la entrada. A continuación, se observa el diagrama de la compuerta y su tabla de verdad.

Figura 51. Diagrama de una compuerta *NOT*.



[127]

Tabla V. Tabla de verdad de una compuerta *NOT*.

Entrada A	Salida Y
L	H
H	L

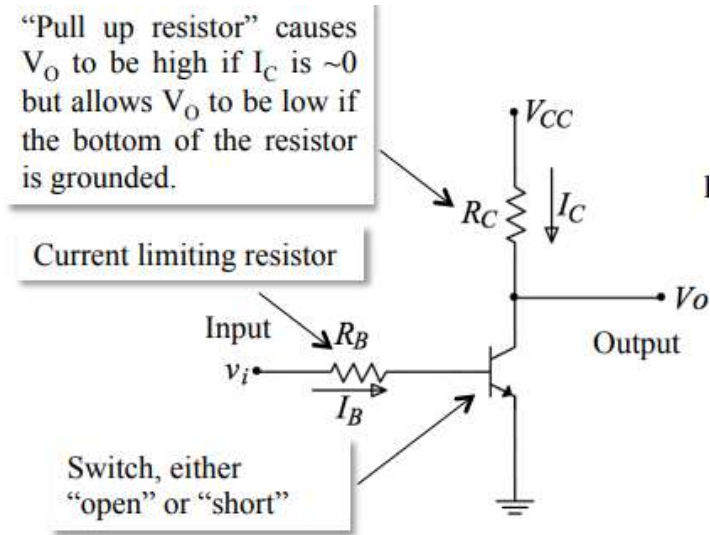
Donde H representa un 1 lógico, L representa un 0 lógico.

Un circuito integrado que implementa compuertas *NOT* es el 74HC04. Posee seis inversores independientes. Utiliza tecnología CMOS. El voltaje de alimentación nominal es de 5VDC, aunque los valores mínimo y máximo son 2 VDC y 6VDC respectivamente. Opera en un rango de temperatura de -40°C hasta 85°C . Su corriente máxima en cada salida es 25mA, y su consumo máximo es de 50mA. Los valores anteriores dan una idea del relativamente bajo consumo de potencia de este circuito integrado. Está disponible para la venta en diferentes empaquetados, que se analizarán más adelante. [127]

Otra forma de implementar una compuerta *NOT* es utilizando transistores. Esta forma es de utilidad cuando se quiere enlazar un voltaje mayor a un voltaje menor, por ejemplo, lógica de 5VDC con lógica de

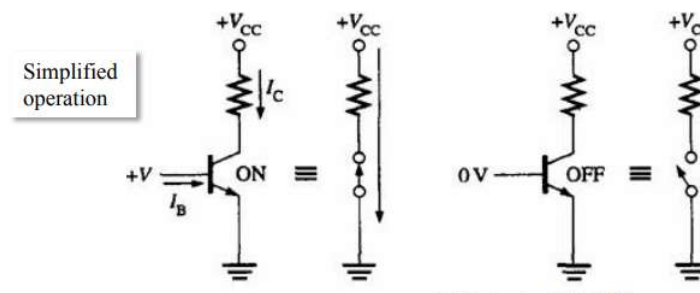
3.3VDC. A continuación, se muestra un diagrama de conexión para un inversor utilizando un transistor BJT NPN.

Figura 52. Diagrama de conexión de una compuerta *NOT* con transistor BJT.



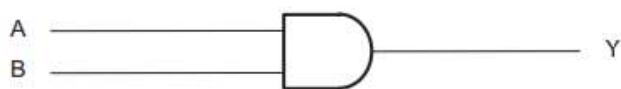
[73]

Figura 53. Diagrama simplificado del funcionamiento del inversor con transistor BJT.



[73]

c. Compuerta lógica *AND* y circuito integrado 74HC08. La compuerta *AND* es una función lógica que posee dos o más entradas y una salida. El valor lógico en la salida es 1 si todas las entradas son 1. En caso contrario, su valor es 0. A continuación, se observa el diagrama de la compuerta y la tabla de verdad para una *AND* de dos entradas.

Figura 54. Diagrama de una compuerta *AND* de dos entradas.

[128]

Tabla VI. Tabla de verdad de una compuerta *AND* de dos entradas.

Entrada A	Entrada B	Salida Y
H	H	H
H	L	L
L	H	L
L	L	L

Donde H representa un 1 lógico, L representa un 0 lógico.

Un circuito integrado que implementa compuertas *AND* de dos entradas es el 74HC08. Tiene 4 compuertas independientes. Sus características de voltaje, temperatura de operación y consumo de corriente son similares al circuito 74HC04. Está disponible para la venta en diferentes empaquetados, que se analizarán más adelante.

d. Compuerta lógica *OR* y circuito integrado 74HC32. La compuerta *OR* es una función lógica que posee dos o más entradas y una salida. El valor lógico en la salida es 1 si al menos una de las entradas son 1. En caso contrario, su valor es 0. A continuación, se observa el diagrama de la compuerta y la tabla de verdad para una *OR* de dos entradas.

Figura 55. Diagrama de una compuerta *OR* de dos entradas.

[128]

Tabla VII. Tabla de verdad de una compuerta *OR* de dos entradas.

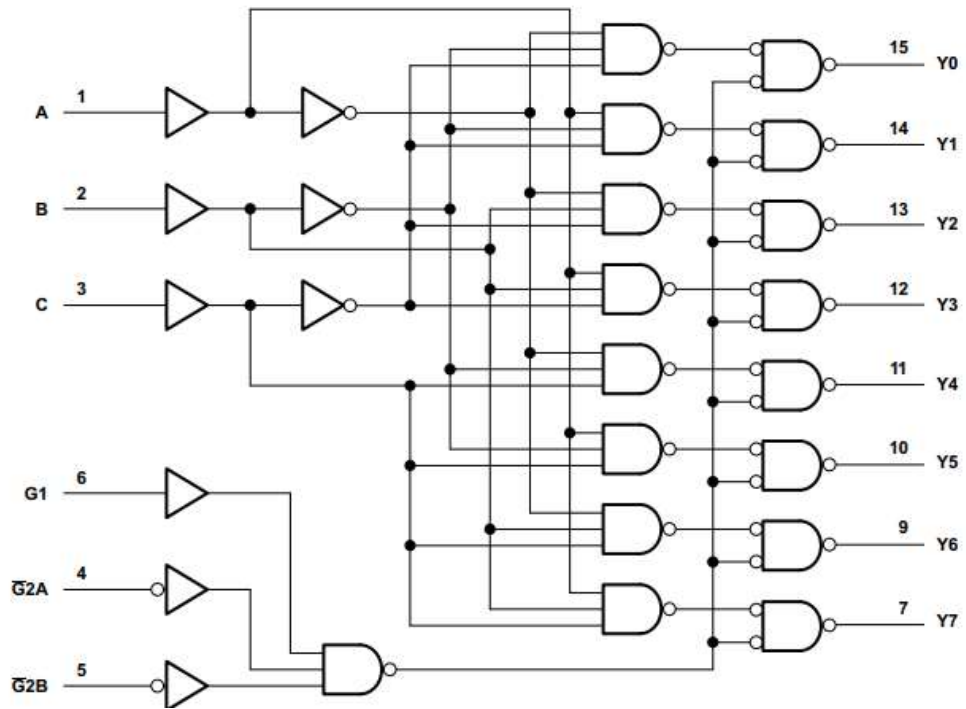
Entrada A	Entrada B	Salida Y
H	H	H
H	L	H
L	H	H
L	L	L

Donde H representa un 1 lógico, L representa un 0 lógico.

Un circuito integrado que implementa compuertas *OR* de dos entradas es el 74HC32. Tiene cuatro compuertas independientes. Sus características de voltaje, temperatura de operación y consumo de corriente son similares al circuito 74HC04. Está disponible para la venta en diferentes empaquetados, que se analizarán más adelante.

e. Demultiplexor o decodificador y circuito integrado 74HC138. Es una función lógica que tiene n entradas y 2^n salidas. Dependiendo de la combinación binaria en la entrada, una de las salidas será diferente a las demás. A continuación, se muestra el diagrama lógico de la implementación de un decodificador de 3 a 8 del circuito integrado 74HC138, con tres señales adicionales de habilitación. Está disponible para la venta en diferentes empaquetados. Su *delay* de propagación entre A, B o C y cualquier salida Y es de 47 ns cuando el voltaje de alimentación es de 4.5 VDC (Texas Instruments, 2016). Esto indica que como máximo, la frecuencia de las entradas A, B, C podrá ser 10 MHz. Es suficiente para trabajar con seis sensores ultrasónicos. Maneja un margen V_{IL} de 3.15VDC cuando la alimentación es 4.5VDC, lo que muestra que este decodificador sirve para unir lógica de 3.3VDC con lógica de 5VDC.

Figura 56. Diagrama de un decodificador de 3 a 8.



[129]

Tabla VIII. Tabla de verdad de un demultiplexor 74HC138.

Entradas						Salidas							
<i>Enable</i>			<i>Select</i>										
G1	$\overline{\text{G2A}}$	$\overline{\text{G2B}}$	C	B	A	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
X	H	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
X	X	H	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
L	X	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
H	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H
H	L	L	L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H
H	L	L	L	H	L	H	H	L	H	H	H	H	H
H	L	L	L	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H
H	L	L	H	L	L	H	H	H	H	L	H	H	H
H	L	L	H	L	H	H	H	H	H	H	L	H	H
H	L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	L	H
H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L

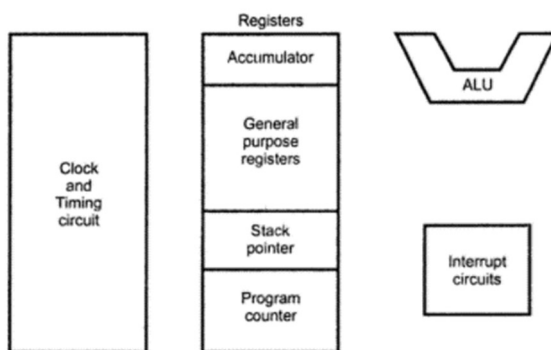
[129]

Donde H representa un 1 lógico, L representa un 0 lógico, y X representa un *don't care*.

14. Microcontroladores basados en ARM cortex

a. Microcontroladores y microprocesadores. Un microprocesador es un circuito integrado que consiste de una unidad lógica y aritmética (ALU), registros de propósito general, *stack pointer* (SP), *program counter* (PC), circuito de reloj y circuitos de interrupciones (Godse & Godse, 2009). Su función es ejecutar instrucciones y procesar la información de sus entradas. La ALU, el circuito de reloj y los circuitos de interrupciones son componentes electrónicos interconectados de manera que forman un circuito que realiza una función específica. El *stack pointer*, el *program counter* y los registros de propósito general son espacios de memoria implementados en el silicio del procesador; es memoria rápida, pero de alto costo, y es de corta extensión comparada con memorias externas como la RAM.

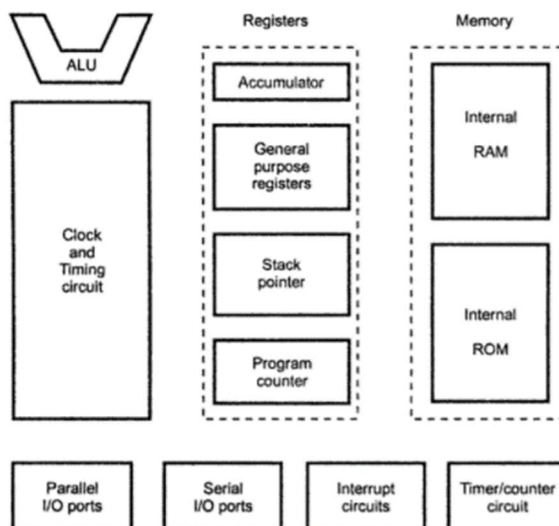
Figura 57. Diagrama de bloques general de un microprocesador.



[44]

Un entorno de microcomputadora no es posible usando solo un microprocesador. Se requieren de otros dispositivos periféricos como memoria ROM (*read only memory*), memoria de lectura y escritura (RAM, *random access memory*), decodificadores, *drivers* y dispositivos de entrada y salida, además del microprocesador. También se puede incluir controladores de interrupciones y temporizadores programables. Una característica importante de una computadora basada en un microprocesador es la flexibilidad que este diseño brinda, ya que se le pueden añadir más módulos periféricos para escalar el sistema. Un microcontrolador incorpora las características de un microprocesador, así como ROM, RAM, entradas y salidas paralelas, entradas y salidas seriales, contadores y circuito de reloj. Todo esto se incorpora en un mismo circuito integrado. Gracias a ello, los dispositivos periféricos tienen menor tiempo de acceso, lo que implica más velocidad. Tener menos hardware reduce el tamaño del PCB (circuito impreso) y añade confiabilidad al sistema. [44]

Figura 58. Diagrama de bloques general de un microcontrolador.

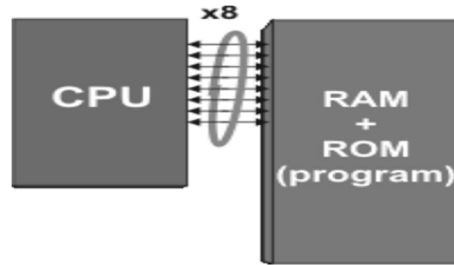


[44]

b. Arquitectura de computadores. Las computadoras se componen de varios componentes que son nombrados como hardware. Incluyen el CPU, memoria, buses, reloj, dispositivos periféricos. Deben comunicarse entre ellos y proveer servicios al usuario. La forma en que estas partes interactúan se llama arquitectura de computadores. La memoria se clasifica por niveles. El primer nivel se compone de registros, que están implementados en el silicio del procesador, es la memoria de menor tamaño y la más rápida. Le sigue la memoria caché, que es de algunos kilobytes o megabytes. Después está la RAM, que es de mayor extensión y menos rápida que las anteriores. Después siguen los dispositivos de memoria donde se almacenan cantidades grandes de datos (orden de gigabytes), como el disco duro, unidades de CD o DVD, que son de mayor capacidad, pero con un tiempo de acceso mayor. [28]

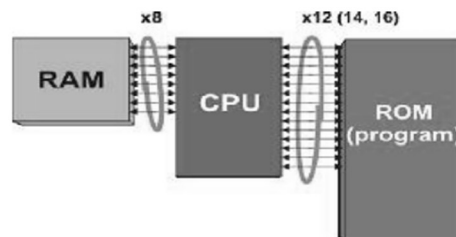
Dos tipos básicos de arquitectura son Harvard y Von-Neumann. Se diferencian en la forma en que el CPU (procesador) y la memoria intercambian información. La arquitectura Von-Neumann posee una sola memoria para datos e instrucciones. La arquitectura Harvard posee memorias separadas para instrucciones (ROM) y datos (RAM). Otra clasificación para los microcontroladores de acuerdo con su set de instrucciones es CISC (*Complex instruction set computing*) y RISC (*Reduced instruction set computing*). Los primeros tienen instrucciones complejas, que ejecutan varios procesos de bajo nivel en una sola instrucción y le toman más tiempo al procesador. Los RISC poseen instrucciones sencillas, se ejecutan más rápido en el procesador, y el listado completo de instrucciones es más reducido que CISC. [5]

Figura 59. Diagrama básico de una arquitectura Von-Neumann



[5]

Figura 60. Diagrama básico de una arquitectura Harvard



[5]

Dependiendo de la tecnología y la cantidad de bits que puede manejar un microcontrolador, pueden ser clasificados como microcontroladores de 4, 8, 16 o 32 bits. Los de 4 bits se usan en aplicaciones básicas como juguetes. Los de 8 bits se emplean en aplicaciones generales; entre ellas está el manejo de datos tipo ASCII que es un formato de representación de caracteres de 8 bits. Los de 16 bits son una mejora de los de 8 bits, ya que permiten mayor precisión y alta velocidad de procesamiento de datos. Los de 32 bits están diseñados para aplicaciones más complejas como robótica, instrumentación inteligente, procesamiento de imágenes, telecomunicaciones, automóviles autónomos. [44]

La arquitectura ARM (Advanced RISC Machines) está basada en la arquitectura RISC. Algunas de las características que comparten son: El procesamiento de datos se ejecuta en los registros y no directamente en contenido de memoria; Los modos de direccionamiento son simples, se determinan a partir del contenido de los registros y contenidos de instrucciones. La arquitectura ARM ha evolucionado para cumplir con las demandas de nuevas funcionalidades, alto rendimiento y las necesidades de los mercados emergentes. Los principales atributos de la arquitectura ARM son el tamaño, desempeño y bajo consumo de potencia. Las mejoras hechas a la arquitectura RISC permiten tener procesadores con un buen balance de alto desempeño, código de corta extensión, bajo consumo de potencia y menor área en silicio. [9]

Existen diferentes familias de procesadores con algunas características en común, pero diseñados para tareas diferentes. El perfil *Architecture* (A) es para mercados de alto desempeño como móviles y empresas. El perfil *Real-Time* (R) es para aplicaciones embebidas de automóviles e industria de control. El perfil *Microcontroller* (M) es para el mercado de microcontroladores, cumpliendo demandas de conteo, tiempo real y desempeño. [9]

c. Teensy. Teensy es un sistema de desarrollo de proyectos con un *footprint* de dimensiones relativamente pequeñas. Toda la programación se hace a través del puerto USB. Hay Teensy de 8 bits, que contienen microcontroladores AVR (Teensy 2.0, Teensy++ 2.0). También existen Teensy de 32 bits, que contienen microcontroladores ARM Cortex de 32 bits. Estas plataformas son conocidas por ser de tercera generación (Teensy 3.0, Teensy 3.1, Teensy 3.2, Teensy 3.5, Teensy 3.6, Teensy LC). Cada una de ellas difiere en el microcontrolador que utiliza. El proyecto PJRC, que incluye a Teensy, ha sido desarrollado gracias al trabajo de Paul Stoffregen, ingeniero eléctrico. En el trabajo la acompaña Robin Coon. Existe amplia documentación sobre esta plataforma, existe un foro donde se plantean problemas y Paul les da seguimiento. Teensy es compatible con el IDE de Arduino, la programación se puede hacer en ese entorno.

1) Teensy LC. El Teensy LC forma parte de la tercera generación de estas plataformas de desarrollo de proyectos. Utiliza el microcontrolador de Freescale MKL26Z64VFT4, basado en ARM Cortex M0+. El procesador es de 32 bits, pero soporta menos instrucciones que los procesadores más potentes de ARM. El compilador traduce las operaciones a instrucciones de un ciclo de reloj, pero puede ser que, por tener un set de instrucciones reducido, las instrucciones necesarias sean más y tome más de un ciclo de reloj ejecutar una operación compleja. [124]

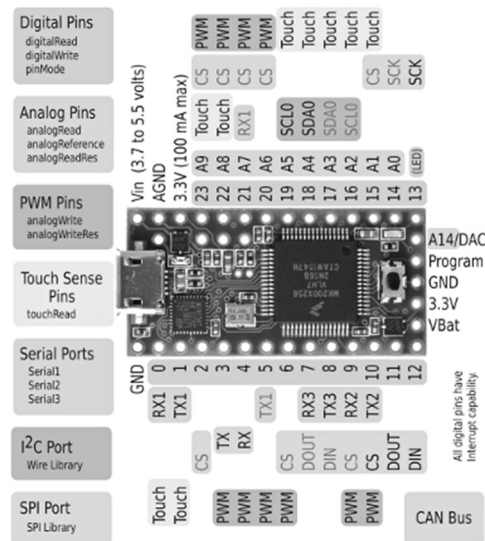
El procesador Cortex M0+ implementa dos sets de instrucciones, uno Thumb (instrucciones de 16 bits) y otro ARM (instrucciones de 32 bits). Posee uno de los footprints más pequeños, menor área en silicio y ultra bajo consumo de potencia (4μ /MHz). Es compatible con los demás procesadores Cortex-M. Está diseñado para máxima eficiencia energética y dispositivos de bajo costo. Entre sus aplicaciones están: sensores MEMS, control de potencia, control digital de motores, microcontroladores de bajo consumo, prendas para monitorear signos vitales, entre otros. [9]

El procesador funciona a 48MHz. Además, el Teensy LC implementa memoria flash de 62 kBytes, cache de 64 Bytes, RAM de 8 kBytes, 24 pines de entrada y salida digitales, opera a 3.3V, 18 interrupciones, 13 entradas analógicas, entradas táctiles, una salida analógica con 12 bits de resolución, 7 *timers*, 10 salidas PWM, comunicación USB 2.0, 3 puertos seriales, 2 interfaces SPI, 2 interfaces I2C, entre otras características. Estas especificaciones son más que suficientes para controlar el robot que se desea construir. Además, el precio es de \$11.65 por un microcontrolador de 32 bits, comparado con los \$22 que cuesta un

2) Teensy 3.2. El Teensy 3.2 forma parte de la tercera generación de placas de desarrollo de Teensy. Contiene un microcontrolador MK20DX256VLH7 basado en el procesador ARM Cortex M4. Posee 256 kBytes de memoria flash e igual cantidad de memoria caché, 64 kBytes de memoria RAM, 24 pines digitales de entrada y salida, opera a 3.3V, aunque sus entradas también toleran 5V (diferente del Teensy LC). Tiene 21 entradas analógicas, una salida analógica de 12 bits de resolución, 12 *timers*, 12 salidas PWM, comunicación USB 2.0, 3 puertos seriales, 1 interfaz SPI, 2 interfaces I2C y una interfaz de audio digital. El núcleo funciona a 72 MHz, con capacidad de overclock de 96 MHz. Además, posee una unidad DSP (Digital Signal Processing), que es utilizada en aplicaciones de audio. Es capaz de hacer operaciones de multiplicación y división, que pueden devolver resultados de 64 bits. [124] [40]

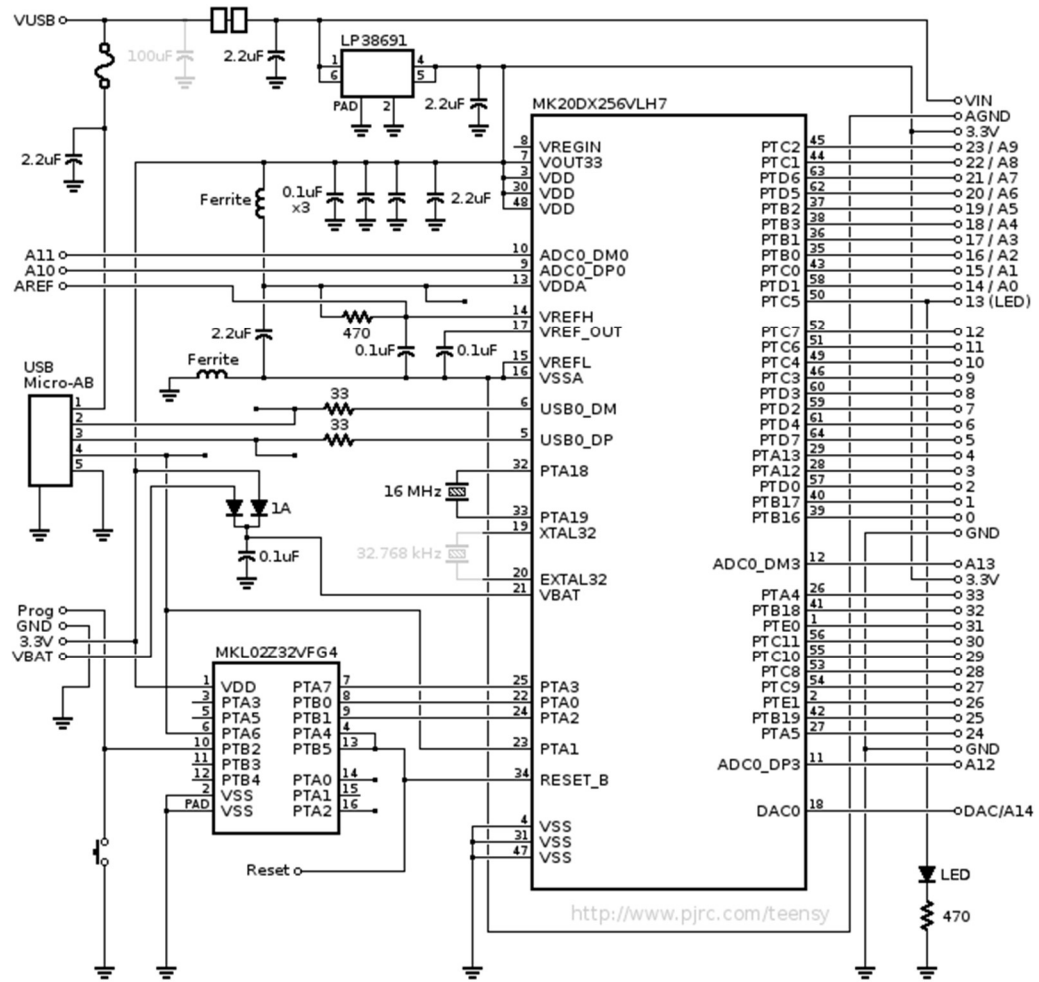
En otras palabras, el Teensy 3.2 es una placa con un microcontrolador más potente que el que incluye el Teensy LC. Su precio es de \$19.80, comparado con los \$33.15 que cuesta un arduino zero, que incluye un microcontrolador basado en ARM cortex M0+. Para el control del robot que se desea implementar, el Teensy 3.2 es una buena opción. Posee interrupciones en todos sus pines digitales, una característica útil para medir tiempos entre pulsos.

Figura 63. Ubicación de los pines del Teensy 3.2



[125]

Figura 64. Esquemático del Teensy 3.2.



[123]

Tabla IX. Comparación entre Teensy LC y Teensy 3.2.

	Teensy LC	Teensy 3.2
Precio	\$11.65	\$19.80
Procesador	Cortex M0+ 48 MHz	Cortex M4 72 MHz, 96 MHz overclock
Memoria flash	62 KB	256 KB
Cache	64 B	256 B
RAM	8KB	64 KB
Entradas y salidas digitales	27	34
Entradas analógicas	13	21
Salidas analógicas	1 DAC 12 bits	1 DAC 12 bits
Timers	7	12
Puerto Serial	3	3
USB	Sí	Sí
SPI	2	1
I2C	2	2

[122]

En la Tabla IX se observa que el Teensy 3.2 ofrece más prestaciones que el Teensy LC, y la diferencia de precio es de aproximadamente \$8. Se puede probar con los dos para verificar el desempeño de placas en el manejo del robot a desarrollar.

15. Manejo de interrupciones en Teensy 3.2 y Teensy LC. Las interrupciones en ARM se manejan a través de hardware, en el vector de interrupciones anidadas (NVIC, Nested vectored interrupt controller). Una solicitud de interrupción externa o de software puede cambiar el estado de una interrupción a pendiente. Los tres estados posibles son: Inactivo, pendiente, activo, pendiente y activo. El NVIC controla cuáles se ejecutan. Cuando una interrupción ocurre, el procesador automáticamente guarda los registros en la pila (espacio en memoria). En ARM hay buses separados para acceder simultáneamente a la RAM y a la memoria Flash, así que el código de la interrupción se obtiene al mismo tiempo que se guardan los registros. El hardware maneja el almacenamiento y restauración de registros, y realiza una cadena (*tail chain*) si otra interrupción está pendiente. Se salta del final de una interrupción al principio de otra sin necesidad de extraer y almacenar nuevamente los registros en la pila. [121]

El NVIC implementa niveles de prioridad para las interrupciones, de 0 a 255, mientras menor es el número la prioridad es mayor. Por defecto, todas están en cero. El NVIC no permite otra interrupción de una prioridad similar o menor hasta que se retorne de la actual. Cuando se asignan prioridades, el NVIC y el hardware de ARM se encargan automáticamente de todo. (Stoffregen, AVR like ISR, 2013). Para usar interrupciones periféricas, se usa el `attachInterrupt` de arduino y el comando `NVIC_SET_PRIORITY(IRQ, NIVEL)`, donde el IRQ es el número de *Interrupt Request* (es una dirección de memoria que es diferente para cada fuente de interrupción), y el nivel es el valor de prioridad.

Utilizando la Figura 64 y la Figura 62 se obtiene la siguiente relación entre puertos del microcontrolador y pines del Teensy. En la tercera columna de la Tabla X se coloca el valor del IRQ como un parámetro en letras, que el compilador convierte al valor correspondiente.

Tabla X. Relación entre pines del Teensy y puertos del microcontrolador.

Puerto del microcontrolador	Número de pin en el Teensy 3.x	IRQ
PortA[4:5, 12:13]	33, 24, 3, 4	IRQ_PORTA
PortB[0:3, 16:19]	16, 17, 19, 18, 0, 1, 32, 25	IRQ_PORTB
PortC[0:11]	15, 22, 23, 9, 10, 13, 11, 12, 28, 27, 29, 30	IRQ_PORTC
PortD[0:7]	2, 14, 7, 8, 6, 20, 21, 5	IRQ_PORTD
PortE[0:1]	31, 26	

[121]

16. IMU. Una IMU es una unidad de medición inercial (*Inercial Measurement Unit*). Su implementación en circuito integrado es capaz de devolver mediciones de velocidad, orientación, fuerzas gravitacionales, utilizando una combinación de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros. Se usan en aplicaciones de interacción humano-computador, propósitos de navegación y sistemas con balanceo automático como el Transportador personal Segway. [30]

a. MPU6050. Es una unidad de procesamiento (*Microprocessing Unit*) que provee un procesador de movimiento de 6 grados de libertad. Combina un giroscopio de 3 ejes y un acelerómetro de 3 ejes en el mismo *die* de silicio. Posee un procesador digital de movimiento (DMP), capaz de procesar algoritmos complejos de 9 ejes. El módulo de DFRobot MPU6050 incluye el sensor mencionado, un regulador de 3.3V y resistencias pull up para el bus I2C. Para acceder a la IMU, se usa la librería *i2cdev* de arduino y con *i2ct3*, que está diseñada para la familia de la tercera generación de Teensy (entre ellos el Teensy 3.2 y Teensy LC). [51]

Para acceder a la información de giro y aceleración, se deben configurar los registros. La comunicación es a través de una interfaz I2C. Los bits *FS_SEL* del registro *GYRO_CONFIG* sirven para definir la escala de medición del giroscopio. Los bits *AFS_SEL* del registro *ACCEL_CONFIG* definen el rango de medición de aceleración, teniendo como referencia $g=9.81\text{m/s}^2$. [51]

Tabla XI. Escala y sensibilidad de giro para los valores de *FS_SEL*

<i>FS_SEL</i>	Escala completa	Sensibilidad de los LSB (bits menos significativos)
0	$\pm 250^\circ/\text{s}$	131 LSB/ $^\circ/\text{s}$
1	$\pm 500^\circ/\text{s}$	65.5 LSB/ $^\circ/\text{s}$
2	$\pm 1000^\circ/\text{s}$	32.8 LSB/ $^\circ/\text{s}$
3	$\pm 2000^\circ/\text{s}$	16.4 LSB/ $^\circ/\text{s}$

[51]

Tabla XII. Escala y sensibilidad de aceleración para los valores de AFS_SEL

AFS_SEL	Escala completa	Sensibilidad de los LSB (bits menos significativos)
0	±2g	16 384 LSB/g
1	±4g	8 192 LSB/g
2	±8g	4 096 LSB/g
3	±16g	2 048 LSB/g

[51]

17. **Circuito impreso.** Un circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés *Printed Circuit Board*) es el resultado final de un proceso de diseño e implementación de un circuito. Un PCB es una placa de cobre y sustrato no conductor que sirve de estructura para conectar componentes eléctricos y electrónicos. Es la base para conectar componentes pasivos (como resistencias, capacitores, inductores), activos (como amplificadores operacionales), y dispositivos embebidos, para lograr fines específicos. Las conexiones entre componentes se hacen mediante conexiones de cobre (rutas), que es por donde pasan las señales eléctricas. El PCB consiste de múltiples capas de cobre, con capas de dieléctrico entre ellas como aislante. [83]

a. **Selección de componentes.** Una de las partes más importantes del diseño de PCB es la selección de componentes, como resistencias, amplificadores operacionales, transistores, componentes digitales, etc. Para ello se debe investigar cómo funciona cada uno, y cómo contribuirá en la topología. La información del desempeño de los dispositivos se encuentra en las hojas de datos. Estas contienen puntos de operación, características de *switching*, consideraciones de diseño, empaquetados, etc. Algunas instituciones poseen sitios donde se encuentran hojas de datos: Analog Devices, Texas Instruments, ON Semiconductor. Para probar el comportamiento de los dispositivos, hay dos opciones. Una es comprar los componentes, una placa de pruebas (*proto-board*), y cable para interconectar los dispositivos. La otra forma es hacer simulaciones empleando modelos de una base de datos de componentes. Dos opciones de software para simulación son Multisim® de National Instruments, o Altium Designer®. [83]

b. Esquemático. Un esquemático contiene la representación con símbolos eléctricos y electrónicos de los componentes a utilizar, así como la interconexión entre ellos. El entorno de captura de esquemático en software es una interfaz con símbolos gráficos de componentes que se colocan y se conectan para formar una topología. En un esquemático, el diseño se representa con símbolos de los estándares ASCII y DIN, conectados por cables, que se denominan *nets*. Los componentes y las *nets* son elementos fundamentales de un esquemático. Con ellos se forman las conexiones que dan lugar a un diseño. [83]

c. Empaquetado de componentes electrónicos. El empaquetado electrónico es una rama multidisciplinaria que involucra ingeniería mecánica, eléctrica e industrial, química, física y marketing. Es la cubierta y las interconexiones de los circuitos integrados para formar sistemas electrónicos. Debe proveer: protección y soporte al circuito (estructura de cerámica, sustratos orgánicos, metal, entre otros), disipación de calor, distribución de señales, manufacturabilidad, distribución de potencia. Las conexiones del empaquetado al circuito pueden ser *thru-hole*, *leaded*, *leadless*, *array pads*, BGA, entre otros. Las dimensiones de un componente pueden estar dadas en milímetros (mm) o en mil (milésimas de pulgada, 1 pulgada equivale a 1000 mil). [64] [89]

1) Dual-in-line Plated-Through-Hole Packages (DIP). Los empaquetados han evolucionado a través del tiempo. En la década de los 60 y de los 70, fue popular el DIP. Entre sus ventajas está que es un diseño robusto y de bajo costo, fácil de soldar a mano, y es útil cuando se desea hacer pruebas con prototipos en *protoboard*. Como desventajas está su baja densidad de montaje, por su diámetro de pines y el espaciado entre ellos (100 mil, o 0.1 pulgadas), y las señales deben estar en todas las capas debido al montaje a través del PCB. [89]

Figura 65. Ejemplo de empaquetado DIP.



[82]

2) Surface-Mount Technology (SMT). La tecnología de montaje supreficial (SMT, *Surface Mount Technology*) es una nueva generación de componentes electrónicos que surgió en la década de los 70 y 80: SMD, *Surface Mounted Devices*. Son componentes más pequeños que los convencionales *through-hole*. La tecnología SMD penetra en las áreas de electrónica moderna. Los *footprint* (arreglo de *pads* y agujeros que componen la huella de un componente) generalmente son solo en una capa, en la misma donde va el componente. Ocupan menos área y son más baratos que los *through-hole* (componentes cuyos pines van en una capa, y su cuerpo va en la capa opuesta, requiriendo agujeros para que los pines pasen a través del PCB), lo que los hace más eficientes en espacio y costo. Los *pads* (Superficie de cobre que permite soldar el componente al PCB) y posiciones de los componentes SMD dependen de tolerancias dadas por el fabricante. [134]


Figura 66. Ejemplo de empaquetado SMD



[81]

El empaquetado SMD tiene variaciones en el *footprint*. Para ello es útil ubicar el código del componente y desglosar los prefijos y sufijos, para encontrar el empaquetado correcto en la hoja de datos. En la tabla de “Packaging information”, como la que se observa en la Figura 67, se ubica el código completo del integrado que se adquirió, y en la fila “Package Drawing” se encuentra la letra que identifica el empaquetado específico del integrado. Con eso ya se puede ir a la sección de “*Mechanical information*”, para encontrar las dimensiones específicas y tolerancias del chip, como se observa en la Figura 68. También sirve para encontrar las posiciones, dimensiones y tolerancias de los *pads* y agujeros del chip en su *footprint*, en la sección “Land Pattern Data”, como se observa en la Figura 69.

Figura 67. Tabla de información de empaquetados en una hoja de datos de Texas Instruments.

		PACKAGE OPTION ADDENDUM								
www.ti.com		17-Mar-2017								
PACKAGING INFORMATION										
Orderable Device	Status (1)	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan (2)	Lead/Ball Finish (6)	MSL Peak Temp (3)	Op Temp (°C)	Device Marking (4/5)
5962-8406201VEA	ACTIVE	CDIP	J	16	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	5962-8406201VE A SNV54HC138J
5962-8406201VFA	ACTIVE	CFP	W	16	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	5962-8406201VF A SNV54HC138W
84062012A	ACTIVE	LCCC	FK	20	1	TBD	POST-PLATE	N / A for Pkg Type	-55 to 125	84062012A SNJ54HC 138FK
8406201EA	ACTIVE	CDIP	J	16	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	8406201EA SNJ54HC138J
8406201FA	ACTIVE	CFP	W	16	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	8406201FA SNJ54HC138W
JM38510/65802B2A	ACTIVE	LCCC	FK	20	1	TBD	POST-PLATE	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/ 65802B2A
JM38510/65802BEA	ACTIVE	CDIP	J	16	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/ 65802BEA
M38510/65802B2A	ACTIVE	LCCC	FK	20	1	TBD	POST-PLATE	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/ 65802B2A
M38510/65802BEA	ACTIVE	CDIP	J	16	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/ 65802BEA
SN54HC138J	ACTIVE	CDIP	J	16	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SN54HC138J
SN74HC138D	ACTIVE	SOIC	D	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 85	HC138
SN74HC138DBR	ACTIVE	SSOP	DB	16	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 85	HC138
SN74HC138DE4	ACTIVE	SOIC	D	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 85	HC138
SN74HC138DG4	ACTIVE	SOIC	D	16	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 85	HC138
SN74HC138DR	ACTIVE	SOIC	D	16	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU CU SN	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 85	HC138
SN74HC138DRE4	ACTIVE	SOIC	D	16	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 85	HC138

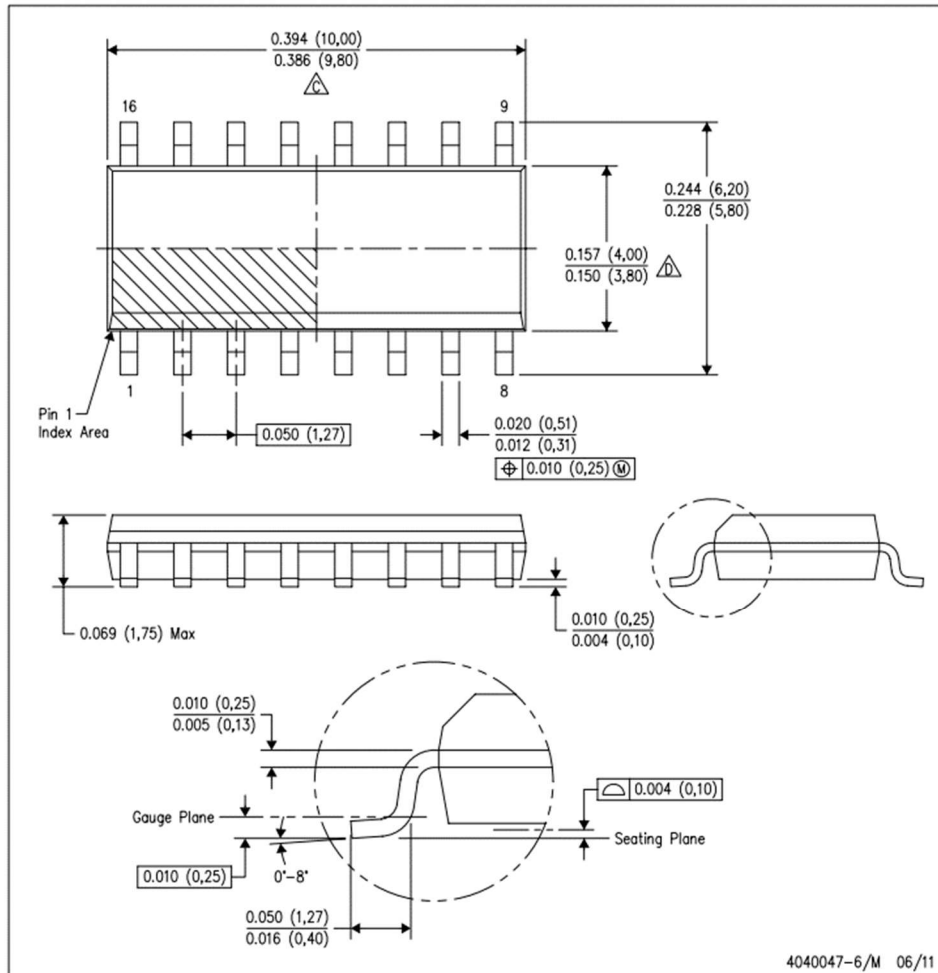
[129]

Figura 68. Datos mecánicos de un componente en una hoja de datos de Texas Instruments.

MECHANICAL DATA

D (R-PDSO-G16)

PLASTIC SMALL OUTLINE

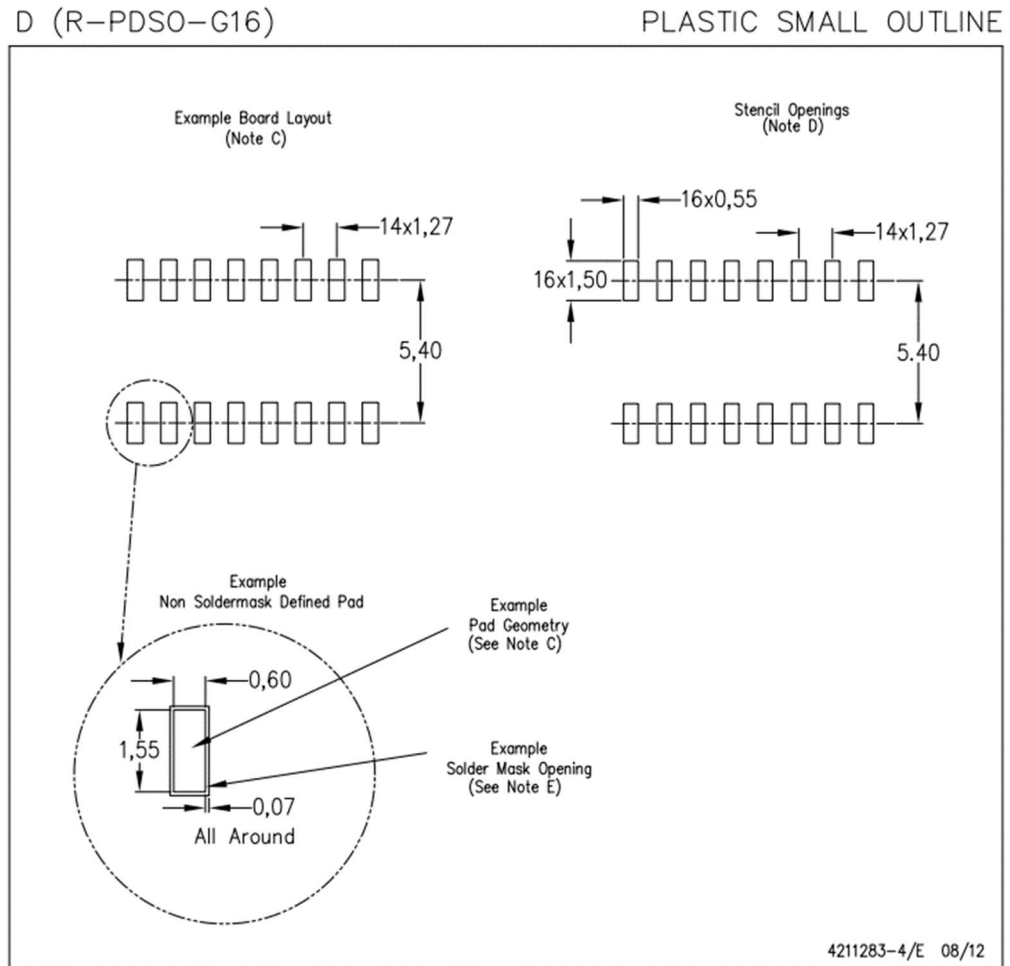


NOTES: A. All linear dimensions are in inches (millimeters).

[129]

Figura 69. Información del *footprint* de un componente de Texas Instruments.

LAND PATTERN DATA



- NOTES:
- All linear dimensions are in millimeters.
 - This drawing is subject to change without notice.
 - Publication IPC-7351 is recommended for alternate designs.
 - Laser cutting apertures with trapezoidal walls and also rounding corners will offer better paste release. Customers should contact their board assembly site for stencil design recommendations. Refer to IPC-7525 for other stencil recommendations.
 - Customers should contact their board fabrication site for solder mask tolerances between and around signal pads.

3) Chip Scale Packages (CSP). Es una evolución del SMD. Los componentes alrededor de un chip de este tipo deben ser miniaturizados. Permite altas velocidades de desempeño, y da lugar a las computadoras. Permite mayor densidad de componentes en el PCB. Es difícil de manipular con las manos, pero con la tecnología, los procesos de montaje se hacen con máquinas. No es posible cambiar un componente dañado de este tipo.

d. Fabricación de un circuito impreso. La fabricación de un PCB se puede dividir en pasos que se muestran a continuación. [137]

Tabla XIII. Pasos para fabricar un PCB

Paso	Descripción
1	Generación del esquemático
2	Ubicar y encaminar (rutear) el circuito
3	Generación del arte del PCB
4	Desarrollo de la <i>resist layer</i>
5	Grabar el PCB
6	Colocar estaño donde sea necesario
7	Abrir agujeros, cortar el PCB, colocar vías

[137]

Los pasos anteriores no necesariamente aplican para todo proceso de elaboración de PCB, y muestran una idea general de lo que se debe hacer. Para el presente megaproyecto, se consideran los siguientes pasos: Generación del esquemático; ubicar y rutear el circuito; cálculo de anchos de pista; fabricar el PCB.

Después de generar el esquemático y validar el funcionamiento del circuito con alguna de las dos formas mencionadas (pruebas con los componentes o con simulaciones), se debe exportar el diseño hacia una herramienta de diseño donde se aprecien los componentes con sus dimensiones reales colocados sobre un PCB real de una o varias capas. Durante la etapa de diseño del PCB, los circuitos integrados y componentes se colocan en la placa, conectándolos mediante pistas de cobre (rutas). Aunque en el software que se elija

para diseñar pueda tener una opción de auto ruteo, es preferible hacerlo de forma manual para cumplir con reglas de diseño de PCB. [84]

Estas reglas sirven para respetar estándares, evitar problemas bajo ciertas condiciones (como altas frecuencias), para que el PCB se pueda fabricar y obtener una placa donde los componentes sean relativamente fáciles de soldar. Para ello es importante tener en cuenta la orientación, posicionamiento y organización de los componentes. Los de superficie deben ir en la misma capa, y los componentes *through-hole* deben ir en la parte superior del PCB. Se recomienda colocar los voltajes y tierras de la placa simétricos y centrados, en pistas con anchos apropiados. Las señales se deben conectar de manera corta y directa, alternando entre horizontal y vertical en diferentes capas. En el curso de Simulación y Fabricación de Circuitos Impresos, se discutieron las siguientes reglas: las pistas de cobre no pueden tener ángulos de 90°, los *pads* cuadrados deben tener pistas que salgan a 90°. [68]

Se recomienda separar las referencias de control y de potencia, y unirlos en un solo punto. Las partes de electrónica analógica y de electrónica digital deben estar en áreas separadas del PCB. Las rutas necesitarán una capacidad diferente de corriente, por lo que deberán tener un ancho distinto dependiendo de su longitud, caída de voltaje máxima permitida, y corriente. Existen herramientas de cálculo de ancho de pista, como la ANSI PCB *Trace Width Calculator*. [68] [27]

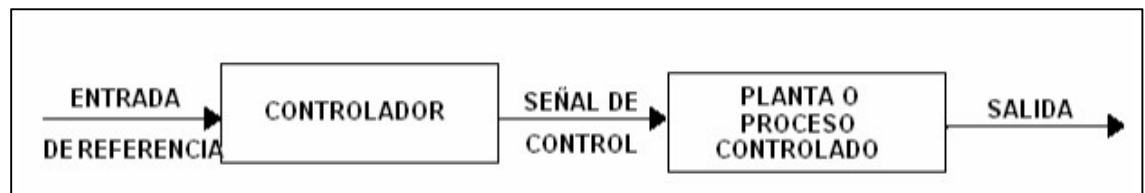
Por último, se debe realizar un chequeo de reglas de diseño (*Design Rules Check* en Altium®). Las reglas varían con los requerimientos del PCB a elaborar. Existen varias reglas que pueden ser definidas, como anchos de pista; la libranza (*clearance* entre pads, entre componentes, entre pistas, por ejemplo), tamaños de agujero y de *pad*, ángulo de ruteo, entre otros. El software a emplear, de preferencia, debe tener un asistente para el chequeo de reglas. Este es el último paso antes de fabricar el PCB. Si el diseño cumple con las reglas, entonces está listo para obtener los archivos de fabricación. Estos son exportados en formato Gerber, que es usado por los fabricantes para plasmar el PCB de forma física. La fresadora de circuitos de la Universidad del Valle usa este tipo de archivos y con ellos realiza las pistas del circuito, abre los agujeros y corta la orilla. Si el PCB se fabrica de forma artesanal, entonces se debe exportar el arte de las capas a un archivo imprimible, como un PDF. Este se pasa a un material con transferencia de calor (como toner de impresora) para luego transferirlo de la misma forma a una placa de cobre. Por último, se abren los agujeros y se recorta la forma del PCB. [68]

C. SILLA

1. **Sistema de control.** Un sistema de control se puede definir como un conjunto de elementos que operan para conseguir determinar el comportamiento de la o las variables de salida. Los sistemas de control más utilizados son los de lazo cerrado, ya que cuentan con retroalimentación lo que les da muchas ventajas sobre los sistemas de control de lazo abierto.

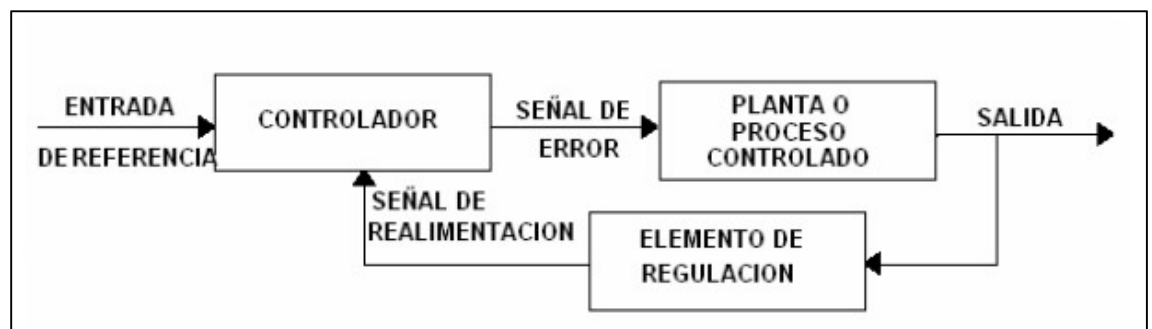
Los sistemas de control de lazo abierto se caracterizan porque la salida no se monitorea ni se mide, por lo tanto, tampoco se compara con el valor de entrada para corregir errores. Esto quiere decir que el valor de la salida depende únicamente del valor de la entrada, se considera como un sistema de control secuencial ya que a cada valor o a un valor determinado en la entrada corresponde un valor en la salida. Este tipo de controladores son muy sensible a las perturbaciones porque no están retroalimentados y no pueden corregir errores. A continuación, se presenta una imagen correspondiente a un sistema de control de lazo abierto.

Figura 70. Sistema de control en lazo abierto.



Los sistemas de control de lazo cerrado se caracterizan principalmente por la retroalimentación, ya sea positiva o negativa, esto permite comparar el valor de la salida con el valor de la entrada y tomar decisiones. A diferencia del sistema de control de lazo abierto, este es menos susceptible a perturbaciones debido a la retroalimentación. En la Figura 71 se muestra un sistema de control con lazo cerrado.

Figura 71. Sistema de control en lazo cerrado.



En un sistema de control de lazo cerrado se mide la salida y se compara con la entrada (referencia) para obtener una señal de error, la cual es introducida al controlador para corregir el valor de la salida. Como se mencionó anteriormente, la principal ventaja es la retroalimentación normalmente negativa; los principales efectos de dicha retroalimentación se ven reflejados en la estabilidad del sistema, la sensibilidad y en el rechazo a perturbaciones externas.

Se considera un sistema estable, cuando se producen cambios en la salida y el controlador es capaz de tomar decisiones basadas en la señal de error y con eso corregir el valor de la salida. Si al contrario el controlador no es capaz de corregir la salida y esta diverge o se aleja demasiado del valor de la entrada se dice que el sistema es inestable. De acá se obtiene una de las posibles desventajas de los sistemas de control de lazo cerrado, si el controlador no está bien sintonizado puede provocar que el sistema sea inestable.

Con respecto a la sensibilidad de un sistema, esto se refiere a que tanto afectan los parámetros de los componentes en los valores de la salida. Normalmente cuando se habla de sensibilidad del sistema se refiere a que el controlador sea capaz de corregir los errores que se producen por cambios en temperatura o cualquier otra variable del entorno que puede afectar a los componentes del sistema de control.

Una de las mejores contribuciones de la retroalimentación es hacer que el sistema sea menos susceptible a perturbaciones externas o ruido. Cuando las perturbaciones se producen del lado de la planta, estas se ven reflejadas en el valor de la salida la cual es retroalimentada y se compara con la referencia para obtener un valor de error. Dicho valor es introducido al controlador que se encarga de corregir el valor de la salida, corrigiendo a su vez los efectos producidos por las perturbaciones.

Un sistema de control se considera robusto cuando el controlador es capaz de reducir la sensibilidad y rechazar perturbaciones.

Un término muy importante para los sistemas de control es el error en estado estacionario, este determina que tan parecida es la salida con la entrada. Se puede definir como la diferencia entre la entrada y la salida cuando el sistema se encuentra en estado estacionario. Es decir, cuando la derivada con respecto al tiempo de la señal de salida sea igual a cero. Para un sistema de lazo cerrado el error en estado estacionario se puede determinar fácilmente por las siguientes sustituciones.

De la Figura 72 se pueden obtener las siguientes ecuaciones:

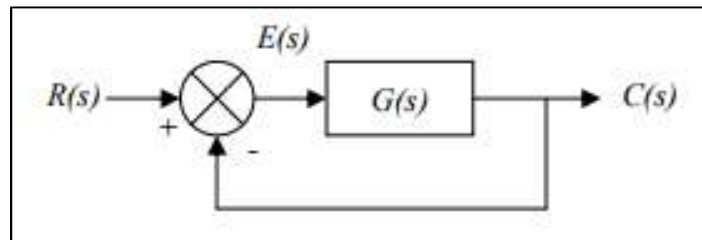
$$E(s) = R(s) - C(s) \quad (1)$$

$$C(s) = G(s)E(s) \quad (2)$$

Al sustituir la ecuación 2 en la 1 y despejar para el error $E(s)$, se obtiene la siguiente ecuación:

$$E(s) = \left(\frac{1}{1+G(s)} \right) R(s) \quad (3)$$

Figura 72. Diagrama de bloques para determinar el error en estado estacionario.

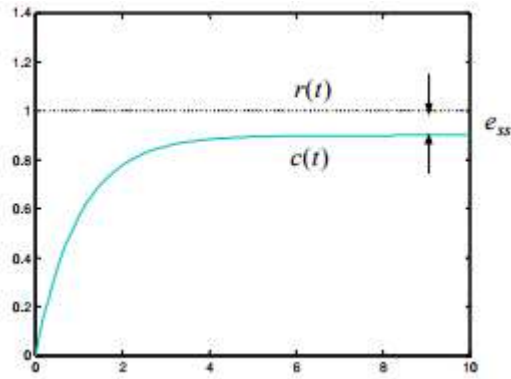


Como se puede observar en la ecuación 3, la señal de error se ve afectada por el valor de $G(s)$. Entre mayor sea $G(s)$, el cual a su vez depende de la frecuencia, menor será el error en estado estacionario $E(s)$. Para determinar el valor del error en estado estacionario es necesario aplicar el teorema del valor final, como se muestra a continuación.

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (4)$$

Un claro ejemplo, de lo que significa o representa el error en estado estacionario, se puede ver claramente en la siguiente Figura 73, la cual es la respuesta de la salida cuando en la entrada se coloca un escalón unitario.

Figura 73. Error en estado estacionario.



El controlador PID utiliza los tres tipos de controladores, proporcional, integra y derivativo. Tomando las ventajas de cada uno de ellos, se hace que el sistema de control sea robusto y sea capaz de tomar decisiones con el fin de corregir errores en la respuesta del sistema.

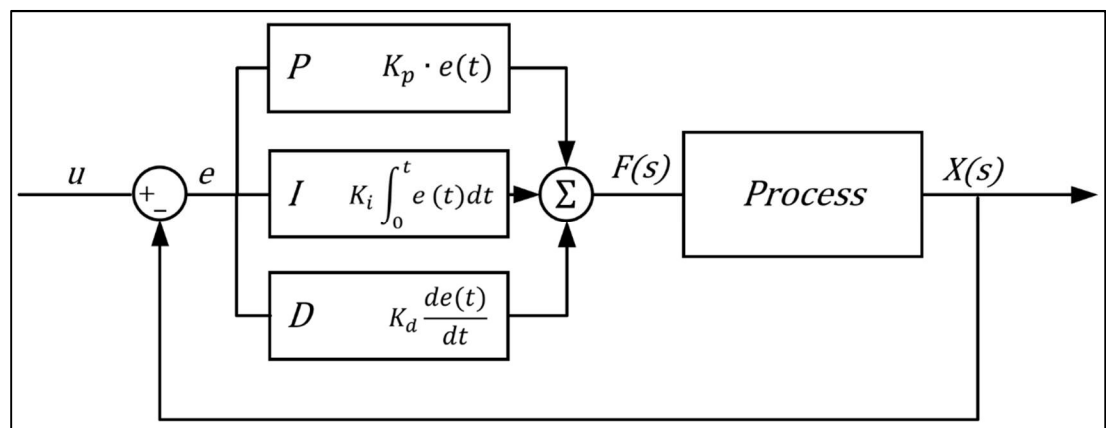
En la Figura 74 se puede observar el diagrama de bloques de un controlador PID, en el dominio del tiempo la salida se puede definir como:

$$k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \dot{e}(t) \quad (5)$$

Y su función de transferencia está dada por:

$$\frac{k_D S^2 + k_P S + k_I}{S} \quad (6)$$

Figura 74. Diagrama de bloques de un controlador PID.



Cada una de las partes del controlador PID contribuyen a eliminar partes del error que surgen en la respuesta del sistema. La parte proporcional se encarga del error presente, esto por medio de buscar la referencia y hacer que el error en estado estacionario se vuelva cero lo más pronto posible. La parte integral se encarga del error pasado, se enfoca en corregir el error en estado estacionario y rastrear referencias. La parte derivativa se encarga del error futuro, trata de predecir el error utilizando valores anteriores para corregirlos antes que suceda. Con esto contribuye en la estabilidad del sistema.

Existen diversos métodos, la mayoría de forma empírica, para calibrar o sincronizar las constantes de los controladores que conforman el PID. Entre los que se pueden mencionar el método de oscilación, método de la pendiente, el método de Ziegler-Nichols (calcular las constantes de forma teórica) y el método de respuesta al escalón.

Para este último existe una tabla que nos indica en que afecta a la respuesta si aumentamos cada una de las constantes en diferentes cantidades. Dicha tabla se muestra a continuación.

Tabla XIV. Parámetros para ajuste de constantes PID.

Parámetro ↑	Tiempo de subida	Overshoot y oscilaciones	Tiempo de asentamiento	Erro en estado estable	Estabilidad
K_P	Decrece	Crece	Cambio menor	Decrece	Degrada
K_I	Decrece	Crece	Crece	Elimina	Degrada
K_D	Cambio menor	Decrece	Decrece	No tiene efecto	Mejora si es pequeño

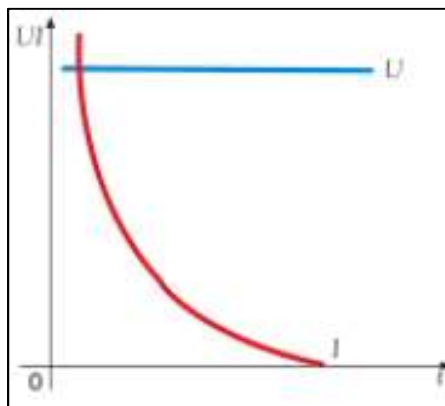
2. Cargador de batería. En proyectos autónomos o que trabajan de forma inalámbrica, uno de los principales retos es la alimentación, normalmente las baterías. Estas deben ser bien dimensionadas según la potencia requerida por los circuitos y actuadores electromecánicos, ya que esto definirá el tiempo de uso continuo del proyecto. Pero sobre todo se debe tener en cuenta el peso que las baterías le agregan a las estructuras de los proyectos. Debido a estos parámetros, las baterías son parte fundamental de cualquier proyecto que se trabaje de forma inalámbrica o sea totalmente autónomo.

Algo muy importante es la forma o el método utilizado para recargar las baterías, debido a que de esto dependerá el tiempo de vida útil de la misma. Dichos métodos también definirán el tiempo total que tarde en recargar la batería al 100%, pero sobre todo determinarán los daños que se le puedan causar a la batería. Además, se debe tener en cuenta el tipo de batería que se utilizara, ya que dependiendo de la composición química de la batería existen diferentes métodos para evitar daños en el proceso de carga. En este caso se trabajará con baterías de ácido-plomo, todo lo descrito a continuación se basa en dicho tipo de baterías.

De forma general existen dos métodos para cargar una batería, por medio de voltaje constante y por medio de corriente constante. Con forme mejora la tecnología se ha ido combinando ambos métodos para poder obtener mejores resultados; como reducir el tiempo de carga y evitar daños debido a procesos como sulfatación (se produce cuando no se ha cargado por un periodo largo de tiempo) o gasificación (se produce cuando el voltaje de carga es muy grande en comparación al valor nominal de la batería, esto provoca altas temperaturas que se ve reflejado en la descomposición del ácido en gas), entre otros.

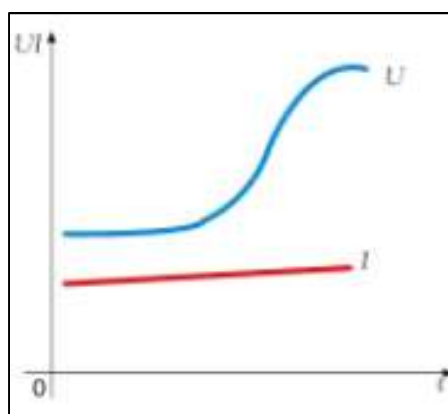
Al combinar los métodos mencionados con anterioridad, se puede obtener cuatro formas diferentes de cargar una batería. Cada una de ellas presenta ventajas y desventajas. La primera es de voltaje constante e ir disminuyendo la corriente hasta el punto de que sea prácticamente cero (ver Figura 75), con eso se sabrá que la batería está completamente cargada. Este método tiene sus riesgos, ya que si se carga aun voltaje mucho mayor al voltaje nominal de la batería se puede producir gasificación hasta tal punto de poder provocar la explosión de la batería.

Figura 75. Curva de carga a tensión constante.



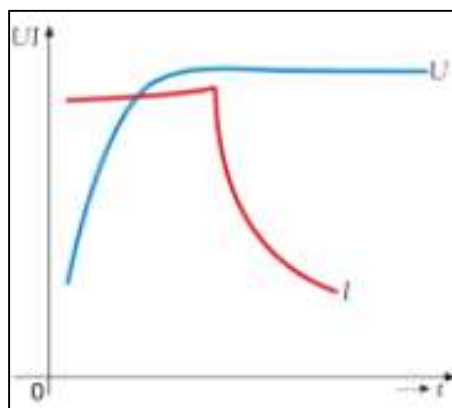
El segundo método es a corriente constante e ir aumentando el voltaje hasta alcanzar el voltaje nominal de la batería (ver Figura 76). El riesgo con este método es que se debe tener alguna forma para determinar cuando se ha completado el ciclo y poder desconectar la batería, de lo contrario se tendrán las mismas dificultades que con el método anterior.

Figura 76. Curva de carga a corriente constante.



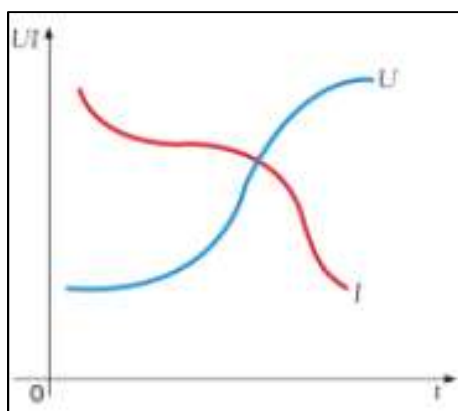
Tercer método es uno de los más eficientes, no solo porque combina los dos anteriores sino también porque puede llegar a reducir el tiempo de carga de la batería. Este método es de corriente y voltaje constante (ver Figura 77), en este método se aplica primero corriente constante hasta lograr que el voltaje llegue al valor máximo para gasificación, después de esto se deja el voltaje constante y se disminuye la corriente. Eso permite que los daños sean mínimos y que el ciclo de carga se produzca en un tiempo menor.

Figura 77. Curva de carga a corriente y voltaje constante.



El último método es disminuir la corriente mientras se aumenta el voltaje (ver Figura 78). Este método se utiliza para evitar daños por gasificación, se comienza con corriente máxima y voltaje mínimo. Conforme el voltaje aumenta la corriente disminuye, cuando el voltaje llega al valor máximo para gasificación, la corriente disminuye aproximadamente al 50% para evitar que la temperatura siga aumentando.

Figura 78. Curva de carga a voltaje creciente.



Los métodos anteriores tienen limitaciones que se pueden corregir cuando se utilizan combinados, de aquí sale la idea de un algoritmo para carga de baterías. Dicho algoritmo puede ser de dos, tres o cuatro etapas según la cantidad de métodos combinados en un mismo proceso. En este caso se utilizará un proceso de tres etapas, en donde se combinarán los métodos de solo corriente constante, solo voltaje constante y ambos constantes al mismo tiempo.

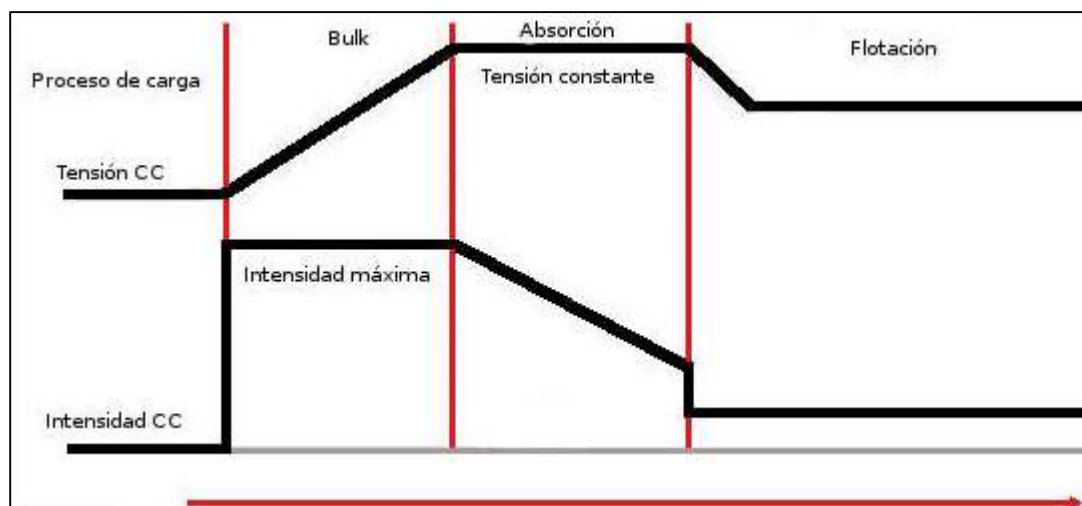
Al combinar estos métodos el proceso se divide en tres partes (ver Figura 79), Bulk (corriente constante), Absorción (voltaje constante) y Flotación (voltaje y corriente constante).

En la parte de Bulk se trabaja con la corriente máxima que puede soportar la batería al cargarse, este valor depende de la batería, pero se aconseja cargar con una corriente máxima que este entre un 10% a 20% de los ampere-hora de la batería. Se inyecta dicho valor de corriente de forma constante mientras se va aumentando el voltaje hasta llegar aproximadamente al 80% de la carga total de la batería, este valor está definido para evitar llegar al voltaje de gasificación. Al llegar a dicho voltaje se pasas a la siguiente etapa.

La etapa de absorción es la que se encarga de llevar a la batería al 100% de carga, en esta etapa la corriente va disminuyendo y el voltaje se queda constante hasta lograr cargar el 20% restante de la etapa anterior. Con esto se evitará que la batería llegue al proceso de gaseo ya que el voltaje se mantendrá constante y la corriente disminuirá haciendo que la temperatura disminuya también.

Por último, está la etapa de flotación una de las más importantes, debido a que evita que la batería se descargue y se mantenga con su valor de voltaje nominal mientras no se encuentre en uso. Lo que se hace en esta etapa es mantener constante la corriente demandada por la batería, la cual será mínima, y mantener un voltaje de flotación el cual es un poco superior al voltaje nominal de la batería, dicho voltaje varía según las especificaciones de cada fabricante.

Figura 79. Ciclo de carga de una batería.

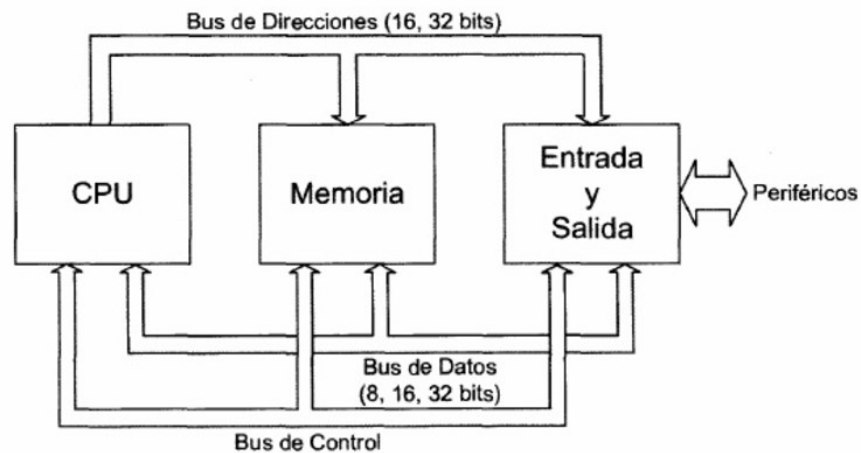


D. ROBOT EXPLORADOR

1. **Microprocesadores y microcontroladores.** Un microprocesador es un circuito lógico, encargado de procesar y realizar operaciones aritméticas y lógicas para el funcionamiento de un computador. El microprocesador es el cerebro de los sistemas cómputos.

Un microcontrolador se conforma de tres componentes principales, interconectados entre sí mediante buses de conexiones. Estos bloques son: el procesador o CPU (Central Processing Unit, por sus siglas en inglés), la memoria y la unidad de entradas y salidas, con la cual se comunica con dispositivos periféricos. [1]

Figura 80: Esquema básico general de un microcontrolador.



[1]

Los microcontroladores nos ayudan a implementar algoritmos matemáticos y surgen de la necesidad de cumplir con tareas específicas que requieren de menos recursos comparados con lo que puede entregar un microprocesador de propósito general. Su diseño se centra en ejecutar tareas puntuales; con esto, se minimiza el costo y el consumo de potencia. Con estos, podemos obtener información de fenómenos físicos de interés, por medio de sensores, para luego poder realizar un análisis sobre los datos obtenidos.

e. Consumo de corriente. La utilización de microcontroladores es importante debido a los bajos consumos de corriente que presentan, comparados con otros dispositivos de propósito general. El consumo de potencia depende de tres aspectos fundamentales: tecnología de fabricación, frecuencia del oscilador y voltaje de alimentación. Para su fabricación se utiliza primordialmente la tecnología CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor), la cual consiste en la implementación de transistores pMOS y nMOS, configurados de forma en que, cuando están en su estado de reposo, el único consumo de corriente es debido a las corrientes de fuga o parásitas del transistor. [1] [2]

f. Protocolos de comunicación en controladores. Es necesario que para el intercambio de información o datos, los dispositivos involucrados utilicen un mismo protocolo de comunicación para entenderse. Un protocolo es simplemente un lenguaje o un sistema de reglas para lograr que dos o más dispositivos se comuniquen entre ellos. En el caso de este módulo, el intercambio de información se realizará utilizando comunicación serial; específicamente, en los protocolos UART e I2C.

La comunicación serial es un protocolo comúnmente utilizado para la comunicación entre dispositivos cómputos. La idea central de la comunicación serial es el intercambio de bytes de información un bit a la vez, en contra parte a la comunicación con puertos paralelos, la cual envía un byte entero. Habitualmente, la comunicación serial depende de tres conexiones físicas o líneas de transmisión. La primera es la referencia o tierra (interconectadas de ambos dispositivos), transmisión (usualmente llamado TX) y recibir (RX). Se tienen dos modos de comunicación: asíncrona y síncrona. Para la comunicación síncrona, se dispone de una línea de transmisión para una señal de reloj, y otra para el intercambio de información. La transmisión de datos ocurre a un bit por cada pulso de reloj. Se designa un dispositivo maestro, quien orquesta la transmisión manejando la señal de reloj, y un esclavo. En la comunicación asíncrona, se establece entre los dispositivos una misma tasa de transmisión dada en bits por segundo. Uno de ellos hace el envío mientras el otro recibe y de manera inversa. [3] [4]

Figura 81: Comunicación serial asíncrona

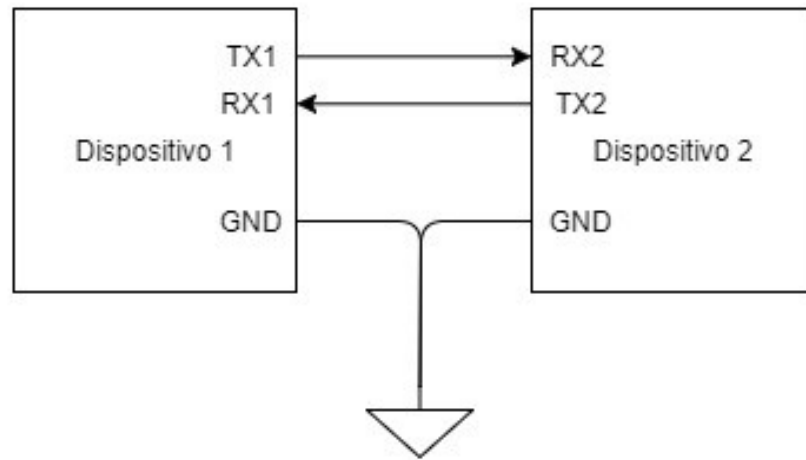
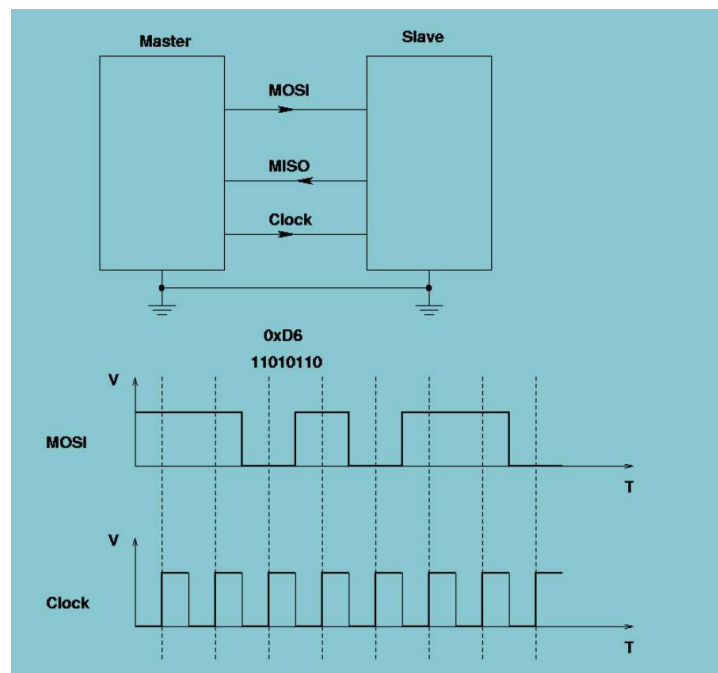


Figura 82: Comunicación serial síncrona



[4]

En la parte inferior de la Figura No. 82, podemos observar el envío de datos por medio del controlador maestro. El flanco positivo de la señal *clock* nos indica cuando leer el bit transmitido al esclavo.

En este proyecto, se debe de entablar comunicación entre los controladores a usar, y entre un controlador y los sensores. Se utilizó tanto comunicación serial asíncrona por medio de UART (Universal Asynchronous

Receiver/Transmitter), como comunicación serial síncrona, por medio del protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit).

UART: Recepción/Transmisión Asíncrona Universal, es uno de los protocolos seriales de común uso. La mayoría de controladores contiene un módulo con hardware UART. Tal es el caso del controlador ATmega1280, utilizado en el Arduino Mega. La ventaja que presenta el tener integrado el módulo UART, es que permite al microcontrolador ejecutar otras tareas aun cuando recibe datos en el puerto serial. Esto es gracias a que la información la almacena en un buffer interno. Este permite diferentes velocidades de transmisión de datos e incluso permite el uso de varias comunicaciones seriales mediante el uso de ciertos pines digitales I/O designados a esta comunicación. Existe una librería desarrollada para Arduino llamada *SoftwareSerial*, esta nos permite crear objetos para la comunicación serial y aplicar métodos para el uso es esta. [4]

I2C: Inter-Integrated Circuit, es otro protocolo de comunicación serial. Este también utiliza solo dos líneas para la transmisión de datos, de manera síncrona. Está pensado para el manejo de múltiples esclavos. Consiste de dos señales: SCL para la señal de reloj y SDA para la información. La señal de reloj es la que orquesta la transmisión de datos y esta siempre proviene del controlador maestro. [5]

El protocolo consiste en quebrar el mensaje en dos tipos: direccionamiento e información. A través del direccionamiento el maestro selecciona el esclavo con el cual entablará la comunicación. La sección de información contiene mensajes de 8 bits. Cuando el SCL tiene el primer flanco 0, se comienza el envío de datos en el SDA y se muestrea cada vez que la señal de SCL tiene un flanco positivo. Para el inicio de la comunicación se realiza el direccionamiento. Para esto, el maestro deja el SCL en alto y pone un 0 lógico al SDA, con lo que hace que los esclavos ahora estén pendientes de poder entablar una comunicación. Se incluye un bit para saber si el proceso es de lectura o escritura y otro llamado ACK, correspondiente al bit número 9 menos significativo. Luego de existir una comunicación, si el esclavo no pone un 0 lógico en la línea del SDA, esto indicará al maestro que la comunicación no fue exitosa. [5]

Esta es una vista un poco general de los protocolos de comunicación. Debido a la cantidad de sensores y de comunicaciones entre dispositivos que se tendrán en el robot explorador, se aplicarán estos protocolos para el intercambio de información.

2. **Sensores.** Podemos definir el término sensor cómo: “un dispositivo de entrada que provee una salida manipulable de la variable física medida” [6]. Este es únicamente un dispositivo de entrada, que actúa como mediador entre la variable de interés y el sistema con el que deseamos operarla. El funcionamiento de estos parte del uso de los transductores, los cuales son dispositivos que reciben energía en una forma determinada (sea eléctrica, mecánica, magnética, etcétera), y entregan energía con otra naturaleza. Podemos clasificar los sensores por el tipo de transductor que utiliza; sin embargo, es más práctico catalogarlos según la variable que miden.

Tabla XV: Clasificación de sensores por el tipo de variable que miden

Clasificación según variable física a medir	De posición, velocidad, aceleración y orientación
	De nivel y proximidad
	De humedad y temperatura
	De fuerza y deformación
	De flujo y presión
	De color, luz y visión
	De corriente

[6]

a. Sensores ultrasónicos. Así como lo indica su nombre, los sensores ultrasónicos utilizan ondas ultrasónicas para poder realizar mediciones de distancia. A través de un emisor, el sensor envía una onda y luego espera el eco que refleja un objeto. De esta forma, podemos conocer el tiempo transcurrido entre el envío y el retorno de la onda y, usando la velocidad del sonido, podemos calcular la distancia que recorrió la misma. Podemos calcular la distancia del sensor al objeto como se muestra a continuación.

$$Distancia = \frac{1}{2} * t * C$$

En donde:

- t es el tiempo leído por el sensor.
- C es la velocidad del sonido (343.2 m/s a 20°C)

Los sensores ultrasónicos presentan muchas ventajas importantes; siendo la principal su facilidad de implementación. Otras fortalezas son:

- Capacidad para detectar objetos transparentes, tales como el vidrio y líquidos.
- Su capacidad de detección no se ve afectada por la niebla, la suciedad o la acumulación de polvo, por lo que tiene resistencia a estos factores.
- Los objetos con formas complejas también son detectables. [7]

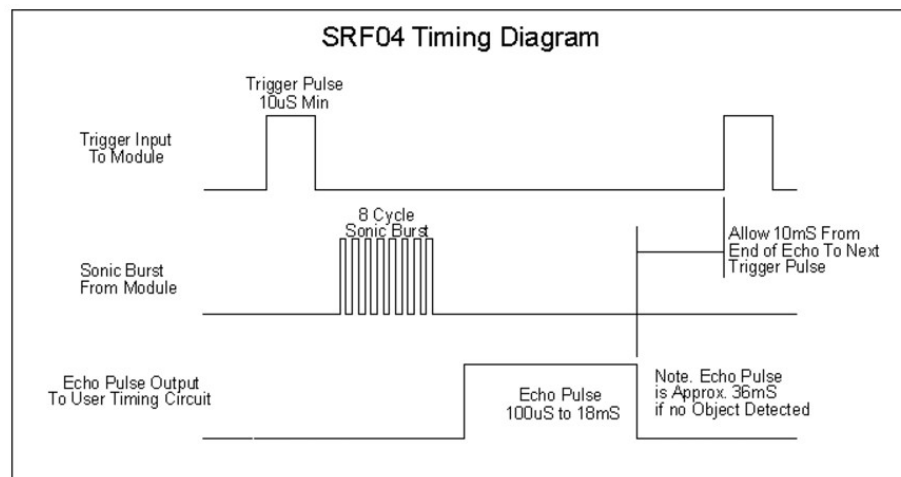
Limitantes: Aunque la implementación de los sensores ultrasónicos sea sencilla, estos tienen limitaciones en su aplicación, la mayoría de estas debido a la forma cónica que toma la onda emitida al momento de propagarse. El eco que se recibe como respuesta es generado por cualquier objeto que este en

ese espacio cónico. No podemos conocer las dimensiones del objeto frente al sensor, solo obtenemos la distancia hacia el primer objeto ubicado en el rango audible de este. [8]

La segunda limitación importante que tiene este tipo de sensores se presenta cuando hay un objeto que refleja la onda ultrasónica con un ángulo de desviación, lo que hace que esta no necesariamente refleje a la posición en la que se encuentra el sensor. Esto también causa problemas puesto que se pueden recibir ondas generadas por otro sensor.

Por último, se debe mencionar también que el sensor tiene un rango mínimo de distancia en la que puede realizar la medición. Cuando el transductor emite la onda de salida, existe un periodo de tiempo en donde el sensor espera a que no haya vibraciones y así poder empezar a escuchar el eco:

Figura 83: Diagrama de tiempos de un sensor SR04



[9]

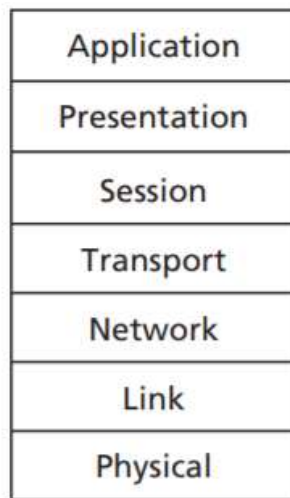
De esta manera, se genera el pulso de envío, se espera un tiempo (para el SR04, 8 pulsos a 40 khz) y luego el receptor comienza a esperar la respuesta. Cuando percibe el eco de retorno, se tiene un flanco negativo en la entrada, lo que nos da el tiempo total entre la salida y el regreso de la onda. [9]

b. Unidad de medición inercial. Una unidad de medición inercial (Inertial Measurement Unit, IMU), es un sistema autónomo que tiene como propósito medir movimientos, tanto lineales como angulares. Hace uso de giroscopios y acelerómetros para la obtención de datos. En otras palabras, una IMU nos permite conocer movimientos y rotaciones sobre diferentes ejes para conocer la orientación del sistema. [10]

c. Sensores de temperatura. Estos sensores hacen uso de las características de algunos materiales conductores y semiconductores. Se utilizan materiales cuya resistencia eléctrica varía dependiendo de la temperatura ambiente en la que se encuentran, con lo que podemos conocer el valor de esta. También reciben el nombre de termistores. [11]

3. Aplicaciones web y comunicación por internet. El internet es una herramienta muy potente para el intercambio de información entre usuarios y sistemas. Se puede definir como una infraestructura que provee servicios a aplicaciones, las cuales incluyen desde envío de correos electrónicos, hasta video llamadas, intercambio de archivos y televisión por internet (12). Las aplicaciones se ejecutan en los sistemas finales o de orilla (*end systems*), utilizando API's (Application Programming Interface), que definen como estas le piden al internet que entregue mensajes a un programa de destino ejecutándose en otro sistema final. El internet resulta ser un sistema con mucha complejidad y para su organización se utiliza un modelo de capas y protocolos; de esta manera, podemos analizarlo por partes más específicas. El modelo ISO OSI considera siete capas:

Figura 84: Capas del internet según el modelo ISO OSI



[12]

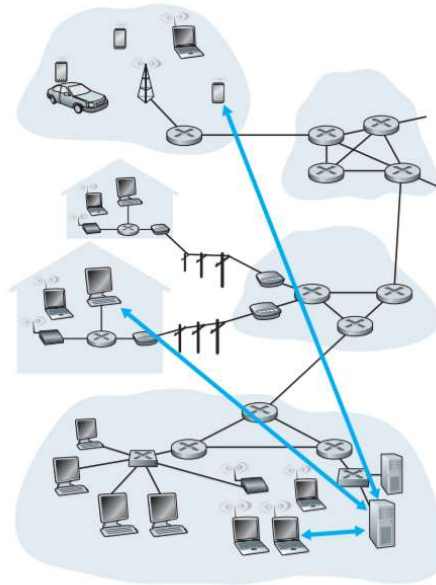
Aunque existe un modelo de cinco capas aceptado que une las capas de aplicación, presentación y sesión en una sola llamada aplicación. Para propósitos de este escrito nos enfocaremos únicamente en la capa de aplicación y los métodos de acceso a la red.

a. Capa de Aplicación. En esta capa se encuentran las aplicaciones web y sus diferentes protocolos (HTTP, SMTP, DNS, entre muchos otros). La información en esta capa se encuentra en mensajes. En el desarrollo de aplicaciones web, se desea comunicar dos programas: uno ubicado en el host, siendo estos dispositivos como teléfonos, computadoras, laptops, etc. Y un programa servidor, ubicado en el servidor web. El servidor es el encargado de proveer la información requerida por parte del host. Existen dos arquitecturas diferentes para el desarrollo de aplicaciones web y es trabajo del programador elegir cual utilizar, según la funcionalidad que se desea tener. Estas son:

1) Aplicaciones Cliente-Servidor. En esta arquitectura se tiene un host que siempre permanece encendido y que es el encargado de servir a las peticiones realizadas por otros hosts, llamados

clientes. En esta arquitectura, los clientes no se comunican directamente entre ellos mismos; además, los servidores tienen una dirección IP (Internet Protocol) fija. De esta manera un cliente siempre puede comunicarse con dicho servidor mediante el envío de paquetes a la dirección de este.

Figura 85: Arquitectura cliente-servidor

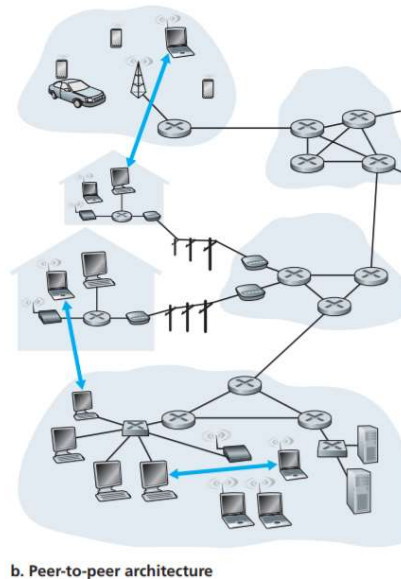


a. Client-server architecture

[12]

2) P2P (Peer to peer). En esta arquitectura, existe una mínima o ninguna necesidad de tener servidores dedicados. Se realiza la comunicación directamente entre dos hosts conectados, a los cuales se les denomina *peers*, los cuales son dispositivos utilizados por los usuarios. Llamadas de video o de voz (Voice Over) son ejemplos de utilización de esta arquitectura.

Figura 86: Arquitectura Peer-to-Peer



[12]

4. Motores de corriente directa y control. Los motores aprovechan las fuerzas producidas por campos magnéticos para producir movimiento de rotación. En un motor de corriente directa (DC) se tienen dos partes principales: el rotor y el estator. El estator consiste en un imán fijo que provee un campo magnético constante. El rotor, que es la parte móvil, es en este caso un embobinado. Al suplir un voltaje a esta bobina por medio de un anillo conmutador, y tener una corriente fluyendo por ella, se genera una fuerza electromagnética acorde la ley de Lorenz, que provoca el movimiento del rotor. [13] [14]

Figura 87: Motor DC Simple

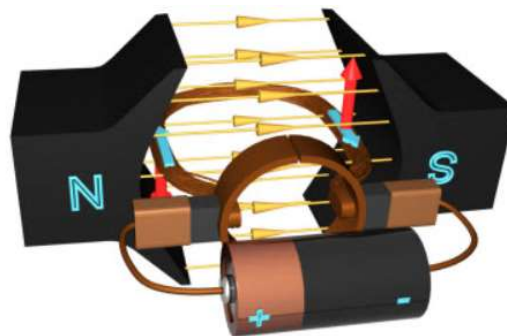


Fig.2 The electromagnetic force induced on the coils make the armature coil rotate

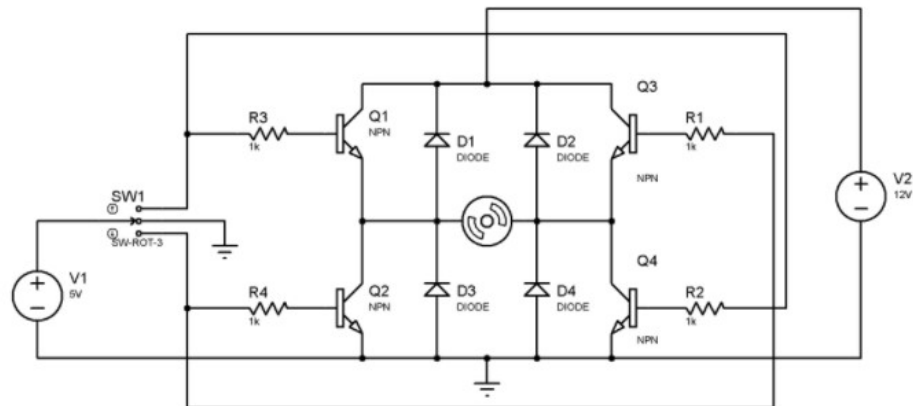
[14]

Para lograr el control de los motores tomamos en cuenta 3 factores principales: el consumo de potencia, la velocidad y el sentido del giro. El consumo de potencia eléctrica del motor varía dependiendo del voltaje aplicado y la carga. Se puede calcular la potencia eléctrica en corriente continua utilizando la siguiente expresión:

Conociendo de manera básica el funcionamiento del motor, sabemos que podemos invertir el sentido de giro de este cambiando el sentido en el que fluye la corriente a través de él. Una configuración común para lograr esto es el denominado “Puente en H”.

a. Puente H. Consiste en un arreglo electrónico compuesto de cuatro transistores. Este nos permite cambiar el sentido del flujo de corriente que pasará por el motor para cambiar su giro:

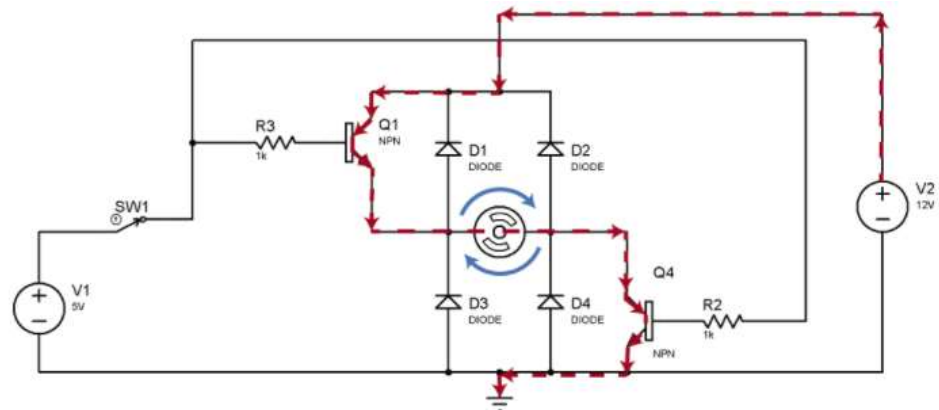
Figura 88: Puente en H



[16]

El funcionamiento de este se basa en los estados de corte y saturación de los transistores, que actúan como switches electrónicos. En el circuito de la Figura No. 88 tenemos tres posibles escenarios. Primero, cuando el switch de entrada SW1 está en la posición media. Cuando esto sucede, no existe ningún voltaje en las bases de los transistores, por lo que todos están en estado de corte y no hay flujo de corriente en el motor; es decir, está apagado. El siguiente estado es cuando posicionamos el SW1 en el extremo superior:

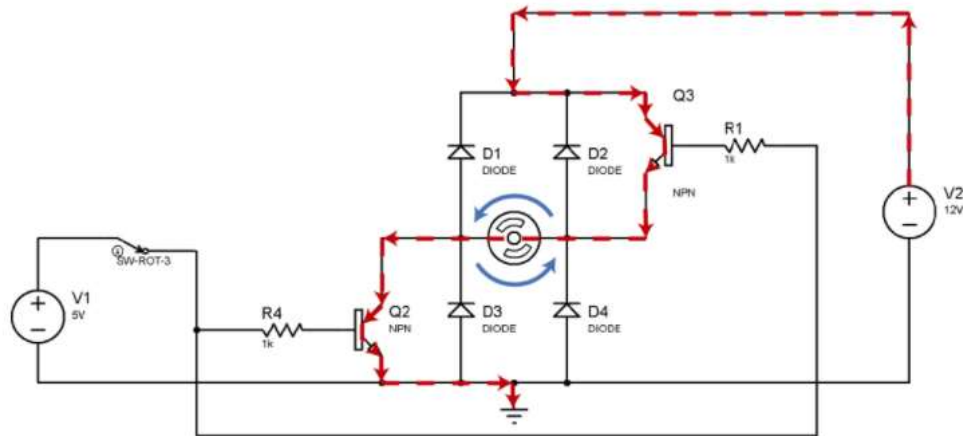
Figura 89: Primer sentido de giro



[16]

De esta forma obtenemos un voltaje en las bases de los transistores Q1 y Q4, por lo que entran en estado de saturación y conducen, permitiendo el flujo de corriente proveniente de la fuente V2. Luego, en el tercer estado cambiamos el SW1 a la posición extrema inferior.

Figura 90: Segundo sentido de giro



[16]

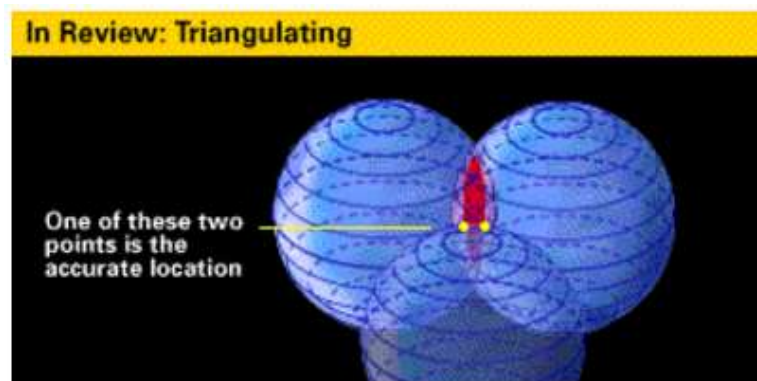
En este caso, los transistores Q2 y Q3 tienen el voltaje en su base, que hace que entren en saturación y conduzcan permitiendo el flujo de corriente; pero esta vez en otro sentido. Esto cambia el giro del motor. La ventaja es que para hacer que los transistores entren en estado de saturación es necesario corrientes bajas, por lo que se puede implementar un controlador en vez de utilizar el SW1. Con esto, podemos controlar el giro del motor desde un microcontrolador.

5. Navegación. Se desea implementar un sistema de navegación con el fin de poder ubicar el robot explorador y de esta manera saber si realizó los movimientos deseados. Se dispondrá de un sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés).

a. Sistema de Posicionamiento Global. Es un sistema conformado por tres componentes: satélites, estaciones en tierra y receptores. Permite determinar posiciones en cualquier lugar del globo terráqueo sin importar las condiciones climatológicas. Consiste en un conjunto de satélites que circundan la tierra y envían señales de radio a su superficie, por lo que es necesario únicamente tener un receptor GPS, siendo este un sistema electrónico capaz de recibir dichas señales. [17]

Para su funcionamiento se utiliza una triangulación de señales. Conociendo las posiciones de los satélites y el tiempo de vuelo de la señal de radio enviada al receptor, podemos conocer la distancia a la que este está situado. Se calcula la distancia hacia tres satélites y se trazan circunferencias usando a cada uno de centro. El punto en donde estas tres se intersecan es en donde se encuentra el receptor.

Figura 91: Triangulación GPS



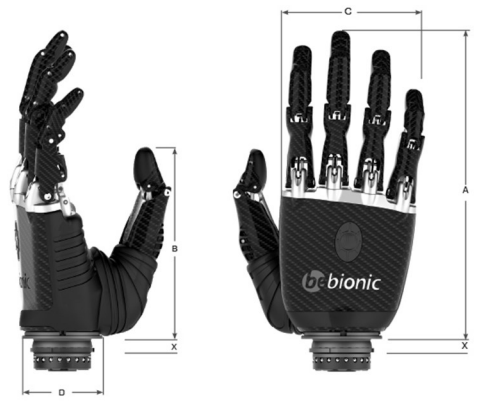
[17]

V. ANTECEDENTES

La ingenierías electrónica y mecatrónica constan entre sí de un amplio espectro de ramas de investigación y aplicación en el mundo actual. Con la capacidad de trabajar tanto en el diseño y fabricación de mecanismos de movimiento, así como la fabricación de placas impresas para sistemas de control modernos ambas ingenierías cuentan con un amplio campo en el cual aplicar los conocimientos adquiridos. El propósito de este megaproyecto fue el de tomar algunas de las implementaciones ya realizadas por estudiantes de estas carreras en años pasados y renovarlos, arreglando problemas que podrían haber tenido debido a su falta de uso y demás. Estos proyectos buscan cada uno, a su manera, ayudar con la resolución de un problema a través de la aplicación de la tecnología.

El primero de estos proyectos fue una prótesis biónica diseñada para simular el funcionamiento de una mano humana. Este proyecto busca ayudar a personas discapacitadas que han perdido una mano proveyéndoles una alternativa moderna que no solo funciona como una pieza estética, sino que es capaz de realizar las funciones esperadas de la misma. Este deseo de ayudar a las personas con discapacidades a recuperar funciones perdidas no es nada nuevo, y existen diversos proyectos a lo largo el mundo que están avanzando en este campo de tecnología médica. Uno de estos es la compañía Bebionic en Alemania que vende una mano robótica como la que se muestra a continuación.

Figura 92. Mano robótica vendida por Bebionic

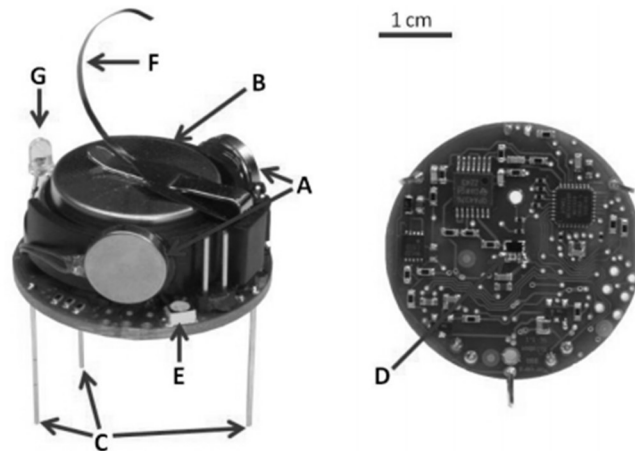


[17]

El segundo de los proyectos que componen este trabajo fue el de un robot destinado a operar en enjambre. El propósito de este robot es el de funcionar como una herramienta didáctica de bajo costo y con un diseño que es fácil de reproducir por la Universidad del Valle de Guatemala. El diseño y la

inspiración de este equipo son la multitud de robots similares que se utilizan a lo largo del mundo en campos de investigación robótica sobre el comportamiento de enjambres. Uno de estos es el sistema de Kilobot, un pequeño robot diseñado exclusivamente para su uso en investigación de sistemas robóticos. En el caso del alcance de este proyecto se propone realizar un equipo un poco más complejo que sea capaz de ser utilizado tanto por estudiantes dedicados a la robótica como por principiantes.

Figura 93. Robots para trabajo de enjambre Kilobot



[109]

El tercer proyecto es el de una silla de ruedas capaz de superar obstáculos que serían imposibles para una silla de diseño tradicional. Este proyecto se trabajó con la intención de ayudar a personas con discapacidades a moverse de un punto a otro sin encontrar mayores problemas, superando obstáculos que actualmente son casi imposibles de superar como un set de gradas. Diseños similares se han realizado para lograr el mismo objetivo, uno de los más populares es el equipo TopChair-S de la compañía francesa TopChair. Este modelo utiliza un mecanismo combinado de ruedas y tractor oruga para proveer al usuario una movilidad sin problemas aún cuando se encuentra frente a gradas.

Figura 94. Silla de ruedas TopChair-S capaz de subir y bajar gradas



[132]

Finalmente, el último proyecto que compone este trabajo es el de un Rover diseñado para recolectar basura y demás desechos en áreas públicas. Este equipo consta de un pequeño sistema robótico capaz de movilizarse por diferentes terrenos como arena y tierra para limpiar áreas de manera autónoma. Este sistema se ve fuertemente influenciado por equipos similares aplicados en diversas áreas, no solo el campo ambientalista. La aplicación más reconocida para equipos de este tipo es como herramientas para la exploración de planetas distantes con los rovers Opportunity y Spirit siendo encargados con recolectar y analizar muestras de la superficie de Marte.

Figura 95. El rover Spirit diseñado para explorar Marte



[86]

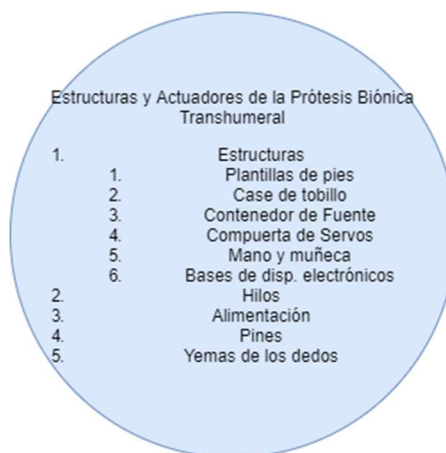
VI. METODOLOGÍA

A. PRÓTESIS BIÓNICA

1. Módulo de estructuras y actuadores. Así pues, en el presente se le da el seguimiento necesario al módulo de estructuras y actuadores de la prótesis biónica transhumeral. Mostrando los procesos que fueron necesarios hacer para llevar al sistema al estado requerido. Las versiones finales del case y placas de control utilizadas se encuentran debidamente redactadas en el módulo de restauración.

El módulo de estructuras y actuadores posee diferentes tareas las cuáles fueron divididas por secciones para delimitar la separación entre los módulos y la revisión o reparación, según fuera el caso, se realizará de una forma individual. Cada uno de estos bloques fueron trabajándose independientemente para asegurar que no existiesen problemas. El esquema de la división de estos bloques de tareas queda como se indica a continuación:

Figura 96. División del módulo de estructuras y actuadores del proyecto Protolife



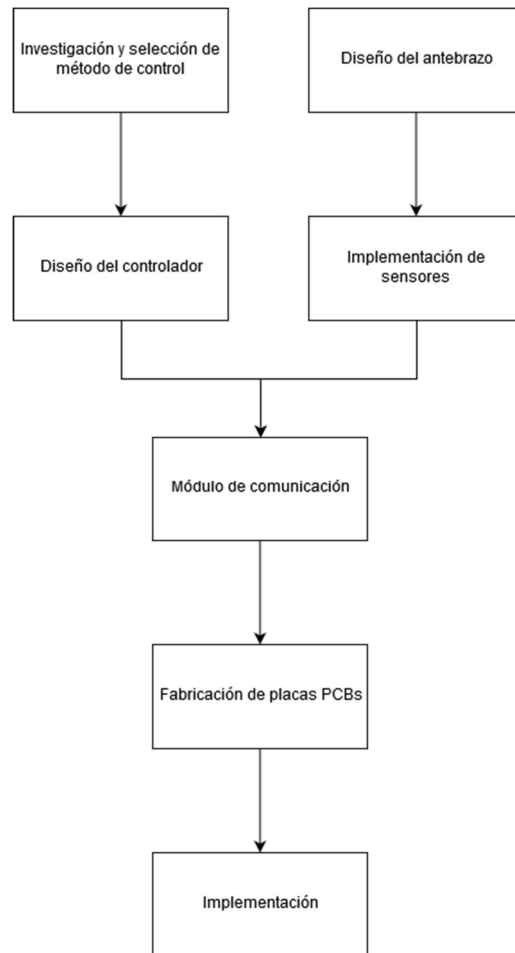
Cada una de estas secciones posee tareas intermedias las cuales fueron evolucionando a partir de los resultados parciales obtenidos mientras se desarrollaba el proyecto. El cronograma de actividades utilizado para delimitar tiempos de trabajos de estas tareas se presenta a continuación:

Tabla XVI. Cronograma de actividades.

Actividad	Año 2017																																											
	Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre							
1 Desarmado y limpieza de mano y muñeca.	■	■	■	■																																								
2 Lijado y Pintado de mano y muñeca					■	■	■	■																																				
3 Diseño de Case de tobillo y plantilla de pie									■	■	■	■																																
4 Impresión de case													■	■	■	■																												
5 Armado de los dedos utilizando el hilo nuevo																	■	■	■	■																								
6 Unión de las falanges con los pines sólidos																					■	■	■	■																				
7 Colocación de motores y guías en la palma																									■	■	■	■																
8 Colocación de dispositivos en la muñeca																													■	■	■	■												
9 Colocación de dispositivos en el antebrazo																																	■	■	■	■								
10 Fijación de compuerta en antebrazo																																					■	■	■	■				
11 Pruebas con la muñeca																																												
12 Colocación de yemas y pruebas con sensores																																												
13 Diseño y corte de la base del antebrazo																																												
14 Colocación de fuente y placas en la base																																												
15 Pruebas con todos los servos																																												
16 Retocado de pintura en mano y muñeca																																												
17 Pruebas con case y plantilla																																												
18 Redacción de Trabajo Escrito																																												

2. Módulo de restauración y mejora. Algunos de los módulos de la prótesis son dependiente entre sí, por lo que su trabajo se realizó gradualmente. Por la misma naturaleza dependiente, se trabajaron algunos módulos de forma paralela. El flujo de trabajo seguido se puede observar en el siguiente flujo de trabajo.

Figura 97. Diagrama de flujo para el desarrollo del proyecto.



Cada una de las fases requiere de tareas intermedias las cuales dependen de los resultados obtenidos. El trabajo se realizó con una fecha límite de entrega por lo que fue necesario realizar un cronograma de actividades el cual permitió, de manera más fácil, seguir el progreso de cada módulo.

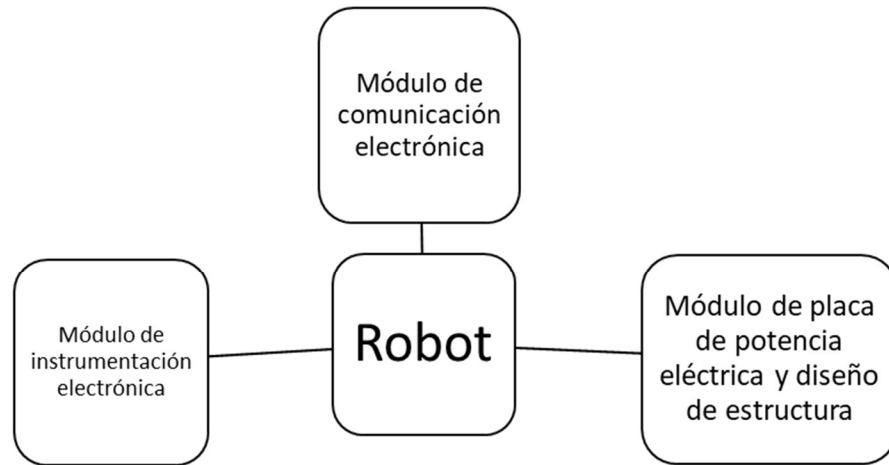
Tabla XVII. Cronograma de actividades del trabajo de graduación.

Actividad	2017					
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Investigación de métodos actuales de control de prótesis	■					
Diseño de método de control a utilizar	■					
Investigación de microcontroladores disponibles	■					
Compra de materiales y microcontroladores seleccionados	■					
Pruebas de corriente para actuadores		■				
Diseño de antebrazo		■				
Impresión 3d de antebrazo		■				
Investigación de registros de microcontroladores			■			
Prototipado del método de control diseñado			■			
Programación del microcontrolador para el control			■			
Verificación del funcionamiento del controlador				■		
Programación del microcontrolador del antebrazo				■		
Prototipado del sistema del antebrazo				■		
Verificación del funcionamiento del antebrazo				■		
Redacción del reporte sobre la información recaudada					■	
Redacción de reporte sobre la programación					■	
Redacción de problemas encontrados					■	
Resolución de problemas encontrados						■
Adaptaciones de diseños para resolución de problemas						■
Pruebas de corriente para circuitos						■
Selección y adquisición de fuente de alimentación						■
Actividad	2017					
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	
Prototipado de nuevos diseños de controlador y antebrazo	■					
Verificación de controlador y antebrazo	■					
Redacción de información recaudada y problemas resueltos	■					
Comienzo de redacción de tesis		■				
Diseño y simulación de placas para controlador y antebrazo		■				
Fabricación de placas para controlador y antebrazo		■				
Implementación de placas para controlador y antebrazo		■				
Verificación de placas PCB		■				
Diseño y fabricación de caja para controlador			■			
Montaje de circuitos eléctricos para controlador			■			
Verificación de controlador			■			
Redacción de tesis			■			
Montaje de circuitos eléctricos para antebrazo				■		
Verificación del antebrazo				■		
Redacción final de tesis				■		
Programación de poses para la mano					■	
Verificación del sistema completo					■	

La información se presenta de manera cronológica, de tal manera, que se facilite la comprensión de las decisiones tomadas y los resultados obtenidos.

B. SWARM ROBOTICS

Figura 98. Diagrama de bloques de los módulos de Swarm Robotics.



1. **Módulo de comunicación electrónica.** Con el objetivo de diseñar e implementar un sistema de comunicación eficiente, efectivo y de bajo costo de la mejor manera el módulo de comunicación se dividió en diversas tareas las cuales se extienden desde la selección del módulo de comunicación indicado hasta las pruebas finales del equipo. Con la intención de simplificar este proceso se dividió en cuatro fases principales de trabajo. A continuación, se muestran estas cuatro fases principales:

- I. Selección del módulo de comunicación.
- II. Selección del protocolo de comunicación.
- III. Diseño y prueba preliminar.
 - A. Establecimiento de conexión con la red.
 - B. Diseño preliminar de la librería de Matlab.
 - C. Comunicación entre el equipo y Matlab.
- IV. Reducción de retrasos y pruebas finales.

Cada una de estas etapas está compuesta por múltiples tareas realizadas a lo largo del desarrollo del proyecto. Con la intención de mejorar la eficiencia del trabajo, así como lograr cumplir con las metas de diseño dentro del rango de tiempo estimado se realizó un cronograma de actividades. Este cronograma se presenta a continuación en la Tabla XVIII.

Tabla XVIII. Cronograma de las actividades del trabajo de graduación.

Actividad	Fecha propuesta
Investigación sobre módulos de comunicación inalámbrica de baja potencia.	23 enero - 10 febrero
Selección de módulo para comunicación del microcontrolador.	
Investigación sobre diferentes protocolos de comunicación para el módulo elegido.	11 febrero - 25 febrero
Selección del protocolo de comunicación adecuado para el sistema.	
Implementación preliminar de funciones.	26 febrero - 17 marzo
Establecimiento de conexión básica entre el microcontrolador y la red.	
Diseño y prueba de funciones de establecimiento de servidor TCP.	18 marzo - 7 abril
Diseño y prueba de funciones de envío de datos de servidor a cliente TCP.	

Continuación Tabla XVIII. Cronograma de las actividades del trabajo de graduación.

Actividad	Fecha propuesta
Investigación sobre funciones básicas para la librería de Matlab.	8 abril - 28 abril
Establecimiento de conexión básica entre el microcontrolador y Matlab con la librería.	
Pruebas preliminares con el equipo.	28 abril - 1 junio
Elaboración del protocolo.	2 junio - 30 junio
Identificación de problemas o errores en el funcionamiento del robot.	1 julio - 9 julio
Reestructuración del código y reducción de retrasos.	10 julio - 23 julio
Independización del control de motores.	
Pruebas finales con sistemas elementales de control.	24 julio - 20 agosto
Redacción del trabajo escrito.	21 agosto - 10 septiembre
Revisión y corrección de detalles en el trabajo escrito.	11 septiembre - 1 octubre
Entrega de trabajo escrito	6 octubre

Los resultados de cada una de las tareas y fases mencionadas anteriormente se muestran de manera cronológica.

2. Módulo de diseño de estructura e implementación de potencia eléctrica para un robot destinado a trabajar en enjambre. Los tres sub-módulos que se desarrollaron en este proyecto tuvieron cierta cronología debido a que estos dependían de ellos entre sí. El desarrollo de cada uno de los bloques de este proyecto fue de modo gradual como podemos ver en la cronología inferior que nos indica el orden. Además, en la Figura 98, podemos observar los bloques y los módulos desarrollados.

A. Estructura

1. Pieza para ultrasónicos.
2. Ball Caster.
3. Base de robot de MDF y sostenedores de baterías LiPo.
4. Porta Switch y fusible.

B. Placa de Potencia

1. Fabricación de placa de potencia prototipo

- 2. Diseño de PCB
- C. Implementación de encoders.
 - 1. Calibración.
 - 2. Programación.
- D. Armado de prototipo
- E. Fabricación y diseño de placa de potencia final
 - a. Selección de componentes
 - b. Diseño y fabricación de PCB final
- F. Ensamblaje final
- G. Prueba de eficiencia de reguladores

Tabla XIX . Lista de tareas.

Lista de tareas			
No.	Tarea	Fecha de inicio	Fecha de finalización
1	Planeación de módulos y compra de materiales	05/02/2017	19/02/2017
2	Desarrollo de módulo de ultrasónicos	20/02/2017	15/03/2017
3	Ball Caster	17/03/2017	23/03/2017
4	Desarrollo de placa MDF y sostenedores de baterías LiPo.	28/03/2017	06/04/2017
5	Fabricación de placa de potencia prototipo	07/04/2017	15/04/2017
6	Implementación de encoders.	18/04/2017	25/04/2017
7	Armado de robot	01/05/2017	15/05/2017
8	Pruebas	16/05/2017	23/05/2017
9	Corrección de estructura	07/06/2017	16/06/2017
10	Selección y compra de componentes	18/06/2017	23/06/2017
11	Diseño y fabricación de PCB de potencia eléctrica final	01/07/2017	08/07/2017
12	Armado de robot # 1 de entrega final	15/07/2017	21/07/2017
13	Pruebas y calibraciones	02/08/2017	09/08/2017
14	Armado de robot # 2 de entrega final	15/10/17	25/10/17
15	Armado de robot # 3	8/11/17	15/11/17

3. Módulo de instrumentación electrónica. Las actividades se dividen en 5 tareas, desarrolladas a lo largo de 3 meses del ciclo 2 de 2017 como continuación de un trabajo preliminar que se realizó en el ciclo 1 de 2017. Estas son: diseño y pruebas del circuito de control de sensores ultrasónicos; diseño y fabricación de PCB para el circuito de control; programación del microcontrolador para el manejo de sensores; Calibración del conjunto de sensores ultrasónicos; y pruebas con teoría de control para verificar el funcionamiento de forma individual. A continuación, se describe cada tarea. Los módulos del megaproyecto se ilustran en la 98.

Tabla XX. Cronograma de actividades del módulo de instrumentación electrónica de Swarm Robotics

Fecha	Actividad
-------	-----------

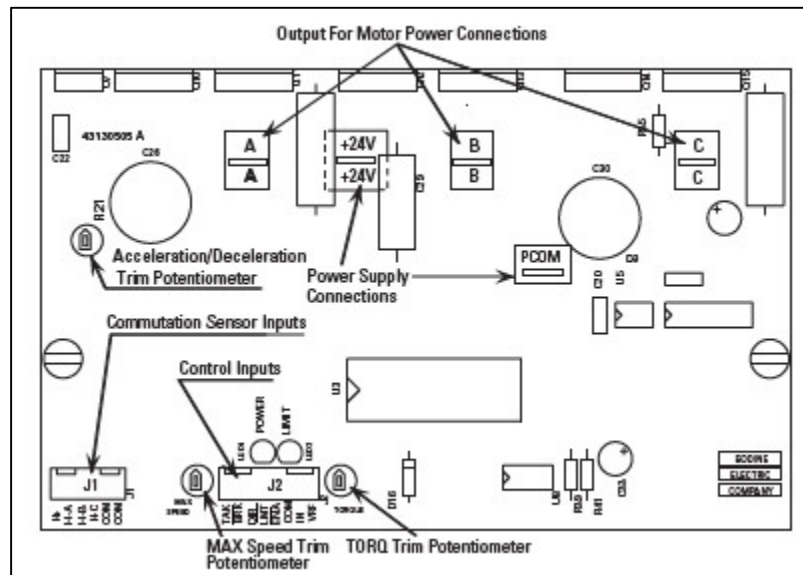
4 julio – 22 julio	Programación y pruebas con la IMU y la falda de sensores ultrasónicos.
23 julio- 20 agosto	Diseño del circuito y fabricación del PCB. Ensamblar el robot. Realizar pruebas de calibración de los sensores ultrasónicos y comparar los datos enviados desde el microcontrolador y los que se reciben en Matlab.
21 agosto – 16 septiembre	Pruebas del robot usando control proporcional. Resolución de problemas que puedan surgir.
21 agosto – 24 septiembre	Redacción del trabajo escrito
25 septiembre – 1 octubre	Revisión y corrección de detalles en el trabajo escrito
6 octubre	Entrega del trabajo final

C. SILLA

1. Módulo de sistema de control. Como se mencionó al principio del trabajo, no se implementó el sistema de control en lazo cerrado ya que no se contaba con los actuadores lineales que eran los encargados del enclave automático. Lo que se implementó fue una función que recibe como parámetro la dirección de giro para los triángulos. El movimiento lineal y el giro de los triángulos será de forma independiente. Esto debido a que las gradas pueden tener distinta profundidad y que no basta con hacer girar los triángulos, sino que se necesite que la silla se mueva de forma lineal para llegar a la siguiente grada.

Los triángulos se mueven utilizando motores sin escobillas (brushless), los cuales a su vez tienen controladores que los hacen funcionar como un tipo de motores DC (ver Figura 11). Esto quiere decir que únicamente necesitamos de tres señales para hacer funcionar los motores, señal de freno, señal de habilitación y señal de dirección. Estas señales son las salidas de las rutinas que se programaron, especificando que motor debe moverse y en qué dirección. El código se adjunta en la parte de anexos. También cuenta con las correspondientes líneas de voltaje de entrada y tierra, las conexiones para los motores y sobre todo posee tres potenciómetros, los cuales controlan la aceleración, torque y velocidad de los motores.

Figura 99. Controlador motor sin escobillas (brushless).



En la Figura 99 se muestra el conector J2, en el cual se puede observar las señales de salida y entrada de la placa de control. En este caso nos interesan los pines BRK, DIR y ENA, en la figura se puede ver que dos de estas entradas están negadas. En la siguiente tabla se muestra la configuración de cada una de las

entradas, esto con el fin de determinar los valores para los cuales los motores están activos o no, la dirección de giro o si están frenados o no.

Figura 100. Conector J2, entradas y salidas de la placa de control.

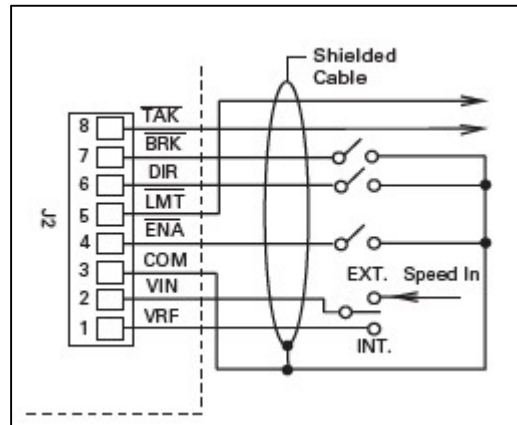
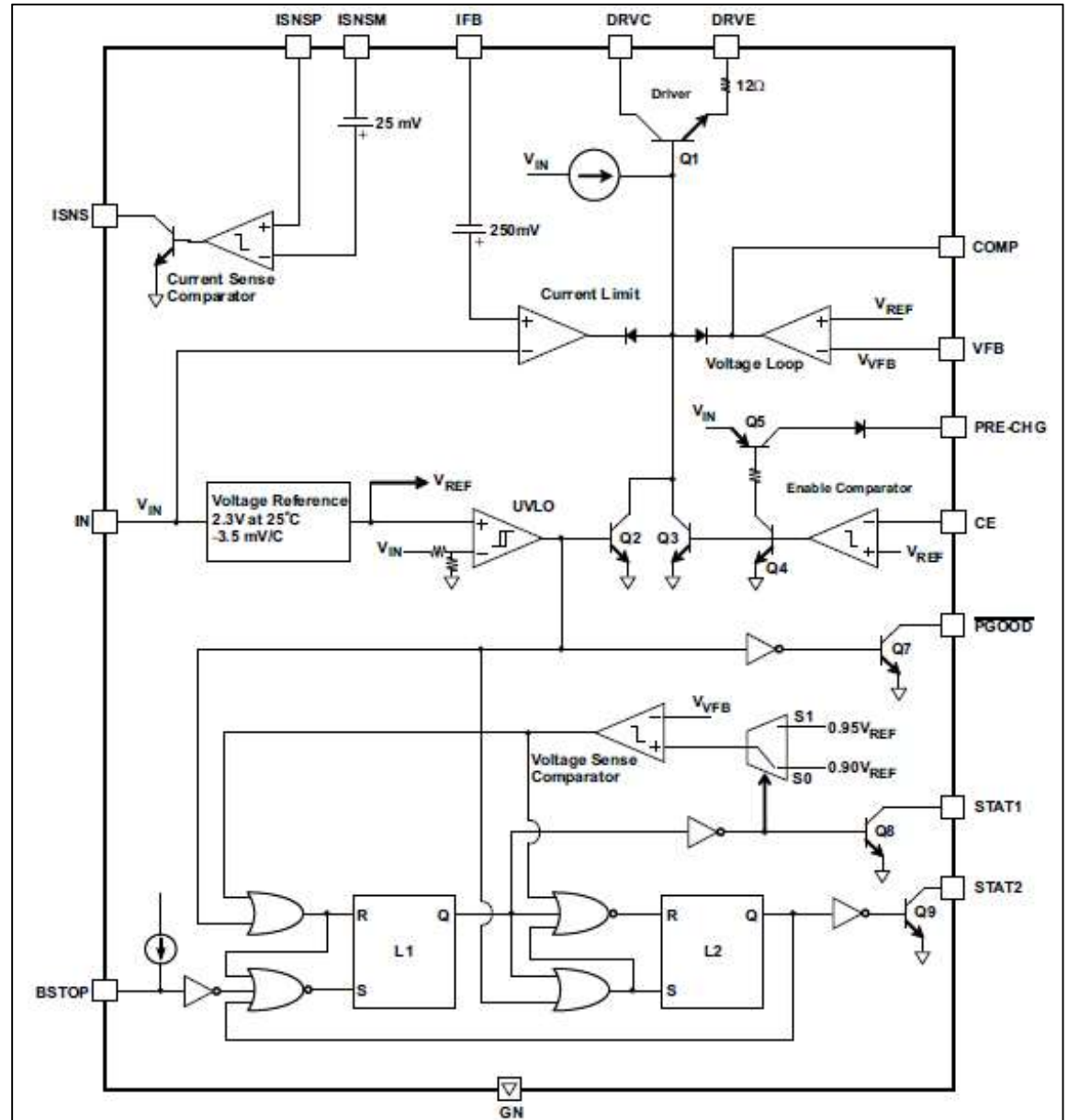


Tabla XXI. Estados de las entradas de la placa de control.

Pin	Nivel bajo de voltaje	Nivel alto de voltaje
ENA	Habilitado	Deshabilitado
DIR	Sentido antihorario	Sentido horario
BRK	Frenado	Girando

2. Módulo de carga de batería. Las baterías con las que cuenta el megaproyecto son de ácido-plomo, específicamente de 12V 26Ah. El circuito que se colocó cuenta con tres etapas en el proceso de carga (Bulk, Absorción y Flotación). Para la fabricación del circuito encargado de cargar las baterías se utilizó el integrado BQ24450, el cual es un integrado específico para baterías de ácido-plomo, que se basa en comparadores de corriente y voltaje utilizando amplificadores operacionales, latches y divisores de voltajes para colocar referencias de voltajes como Vfloat, Vref, Vin, etc.

Figura 101. Diagrama de bloques del integrado BQ24450.



El integrado de forma interna (ver Figura 101) cuenta con amplificadores operacionales en distintas configuraciones, entre ellas están un comparador de corriente, un comparador de voltaje, limitadores de corriente y transistores que se activan dependiendo de las condiciones para delimitar corrientes máximas y voltajes de carga. Pero la parte más importante la conforman los latches (L1 y L2) que forman una maquina de estados, la cual determina el proceso de carga, es la encargada de controlar los estados en los que se encuentra el proceso (Bulk, Absorción o Flotación). Dependiendo de la combinación que estos dos presenten en la salida, así será el estado en el que se encuentre el proceso, ver el siguiente cuadro:

Tabla XXII. Estados del proceso de carga según las salidas de los Latches.

Q(L1)	Q(L2)	STAT1	STAT2	ESTADO
LOW	HIGH	ON	OFF	Bulk
LOW	LOW	ON	ON	Absorción
HIGH	HIGH	OFF	OFF	Flotación

Lo que se requiere para hacer funcionar el circuito de carga es delimitar algunos valores como voltaje máximo y mínimo de la fuente de alimentación, voltaje de flotación, voltajes de absorción, corriente de carga máxima, entre otros. Además de realizar los cálculos pertinentes para las resistencias que forman los divisores de voltaje (RA, RB, RC, RD, RT Y RISNS) y elegir la configuración del transistor externo que mejor se aplique a las condiciones y parámetros de la batería.

En el siguiente cuadro se describen los parámetros que se utilizaron para realizar los cálculos de las resistencias y también se describen las ecuaciones utilizadas para todos los cálculos.

Tabla XXIII. Constantes para cálculo de resistencias.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Voltaje de entrada	12.0V	Corriente máxima de carga	6.00A
Voltaje de entrada máximo	15.0V	V _{lim}	0.25V
Voltaje de entrada mínimo	13.0V	V _{ref}	2.30V
Voltaje de flotación	13.5V	V _{pre}	0.025V
Voltaje de absorción	14.4V	V _{diodo}	2.00V
Voltaje final de descarga	10.5V	V _{bat} mínimo	10.0V

En la Tabla XXIII se muestran las resistencias que se desean calcular además del transistor externo el cual delimitara la corriente máxima a la que se cargara la batería.

$$R_C = V_{ref} \div I_{float} \quad (7)$$

En donde, V_{ref} es una constante dada por la hoja de datos e I_{float} es la corriente en el divisor de voltaje en modo Flotación, en la hoja de datos se sugiere 50uA.

Con el siguiente grupo de ecuaciones se procede a calcular el resto de resistencias faltantes, teniendo en cuenta que los valores obtenidos no serán valores comerciales por lo tanto se deben aproximar.

$$V_{float} = V_{ref} \times (R_A + R_B + R_C) \div R_C \quad (8)$$

$$V_{boost} = V_{ref} \times (R_A + R_B + R_C // R_D) \div R_C // R_D \quad (9)$$

$$V_{TH} = V_{ref} \times (R_A + R_B + R_C // R_D) \div (R_B + R_C // R_D) \quad (10)$$

$$R_A + R_B = 2 \times R_C \quad (11)$$

En donde todos los voltajes se definieron en la Tabla XXIII, solo es suficiente despejar para cada resistencia y obtener los valores. Ahora se calcula el valor de la corriente de precarga, esta necesaria únicamente cuando la batería se ha descargado por debajo del valor mínimo establecido en el cuadro 4 y también el valor de R_{ISNS} el cual definirá el valor de la corriente a la que se cargará la batería.

$$I_{pre} = (R_{IN} - R_{PRE} - V_{DEXT} - V_{BAT}) \div R_T \quad (12)$$

$$I_{MAX-C} = V_{ILIM} \div R_{ISNS} \quad (13)$$

En donde se selecciona R_t en 634Ω , por sugerencia de la hoja de datos y se determina el valor de la corriente de precarga.

Por último, se procede a calcular el transistor externo, en este caso se elige una configuración cuasi-darlington (ver Figura 103) debido a la corriente con la que se cargara la batería, que es de 6A

aproximadamente. Conociendo los parámetros de los transistores a utilizar, se calcula la resistencia R_p y la Potencia, además la hoja de datos indica que el capacitor a utilizar debe estar en el rango de 0.01uF a 0.047uF.

$$R_p = (V_{IN(MIN)} - V_{OUT(MAX)} - 1.2V) \div I_{MAX-CHG} \times h_{FE(MIN)} \quad (14)$$

$$P_D = (V_{IN(MAX)} - V_{OUT} - 0.7V) \div h_{FE} \times I_{MAX-CHG} - (I_{MAX-CHG})^2 \div (h_{FE})^2 \times R_p \quad (15)$$

Figura 102. Circuito del cargador de batería.

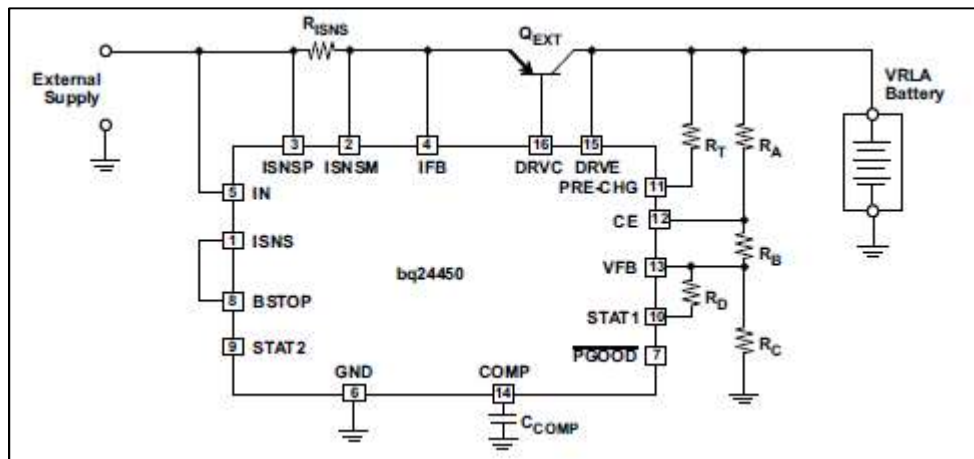
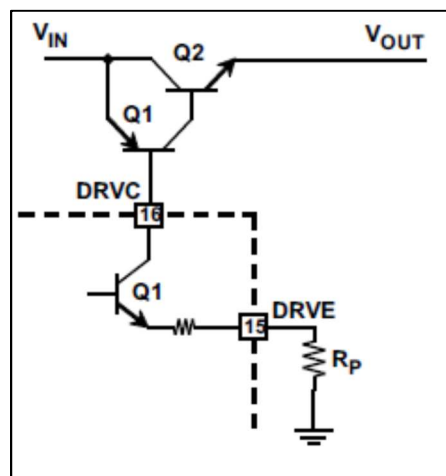


Figura 103. Transistor externo, configuración cuasi-darlington



Por último, se realiza la fabricación del PCB basados en el circuito de la Figura 102. El diseño del PCB es muy importante debido a la corriente que se maneja a la hora de cargar la batería, por lo tanto, algunos componentes como el transistor de paso se calentará a una temperatura por arriba de lo normal.

Debido a esto se tiene que tener muy en cuenta el ancho de las pistas para que tengan la suficiente capacidad de disipar el calor generado por un alto paso de corriente a través de ellos.

La corriente que se manejara es de 5 amperios, pero por seguridad se diseñaran las pistas para que soporten 10 amperios. Al realizar los cálculos correspondientes, según Smith (2017), los anchos de las pistas deben tener un ancho mínimo de 7.38mm. Este valor se obtuvo considerando el ancho del cobre de la placa, la temperatura ambiente, el largo de las pistas y el voltaje que manejaran.

D. ROBOT EXPLORADOR

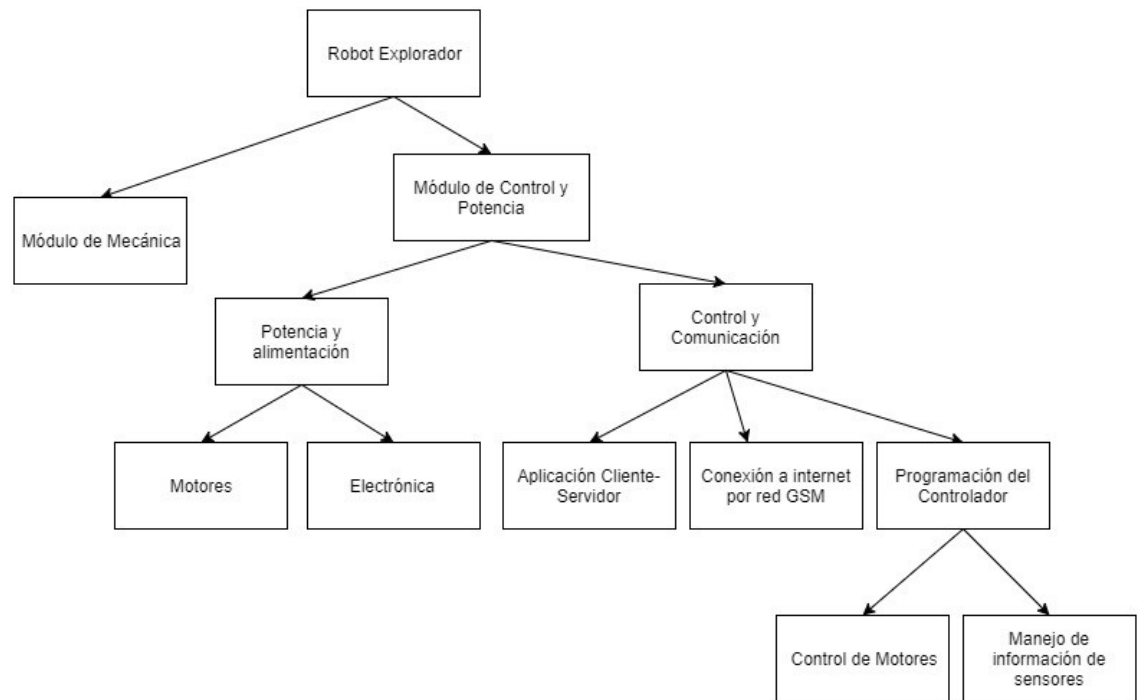
Se asignó tres semestres para la investigación, el diseño y el desarrollo del Robot Explorador, empezando por el 8° semestre de la carrera. Así mismo, se trabajó en equipos de varios miembros, dividiendo el proyecto en módulos. A continuación, se detallará la metodología utilizada en el módulo de potencia y control del Robot Explorador.

Comenzando con la fase de investigación, primero se identificó la necesidad. Para esto, se consideró principalmente los niveles de contaminación en playas de Guatemala que posean conectividad a Internet a través de la red GSM/GPRS, especialmente en fechas festivas y asuetos nacionales, en donde la cantidad de desechos aumenta. Para la investigación preliminar, se profundizó en el trabajo de graduación “Sistema Explorador Robotizado y Autárquico” del departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle de Guatemala. Se evaluaron los sistemas utilizados, los protocolos de comunicación y la estructura que implementaron para el control del Robot. De esta manera, se comparó la tecnología utilizada con el estado del arte actual y se analizaron las ventajas que se pueden obtener con el uso de nuevas tecnologías. Luego, se definieron los requerimientos del sistema por orden de importancia, y se desarrolló un plan de verificación y validación del sistema.

En la fase de diseño, se propusieron varias soluciones para los requerimientos detallados, evaluando ventajas y limitantes de los circuitos, sistemas y módulos a implementar. Se tomaron en cuenta factores como: compatibilidad, precio, disponibilidad en el mercado y facilidad de obtención, flexibilidad de los módulos propuestos y la complejidad de su implementación, entre otros. De esta manera y siguiendo un diagrama de la estructura general que tendrá el sistema de comunicación y el módulo de potencia, se seleccionaron los dispositivos más adecuados para cada tarea. A continuación, se detallará el diseño experimental y los procedimientos realizados para el desarrollo del módulo.

Se dividió el módulo en dos sub sistemas para tener una mejor organización de las tareas a realizar: potencia y alimentación, y el sub sistema de control y comunicación del robot explorador.

Figura 104: Subsistemas del módulo



VII. PRÓTESIS BIÓNICA

A. DESARROLLO DEL MÓDULO DE ESTRUCTURAS Y ACTUADORES

1. Diseño de estructuras. En esta sección se hace mención de todas aquellas partes diseñadas y manufacturadas, por cualquier método CAM, necesarias para tener un prototipo de prótesis funcional. Se decidió trabajar en base a las estructuras que se tenían disponibles para la mano y muñeca en ese momento. Esta decisión fue tomada a partir del objetivo general del megaproyecto y como ambas se encontraban en un estado funcional respecto a cuando fueron manufacturadas se optó por no realizarles cambio alguno.

a. Plantillas de los pies. La razón por la que se decidió utilizar un control basado en pulsos enviados a través de sensores resistivos ubicados en los pies fue debido a que el funcionamiento después de la cuarta fase hacía uso de señales mioeléctricas. Esto implicaba un largo tiempo de calibración del equipo por persona para hacer uso de la prótesis. Así que, como objetivo estas plantillas tienen el de controlar de forma intuitiva la prótesis durante las demostraciones en las que será utilizada.

Para este dispositivo se trabajaron dos versiones. La principal diferencia es el material utilizado de la plantilla. Para la primera versión se realizó un molde con una forma aproximada del pie. Tal como se muestra en la siguiente imagen. Posteriormente se empleó una máquina de coser para unir las secciones de tela necesarias con elástico.

Figura 105. Molde realizado en periódico que tendría la forma de la plantilla.



Figura 106. Plantilla después de haberla cosido y con el sensor dentro de su alojamiento.



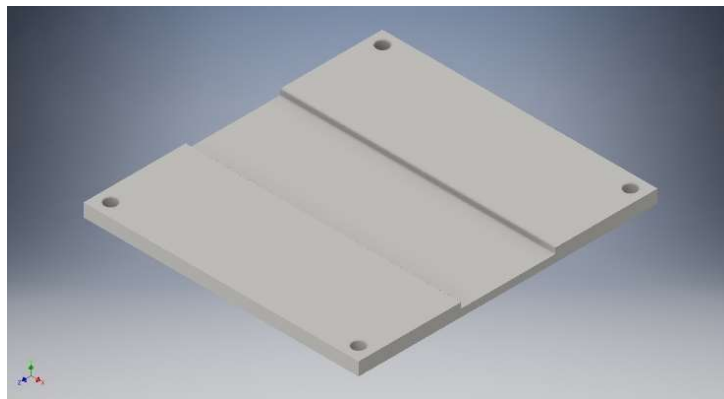
Como se aprecia, esta solo abarcaría medio pie y estaría sujeto en la parte posterior a través de una línea de elástico. Un inconveniente que se encontró en el diseño de la plantilla fue la incomodidad que se tenía al momento de usarlo. Otro inconveniente fue que no podía utilizarse en cualquier talla de pie, solo en una específica. Por estos motivos se decidió realizar variaciones en el diseño de tal forma que ahora el molde ocuparía toda la parte inferior del pie y se ajustaría a través de una línea de elástico. Tendría un espacio reservado para el sensor de fuerza, justo por encima de cada pulgar, y una línea de hilos aseguraría el cable que iría directo al case. La tela utilizada fue dacron y el inconveniente que presentó en su uso fue el deshilado que podía darse de la plantilla, también que no poseía una forma definida y existían zonas donde el elástico

no era suficiente para lograr mantenerla unido al pie del pie. Como consecuencia durante el uso podía desprenderse.

La segunda versión de la plantilla se diferenció en el tipo de tela utilizada. Esta tela es más resistente y elástica, evitando que se desprenda del pie durante su uso. Al tener estas propiedades, permite tener un tamaño compacto para su almacenamiento y tiende a ser cómoda para el usuario. Por su contraparte, tiende a deshilarse si se llega a trabar en algún objeto con terminación en punta, hay un mayor reto para lograr que el sensor resistivo se fije a la plantilla ya que toda su área tenderá a estirarse. Por ser de uso demostrativo no se tendrá el riesgo de que exista un contacto con algún objeto punzante y la fijación del sensor se realiza a través de una cadena de argollas formada de hilos con el suficiente espacio para que no le afecte un cierto rango de estiramiento y el sensor pueda seguir unido a la plantilla. Este diseño es el que se eligió para utilizarse en las demostraciones y pruebas que posteriores.

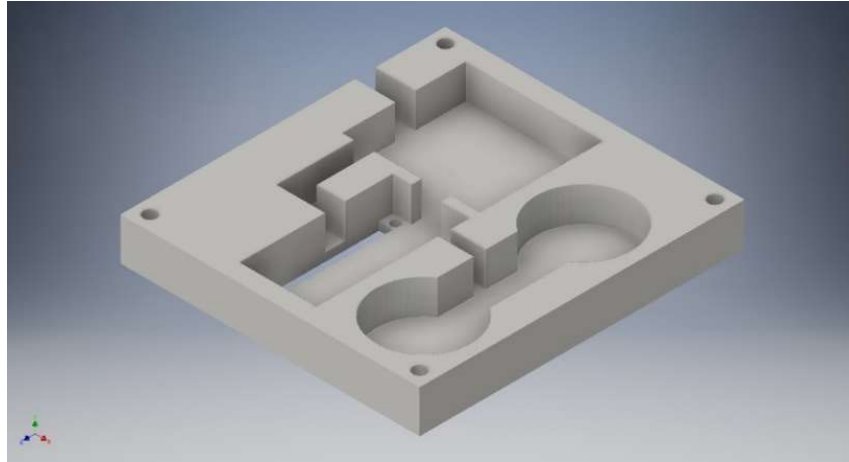
b. Case del tobillo. El case fue una de las principales estructuras integradas en esta fase del megaproyecto. Su objetivo fue alojar internamente al circuito de control y ser portátil de manera que al usuario no le represente incomodidad o molestia en la región del tobillo. Esta estructura tuvo tres versiones en total, en este trabajo se apreciarán los primeros dos prototipos. De la Figura 107 a la Figura 109 se observa el diseño de la primera versión en Inventor.

Figura 107. Diseño de la base del case.



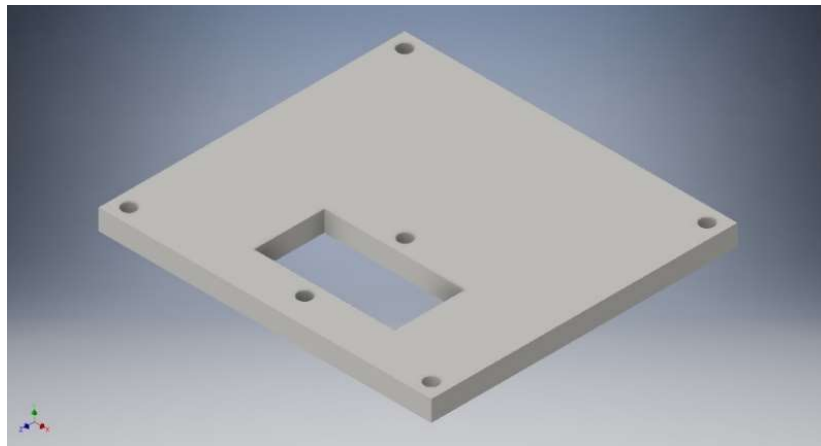
[Elaboración propia]

Figura. Diseño del contenedor del circuito de control.



[Elaboración propia]

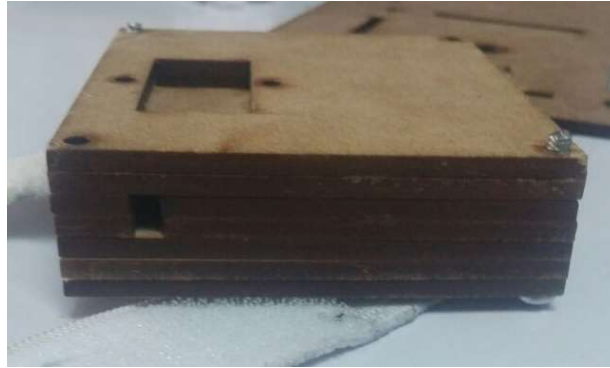
Figura 108. Diseño de la cubierta del case.



[Elaboración propia]

Para el proceso de manufactura de este diseño se realizó utilizando madera del tipo MDF utilizando corte láser. Al realizar el acople de las piezas por medio de tornillos se obtuvo la estructura mostrada en la Figura 108.

Figura 109. Acople del case cortado en MDF.



[Elaboración propia]

El diseño fabricado en MDF fue útil para hacer pruebas junto a la primera versión de las plantillas y tener una rápida idea de las dimensiones que tendría y realizar las modificaciones que fueran necesarias. La segunda versión se basaba en el mismo modelo con algunas modificaciones de espaciado interno para darle una mejor cabida a los componentes y permitir una mejor unión entre estos.

Para este segundo prototipo fue utilizado un proceso de fundición FDM, en el cual el material utilizado fue PLA (Ácido poliláctico) y se realizó mediante impresión 3D. A esta versión se le dividió en tres capas. La primera contenía el elemento que se sujetaría en el tobillo del usuario, en este caso se utilizó elástico. En la capa del medio se alojaban los componentes electrónicos y su alimentación, con excepción del nRF24I01 el cual estaría ubicado en la capa superior.

Figura 110. Impresión en 3D de la segunda versión del case.



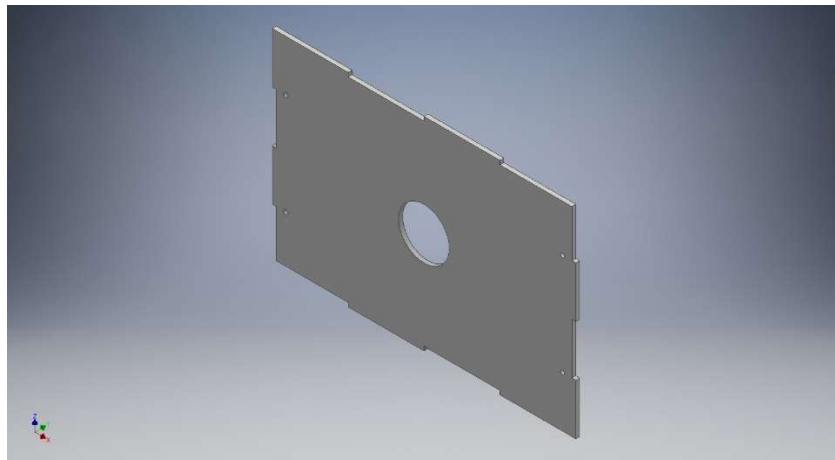
[Elaboración propia]

Después del proceso de manufactura del case se encontraron algunos inconvenientes. Uno de ellos fue que el espacio para los componentes del circuito de control no fue el suficiente y esto condujo a que fuera imposible ensamblar la parte superior. Después de estudiar las posibles modificaciones que se le podría realizar se obtuvieron las características que el case debía poseer:

- Dimensionarse para que pueda contener sin problema al PCB del controlador, la alimentación, el transmisor y el microprocesador.
- Desarmado y armado que no requiera un proceso forzado o herramienta especial o inclusive el cambio de algún componente.
- Ser lo más cómodo posible para el usuario y que esto no impida el cumplir con los objetivos anteriores.

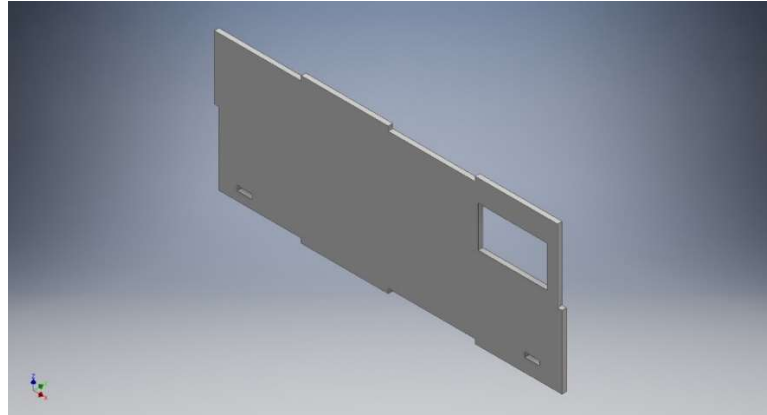
c. Contenedor de fuente de voltaje. El objetivo principal de esta estructura es proveerle a la fuente de voltaje un almacenamiento seguro y aislado de los usuarios, a la vez darle una base segura a la prótesis en donde ésta se montará y podrá realizar las demostraciones necesarias. Esta también cuenta con espacio suficiente para incluir, una vez terminadas dichas demostraciones, los cases de control junto con sus respectivas plantillas. Esta estructura se compone de un total de 9 piezas, de la Figura 112 a la 119 se observa el diseño de las mismas.

Figura 111. Diseño de la parte superior del contenedor.



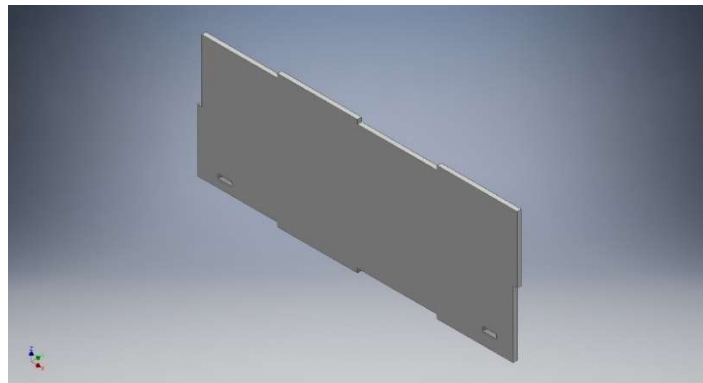
[Elaboración propia]

Figura 112. Diseño de la parte posterior del contenedor.



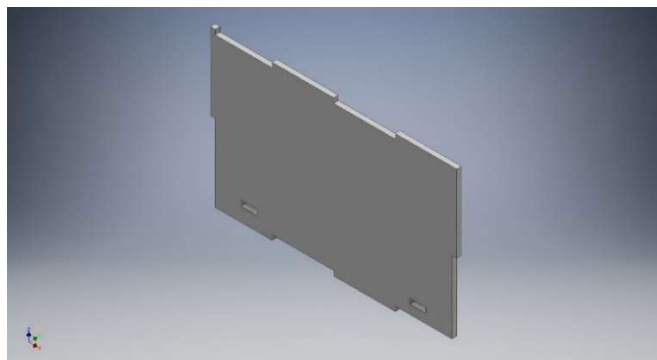
[Elaboración propia]

Figura 113. Diseño de la parte delantera del contenedor.



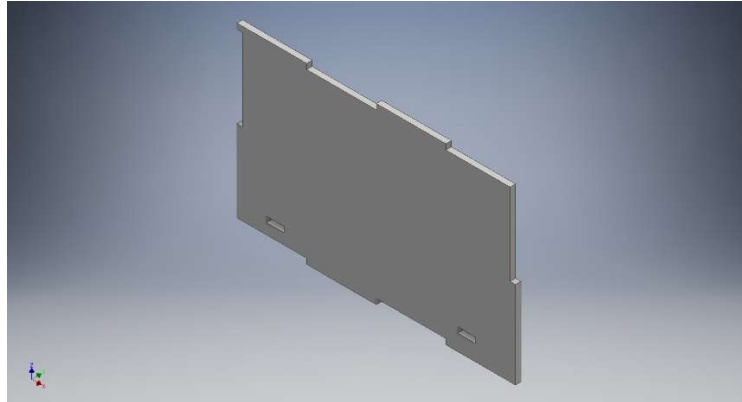
[Elaboración propia]

Figura 114. Diseño del lado izquierdo del contenedor.



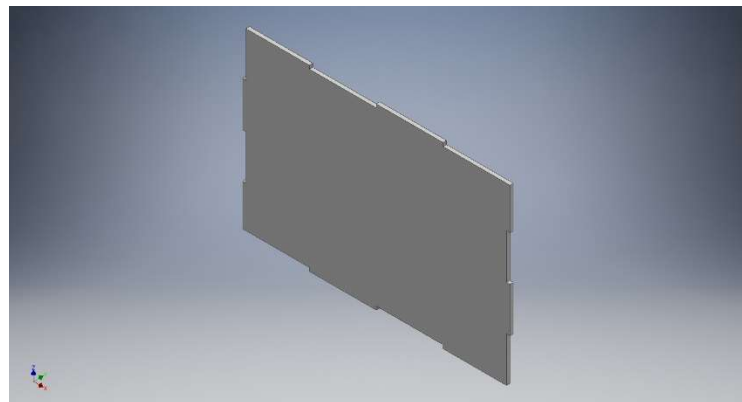
[Elaboración propia]

Figura 115. Diseño del lado derecho del contenedor.



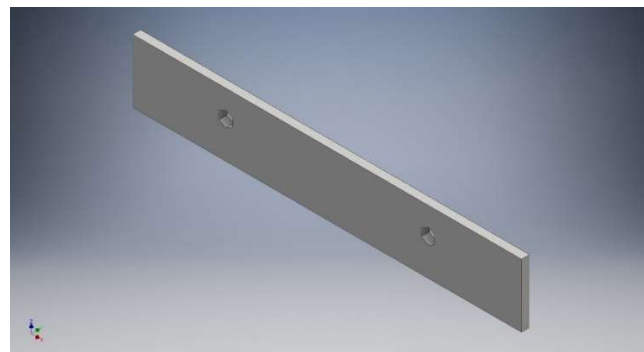
[Elaboración propia]

Figura 116. Diseño de la base del contenedor.



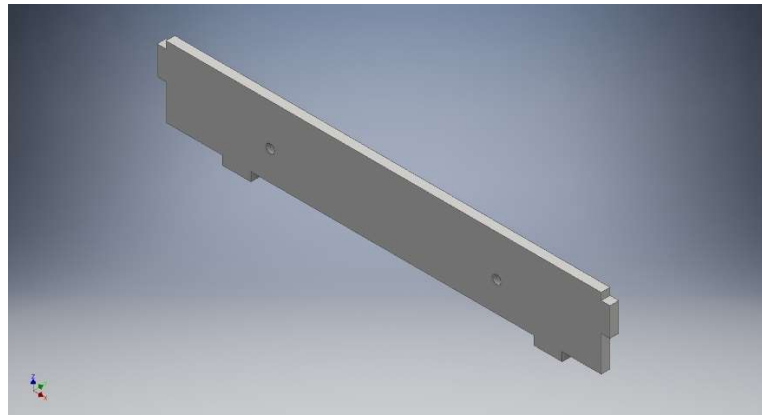
[Elaboración propia]

Figura 117. Diseño del fijador de tuercas para la parte superior.



[Elaboración propia]

Figura 118. Diseño del acople para el fijador de tuercas.



[Elaboración propia]

El diseño de esta estructura se pensó para manufacturarse a través de un proceso de corte láser. Después de realizar este proceso se obtuvieron piezas como las mostradas en la Figura 108. Las piezas se observan de un color blanco opaco debido a que a la plancha solo se le retiró el protector de una de las caras, se realiza de esta manera para evitar que el láser deje rastros de quemadura en el lado opuesto del que el láser corta.

Figura 119. Pieza en acrílico obtenida después de realizar el proceso de corte.



[Elaboración propia]

d. Compuerta de servos. Un inconveniente que se presentó después de ensamblar el antebrazo fue que no se tenía un acceso a los servos que se alojaban en esta parte. Se tomó la decisión de realizar la modificación a través de un proceso manual.

Para realizar este procedimiento se utilizó un bisturí y un mechero.

- 1) En primera instancia se marcó el área de material del antebrazo que debía ser retirado para poder acceder a estos motores.
- 2) Una vez delimitada la frontera se prosiguió a calentar la hoja de bisturí con el mechero hasta que tomó un color rojizo.
- 3) El siguiente paso requirió precisión en cuanto a un buen manejo de la herramienta. Teniendo la hoja del bisturí a una temperatura elevada, se insertó en un borde marcado atravesando por completo la estructura. Se trazó la línea con la hoja hasta que esta empezara a presentar resistencia al movimiento, esto indicaba que su temperatura había bajado y el PLA ya no se derretiría. Cuando esto sucedía debía retirarse rápidamente y volver a elevar su temperatura con el mechero.

Se realizó esta secuencia de pasos hasta tener la sección retirada de la estructura principal. Se utilizó un bisturí debido al filo intrínseco que posee y la delgadez de su hoja.

Al terminar el corte se prosiguió a retirar el material sobrante que quedó en la orilla de la sección cortada. Para hacer esto se empleó una lima hasta que los bordes quedaran completamente planos.

Figura 120. Sección del antebrazo cortada.



[Elaboración propia]

Se consideró la opción de dejar el acceso permanentemente abierto. Esta idea se rechazó por significar el riesgo del ingreso de polvo o partículas no deseadas dentro de los dispositivos. Como es sabido el polvo en los componentes electrónicos es sumamente dañino ya que puede perjudicar su funcionamiento. En los sistemas mecánicos, dependiendo del tamaño de partículas, podría ocasionar fricción donde no se desea. Por esta razón se eligió fabricar una compuerta la cual fuera fácil de colocar y de retirarse.

Considerando únicamente el aspecto visual de la prótesis, se eligió realizar la compuerta de acrílico. La pieza requerida debía ser oblicua o curvada. Una de las propiedades del acrílico es que a ciertas temperaturas este pasa a una zona plástica donde es posible deformarlo a voluntad. La interrogante fue cómo elevar su temperatura y llevarlo a este punto.

Este proceso inició utilizando arcilla para recrear un sólido que tendría la forma deseada para el acrílico. El primer método de calentamiento utilizado fue a través de un microondas de uso doméstico. A continuación, se enlistan los pasos utilizados:

- 1) Ingresar el acrílico al horno microondas.
- 2) Calentarlo por un determinado tiempo, aproximadamente 3 minutos.
- 3) Retirar el acrílico y posicionarlo contra el molde de arcilla. Aplicarle presión para lograr curvarlo.

Durante este proceso se notaron algunas dificultades. El acrílico dentro del microondas se encontraba caliente, pero al hacer contacto con el medio ambiente se enfriaba rápidamente. Otra fue que, a medida que se lograba doblar los extremos, el calor ya no era uniforme por toda la sección si no se concentraba en los extremos curvos.

El segundo método consistió en aplicar calor con una secadora de pelo y con la pieza de acrílico sobre el molde de arcilla. Los resultados no fueron satisfactorios, la temperatura alcanzada por la secadora no era lo suficientemente elevada para que el acrílico alcanzara su zona plástica y pudiera moldearse.

El último método con el cual se consiguieron mejores resultados fue utilizar una pistola de calor industrial, utilizando el mismo procedimiento que se realizó utilizando la secadora de pelo. A diferencia de la secadora de pelo utilizada, la pistola de calor sí alcanzaba la temperatura requerida para lograr que el acrílico alcanzara su zona plástica. De esta forma mientras se realizaba el calentamiento de la pieza de acrílico sobre el molde de arcilla iba dándosele la forma deseada, principalmente en los extremos los cuales sí tenían curvas pronunciadas. En los tres casos se utilizaron guantes de seguridad en todo momento y lentes para

evitar que cualquier partícula, posiblemente desprendida por las elevadas temperaturas, cayera en alguna región sensible de la cara.

e. Estructuras de la mano y muñeca. La mano, en su interior, contiene la disposición de los hilos para movilizar los dedos y los servos motores necesarios para movilizar dos de estos. El procedimiento utilizado para armarla y desarmarla fue el siguiente:

- 1) Se desarmó el mecanismo interno a la palma, esto implica retirar los motores y guías de los hilos.
- 2) Se retiraron las falanges de la mano y se desarmaron.
- 3) Como existían rastros de corrosión dentro de la estructura, se realizó una limpieza general.
- 4) El siguiente paso fue armar las falanges con los nuevos hilos y pines.
- 5) Se aplicó una capa de pintura a todas las partes de la estructura.
- 6) Se introdujeron los nuevos servos en sus respectivas posiciones y se posicionaron los hilos.

El primer color seleccionado para la estructura fue el blanco. Mientras se desarrollaba el proyecto se observó que con este tono se notaba más la suciedad que la mano iba acumulando, principalmente en los dedos. Por este motivo se desarmó nuevamente la mano y se retiró la capa de transparente junto a la de tono blanco. Esto se realizó siempre utilizando una lija de grano de 400, ya que las capas sí habían resultado ser de un grosor considerable. Cuando se consiguió manufacturar el antebrazo y la segunda versión del case se eligió darle una tonalidad de color negra a la mano para que se conservara la misma tonalidad que la de estos componentes. El cambio en los servomotores se hizo debido a que los actuales no correspondían con los del diseño original y algunos de estos no funcionaban.

La muñeca cuenta con un mecanismo de transmisión de potencia a través de una banda dentada. En el momento en que se desarmó esta banda se encontraba desgastada y agrietada. Para realizar el cambio de la banda, se buscaron las especificaciones y se encontró un código que facilitó su búsqueda. El formato de dicho código fue el siguiente.

Tabla XXIV. Especificaciones de la banda utilizada.

Banda dentada utilizada en la muñeca	
Descripción	Banda dentada de tiempo
Material	Neopreno
Ancho	9 mm
Paso	3 mm
Longitud	105 mm
No. de dientes	35

Adicionalmente la estructura que contiene el servomotor de potencia también fue pintada de color negro para que todas las piezas con superficie externa visible compartieran la misma tonalidad. Este dispositivo de la muñeca va unido por tornillos a la parte superior del antebrazo, de esta manera se asegura que el torque aplicado por el motor no se ve afectado por vibraciones.

f. Bases de dispositivos electrónicos del antebrazo. En el antebrazo se distribuyen dispositivos eléctricos los cuales son: motores, encargados de controlar el movimiento de los dedos anular, meñique y pulgar, y un Arduino uno, el cual regula las señales enviadas a los servomotores a partir de los pulsos generados en las plantillas de los pies. Estos necesitan ir asegurados en bases que les provean una ubicación en el antebrazo y de donde puedan retirarse fácilmente cuando sea necesario.

Durante el montaje y armado de estas partes se encontró que uno de los servomotores no contaba con la polea necesaria para realizar la colocación de los hilos. Como no se especificaba la procedencia de estas en el trabajo escrito de su implementación, se decidió hacer una de diseño propio. A través de un método de corte láser se obtuvieron las partes, en acrílico, necesarias para armar esta polea.

2. Cambio de hilos. Mientras se realizaba el desarmado de las falanges para la respectiva limpieza, se notó que algunos de los hilos que hacían el rol de tendones de los dedos, se encontraban deteriorados o demasiado estirados. No se conoce el motivo o el proceso por el que se sometieron para llegar a este estado, ni tampoco si se realizó un estiramiento previo para su colocación. Para evitar este suceso en un futuro, ya sea por los ciclos de uso o por una mala colocación sin previo estiramiento, se optó por cambiar el tipo de hilo que se utilizaría para unir los dedos con sus respectivos motores.

La diferencia principal es el proceso a través del cual es fabricado y la cantidad de filamentos que posee. El hilo trenzado, posee características de los monofilamentos, es decir, las propiedades de alta resistencia a la tensión, baja resistencia al corte, entre otras, son mantenidas y sumado a esto se ganan etapas previas de estiramiento, las cuales son realizadas durante la fusión de filamentos en la producción de este componente. El procedimiento para cambiarlos fue el siguiente:

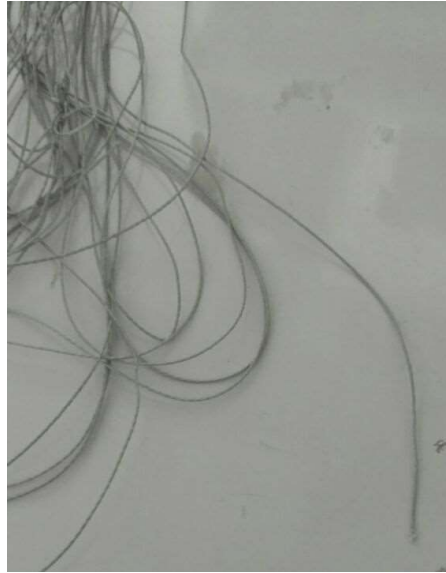
- 1) Una vez desatada la unión entre el hilo y el motor se retira por completo el dedo de la mano.
- 2) Se continúa el proceso retirando el hilo y los pines de sujeción entre falanges. Debe hacerse con cuidado ya que se utilizan cojinetes pequeños para hacer un contacto de las caras internas de las falanges y su función es permitir el movimiento rotacional de estas.
- 3) Cuando se tengan por separado las tres falanges que componen un dedo se toma un extremo del hilo nuevo y se hace pasar por uno de los agujeros y se desliza hasta que un extremo de la vuelta completa al dedo. Los agujeros posteriores realizan el movimiento de tensión de los dedos y los delanteros el movimiento de cierre o de retracción. Es recomendable que su longitud sea mayor a la necesaria para que puedan atarse a los servos.
- 4) Se realiza la unión entre el dedo y la polea del servomotor.

Figura 121. Hilo utilizado en fases anteriores.



[Elaboración propia]

Figura 122. Hilo utilizado en esta fase.



[Elaboración propia]

3. **Módulo de alimentación.** El módulo de alimentación o fuente de voltaje seleccionada deberá proveer la potencia necesaria a los actuadores y al microprocesador. Primero se obtuvo la corriente que demandaba el microprocesador. Esto se realizó a través de la hoja de datos del dispositivo. Después, se extrajo del trabajo escrito de la tercera fase el valor de la corriente del servo que este exigiría bajo condiciones de trabajo normales.

Tabla XXV. Valores de corriente por dispositivo.

Dispositivo	Valor de corriente demandado
Servo del pulgar	490 mA
Servo del índice	490 mA
Servo del dedo medio	490 mA
Servo de los dedos anular y Meñique	490 mA
Servo de la muñeca	630 mA
Arduino Uno	50 mA

La fuente de voltaje seleccionada proveerá 5V y 5A, lo que sería más que suficiente para satisfacer la demanda de los componentes. Esta posee protección contra corto circuito y sobre carga. Como su ubicación será interna a una caja de acrílico se consideró que su uso sería únicamente en interiores. Con esta elección de fuente será posible proveer la corriente necesaria a los componentes electrónicos y los actuadores sin dar cabida a una posible caída de potencia.

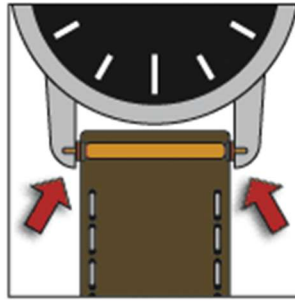
Figura 123. Fuente de voltaje seleccionada.



[Elaboración propia]

4. Cambio de pines. Durante el desarmado y limpieza de las falanges, se encontró que el proceso para retirar los pines de reloj, utilizados como guías, se podía volver muy complicado. Esto debido a que existía el riesgo de que alguna de las partes en las que se compone se separara del resto. En sus extremos un pin de reloj posee dos varillas que tienen movimiento axial y retornan a su posición original debido al efecto de un resorte interno el cual se ubica dentro de la sección del medio que es un tubo.

Figura 124. Pines de reloj utilizados anteriormente para unir las falanges.



[18]

Para retirar los pines es necesario aplicarles una fuerza en un extremo y jalarlos con algún tipo de pinza del otro, esto puede ocasionar que un extremo se separe por completo del pin, provocando que parte de este se quede en el interior del agujero. Si este fuera el caso, retirar esta parte requiere agregar más horas de trabajo, esto es debido a que la parte que queda dentro se aloja entre el cojinete y ambas falanges dificultando su extracción. Con el fin de evitar esto, se decidió cambiar los elementos de guías actuales por unos de tipo sólidos.

Figura 125. Pines sólidos utilizados actualmente para unir las falanges.



[3]

De esta forma el proceso de extracción sigue siendo el mismo explicado anteriormente, con la salvedad de que ya no se tendrá el riesgo de que alguna parte se quede trabada o impida separar las falanges.

5. Yemas. Las yemas se encontraban sin utilidad debido a que no se encontraban fijas, no se encontraban presentes o simplemente se encontraban muy deterioradas. El procedimiento para su realización fue el que se utilizó durante la fase 3 del megaproyecto y se describe a continuación.

- 1) Se realizaron moldes en arcilla con las formas de las yemas, para esto se colocó la arcilla y utilizando las manos se le dio la estructura deseada.
- 2) Al obtener esta forma se colocaron los moldes en un lugar seco y que estuviera a temperatura ambiente para obtener un secado completo de las piezas. El tiempo aproximado para poder utilizar los moldes fue de un día.
- 3) Con los moldes de las yemas, se crearon otros moldes, éstos tendrían la forma cóncava necesaria para poder verter el silicón y obtener las yemas de este material el cuál podría transmitir la presión ejercida al sensor.
- 4) Estos moldes también fueron puestos a secar durante un día para poder utilizarlos. Una vez se tuviera el resultado deseado se procedía a introducir el silicón en la cavidad con la forma de la yema. El secado de este silicón es de mínimo un día para un curado completo.
- 5) Con las yemas ya disponibles en silicón, se utilizó una cuchilla para abrir una abertura y lograr introducir los sensores de presión, estos ya debían de tener el respectivo cable soldado a sus terminales.
- 6) Por último, el cableado de estos sensores se fijó con cinchos plásticos a cada dedo para evitar que estos se deslizaran fuera de la yema.

A continuación, se muestran algunas imágenes que conforman parte del proceso de colocación y creación de las yemas, así como del silicón utilizado.

Figura 126. Moldes de las yemas hechos con arcilla.



[Elaboración propia]

Figura 127. Yemas obtenidas en silicón.



[Elaboración propia]

Figura 128. Silicón utilizado para realizar las yemas.



[Elaboración propia]

6. Resultados

a. Plantillas de los pies

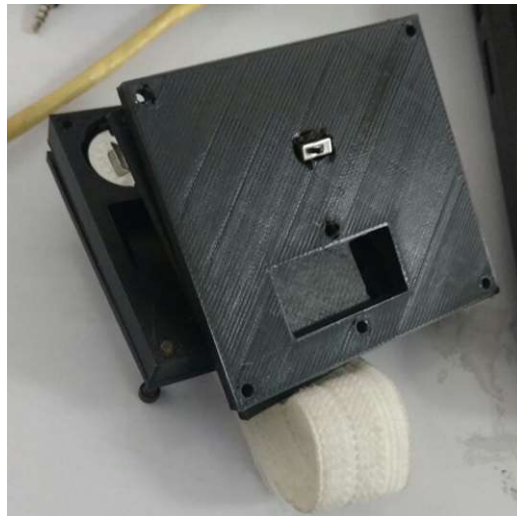
Figura 129. Segunda versión de la plantilla de los pies.



[Elaboración propia]

b. Case del tobillo

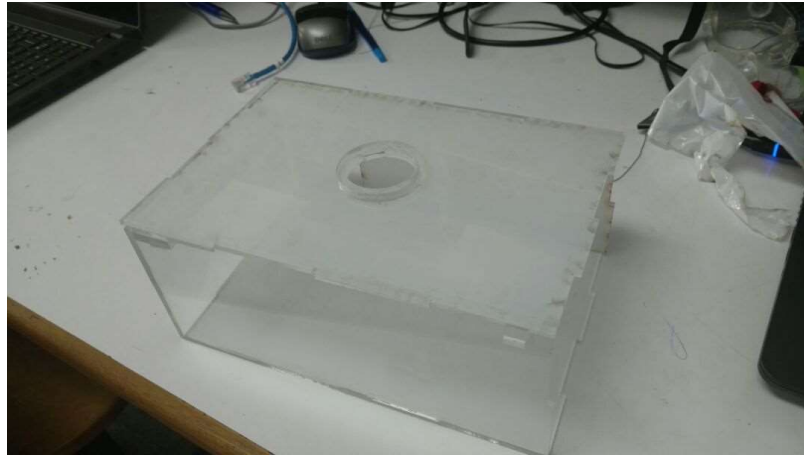
Figura 130. Segunda versión del case del tobillo.



[Elaboración propia]

c. Contenedor de la fuente de voltaje

Figura 131. Vista del contenedor armado.



[Elaboración propia]

d. Compuerta para servos

Figura 132. Pieza de acrílico doblada.



[Elaboración propia]

e. Estructura de la mano y muñeca

Figura 133. Ensamblaje entre mano y muñeca después de haberse pintado.



[Elaboración propia]

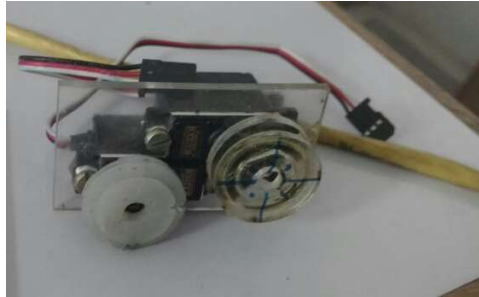
f. Bases de dispositivos electrónicos del antebrazo

Figura 134. Base para el Arduino Uno en acrílico.



[Elaboración propia]

Figura 135. Base para los servos del antebrazo y polea hechas de acrílico.



[Elaboración propia]

g. Cambio de hilos

Figura 136. Unión de los hilos nuevos con los servomotores.



[Elaboración propia]

h. Módulo de alimentación

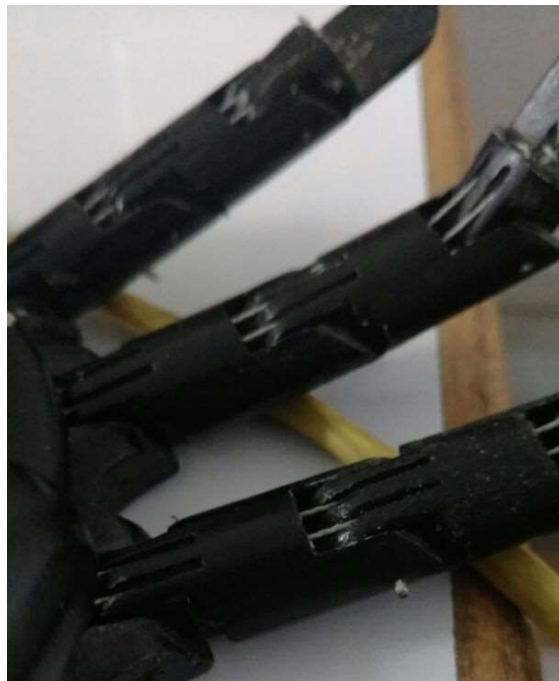
Figura 137. Fuente de alimentación colocada en su contenedor.



[Elaboración propia]

i. Cambio de pines

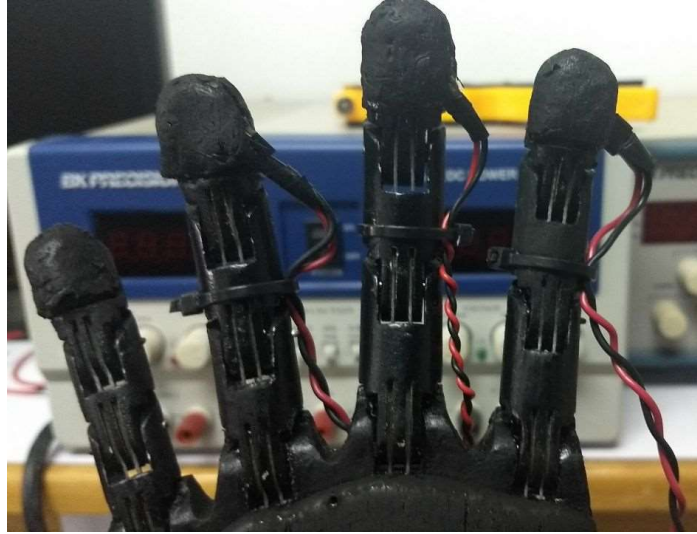
Figura 138. Unión de las falanges con los pines sólidos.



[Elaboración propia]

j. Yemas

Figura 139. Instalación de las yemas con los sensores.



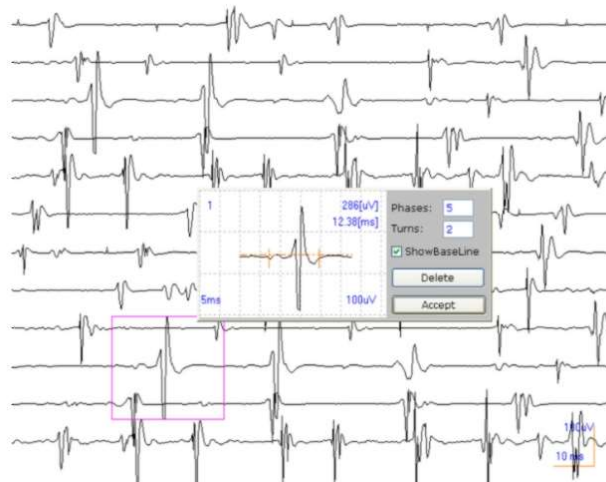
[Elaboración propia]

B. DESARROLLO DEL MÓDULO DE MANTENIMIENTO Y MEJORA

1. Investigación de métodos de control de prótesis. El cuerpo humano es capaz de generar una variedad de señales que, potencialmente, pueden ser utilizadas para la operación de una prótesis. Estos métodos se pueden clasificar en dos categorías principales según el origen de la señal: Biomecánicas o bioeléctricas/acústicas. Algunos de los tipos de señales bioeléctricas/acústicas usados son el control mioeléctrico, mioacústico o neuroeléctrico. [4] Las principales señales provienen de actividad muscular por medio directo, indirecto a través de las articulaciones o de manera indirecta por medio de contracciones musculares. Otras alternativas que se han investigado recientemente son por medio de electroencefalogramas, voz, pies, ojos y lengua.

a. Control mioeléctrico. Por definición, el control mioeléctrico es la operación de una prótesis u otros sistemas por medio de la electricidad intrínseca de los músculos. Dependiendo de la naturaleza de la amputación, estas señales se obtienen del músculo remanente alrededor de la amputación. Esta actividad muscular, la cual normalmente no sería útil, se puede aprovechar para el control de un sistema. La medición de la actividad se puede realizar con dos tipos de electrodos: no invasivos e invasivos o intramusculares. Estos últimos son más eficientes, pero requieren de un procedimiento clínico el cual no es aceptado por la mayoría de los pacientes. [11]

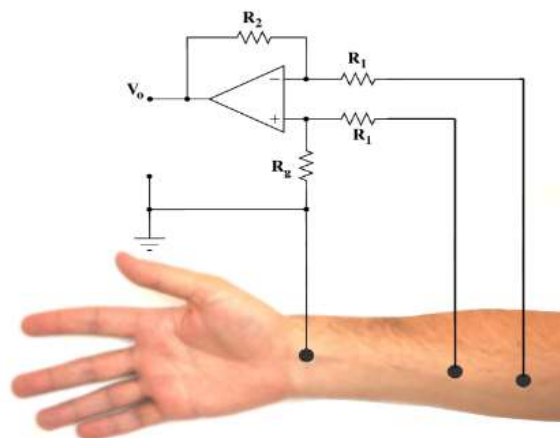
Figura 140. Forma típica de una señal mioeléctrica obtenida por electrodos.



[11]

Debido a la sensibilidad de las señales, se debe tomar precauciones especiales para negar la influencia de interferencias eléctricas externas como señales de radiodifusión, luces fluorescentes, arcos causados por motores, líneas eléctricas, etc. Un electrodo de superficie típico puede tener una amplitud pico a pico alrededor de los 0.0001V. Las interferencias pueden llegar a ser varias veces la señal en sí. Estas interferencias pueden ser eliminadas, en su mayoría, por circuitería dedica que incluyan amplificadores diferenciales, filtros y límites de voltaje para señales [4]. Estos circuitos son los responsables de aumentar la complejidad de una prótesis y, por lo tanto, elevar su precio a un rango inaccesible para muchos.

Figura 141. Ilustración del mecanismo típico para la obtención de una señal mioeléctrica.



[11]

b. Control mioacústico. Las señales mioacústicas son aquellos sonidos causados por los músculos cuando se encuentran activos. Este fenómeno fue observado hace varias décadas, pero hasta hace poco se ha investigado su posible aplicación para el control de prótesis. La estructura de los sistemas de control mioacústicos son muy similares a los sistemas mioeléctricos, por lo que hay pocos argumentos para elegir un sistema de este tipo sobre un sistema mioeléctrico. Una de las ventajas del uso de esta señal es que los sensores no deben estar directamente sobre la piel. La principal desventaja se centra en la dificultad de eliminar los potenciales sonidos externos. [4]

c. Control neuroeléctrico. El control neuroeléctrico usa los mismos electrodos, pero estos están conectados directamente con nervios y, a futuro, con neuronas. Este método requiere de sistemas de procesamiento más avanzados y delicados ya que, por lo general, las señales son muy débiles para ser leídas en la superficie de la piel. La principal ventaja, y la más importante, es el control por medio de múltiples canales, lo cual es posible debido a que existen varias neuronas motoras y sensoriales asociadas a cada nervio. [4] Sin embargo, este método es experimental y la tecnología aún está siendo desarrollada por grandes compañías médicas. Por el momento, este método presenta un gran potencial a futuro para su aplicación práctica.

d. Control biomecánico. Este tipo de señales se ha usado extensivamente para el control de prótesis funcionales mecánicas. Estas señales pueden ser obtenidas de virtualmente cualquier parte móvil del cuerpo como la cabeza, los pies, los brazos, hombros, etc. El primer modelo de este tipo se remonta al año 1884, cuando el cirujano dentista Robert Hasting Norman construyó una prótesis de huesos y marfil para el soldado John Cole. Esta prótesis reemplazaba 4 dedos y era accionada con el pulgar remanente de la misma mano para cerrar o abrir. [9] [32]

Figura 142. Prótesis biomecánica creada durante el año 1844.



[32]

Esta tecnología es la más usada cuando se busca una alternativa más barata y simple a los métodos electrónicos de control. Con el aumento de la popularidad en las impresoras 3D y la disminución en su costo de adquisición y operación, se han realizado varias versiones modernas que aprovechan esta tecnología para proveer una alternativa barata en los casos sea necesarios, por ejemplo, en el caso de niños quienes debido a su crecimiento natural requieren de varias prótesis que se adapten a medida que ellos crezcan.

Figura 143. Prótesis biomecánica moderna fabricada con una impresora 3D.



[9]

Otra aplicación que se le ha dado a esta tecnología en tiempos modernos es la combinación de señales biomecánicas con sistemas electrónicos. En general, el uso de este método se considera intuitivo. La forma en la que estas se han entrelazado es aprovechando el movimiento, o fuerza, de una parte del cuerpo para activar un interruptor mecánico, mover un cable conectado a un interruptor o un sensor, para aplicar una fuerza sobre un transductor de presión u operar algún tipo de sensor de posición, fuerza, contacto o proximidad. [4]

2. Selección y diseño de controlador. Para el diseño del controlador a utilizar se deben considerar los aspectos definidos por el proyecto. La prótesis no debe ser compleja, ya que esta se usará para demostraciones y, en el futuro, para la continuidad del desarrollo de la misma, por lo tanto, debe ser de simple operación, mantenimiento y reparación. El segundo aspecto debe de ser el costo, ya que uno de los objetivos originales de la prótesis fue hacer una alternativa consciente que solucione la problemática en el contexto del país. El tercer, y último, aspecto por considerar es la facilidad de operación de la prótesis en general, esto tiene que ver con la intuitividad del sistema de control.

a. Selección del esquema de control. Para seleccionar el método de control más apropiado se evaluaron las opciones disponibles bajo los siguientes aspectos:

- Complejidad: en este aspecto se evaluó que tan desarrollada está la tecnología y con qué facilidad se pueden aplicar los conceptos en la práctica.
- Costo: se consideró de cuanto es la inversión inicial para el desarrollo de una prótesis de este tipo, desde el punto de vista de diseño. Este se cuantificó por medio indirecto considerando la cantidad y complejidad de los circuitos eléctricos, la cantidad de equipo necesario para la interfaz y los tipos de sensores necesarios para la obtención de señales.
- Facilidad de operación: desde el punto de vista de un usuario nuevo, qué tanto trabajo se debe realizar para operar el sistema.
- Facilidad de integración: considerando los elementos y sistemas actuales en la prótesis, cuantos cambios se deben realizar.
- Flexibilidad: con qué facilidad se puede modificar esta tecnología y los sistemas instalados para modificar las poses y/o los grados de libertad de la mano.
- Movilidad: potencialmente cuanto control sobre su extremidad puede recuperar el usuario con esta tecnología.

Tabla XXVI. Comparación de aspectos entre distintas tecnologías para el control de prótesis electrónicas.

Tecnología	Aspectos evaluados						
	Complejidad	Costo	Facilidad de operación	Facilidad de integración	Flexibilidad	Movilidad	Total
Mecánico	5	5	5	2	1	1	19
Mioacústico	1	1	2	4	5	4	17
Mioeléctrico	2	2 (1*)	2	5	5	4	20
Neuroeléctrico	1	1	1	2	5	5	15
Biomecánico + electrónico	4	4	4	3	4	3	22

1 = Muy mala o bastante; 2 = mala o elevado; 3 = regular; 4 = buena o poca; 5 = muy buena o casi nada; según sea el caso. (*) Nota: según el tipo de electrodo, el costo puede aumentar.

[Elaboración Propia]

De la tabla anterior se puede obtener un resultado cuantitativo que sirvió como filtro para determinar las dos principales opciones. De esta tabla se puede determinar que, según nuestro caso, las dos mejores opciones son el control mioeléctrico y el control biomecánico combinado con sistemas electrónicos. Para elegir entre ambas, debemos regresar a las consideraciones y a la historia del proyecto. En anteriores años se ha trabajado la opción de operar con señales mioeléctricas, pero recurrentemente se han obtenido los mismos problemas: los circuitos resultan ser muy delicados y la reparación de la misma se vuelve dificultosa cuando ya no se encuentra presente el equipo original de desarrollo. Por lo tanto, se decidió que, a cambio de libertad en la movilidad, la mejor tecnología que resuelve los requisitos planteados al comienzo es el uso de un sistema biomecánico combinado con sistemas electrónicos. La propuesta para la base del control es el uso de los pulgares en los pies como la entrada de señales, dándonos así dos canales de entradas.

El sistema propuesto consistió en dos entradas, divididos uno en cada pie. La señal proviene de la fuerza aplicada por el pulgar del pie al sensor colocado dentro de una plantilla que contiene un sensor resistivo de fuerza que mide cuando el pulgar es flexionado hacia arriba. Esta señal es de naturaleza analógica y es procesada por medio de una comparación. Esta comparación se realiza con un voltaje predeterminado y al superarlo, se considera que la señal está activa. La señal se clasifica según la duración del pulso activo en tres categorías distintas:

- Pulso corto, menor a 0.6 segundos
- Pulso medio, mayor que 1 segundos y menor que 1.6 segundo
- Pulso largo, mayor a 2 segundo.

El esquema resulta de la combinación de las técnicas ON-OFF y de estados finitos. Al tener dos canales de entradas con 3 posibles señales, se tiene 6 posibilidades para un total de 6 estados. Definida la cantidad de estados, se usó el esquema de estados finitos para definir 6 posiciones útiles de la mano y las transiciones entre ellas.

b. Selección del módulo de comunicación. El esquema de control elegido requiere enviar información digital en una cantidad máxima de 3 bits o en un paquete de 1 byte. Esta es transmitida por medio inalámbrico al microcontrolador dentro de la prótesis a una distancia menor a 2 metros. Algunas características deseables para este módulo es un costo bajo y facilidad de disposición. Las opciones encontradas que cumplen estas características fueron: el chip nRF24L01+ de Nordic Semiconductor y el módulo Xbee fabricado por Digi. Ambos cumplen con las características de transceptor, lo que significa que, según la configuración de programación, pueden funcionar como emisor o receptor de mensajes. A pesar de que ambos módulos proveen todo lo necesario para la aplicación, se utilizó el nRF24L01+ debido a su bajo costo, bajo consumo de potencia eléctrica y facilidad de uso.

Tabla XXVII. Valores máximos de un chip nRF24L01+.

Condiciones de operación	Mínimo	Máximo	Unidad
Voltaje de alimentación	-0.3	3.6	V
Voltaje en pines	-0.3	5.25	V
Voltaje de salida	Gnd a Vd	Gnd a Vd	V
Disipación total		60	mW
Temperatura de operación	-40	+85	°C
Temperatura de almacenaje	-40	+125	°C

[23]

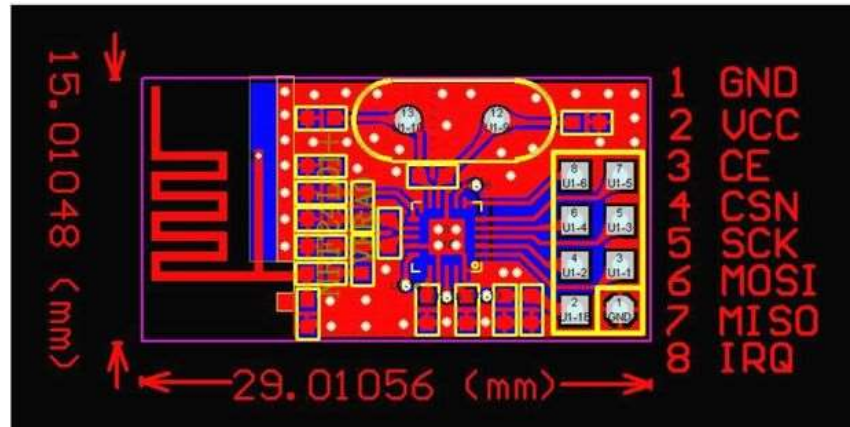
Tabla XXVIII. Valores típicos de operación de un chip nRF24L01+.

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Voltaje de alimentación	1.9	3.0	3.6	V
Voltaje de alimentación, si las entradas son mayores a 3.6V.	2.7	3.0	3.3	V
Temperatura de operación	-40	+27	+85	°C
Consumos de potencia				
Modo descanso	0.9	26	400	mA
Modo de transmisión	7.0	8.0	11.3	mA
Modo de recepción	12.6	13.1	13.5	mA

[23]

La presentación del chip nRF24L01+ varía según la empresa que lo distribuye. En general, este se encuentra en placas de desarrollo y las cuales ya incluyen el cristal oscilador y una antena. Los pines disponibles de estos módulos se presentan en la Figura 145. Aquellos denominados CS o CSN, SCK, MOSI y MISO son propios del protocolo de comunicación SPI, mientras que los pines GND, VCC, CE y IRQ son necesarios para la operación del chip.

Figura 144. Dimensiones y pines del módulo nRF24L01+.



[13]

Tabla XXIX. Descripción y función de los pines en un nRF24L01+

PIN	Nombre	Función
1	Tierra	Voltaje de referencia
2	Voltaje de alimentación	Voltaje de alimentación entre 3.0V y 3.6V
3	CE	Habilitador de chip como transmisor o receptor
4	CS o CSN	SPI: selector de chip
5	SCK	SPI: señal de reloj
6	MOSI	SPI: línea de salida de maestro, entrada de esclavo
7	MISO	SPI: línea de entrada de maestro, salida de esclavo
8	IRQ	Pin de interrupción

[23]

c. Selección del microcontrolador. Debido a que se busca realizar un control por medio de señales causadas por los pies y enviar a la prótesis, el primer microcontrolador será colocado sobre el tobillo, de tal forma que la conexión cableada al sensor sea lo más corta posible. Por esto, éste debe ser compacto y ligero para ser instalado cómodamente sobre el tobillo sin obstruir el campo natural de movimiento. Las opciones consideradas fueron: el PIC16f877 de microchip, el Pro Trinket de Adafruit, el Pi Zero de Raspberry y el NANO de Arduino. Los requisitos que estos microcontroladores deben cumplir, según el esquema de control y el módulo de comunicación, son:

- Cantidad mínima de entradas y salidas digitales: 7
- Cantidad mínima de entradas analógicas: 1
- Protocolo de comunicación: SPI
- Voltaje de alimentación mínimo: 6.6V

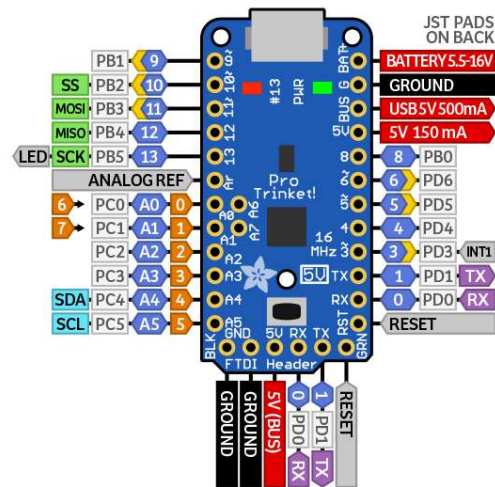
Adicionalmente, se consideraron algunas características especiales que serían convenientes para el desarrollo y funcionamiento: regulador de voltaje interno, voltaje de referencia de 3.3V y comunicación serial hacia la computadora por USB. Estas características no se consideran esenciales ya que se disponen de métodos alternativos u opciones para lograr el mismo resultado. A diferencia del resto, el microcontrolador PIC16F887 es vendido como un chip y no en una placa de desarrollo. Esto se debe consideró al tomar la elección ya que elegir este chip involucraría trabajo adicional diseñando el circuito eléctrico esencial para el funcionamiento e interfaz con los demás sistemas. Otra consideración por tomar es el lenguaje de programación de cada uno de estos. El Arduino NANO y el Pro Trinket se programan con el mismo software en lenguaje C. El PIC16F887 trabaja con el software MPLAB en lenguaje C o en lenguaje ensamblador. En ambos casos, se tiene experiencia previa en el desarrollo de proyectos en estos lenguajes. La principal diferencia entre el Pi Zero y el resto de controladores es que no requiere de un compilador para ejecutar las líneas de código. El Pi Zero posee el sistema operativo Linux instalado el cual lo hace similar a una computadora de escritorio y lo cual hace que la programación se realice dentro del microcontrolador, dejándole el trabajo de la traducción y ejecución al sistema nativo. Las ventajas de esto es una mayor flexibilidad y principalmente una fácil integración del internet de las cosas, sin embargo, estos beneficios no son aprovechados durante esta etapa de desarrollo de la prótesis.

Tabla XXX. Comparación de diferentes características de microcontroladores.

	PIC16F8 87 [22]	Pro trinket [3]	Pi Zero [31]	Arduino Nano [5]
Voltaje del sistema	2.0V - 5.0V	5V	5V	5V
Velocidad del reloj	20 MHz	16 MHz	1 GHz	16 MHz
I/O digitales	35	18	40	22
I/O analógicas	14	5	0	8
Protocolos de comunicación	EUSART , I2C, SPI	I2C, SPI	EUSART , I2C, SPI	EUSART, I2C, SPI
Interfaz de programación	Mplab por medio de programador dedicado	Ardui no por medio de USB	Linux por medio de USB	Arduino por medio de USB
Costo	\$2.14	\$9.95	\$5.00	\$23.50

El esquema de control seleccionado requiere de una entrada analógica y el módulo de comunicación requiere de por lo menos 6 pines digitales. Las dos opciones más prácticas son el Pro Trinket y el Arduino NANO. Debido a que ambos son similares, la elección final se realizó considerando el costo. Por esto, el microcontrolador elegido fue el Pro Trinket de Adafruit.

Figura 145. Configuración de pines para el microcontrolador Pro Trinket.



[18]

Tabla XXXI. Pines utilizados del microcontrolador Pro Trinket.

Pin	Designación	Descripción
11	MOSI	Pin para comunicación SPI: salida del maestro, entrada del esclavo
12	MISO	Pin para comunicación SPI: entrada del maestro, salida del esclavo
13	SCK	Pin para comunicación SPI: señal de reloj
4	CE	Administración del módulo nRF24L01+, indica si se el modo de operación es transmisión o lectura.
8	CS o CSN	Pin para comunicación SPI: selector de chip
A0	-	Entrada analógica para la lectura del sensor
BAT+	-	Entrada de voltaje para alimentación con batería, se posee un regulador integrado en esta línea
GND	-	Voltaje de referencia

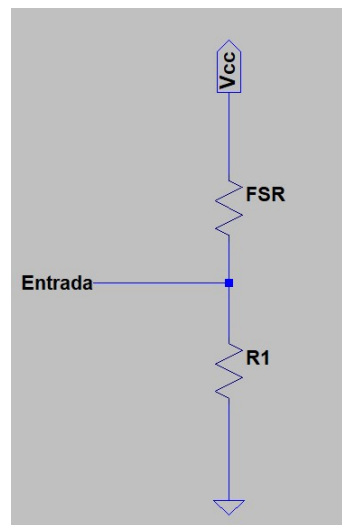
[Elaboración propia]

d. Diseño final del controlador. Con el microcontrolador, módulo de comunicación y esquema de control definidos, se diseñó la interconexión entre cada uno de estos. Lo primero a resolver es la obtención de datos. El sensor resistivo de fuerza se conecta en un circuito divisor de voltaje. Esto nos permite modelar la entrada analógica como:

$$V_{analógico} = V_{entrada} * \frac{R1}{R1+FSR} \quad \text{Ecuación 2}$$

Además, siguiendo el modelo de un FSR mostrado en la Figura 147, cuando no se aplica fuerza sobre el sensor, el voltaje leído por la entrada analógica será de 0 y el voltaje máximo teórico será igual al voltaje de entrada. De esta manera, podemos aplicar un voltaje de 5V en el divisor y, por consecuencia, proteger la entrada del controlador contra sobrecargas de potencial causado por fuerzas excesivas en el sensor.

Figura 146. Circuito divisor de voltaje para la conexión de un sensor resistivo de fuerza.

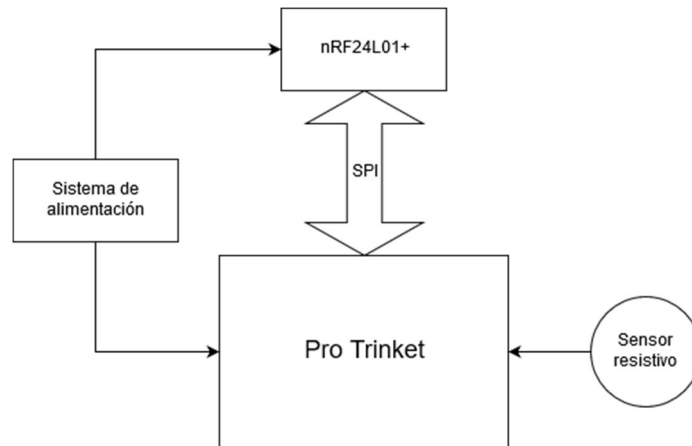


[Elaboración propia]

La siguiente conexión necesaria es entre el microcontrolador y el módulo de comunicación. Ambos dispositivos cuentan con una interfaz serial SPI interna. Esto significa que poseen pines dedicados para las 4 líneas de comunicación y la única conexión necesaria para el intercambio de información es la unión entre los pines con la misma funcionalidad. Estos se pueden observar en la Figura 148 y en la Figura 149. Por último, es necesario proveer una alimentación de potencial de 5V para el procesador y de 3.3V para el módulo RF24. Esto se decidió realizar por medio de dos baterías de metal de litio, con designación CR2032, en serie.

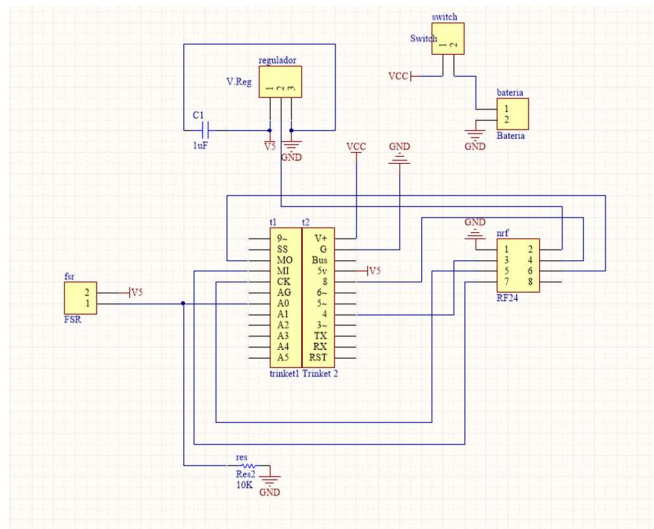
La configuración en serie nos permite combinar ambos voltajes, para un total de 6.6V mientras que al mismo tiempo tener una descarga igual en ambas baterías y no crear un diferencial de potencial entre las dos. El voltaje combinado de 6.6V es suficiente para alimentar el Pro Trinket [3], pero presentó un problema para suministrar el voltaje de alimentación del RF. Según las especificaciones del fabricante, este debe ser entre 3.0V y 3.6V por lo que fue necesario incluir un sistema regulador de potencial.

Figura 147. Diagrama de bloques del controlador.



[Elaboración propia]

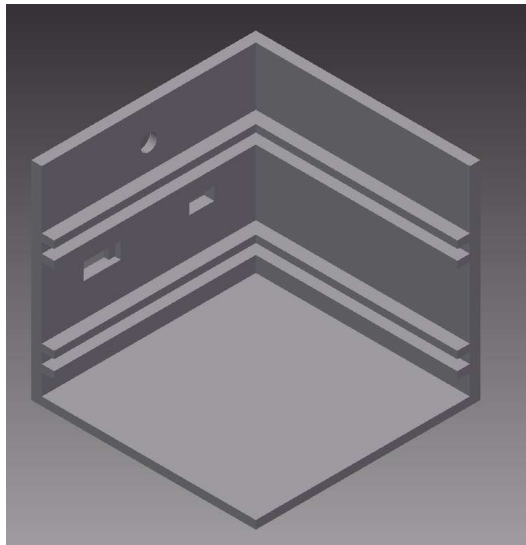
Figura 148. Esquema final del controlador.



[Elaboración propia]

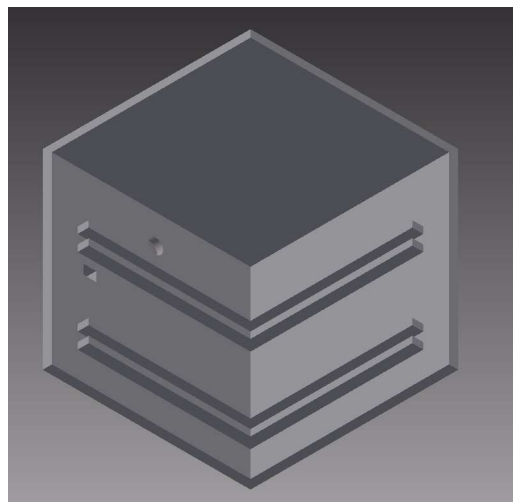
Adicionalmente, usando tecnologías de impresión en 3D, se fabricaron cases para proteger el controlador. Estos fueron diseñados en inventor y consisten en 3 partes. 2 de ellas son paredes, mientras que la última funciona como base para las baterías. Las baterías elegidas fueron baterías CR20XX. Las cuales son de pastilla y tiene un tamaño reducido, lo cual es beneficia el resultado final.

Figura 149. Vista isométrica de la pared 1 del case.



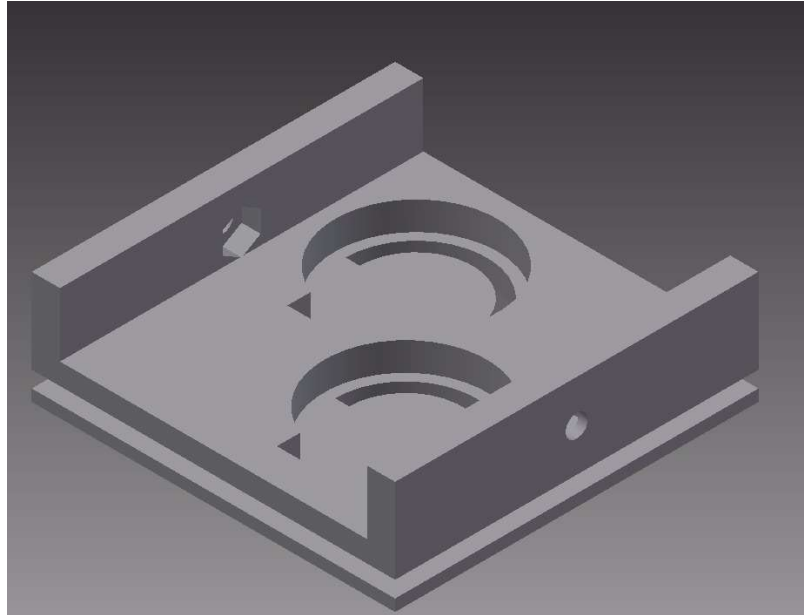
[Elaboración propia]

Figura 150. Vista isométrica de la pared 2 del case.



[Elaboración Propia]

Figura 151. Vista isométrica de la base de baterías del case.



[Elaboración Propia]

3. Diseño de antebrazo. El diseño del antebrazo se realizó usando el software de diseño asistido por computadora, Autodesk Inventor. Este software se utiliza principalmente para el diseño y análisis de piezas mecánicas, así como el planteamiento de una estrategia de manufactura. En nuestro caso, el enfoque de manufactura fue usando tecnología aditiva conocida como modelado por deposición de fundente. Esta se utiliza en las ahora populares impresoras 3D.

El primer paso fue determinar el estado del antebrazo actual y determinar las modificaciones que se deben considerar para este siguiente diseño.

Figura 152. Vista frontal del antebrazo anterior.

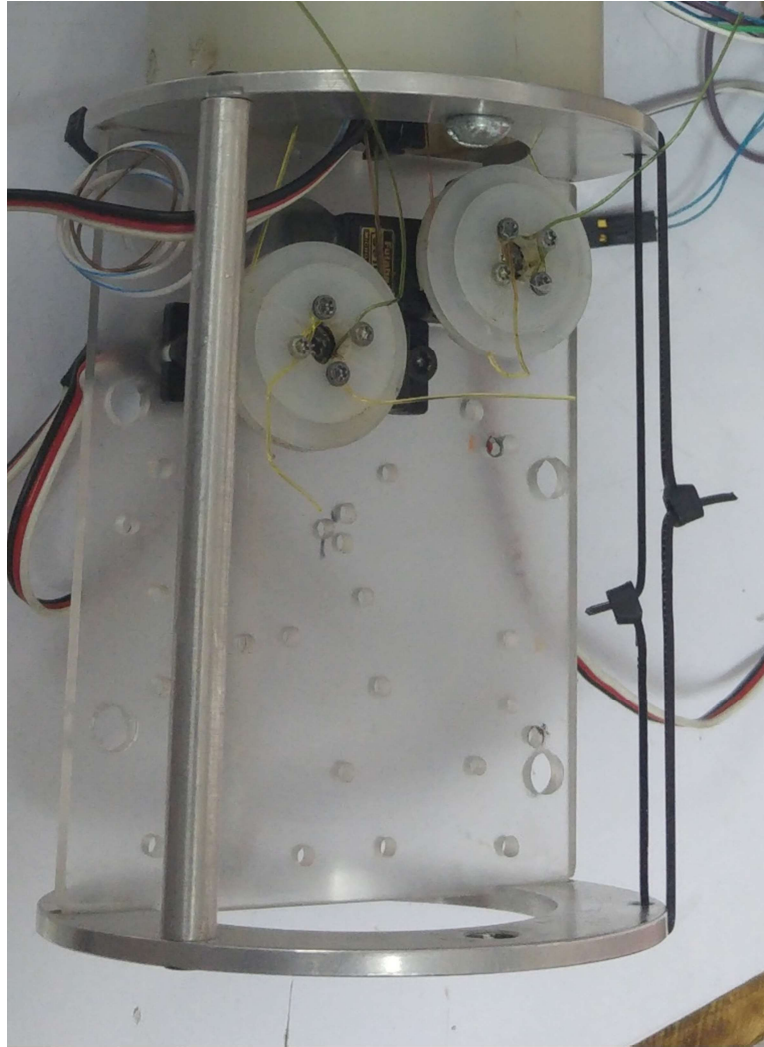


Figura 153. Vista inferior del antebrazo anterior.



De las figuras anterior se pueden determinar algunas características que se deben conservar para la compatibilidad con el resto de la prótesis y las deficiencias que se deben corregir. Las características por conservar incluyen el tamaño de la sección que se conectará a la muñeca y, además, la cantidad, posición y el tamaño de los agujeros para la sujeción con la misma. Se busca mejorar dos cosas: la apariencia física y la cantidad de protección que esta ofrece a los componentes internos. Además, se puede observar que la forma general del antebrazo anterior consiste en un cilindro sin paredes, cuyas partes fueron unidas por medio de tres cilindros equiángulos sujetos por tornillos en la parte superior e inferior. Una desventaja de este diseño es que presenta poca protección a los componentes internos. La única protección proveída por este es mecánica a ciertos tipos de impactos. Adicionalmente, el mantenimiento es dificultoso ya que la pérdida de uno de los 3 cilindros conllevaría la compra o maquinado de uno nuevo. La apariencia física depende en gran manera del estado de los circuitos internos.

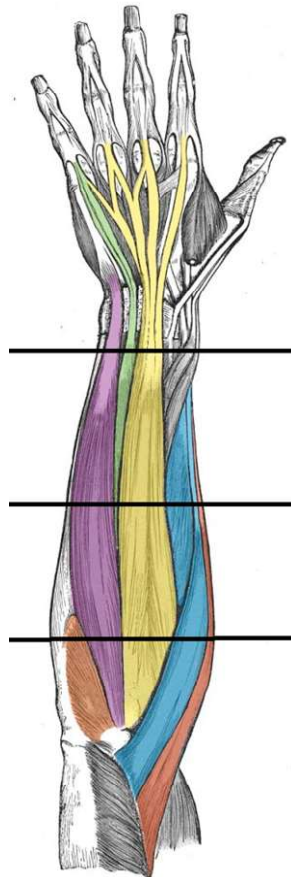
Tomando esto en consideración, se debe plantear un nuevo modelo que permita la instalación de los componentes internos en una placa de acrílico, como la que se ve en las figuras anteriores, con un ancho de 60mm y que resuelva los siguientes problemas:

1. Protección a componentes internos.
2. Apariencia física.
3. Mantenimiento.

Para resolver el problema 1 se propuso un antebrazo sólido que bloquee el acceso total a los componentes. Al tener un antebrazo con una superficie sólida se provee protección física contra impactos directos y descuidos que puedan dañar los componentes o sus conexiones. En este momento se debe considerar el problema 3, ya que este afecta en su ensamblaje, desensamblaje y revisión futura. Para solucionar esto se propuso realizar el antebrazo sólido en dos secciones las cuales se conecten por el centro y su montaje y sujeción se realice por medio de pernos.

La resolución del problema 2 requiere de un diseño que considere el antebrazo anterior, en el cual la apariencia física dependía de dos factores: el estado y cuidados de los componentes internos, así como la estructura en sí. El primer factor se resuelve con el diseño propuesto, ya que este bloquearía la visión de los elementos por lo tanto independizando la apariencia de la prótesis de estos mismos. El segundo factor se debe abordar con la forma y proporciones de la estructura. Por esto, la estructura ya no puede ser una forma geométrica simple.

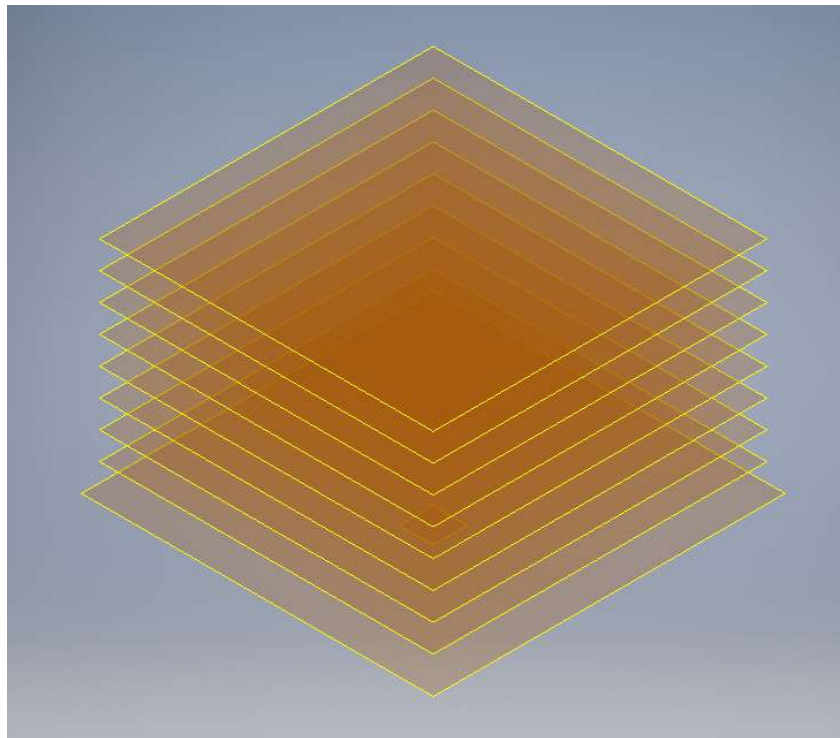
Figura 154. Divisiones propuestas para el modelo de la prótesis.



En la figura anterior se observa los músculos en la capa superficial del antebrazo. Estos en gran manera determinan la forma y proporciones. Debido a que nuestro diseño propone una forma sólida dividida en dos partes se debe elegir un lugar conveniente para realizar esta división. Las líneas indican las divisiones propuestas para el nuevo modelo. La parte superior, delimitadas por la línea en la muñeca y la línea en el centro, tiene, de manera general, la forma de cilindro truncado. La parte inferior es más complicada ya que comienza con un aumento en su diámetro y luego disminuye.

a. Planos de trabajo en inventor. Para modelar los segmentos anteriores, se trabajó con una resolución que nos permita capturar las formas del antebrazo. Para esto se crearon varios planos de trabajos, en inventor, a una distancia de 1 cm cada uno.

Figura 155. Planos de trabajos definidos cada 1cm en inventor.



[Elaboración propia]

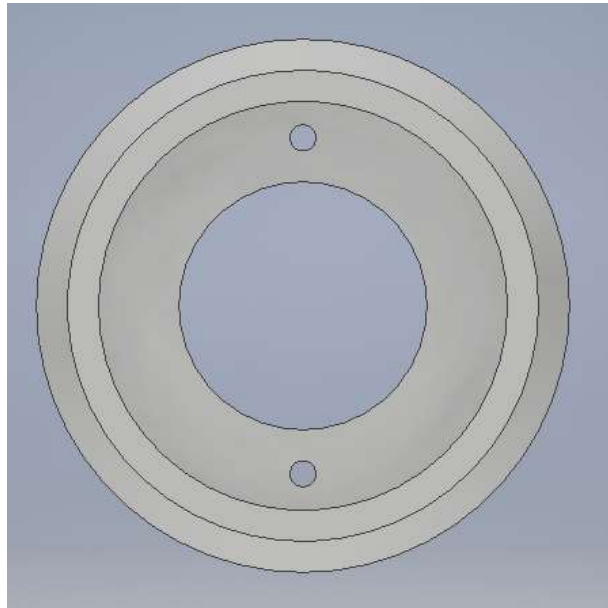
b. Resultados del diseño de la sección superior del antebrazo. A continuación, se muestra el diseño del modelo para la parte superior del antebrazo la cual se conecta con la mano por medio de la muñeca. La conexión se realiza con dos tornillos M4, cuyos agujeros ya existen en el modelo de la muñeca.

Figura 156. Vista isométrica del primer modelo de la sección superior del antebrazo.



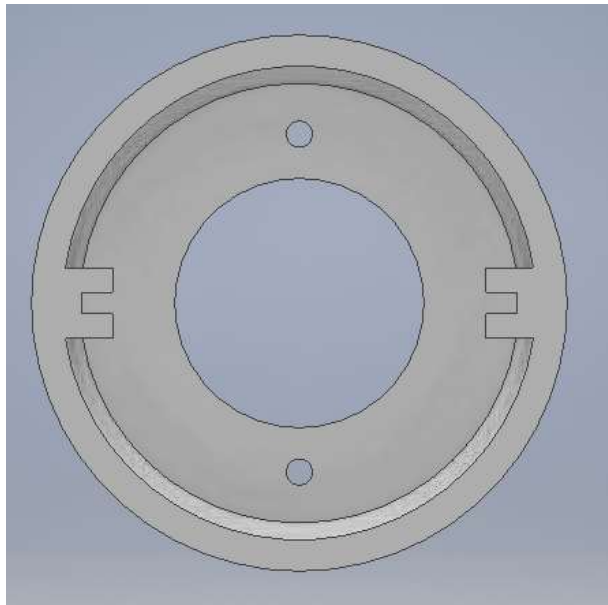
[Elaboración propia]

Figura 157. Vista superior del primer modelo de la sección alta del antebrazo.



[Elaboración propia]

Figura 158. Vista inferior del primer modelo de la sección baja del antebrazo.



[Elaboración propia]

c. Diseño y modelado del método de sujeción. La conexión entre ambas secciones se debe realizar de tal forma que su ensamblaje y desensamblaje sea fácil, pero durante operaciones normales mantenga ambas partes unidas. Debido a que la sección alta del antebrazo posee las dimensiones de menor magnitud, esta definió el tamaño y lugar de los puntos de sujeción. Se decidió realizar la conexión con pernos M3. Aprovechando las dimensiones estándar de las tuercas, se dejó un espacio en el cual se pueda colocar ésta más la rotación está restringida geoméricamente. Esto facilitará el ensamble y desensamble.

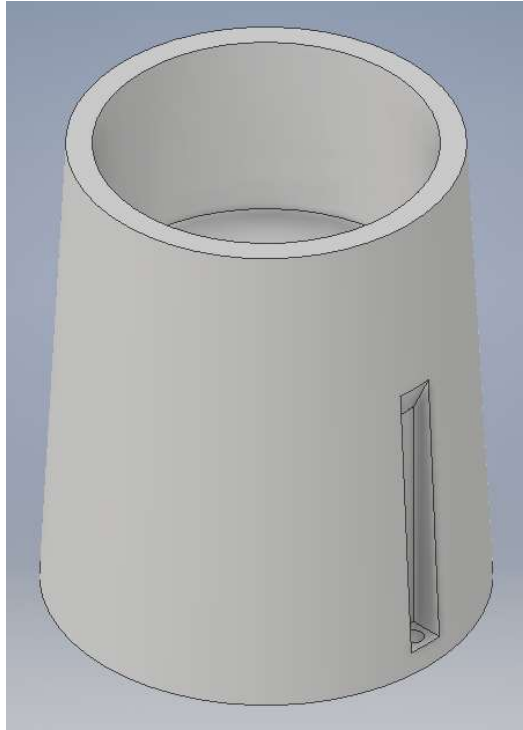
A continuación, se muestra la parte alta del antebrazo ya diseñado, pero ahora ya incluye el método de sujeción propuesto.

Figura 159. Vista lateral derecha del modelo final de la sección alta del antebrazo.



[Elaboración propia]

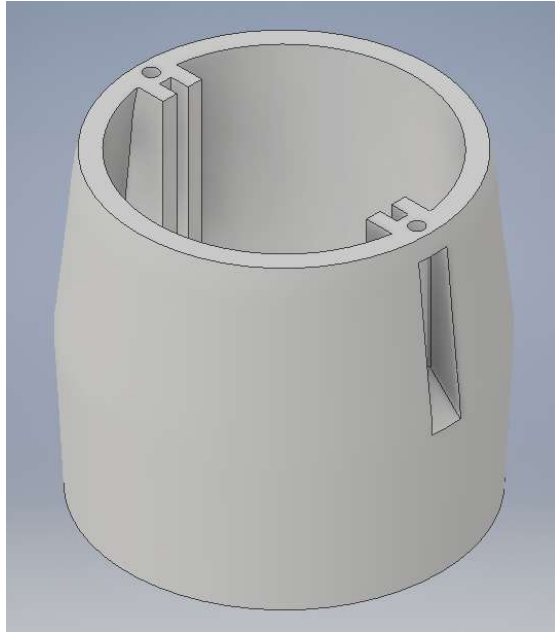
Figura 160. Vista isométrica del modelo final de la sección alta del antebrazo.



[Elaboración propia]

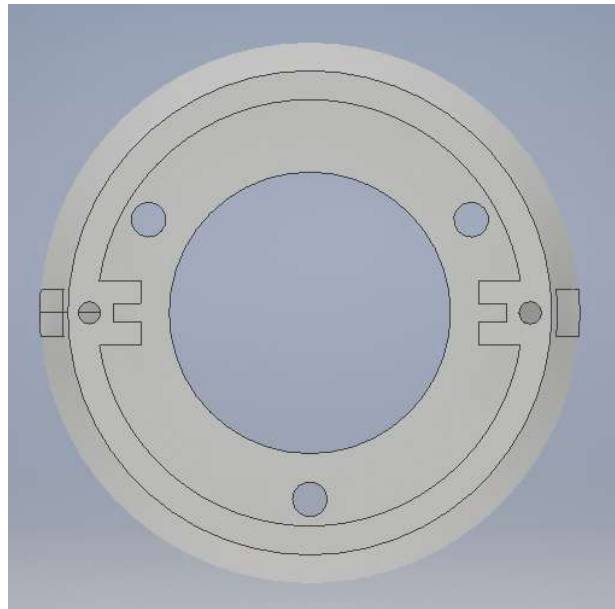
d. Resultados del diseño de la sección inferior del antebrazo. El diseño de la sección baja del antebrazo se dimensiona en un extremo para el acople con la sección alta por medio de los pernos. También, recordando que durante la tercera etapa de trabajo de la prótesis se implementó un codo, se diseñaron tres agujeros en la base que le permite acoplarse a este. Además, la sección posee cambios de geometría cada 1cm de distancia el cual permite modificar la forma para ajustarse a la forma buscada.

Figura 161. Vista isométrica del modelo final de la sección baja del antebrazo.



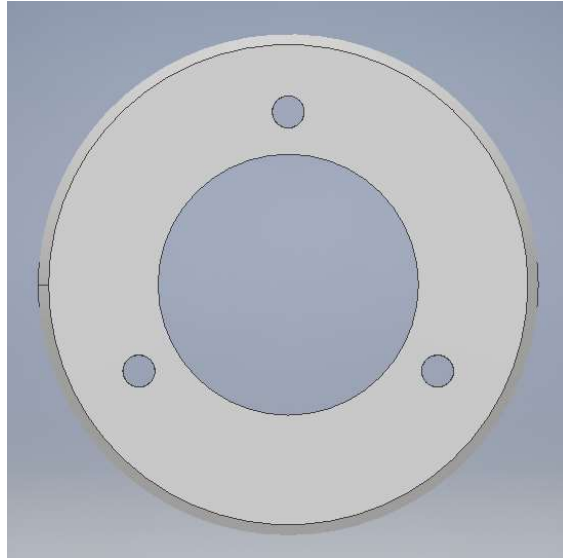
[Elaboración propia]

Figura 162. Vista superior del modelo final de la sección baja del antebrazo.



[Elaboración propia]

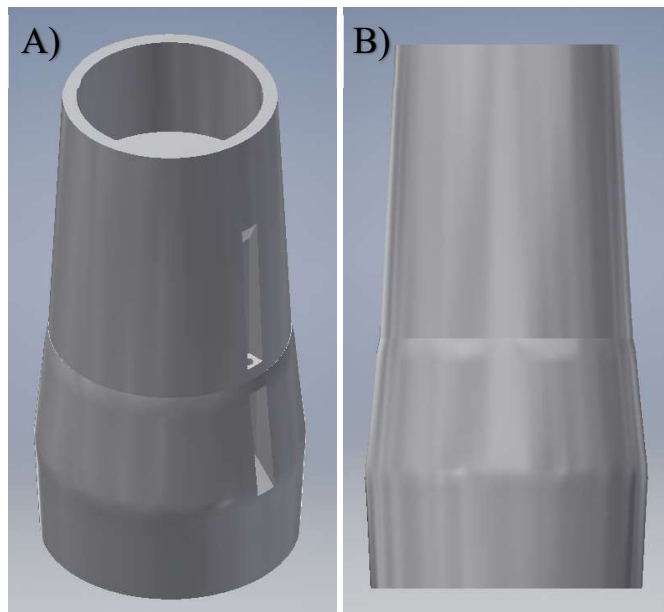
Figura 163. Vista inferior del modelo final de la sección baja del antebrazo.



[Elaboración propia]

e. Modelado del ensamblaje completo del antebrazo.

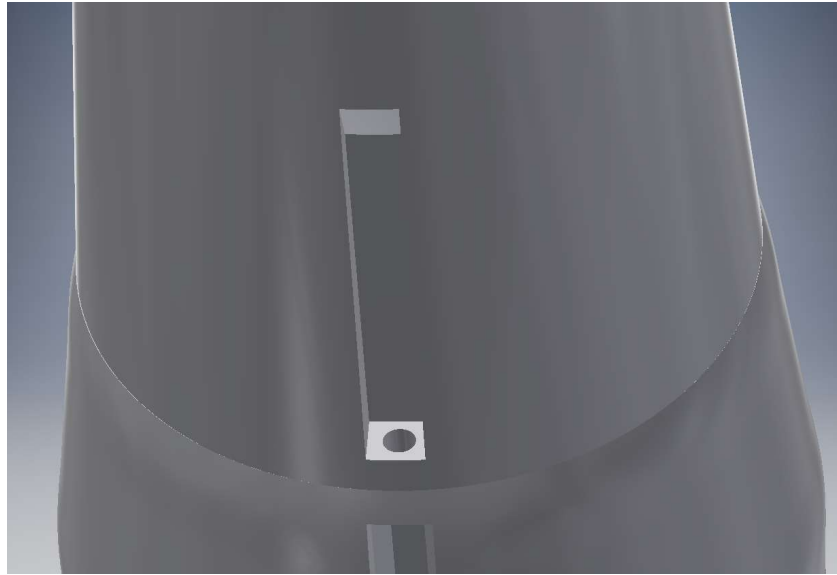
Figura 164. A) Vista isométrica y B) vista lateral del ensamblaje del modelo final del antebrazo.



[Elaboración propia]

En las siguientes figuras se muestra una ampliación de la geometría que permitirá la conexión de ambas secciones. El perno que se utilizó es un M3 de cabeza hexagonal.

Figura 165. Ampliación del punto de conexión en la sección alta del antebrazo.



[Elaboración propia]

Figura 166. Ampliación del punto de conexión en la sección baja del antebrazo.



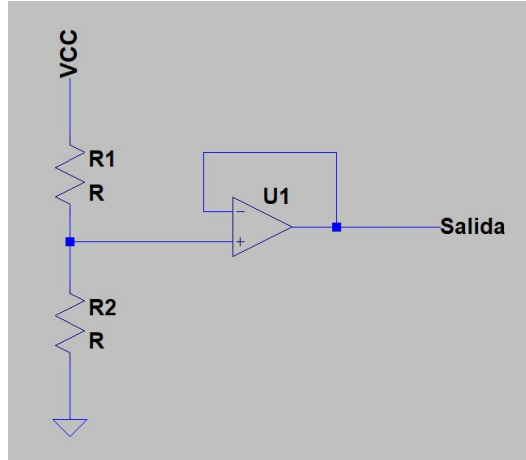
[Elaboración propia]

4. Implementación de sensores. La aplicación de los sensores dentro del sistema de la prótesis es medir la fuerza aplicada por los dedos al momento de realizar una pose. En módulos anteriores se han usado para el mismo propósito por lo que se decidió que la mejor opción era conservar estos dentro del diseño, aprovechando el hecho que su función y planteamiento cumple con los requisitos planteados para este trabajo. El procedimiento realizado sobre estos consistió en reemplazar los componentes -sensores, cableado y moldes de silicón- por nuevos componentes e instalarlos de nuevo en la misma configuración, este procedimiento no es cubierto por este módulo de trabajo.

a. Realimentación de la fuerza. El resultado de la investigación del comportamiento de los sensores resistivos de fuerza mostró que la relación entre la fuerza aplicada y la resistencia total entre las terminales no es de forma lineal. Esto resulta ser una problemática para la lectura precisa de fuerza ya que se debe modelar el comportamiento de tal manera que se pueda calcular fácilmente en un microcontrolador. La relación entre ambas magnitudes se puede determinar usando un método numérico de interpolación usando una matriz de información obtenida. Este procedimiento fue realizado en módulos anteriores de la prótesis. La ecuación que relaciona el valor de leído en el ADC integrado en el microcontrolador y la fuerza resulta ser de comportamiento logarítmico.

Un fenómeno conocido cuando se trabaja con circuitos analógicos, especialmente con divisores de voltaje, es que el acople entre circuito puede ocasionar cambios en el potencial buscado. Esto suele suceder cuando no se consideran las impedancias de ambas partes. Para evitar problemas de esta índole, se agregó un seguidor de voltaje, de esta manera la impedancia de entrada del Arduino siempre será lo suficiente mayor para que el voltaje no se vea afectado y al mismo tiempo evitar problemas con tiempo de carga del capacitor para la lectura de valores analógicos.

Figura 167. Circuito para la lectura de un sensor resistivo.



[Elaboración propia]

Para poder obtener una idea de cuanta fuerza ésta siendo aplicada sobre el sensor, es necesario tener una ecuación que nos relacione la fuerza aplicada con el valor leído en el ADC del Arduino. Para esto es necesario tomar medidas y obtener la ecuación usando estos puntos y extrapolar para el resto de los valores. Es importante que, durante las mediciones, la distribución de la fuerza y el punto de aplicación se mantenga constante sobre el mismo punto del sensor. Para esto, se realizó, por medio de impresión 3D, una base que permite distribuir el peso como se desea.

Figura 168. Base impresa en 3D para distribuir pesos sobre el sensor.



[Elaboración propia]

De esta manera se obtuvieron 61 medidas con diferencias de pesos entre 6g y 11g. Algunos de los puntos se presentan en la tabla a continuación.

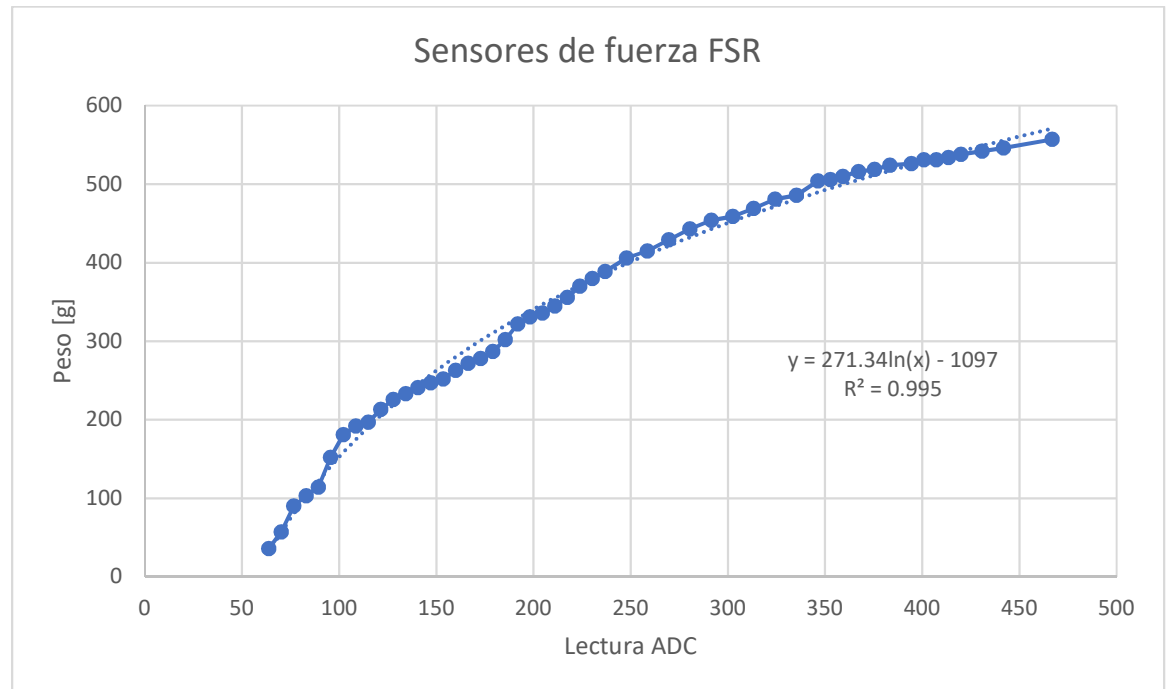
Tabla XXXII. Medidas obtenidas por el ADC al aplicar distintas fuerzas sobre el sensor FSR.

Peso	Lectura del ADC
57.46	0
63.86	36
76.72	90
83.03	103
95.64	152
108.53	192
127.88	226
159.96	263
179.04	287
210.96	345
247.81	406
302.47	459
352.78	506
400.77	531
466.84	557

[Elaboración propia]

Aquí cabe notar algo importante, la yema, por ser de un material elástico, absorbe una porción del peso antes de aplicar la fuerza sobre el sensor. Esto es importante ya que nos determina algunas consideraciones que debemos tener, como, por ejemplo, no se podrá controlar fuerzas pequeñas ya que no se podrá leer sobre el sensor. Con estos valores se usó la función de Data Trend line de Excel para obtener la ecuación. El resultado se muestra en la figura a continuación.

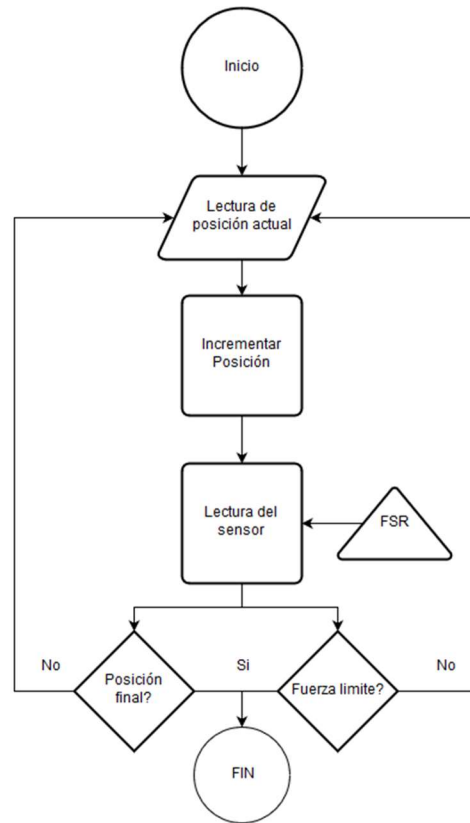
Figura 169. Gráfica de las mediciones obtenidas de la caracterización del sensor en Excel.



[Elaboración propia]

b. Protección de los actuadores. Para mejorar ligeramente el agarre de la mano, se implementó un esquema simple para esto. Debido a la complejidad del modelo mecánico de un dedo de tres falanges, se descartó usar un método de control convencional. Además, por las discontinuidades del comportamiento de la fuerza durante la trayectoria, también se descartó el uso de controladores como PID. Por esto, se implementó una forma simple de control de fuerza. El funcionamiento de este se observa en el diagrama de flujo a continuación.

Figura 170. Diagrama de flujo del esquema de control del agarre implementado.



[Elaboración propia]

Otro problema presente es que en módulos anteriores no existe una forma de protección para los actuadores en caso ocurra una sobrecarga. La sobrecarga puede ser causada por una obstrucción accidental del movimiento o por el forzado intencional de una posición sobre un objeto. En ambos casos, es necesario evitar daño a los servomotores y la estructura en general. La medición individual de corriente en cada línea de alimentación resulta ser impráctico por el espacio disponible dentro del nuevo antebrazo. Por lo tanto, se propuso utilizar la medición ya existen de fuerza en los sensores para agregar una protección adicional. Esta trabajará bajo límites establecidos en los cuales se conozca que el valor de corriente no exceda el valor de operación.

5. **Módulo de comunicación.** La programación del componente emisor, así como la del receptor, se realizó usando el software Arduino IDE. Este se realiza en lenguaje C, pero posee la ventaja que simplifica el control de registros, y por lo tanto el control de entradas y salidas, así como el manejo de librerías. Esta última característica fue de suma importancia debido a que uno de los requisitos del trabajo es completarlo de tal manera que pueda ser utilizado y mejorado en siguientes etapas. Cabe mencionar que el software realiza el trabajo de un compilador, y como algunos compiladores de C, al momento de procesar el código, éste incluye librerías necesarias. En su mayoría, los programas en C requieren de una librería conocida como la librería estándar [35]. De manera similar, los programas para plataformas de Arduino requieren de una librería especial para operar, la cual se encarga de definir los nombres, direcciones y operaciones de registro disponibles. También, existen otro tipo de librerías las cuales agregan funcionalidad adicional. Estas suelen ser obtenidas de terceros o pueden ser diseñadas específicamente para la aplicación. Para el desarrollo de la programación del dispositivo emisor y receptor, se utilizó la librería recomendada por Arduino para el manejo de nRF24L01. Esta fue desarrollada para el uso óptimo del potencial del chip, así como para eliminar problemas, aumentar la confiabilidad, incrementar la compatibilidad con diferentes procesadores y dejar un registro documentado claro para el desarrollo de otras aplicaciones. [34]

a. **Operación del emisor.** El emisor cumple con dos tareas esenciales: la recepción y procesamiento de las señales de entrada y la comunicación de estas al receptor colocado dentro de la prótesis. Durante el bucle infinito se revisa constantemente la señal del sensor y únicamente cuando este cumple con los requisitos de voltaje y tiempo adecuados, se realiza la clasificación según la duración del pulso. El tiempo será medido usando una de las funciones incluidas en la librería de Arduino llamada `millis`, la cual almacena en un registro el valor de tiempo transcurrido desde el inicio de operación. Guardando el tiempo en el cual se detectó el flanco de subida y el instante en el cual la señal baja, se puede determinar la cantidad de milisegundos que esta pasó en alto. Luego de clasificada la señal, se codifica un mensaje, dependiendo del emisor -cada uno posee un código diferente- y al código se le suma 1 si el pulso fue corto, 2 si es medio y 3 si es largo. Los códigos usados para los emisores son: 11695 y 13785.

Tabla XXXIII. Clasificación del pulso de control según la duración.

Tipo	Tiempo mínimo	Tiempo Máximo
Ruido	0	0.1
Pulso corto	0.1	0.6
Pulso medio	1.0	1.6
Pulso largo	2.0	-

[Elaboración propia]

Tabla XXXIV. Código de identificación de los controladores.

Dispositivo	Código
Controlador 1	11695
Controlador 2	13785

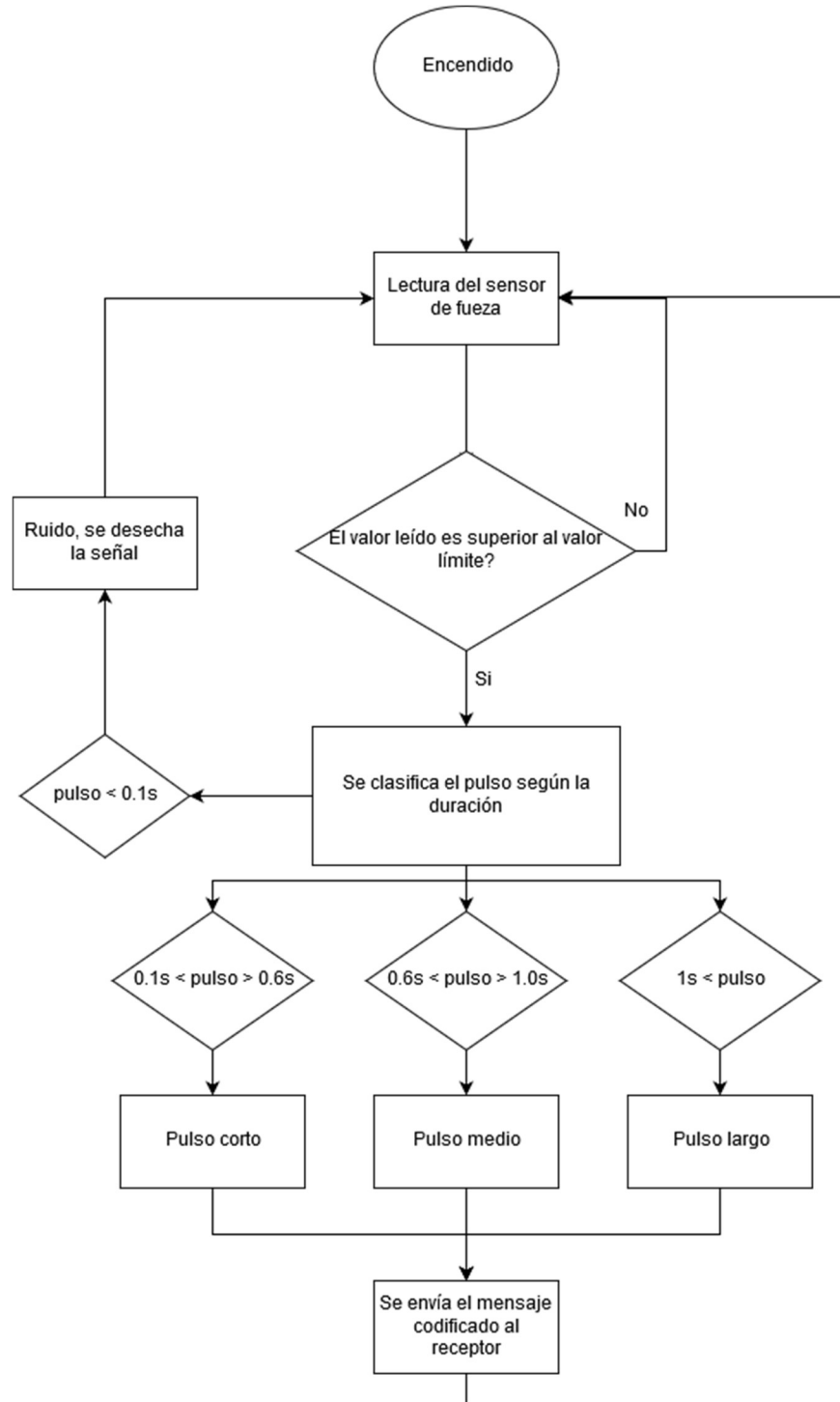
[Elaboración propia]

Tabla XXXV. Codificación de mensajes.

Origen	Duración	Mensaje
Emisor 1	Corto	11696
	Medio	11697
	Largo	11698
Emisor 1	Corto	13786
	Medio	13787
	largo	13788

[Elaboración propia]

Figura 171. Diagrama de flujo de la operación del emisor.



[Elaboración propia]

b. Pseudocódigo del emisor

Inicio del programa

Importación de librerías
 Configuración de pines del módulo RF
 Declaración de variables
 Definición de los canales de comunicación

Configuración:

Inicio del módulo serial
 Inicio del módulo RF
 Configuración del módulo RF
 Apertura de canales de comunicación

Fin de la configuración

Ciclo:

Lectura del sensor resistivo

Si ocurrió un flanco positivo en el sensor:

Medición del tiempo inicial
 Mientras la señal este en alto:
 Esperar al flanco de bajada
 Medición del tiempo final

Calculo de la duración del pulso

Si el tiempo es mayor a 100ms:

 Si el tiempo es mayor a 100ms y menor que 600ms:

 Pulso corto
 Codificación del mensaje
 Enviar el mensaje al receptor

 Si el tiempo es mayor a 600ms y menor que 1000ms:

 Pulso medio
 Codificación del mensaje
 Enviar el mensaje al receptor

 Si el tiempo es mayor que 1000ms:

 Pulso largo
 Codificación del mensaje
 Enviar el mensaje al receptor

Si el tiempo es menor a 100ms:

 Se considera como ruido

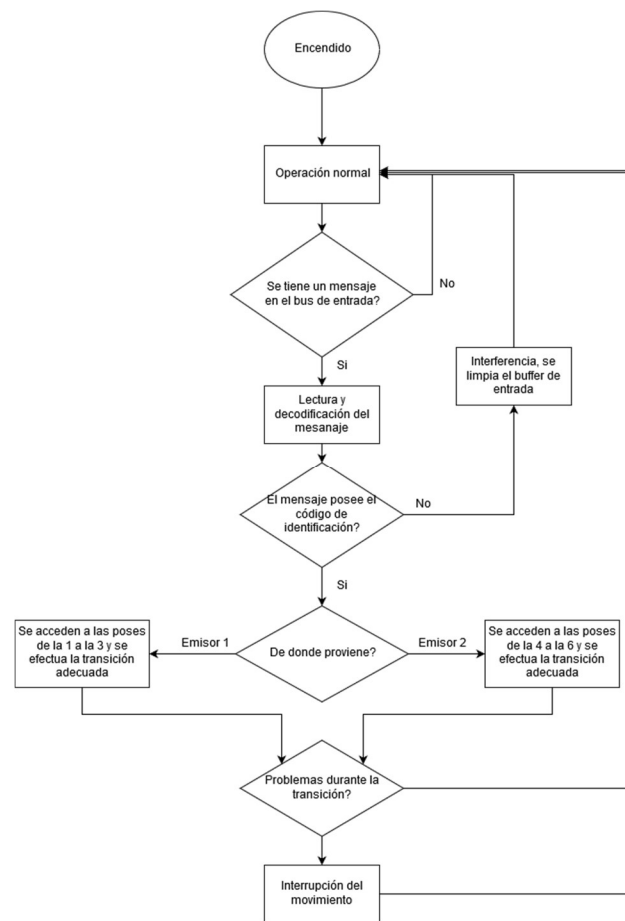
Limpieza de variables

Fin del ciclo

Fin del programa

c. Operación del receptor. El receptor cumple con la principal labor de recibir la realimentación proveniente de los sensores resistivos en las yemas de los dedos y controlar el movimiento de los actuadores de la mano. En general, se considera que este posee dos estados: modalidad regular y ajuste de actuadores. Durante la operación normal la única tarea realizada es la lectura de los cinco canales analógicos. Cuando se recibe un mensaje en el bus de entrada del transceptor RF, se debe verificar que el mensaje posea el código adecuado. Una vez se determina que la información proviene de alguno de los dos emisores, se decodifica para definir el origen y el tipo de señal. Si todo se cumple adecuadamente, ocurre una transición entre estados. A continuación, se entra al modo de ajuste de actuadores y se procede a realizar la transición entre la pose anterior o presente y la pose solicitado por el control. Durante este movimiento puede ocurrir un problema de sobrecarga sobre alguno de los actuadores debido a una fuerza excesiva, por lo que se lee constantemente las entradas analógicas y en caso alguna se salga de los parámetros aceptables, el movimiento se detiene inmediatamente. Si el desplazamiento se realiza sin ningún inconveniente, se retorna al estado regular de operación.

Figura 172. Diagrama de flujo para la operación del receptor.



[Elaboración propia]

d. Pseudocódigo del receptor

Inicio del programa

Importación de librerías
 Configuración de pines del módulo RF
 Declaración de variables
 Definición de los canales de comunicación

Configuración:

Inicio del módulo serial
 Definición de canales analógicos para sensores
 Inicio del módulo RF
 Configuración del módulo RF
 Apertura de canales de comunicación
 Configuración de los actuadores
 Configuración de los sensores
 Fin de la configuración

Ciclo:

Lectura de los 5 canales analógicos
 Si existe información en el bus de lectura del RF:
 Lectura del mensaje
 Limpieza del bus de entrada
 Si el mensaje posee un código de identificación adecuado:
 Decodificación del mensaje
 Si proviene del emisor 1:
 Si la señal fue un pulso corto:
 Se solicita la posición 1
 Si los sensores indican una sobrecarga sobre un actuador:
 Detener movimiento, conservando la posición
 Si la señal fue un pulso medio:
 Se solicita la posición 2
 Si los sensores indican una sobrecarga sobre un actuador:
 Detener movimiento, conservando la posición
 Si la señal fue un pulso largo:
 Se solicita la posición 3
 Si los sensores indican una sobrecarga sobre un actuador:
 Detener movimiento, conservando la posición
 Si proviene del emisor 2:
 Si la señal fue un pulso corto:
 Se solicita la posición 4
 Si los sensores indican una sobrecarga sobre un actuador:
 Detener movimiento, conservando la posición
 Si la señal fue un pulso medio:
 Se solicita la posición 5
 Si los sensores indican una sobrecarga sobre un actuador:
 Detener movimiento, conservando la posición
 Si la señal fue un pulso largo:
 Se solicita la posición 6
 Si los sensores indican una sobrecarga sobre un actuador:
 Detener movimiento, conservando la posición
 Si el mensaje no posee un código de identificación conocido:
 Se considera como interferencia y es ignorado

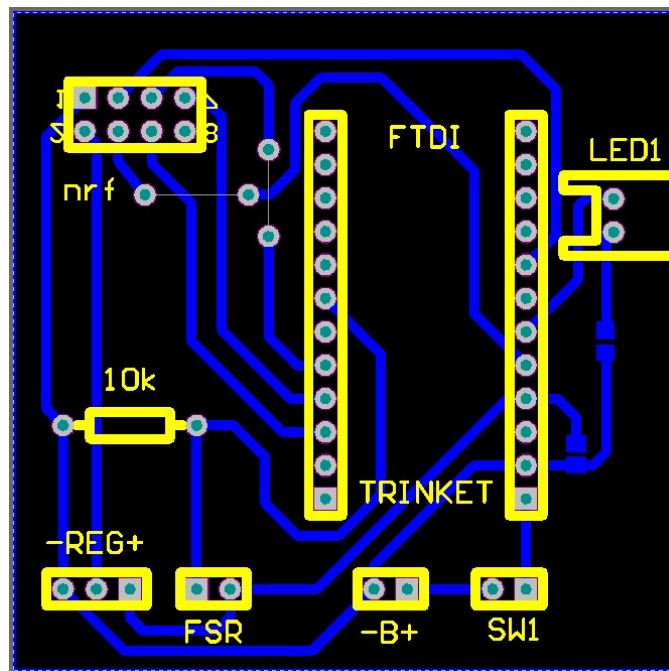
Fin del ciclo

Fin del programa

6. Fabricación de placas PCBs. El principal problema encontrado para el diseño de las placas fue el tamaño limitado disponible. El controlador debe ser tener un tamaño aceptable para portarse cómodamente en el tobillo. Por esto, se trató de realizar el dispositivo completo en dimensiones menores a las de un cubo de 6cm. El diseño esquemático y la organización PCB se realizó por medio del software de fuente abierta, Fritzing. El motivo principal por el cual se usó este programa en lugar de otros más completos es debido a la capacidad de ingresar librerías de proveedores externos. Aunque otros poseen la misma característica, Fritzing fue la única que tenía librerías compatibles de todos los componentes necesarios, particularmente el nRF24L01+ y el Pro Trinket. Ambas PCB fueron diseñados para placas de cobre de un solo lado.

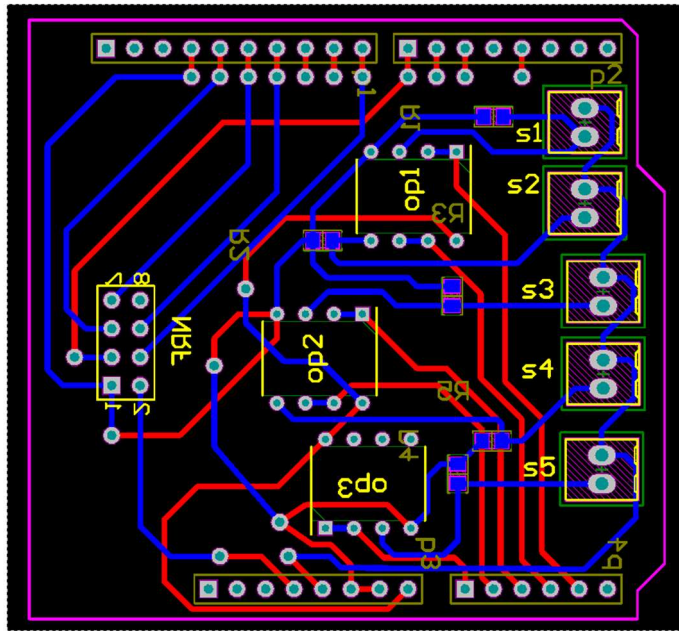
a. Diseño del circuito del controlador. Para poder realizar las conexiones planteadas por el diseño del controlador propuesto se realizó el circuito mostrado a continuación. La alimentación se realiza con baterías, pero puede ser detenida con el interruptor colocado. La conexión con el regulador de voltaje de hace por medio de terminales de pines. Para poder proveer una señal más limpia al módulo nRF24L01+ se coloca un capacitor entre las líneas de voltaje y tierra el cual cumple la función de un filtro.

Figura 173. Diseño de la placa PCB para el controlador.



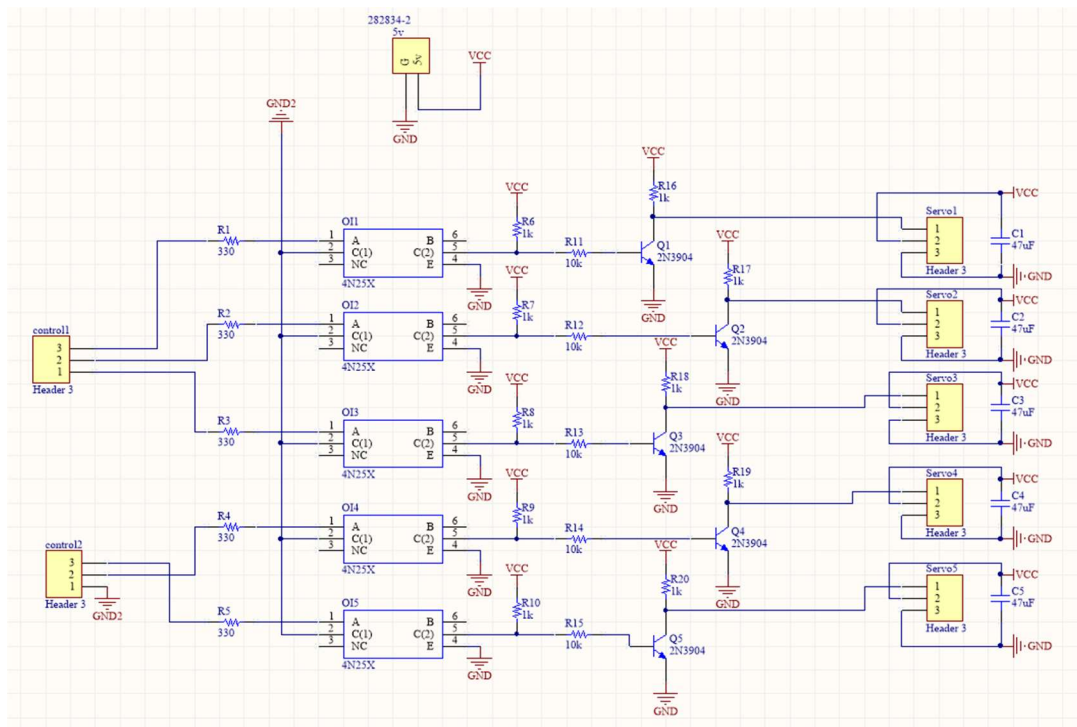
[Elaboración propia]

Figura 175. Diseño de la placa PCB para el circuito principal de la prótesis.



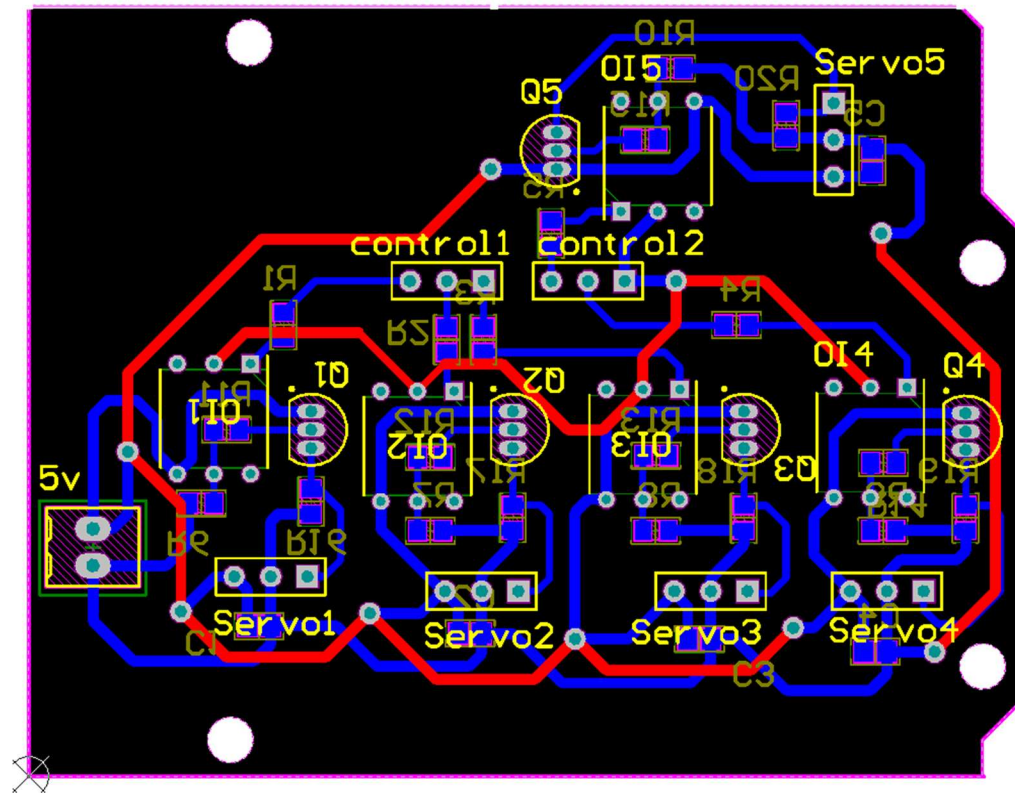
[Elaboración propia]

Figura 176. Esquemático del circuito de potencia de la prótesis.



[Elaboración propia]

Figura 177. Diseño de la placa PCB para el circuito de potencia de la prótesis.



[Elaboración propia]

7. Implementación controlador y antebrazo

a. Programación de las entradas y salidas digitales usando registros. Una alternativa que se exploró en la programación de los microcontroladores fue obviar la librería interna de Arduino y trabajar directamente sobre los registros. La ventaja de trabajar de esta manera es que la librería de Arduino es de uso general para todas las aplicaciones, por lo que incluye protecciones adicionales en su operación las cuales son útiles en casos generales, pero en casos específicos suelen ser innecesarias y ralentizan la ejecución del código.

El manejo de los pines digitales se realiza de manera tal que se configuran los pines según el puerto al que este pertenezcan. Esto se hace mediante la modificación de los registros DDRB y PORTB. La lectura o escritura de un valor en el pin se debe hacer modificando el valor correspondiente en el registro PINB.

Tabla XXXVI. Configuración usada de registros para el manejo de entradas y salidas digitales.

Puerto	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
DRB (D)	1	1	1	1	1	1	1	0
ORT (P)	1	1	1	0	0	0	0	0

[Elaboración propia]

En la tabla anterior se muestra una configuración de registros típica. En esta, los pines 1 al 7 del puerto B se encuentran programados como salidas digitales y el pin 0 se encuentra programado como entrada digital. Adicionalmente, las salidas 5 a la 7 son colocadas como 1 lógicos y de la 1 a la 4 son 0 lógicos. En el caso del bit 0, el registro PORTB se encarga de decirle al microcontrolador si se desea utilizar una resistencia “pull-up” en la entrada, ya que este valor es 0, se desactiva el uso de esta característica.

b. Programación de la lectura analógica usando registros. La lectura analógica es más complicada ya que el chip solo posee un convertidor analógico a digital, por lo que utiliza un multiplexor para ofrecer la lectura de varios pines analógicos. Este multiplexor se debe configurar cada vez que se desea hacer una lectura de pines distintos. Esto se realiza por medio del registro ADMUX, en los bits del 0 al 1.

Tabla XXXVII. Selección del canal de lectura usando los bits del 0 al 3 del registro ADMUX.

Configuración de los bits 0 al 3	Función
0	Lectura del ADC0
1	Lectura del ADC1
10	Lectura del ADC2
11	Lectura del ADC3
100	Lectura del ADC4
101	Lectura del ADC5

Continuación Tabla XXXVII. Selección del canal de lectura usando los bits del 0 al 3 del registro ADMUX.

Configuración de los bits 0 al 3	Función
110	Lectura del ADC6
111	Lectura del ADC7
1000	Sensor de temperatura
1001	Reservado
1010	Reservado
1011	Reservado
1100	Reservado
1101	Reservado
1110	1.1V
1111	GND

[7]

Otra configuración necesaria para operar es en el registro ADCSRA el cual se encarga del control y estado del convertor analógico a digital.

Tabla XXXVIII. Bits del registro ADCSRA.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Designación	DEN	DSC	DATE	DIF	DIE	DPS2	DPS1	DPS0

[7]

Tabla XXXIX. Descripción de los bits del registro ADCSRA.

Bit	Función
ADEN	Habilitador del ADC.
ADSC	Inicio de conversión, este le indica al microcontrolador en que momento iniciar el proceso de conversión analógica a digital.
ADATE	Permite la conversión automática cuando se detecta un flanco positivo en el pin.
ADIF	Bandera de interrupción, esta toma el valor de 1 lógico cuando el proceso se ha terminado.
ADIE	Habilitador de la interrupción causada por el fin de conversión.
ADPS0- ADPS2	Pre-escala para la frecuencia del reloj de conversión y el reloj del sistema.

[7]

La resolución del ADC en el chip Atmega328P es de 16 bits. Lo que significa que el resultado de la operación de conversión es colocado en 2 registros de 8 bits, denominados ADCL y ADCH, los cuales representan los 8 valores menos significativos y los 8 valores más significativos respectivamente.

Tabla XL. Configuración usada de los registros para la lectura analógica.

Puerto	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
AD_MUX	0	0	1	1	0	0	0	0
AD_CSRA	1	0	0	1	0	1	1	1

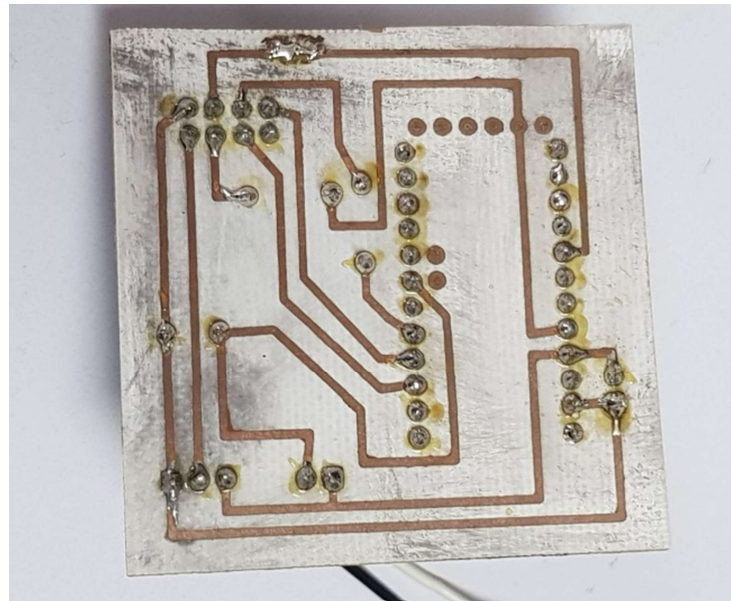
[Elaboración propia]

c. Problemas encontrados durante la programación. Durante el desarrollo de la programación se logró controlar las entradas digitales y analógicas usando registros, pero al implementarse la comunicación surgieron problemas que no pudieron ser resueltos. Específicamente, la comunicación no se podía establecer ya que el microcontrolador no reconocía el módulo conectado. Se cree que la causa de esto es que la librería requiere de funciones específicas de Arduino para establecer la comunicación entre ambos dispositivos. Por este motivo no fue posible implementar la programación por medio de registros y se retornó a utilizar la librería propia de Arduino.

8. Resultados

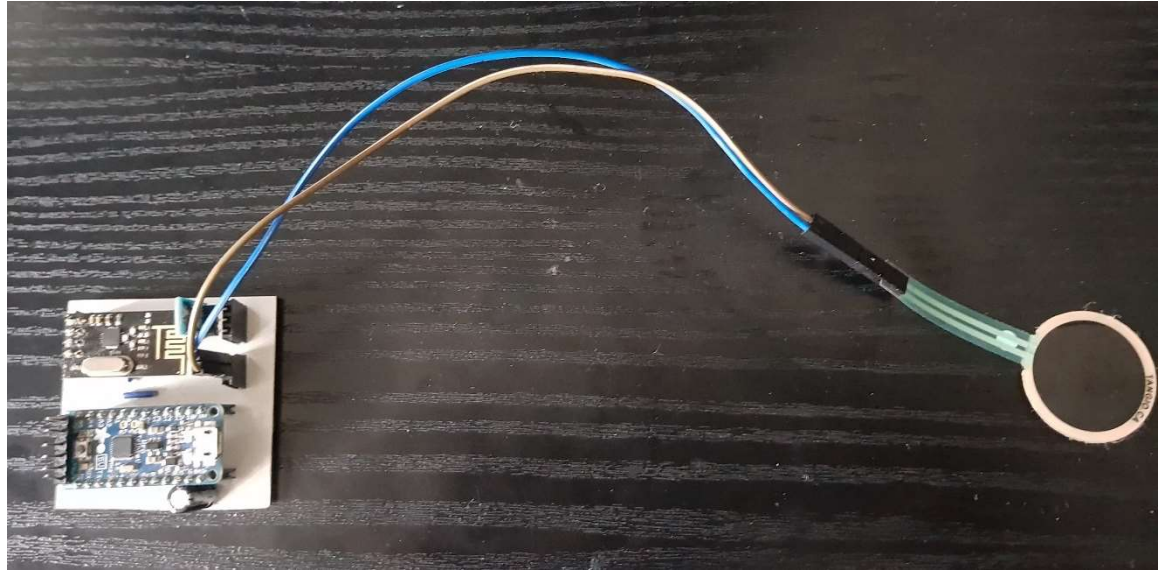
a. Resultados del controlador. Las fabricaciones de las PCB se realizaron en placas de cobre de 1 sólo lado usando el procedimiento por ácido. En la Figura 179 se puede observar las líneas de cobre que conectan las terminales de los componentes y en la Figura 180 se puede observar las terminales de pin disponibles para la inserción del microcontrolador, el módulo de radiofrecuencia, el regulador de voltaje y las terminales del sensor resistivo de fuerza.

Figura 178. Parte inferior de la placa PCB para el controlador.



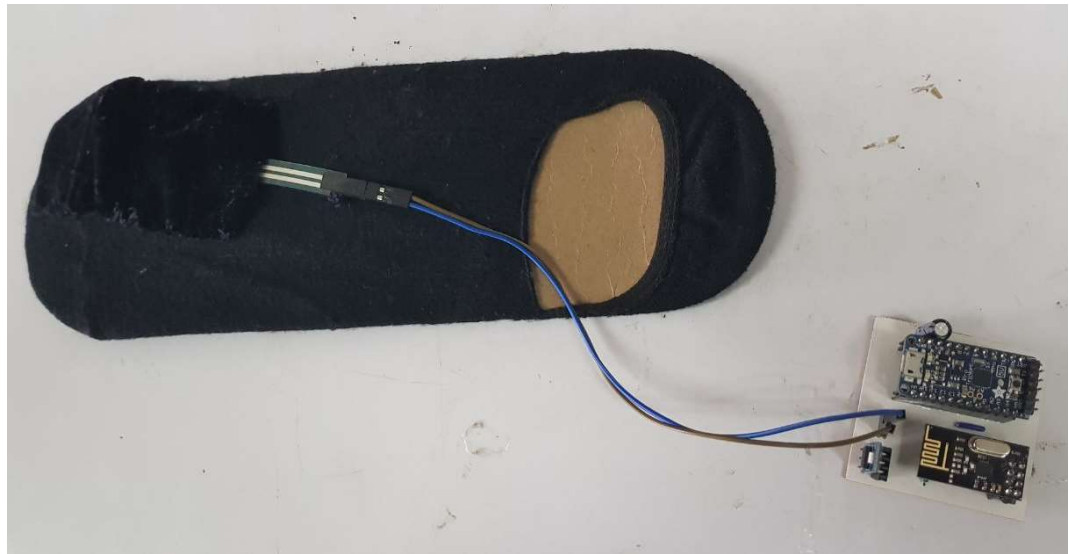
[Elaboración propia]

Figura 181. Controlador completo final.



[Elaboración propia]

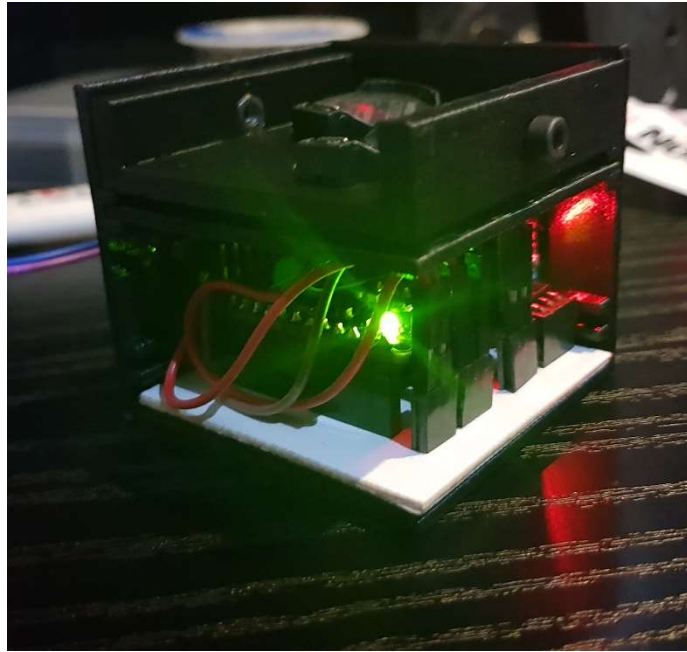
Figura 182. Controlador y plantilla.



[Elaboración propia]

El sensor de la Figura 182 luego es colocado dentro de la plantilla del pie como se ve en la Figura 183. el cual lo posiciona sobre el pulgar. El movimiento ocasiona una fuerza en el sensor al presionar la plantilla contra el zapato activando las señales de control.

Figura 183. Controlador encendido colocado dentro del case abierto.



[Elaboración propia]

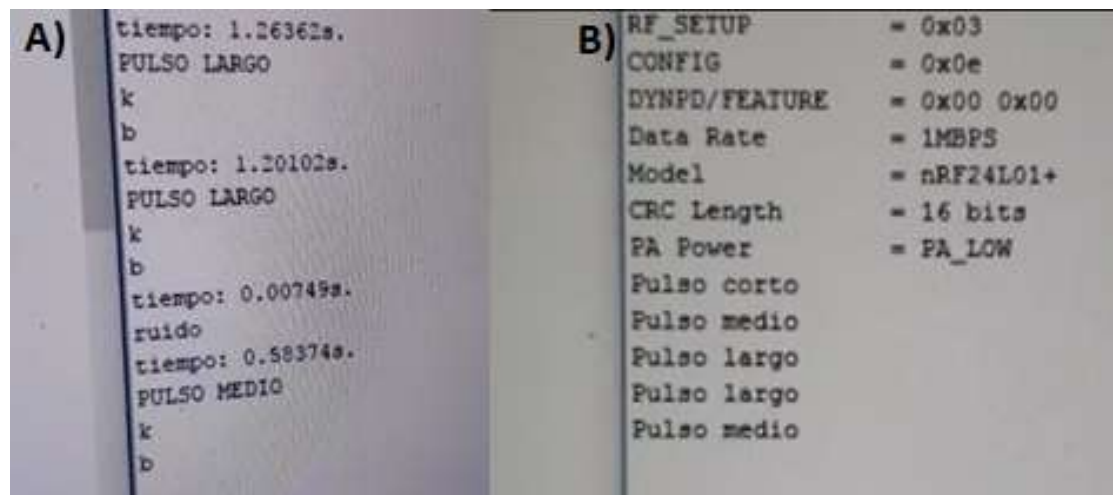
Figura 184. Controlador colocado dentro del case cerrado.



[Elaboración propia]

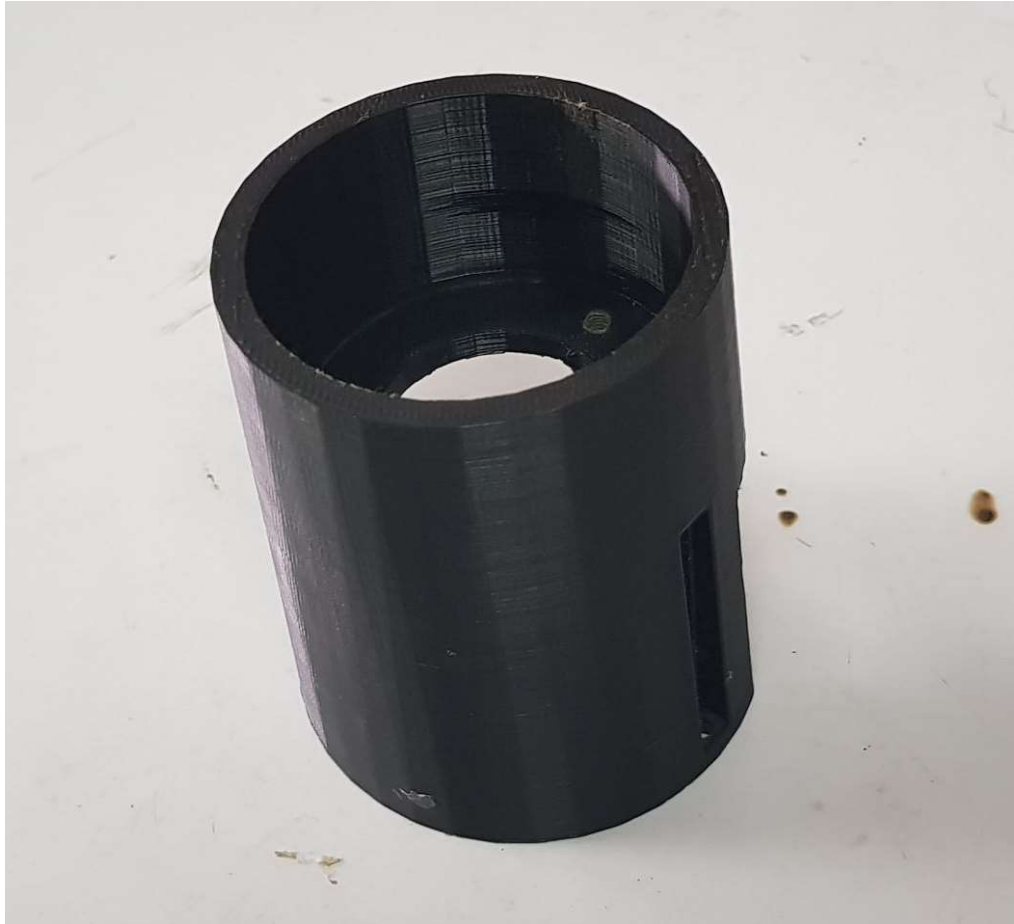
b. Resultados de la comunicación inalámbrica. En la Figura 186 se pueden observar las terminales de comunicación serial en el software Arduino IDE. En estas se escriben textos indicativos de la etapa en la cual se encuentra la ejecución del código y los resultados de las operaciones. En la parte A) se puede observar que el emisor indica el tiempo, seguido de la clasificación. Se pueden observar cuatro tiempos los cuales son clasificados adecuadamente según los parámetros establecidos anteriormente. En la parte B) se puede observar que el circuito principal recibe el mensaje enviado y lo despliega. Los últimos tres mensajes recibidos corresponden a los tres mensajes enviados en la parte A), por lo tanto, el mensaje es recibido y clasificado adecuadamente.

Figura 185. A) Resultados desplegados en la terminal serial del controlador y B) resultados desplegados en la terminal serial del circuito principal.



c. Resultados del antebrazo. La impresión de la parte alta del antebrazo tomó un tiempo aproximado de 4 horas y 30 minutos, la impresión de la parte alta tomó un aproximado de 5 horas y 30 minutos. Dando así un total de 10 horas de impresión para el antebrazo completo. El resultado se puede observar en las siguientes figuras.

Figura 186. Modelo de la parte alta del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.



[Elaboración propia]

Figura 187. Vista superior del modelo de la parte alta del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.



[Elaboración propia]

Figura 188. Vista inferior del modelo de la parte alta del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.



[Elaboración propia]

Figura 189. Modelo de la parte baja del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.



[Elaboración propia]

Figura 190. Vista superior del modelo de la parte baja del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.



[Elaboración propia]

Figura 191. Vista inferior del modelo de la parte baja del antebrazo fabricado en PLA mediante impresión en 3D.



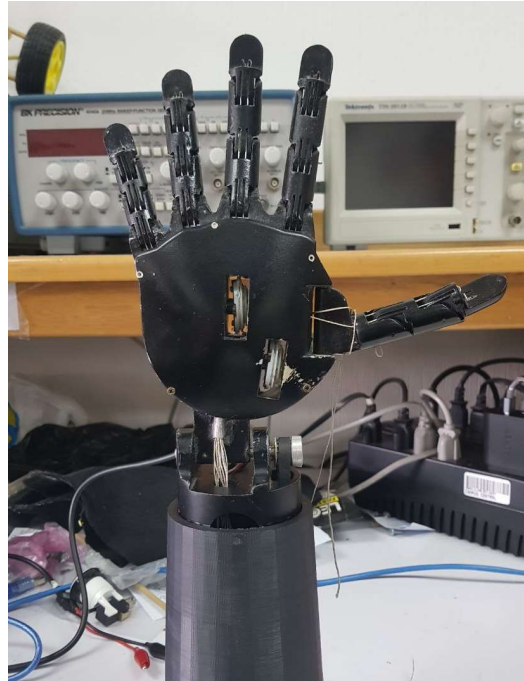
[Elaboración propia]

Figura 192. Ensamblaje completo del antebrazo.



[Elaboración propia]

Figura 193. Ensamblaje del antebrazo y la mano.



[Elaboración propia]

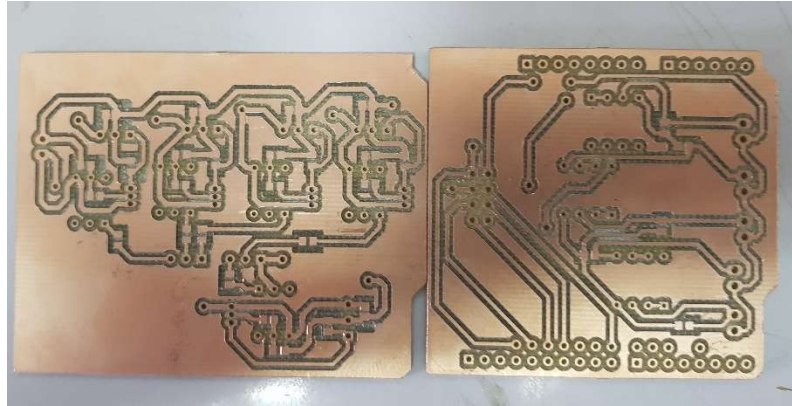
Figura 194. Ensamblaje completo de la prótesis.



[Elaboración propia]

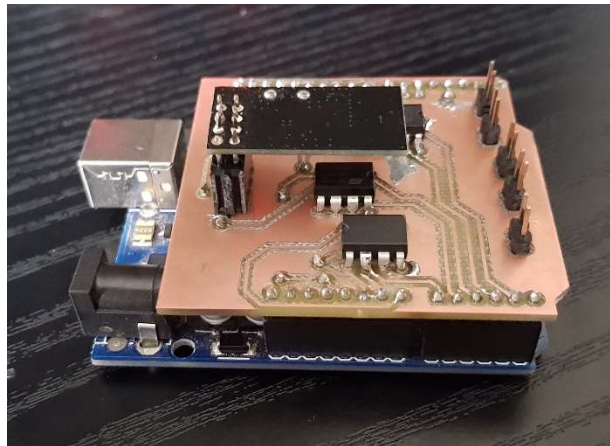
d. Resultados de las poses. Las placas usadas para el control de los sensores y el movimiento de los actuadores se muestran a continuación.

Figura 195. Parte inferior de las placas PCB. A la izquierda, placa de potencia; A la derecha, placa de control.



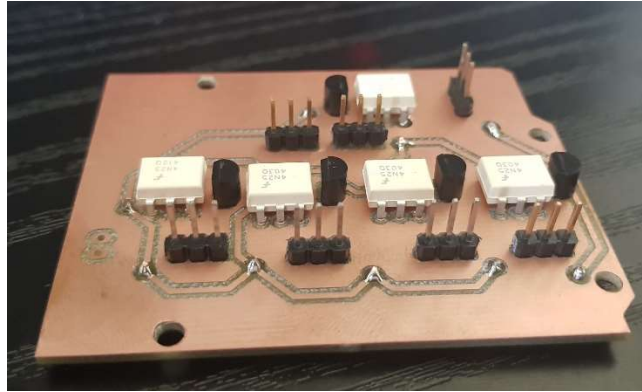
[Elaboración propia]

Figura 196. Placa de control conectada al Arduino Uno.



[Elaboración propia]

Figura 197. Placa de potencia final.



[Elaboración propia]

A continuación, se muestran las posiciones implementadas para los diferentes tipos de agarres, estos fueron: Mano abierta, agarre de gancho, agarre cilíndrico e indicación con índice. Estas se pueden observar en las Figuras 194, 195, 199, 200 y en la Figura 201 encontrada en el anexo. Las posiciones mostradas en la figura 199 y 200 no incluyen la posición del dedo pulgar.

Figura 198. Prueba de la posición 1, indicación con índice.



[Elaboración Propia]

Figura 199. Prueba de la posición 2, agarre cilíndrico.



[Elaboración propia]

Figura 200. Prueba de la posición 3, mano cerrada.



[Elaboración propia]

Al implementar el control de agarre descrito anteriormente, se hicieron pruebas agarrando un objeto a distintos límites de fuerza. De esta manera se obtuvieron la fuerza máxima que se aplica al objeto y así medir el error. A continuación, se presenta los resultados de las pruebas.

Tabla XLI. Resultados de las pruebas de agarre.

No. De Prueba /Límite de fuerza	400	200	100
1	406	210	118
2	401	203	149
3	410	215	126
4	401	212	105
5	404	211	143
Error promedio	4.4	10.2	48.2

[Elaboración propia]