

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL Y
POTENCIA PARA UNA PRÓTESIS BIÓNICA DE ANTEBRAZO Y MANO**

Trabajo de Graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

los estudiantes Miriam Carolina Solares López, José Miguel Fernández Ramírez y Derek Warren Orbaugh Antillón, para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Electrónica; y Luis Estuardo Martínez Guerrero para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Industrial

Guatemala

2014

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL Y
POTENCIA PARA UNA PRÓTESIS BIÓNICA DE ANTEBRAZO Y MANO**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL Y
POTENCIA PARA UNA PRÓTESIS BIÓNICA DE ANTEBRAZO Y MANO**

Trabajo de Graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

los estudiantes Miriam Carolina Solares López, José Miguel Fernández Ramírez y Derek Warren Orbaugh Antillón, para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Electrónica; y Luis Estuardo Martínez Guerrero para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Industrial

Guatemala

2014

Vo. Bo.:

(f) 
Ing. Pablo Daniel Mazariegos de la Cerda

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Pablo Daniel Mazariegos de la Cerda

(f) 
Ing. Carlos Alberto Esquit Hernández

(f) 
Ing. Roberto Enrique Saravia Fernández

Fecha de aprobación:

Guatemala, 31 de enero de 2015

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| ÍNDICE | i |
| LISTA DE TABLAS | vi |
| LISTA DE FIGURAS | viii |
| RESUMEN | xiii |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. OBJETIVOS | 2 |
| A. General del Megaproyecto | 2 |
| B. Específicos del Megaproyecto | 2 |
| III. DELIMITACIÓN DEL TEMA..... | 4 |
| IV. MARCO TEÓRICO | 5 |
| A. Adquisición de datos, procesamiento de señales, control interno y potencia..... | 5 |
| 1. Electroodos de superficie:..... | 5 |
| 2. Funcionamiento de las neuronas:..... | 7 |
| 3. Potencial de membrana en reposo:..... | 7 |
| 4. Potencial de acción: | 8 |
| 5. Músculos activados por las neuronas para medir contracciones musculares:..... | 9 |
| 6. La señal electromiográfica | 9 |
| 7. El amplificador operacional:..... | 10 |
| 8. Implementación de amplificadores operacionales:..... | 11 |
| 9. Componentes electrónicos: | 13 |
| 10. Filtrado de la señal electromiográfica:..... | 14 |
| 11. Librerías necesarias para el filtrado de la señal electromiografía: | 14 |
| 12. Filtro butterworth: | 15 |
| 13. Convertidor análogo digital: | 16 |
| 14. Manejo de información:..... | 16 |
| 15. Comunicación entre dispositivos | 16 |
| 16. Comunicación serial:..... | 16 |
| 17. Transmisor y receptor asíncrono universal..... | 16 |

| | |
|--|----|
| 18. Circuito Inter-Integrado: | 17 |
| 19. Modulación por ancho de pulsos:..... | 18 |
| 20. Servomotores:..... | 19 |
| 21. Sistemas de Control: | 20 |
| 22. Una entrada una salida: | 21 |
| 23. Control PID: | 21 |
| 24. Muestreo de datos:..... | 23 |
| 25. Frecuencia de Muestreo: | 24 |
| 26. Diseño de Placas: | 24 |
| 27. Precauciones y recomendaciones de diseño: | 28 |
| B. Análisis de corriente, voltaje y potencia para un circuito eficiente: | 30 |
| 1. Servomotores:..... | 30 |
| 2. Servomotores analógicos:..... | 32 |
| 3. Servomotores digitales:..... | 32 |
| 4. Circuito eléctrico: | 33 |
| 5. Ley de Ohm: | 34 |
| 6. Leyes de Kirchhoff : | 34 |
| 7. Ley de corriente de Kirchhoff:..... | 34 |
| 8. Ley de voltaje de Kirchhoff:..... | 35 |
| 9. Potencia..... | 35 |
| 10. Transferencia de calor:..... | 35 |
| 11. Conducción: | 35 |
| 12. Convección:..... | 37 |
| 13. Radiación:..... | 37 |
| 14. Calor en un circuito eléctrico: | 38 |
| 15. Generación de calor:..... | 38 |
| 16. Disipación de potencia:..... | 39 |
| 17. Modelo de resistencias térmicas: | 39 |
| 18. Diseño de las resistencias térmicas: | 40 |
| 19. Baterías: | 42 |
| 20. Níquel-cadmio:..... | 43 |
| 21. Níquel-metal: | 44 |

| | |
|---|----|
| 22. Litio-ion: | 44 |
| 23. Polímero de litio (LiPo):..... | 45 |
| 24. Alcalinas: | 45 |
| C. Administración, manual de usuario y propuesta de producción..... | 46 |
| 1. Gráficos de Gantt: | 46 |
| 2. Balanced scorecard: | 46 |
| 3. Cadena de suministros: | 46 |
| 4. Diagrama de operaciones del proceso:..... | 47 |
| 5. Planificación estratégica de la calidad: | 48 |
| 6. Administración de restricciones:..... | 48 |
| 7. Sistema de acumulación de costos: | 49 |
| 8. Análisis beneficio costo: | 49 |
| 9. Análisis financiero: | 49 |
| 10. Valor presente neto: | 49 |
| 11. Planificación de los requerimientos de materiales:..... | 49 |
| 12. Sistemas de producción: | 50 |
| 13. Inventarios: | 50 |
| V. ANTECEDENTES | 51 |
| VI. METODOLOGÍA..... | 52 |
| A. Adquisición de datos y procesamiento de señales electromiografías..... | 52 |
| B. Potencia | 53 |
| C. Administración, manual de usuario y propuesta proceso de producción | 53 |
| VII. DESARROLLO DEL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES ELECTROMIOGRÁFICAS POR MEDIO DE ELECTRODOS DE SUPERFICIE | 55 |
| A. Resultados..... | 55 |
| 1. Sub etapas para la adquisición de datos y procesamiento de señales electromiográficas | 55 |
| 2. Adquisición de las señales por medio de electrodos de superficie | 56 |
| 3. Pre amplificación de la señal electromiográfica | 58 |
| 4. Procesamiento de la señal electromiográfica..... | 61 |
| 5. Diseño de placa | 64 |
| B. Discusión | 65 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 1. | Adquisición de las señales por medio de electrodos de superficie | 65 |
| 2. | Pre amplificación de la señal electromiográfica | 65 |
| 3. | Procesamiento de la señal electromiográfica..... | 66 |
| VIII. | DESARROLLO DEL MÓDULO DE CONTROL INTERNO..... | 67 |
| A. | Resultados..... | 67 |
| 1. | Selección de dispositivo para implementar módulo de control | 67 |
| 2. | Decisión de selección de sistemas | 72 |
| 3. | Programación y configuración de dispositivos | 72 |
| 4. | Módulo de compensación | 81 |
| 5. | Implementación de sistema de control | 82 |
| 6. | Placa para expansión de módulo | 82 |
| B. | Discusión | 88 |
| 1. | Selección de dispositivos | 88 |
| 2. | Compensación..... | 88 |
| 3. | Sistema de Control..... | 89 |
| 4. | Funcionamiento de placa..... | 89 |
| IX. | DESARROLLO DEL MÓDULO DE POTENCIA | 90 |
| A. | Diseño experimental | 90 |
| 1. | Selección de actuadores | 91 |
| 2. | Diseño del circuito | 97 |
| 3. | Selección de baterías | 127 |
| 4. | Estética..... | 130 |
| X. | DESARROLLO DEL MÓDULO DE ADMINISTRACIÓN, MANUAL DE USUARIO Y PROPUESTA DE PRODUCCIÓN DEL PROYECTO | 131 |
| A. | Control de actividades | 131 |
| B. | Manual de usuario | 136 |
| C. | Informe de gastos de la prótesis..... | 143 |
| D. | Diseño del sistema de producción | 148 |
| E. | ANÁLISIS FINANCIERO | 187 |
| XI. | CONCLUSIONES | 190 |
| XII. | RECOMENDACIONES | 194 |

| | |
|--------------------------|-----|
| XIII. BIBLIOGRAFÍA | 197 |
| XIV. GLOSARIO..... | 210 |
| XV. ANEXOS | 213 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Descripción de las funciones para crear un filtro butterworth pasa bandas utilizando la librería Scipy. | 15 |
| Tabla 2 Espaciamiento dependiendo de voltaje | 29 |
| Tabla 3. Resultado obtenido con electrodos de plata cloruro de plata y recubrimiento de oro..... | 57 |
| Tabla 4. Cantidad de cruces por cero, según el movimiento realizado. | 63 |
| Tabla 5. Comparación de métodos de detección en movimientos de la mano. | 63 |
| Tabla 6: Resumen de características de Arduino Uno | 68 |
| Tabla 7: Especificaciones Raspi | 69 |
| Tabla 8: Especificaciones de PIC 16F887 | 70 |
| Tabla 9: Especificaciones BeagleBone Black Rev. B..... | 71 |
| Tabla 10. Comparación de las características de motores más pequeños que el FUTABA S3102 | 92 |
| Tabla 11. Comparación de las características de motores con el HITEC HS-7955TG..... | 94 |
| Tabla 12. Comparación de las características de servomotores para añadir a la palma de la prótesis | 96 |
| Tabla 13. Comparación de motores de la tercera fase con los nuevos. | 97 |
| Tabla 14. Comparación de potencia disipada por los transistores con los servomotores funcionando a 4.8 y 6 voltios..... | 109 |
| Tabla 15. Cálculos para determinar si es necesario utilizar un disipador de calor para disipar la potencia de los reguladores, transistores y el inversor de voltaje | 110 |
| Tabla 16. Valor máximo de resistencias térmicas de disipadores de calor al ambiente necesarias para no dañar los transistores | 111 |
| Tabla 17. Análisis del ATS-1181-C1-R0 a un flujo de 293.35 LFM | 112 |
| Tabla 18. Análisis del ATS-1181-C1-R0 a un flujo de 683.16 LFM | 113 |
| Tabla 19. Análisis del ATS-1101-C1-R0 a un flujo de 293.35 LFM | 113 |
| Tabla 20. Análisis del ATS-1101-C1-R0 a un flujo de 683.16 LFM | 114 |
| Tabla 21. Características mínimas de las baterías para la alimentación de los circuitos | 128 |
| Tabla 22. Comparación de baterías en el mercado para el circuito de potencia | 129 |
| Tabla 23. Comparación de baterías en el mercado para el circuito de control | 129 |
| Tabla 24. Modelo de Balanced Scorecard utilizado. | 132 |
| Tabla 25. Problemas típicos y recomendaciones. | 135 |
| Tabla 26. Informe de costos anteriores | 144 |
| Tabla 27. Presupuesto proyectado | 145 |
| Tabla 28. Costo total proyectado de prótesis. | 146 |
| Tabla 29. Costos incurridos durante esta fase de megaproyecto. | 147 |
| Tabla 30. Diferencia entre costos reales y costos proyectados. | 148 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 31. Costo de prótesis. | 148 |
| Tabla 32. Costos de fabricación de estructura de antebrazo y muñeca. | 151 |
| Tabla 33. Cotizaciones de impresión 3D | 154 |
| Tabla 34. Costo de impresión 3D de la palma y dedos de la mano. | 155 |
| Tabla 35. Costos de fabricación de yemas de dedos. | 157 |
| Tabla 36. Descripción de partes, procedimientos y costos. | 157 |
| Tabla 37. Costo total de prótesis, incluyendo la manufactura y los componentes electrónicos. | 158 |
| Tabla 38. Determinación de la demanda de prótesis de antebrazo y mano. | 159 |
| Tabla 39. MRP. | 162 |
| Tabla 40. Medidas de muñeca. | 163 |
| Tabla 41. Medidas de muñeca. | 163 |
| Tabla 42. Medidas de discos de soporte de antebrazo. | 163 |
| Tabla 43. Medidas de varillas de soporte de antebrazo. | 164 |
| Tabla 44. Materiales para fabricar prótesis. | 172 |
| Tabla 45. Materiales y partes no producidas. | 172 |
| Tabla 46. Maquinas a utilizar en la producción. | 175 |
| Tabla 47. Tiempos estimados por operación en maquinaria. | 176 |
| Tabla 48. Tiempos estándar de operaciones. | 176 |
| Tabla 49. Tiempos de operación en estaciones. | 181 |
| Tabla 50. Unidades producidas al mes. | 182 |
| Tabla 51. Tiempo de ciclo con una sola fresadora CNC. | 183 |
| Tabla 52. Tiempo de ciclo con dos fresadoras CNC. | 183 |
| Tabla 53. Tiempo (en minutos) de máquinas no activadas respecto a cuello de botella. | 185 |
| Tabla 54. Hoja de control de acumulación. | 186 |
| Tabla 55. Inversión inicial necesaria para sistema de producción propuesto. | 187 |
| Tabla 56. Análisis de Valor Presente Neto. | 188 |
| Tabla 57. Análisis del período de retorno. | 188 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Posición de electrodos secos y húmedos para el estudio realizado. | 6 |
| Figura 2 Resultados obtenidos, en la medición de la resistencia de contacto. | 6 |
| Figura 3. Tipos de neuronas. | 7 |
| Figura 4 Esquema del potencial de membrana en reposos para un axón. | 8 |
| Figura 5 Potenciales de acción para tres tipos de neuronas distintas. | 8 |
| Figura 6. Grupo de músculo extensor digitorum communis. | 9 |
| Figura 7. Músculos que forman el antebrazo. | 9 |
| Figura 8 Descomposición de una señal electromiográfica. | 10 |
| Figura 9 Esquema de un circuito amplificador operacional. | 10 |
| Figura 10 Representación gráfica de las características de un amplificador operacional. | 11 |
| Figura 11. Ganancia del circuito AD620. | 12 |
| Figura 12. Amplificador inversor y ganancia. | 12 |
| Figura 13 Sumador no inversor. | 12 |
| Figura 14 Esquema del potenciómetro digital X9313. | 13 |
| Figura 15. Regulador de voltaje LM7905. | 13 |
| Figura 16. Esquema del procesamiento de la señal electromiográfica. | 14 |
| Figura 17. BeagleBone Black. | 14 |
| Figura 18. Trama de envío de 8 bits con bit de paridad y bit de Stop. | 17 |
| Figura 19. Configuración de un maestro y varios esclavos I2C. | 18 |
| Figura 20. Estados de datos y secuencia de bits en I2C. | 18 |
| Figura 21. Ejemplo de funcionalidad de PWM. | 19 |
| Figura 22 Ilustración de PWM versus Angulo de giro de Servo motor. | 19 |
| Figura 23 Conector convencional de Servomotor, especialmente de Atlas Hyperion DS11. | 20 |
| Figura 24 Especificación de Ancho de pulso para servos Atlas Hyperion DS11 y comparación con otras marcas. | 20 |
| Figura 25 Ejemplo de sistema de control. | 21 |
| Figura 26 Efectos de cada componente en un regulador PID. | 22 |
| Figura 27 Muestreo de señales. | 24 |
| Figura 28 Ejemplo de esquemático de interconexión. | 25 |
| Figura 29 Especificaciones físicas de placa. | 25 |
| Figura 30 Ejemplo de placa diseñada e interconectada. | 26 |
| Figura 31 Vista previa en 3D. | 27 |
| Figura 32 Ejemplo de placa finalizada, antes de agregar los componentes. | 27 |
| Figura 33 Diseño de área transversal tomando en cuenta corriente y calentamiento. | 28 |
| Figura 34 Ancho de pistas en relación con área transversal requerida y grosor de cobre. | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 35 Imagen de un servomotor | 30 |
| Figura 36 Diagrama de bloques del funcionamiento de un servomotor | 31 |
| Figura 37 Posición del servomotor respecto al ancho del pulso | 31 |
| Figura 38 Placa de control del servo analógico (izquierda) vs el servo digital (derecha) | 33 |
| Figura 39 Diagramas de los pulsos controladores de alimentación de los servomotores. | |
| Figura 40. Circuito con dos mallas (I1 e I2) y cuatro nodos (V1, V2 V3 y 0) | 34 |
| Figura 41. Transferencia de Calor a través de una pared | 36 |
| Figura 42. Circuito de resistencias térmicas | 39 |
| Figura 43. Gráfica para determinar la resistencia térmica del disipador de calor al ambiente | 41 |
| Figura 44. Voltaje nominal (línea azul superior), de batería muerta (línea azul inferior) y voltaje de la batería en color rojo | 43 |
| Figura 45. Paquete de baterías níquel-cadmio | 44 |
| Figura 46. Paquete de baterías níquel-metal | 44 |
| Figura 47. Paquete de baterías litio-ion | 45 |
| Figura 48. Baterías alcalinas de marca Energizer | 45 |
| Figura 49: Prótesis Transhumeral terminada luego de la tercera fase de Megaproyecto | 51 |
| Figura 50. Orden de los procesos que se fueron realizando | 55 |
| Figura 51. Nervio Radial | 56 |
| Figura 52. a. Electrodo de plata cloruro de plata b. Electrodo con recubrimiento de oro | 58 |
| Figura 53. Etapa pre amplificación de la señal electromiográfica. | 59 |
| Figura 54. a.) Señales electromiográficas pre amplificadas en el dominio del tiempo. b.) Señal electromiográfica pre amplificada en el dominio de frecuencia. | 59 |
| Figura 55. Segunda parte de la etapa pre amplificadora | 60 |
| Figura 56. Tipos de agarre para la mano | 61 |
| Figura 57. Contenido espectral de la señal de entrada. | 61 |
| Figura 58a. Músculo relajado. Y 58b. Pinza de tres dedos | 62 |
| Figura 59. Diseño de la placa utilizando componentes de superficie | 64 |
| Figura 60. Fotografía de la placa soldada. | 65 |
| Figura 61: Arduino Uno | 67 |
| Figura 62: Raspberry Pi | 69 |
| Figura 63: Diagrama de PIC 16F887 | 70 |
| Figura 64: Beagleboard Black rev. B | 71 |
| Figura 65: Diagrama de algoritmo que genera un PWM | 73 |
| Figura 66: Múltiples PWM en un mismo período | 74 |
| Figura 67: Algoritmo que implementa 8 PWMs, en el puerto D del PIC 16F887 | 74 |
| Figura 68: Formatos de resultado de muestras de ADC | 75 |
| Figura 69: Algoritmo de ADC | 76 |

| | |
|--|-----|
| Figura 70: BeagleBone Black conectado | 77 |
| Figura 71: Ventana de comunicación SSH con BBB | 78 |
| Figura 72: Ventana principal de BBB al conectarse por SSH..... | 78 |
| Figura 73: Editor de Linux | 79 |
| Figura 74: Partición de memoria vista por PC | 79 |
| Figura 75: Acople de servo para compensación (Explosión) | 81 |
| Figura 76: Esquemático de Placa | 83 |
| Figura 77: Dimensiones recomendadas placa de expansión | 83 |
| Figura 78: Contorno de placa..... | 84 |
| Figura 79: Diseño final de placa | 85 |
| Figura 80: Placa final vista inferior | 86 |
| Figura 81: Placa final vista superior | 86 |
| Figura 82: Placa montada sobre BBB, moneda de 50c para referencia | 87 |
| Figura 83: Vista de lado, moneda de 50c para referencia | 87 |
| Figura 84. Circuito alimentador de un motor con un transistor en la salida | 99 |
| Figura 85. Circuito indicador de batería baja | 100 |
| Figura 86. Circuito alimentador de voltaje sin el transistor de potencia y con el potenciómetro digital implementado | 101 |
| Figura 87. Esquemático con todos los circuitos alimentadores de voltaje sin los transistores de potencia..... | 102 |
| Figura 88. Esquemático con los transistores de potencia y el regulador de 7 voltios | 103 |
| Figura 89. Esquemático con los circuitos de los sensores, el circuito indicador de batería baja y los headers para conectar el botón y el ventilador | 104 |
| Figura 90. Esquemático con los circuitos para controlar los motores | 104 |
| Figura 91. Esquemático de los transistores modificado, con el regulador de 5 y 7 voltios | 105 |
| Figura 92. Placa diseñada a partir del esquemático de la Figura 19..... | 106 |
| Figura 93. Placa diseñada a partir de los esquemáticos de las Figuras 21 y 22 | 107 |
| Figura 94. Placa diseñada a partir del esquemático de la Figura 23..... | 107 |
| Figura 95. Esquemático de los reguladores de voltaje y el header de entrada del circuito de control | 116 |
| Figura 96. Esquemático de la parte aislante del circuito de control | 116 |
| Figura 97. Esquemático del circuito de la placa de control | 117 |
| Figura 98. Esquemático del regulador de voltaje, el transistor que alimenta a la muñeca y los headers de salida y entrada de la primera placa de potencia | 118 |
| Figura 99. Esquemático del circuito que define el voltaje de operación de los servomotores y el de comparación para determinar el voltaje al que están operando los servomotores | 119 |
| Figura 100. Esquemático de la otra placa de potencia, donde están los tres transistores restantes de potencia..... | 120 |

| | |
|---|-----|
| Figura 101. Esquemático del regulador de 5 voltios para alimentar el ventilador y el Beaglebone Black | 120 |
| Figura 102. Diseño de la placa de control | 121 |
| Figura 103. Diseño de la placa de potencia con tres transistores | 122 |
| Figura 104. Diseño de la placa de potencia con 1 transistor | 123 |
| Figura 105. Diseño de la placa de potencia con 1 transistor | 124 |
| Figura 106. Placa de Control terminada | 124 |
| Figura 107. Placa de Control terminada (otro lado)..... | 125 |
| Figura 108. Placa de potencia con un transistor terminada | 125 |
| Figura 109. Placa de potencia con un transistor terminada (otro lado)..... | 126 |
| Figura 110. Placa de potencia con tres transistores terminada..... | 126 |
| Figura 111. Placa de potencia con tres transistores terminada (otro lado) | 127 |
| Figura 112. Placas de potencia colocadas con el ventilador y los disipadores de calor | 127 |
| Figura 113. Carpeta compartida vía internet | 133 |
| Figura 114. Archivo creado para control semanal | 134 |
| Figura 115. Ejemplo de códigos de control utilizado | 134 |
| Figura 116. Arnés de sujeción de prótesis..... | 138 |
| Figura 117. Clip de sujeción tipo mochila. | 138 |
| Figura 118. Cargador de baterías..... | 139 |
| Figura 119. Botones de configuración del cargador. | 139 |
| Figura 120. Banda que va sujeta al brazo, con sensores..... | 140 |
| Figura 121. Perilla giratoria para control de potencia. | 142 |
| Figura 122. Diseño de Tapaderas de antebrazo 3D..... | 149 |
| Figura 123. Antebrazo ensamblado con placa porta servos. | 149 |
| Figura 124. Maquinado de CNC de piezas de antebrazo..... | 150 |
| Figura 125. Diseño de la muñeca. | 150 |
| Figura 126. Diseño de falanges de los dedos ensamblados. | 151 |
| Figura 127. Diseño final de dedos de la mano. | 152 |
| Figura 128. Palma de la mano con tapa superior. | 152 |
| Figura 129. Palma de la mano con tapa inferior | 153 |
| Figura 130. Palma de mano, sin tapas, con dedos ensamblados | 153 |
| Figura 131. Moldes creados con masilla | 156 |
| Figura 132. Fabricación de yemas de dedos con silicona sellante transparente | 156 |
| Figura 133. Yema acoplada a dedo..... | 157 |
| Figura 134. Habitantes en Guatemala. | 159 |
| Figura 135. Población Guatemalteca que sufre de amputación..... | 160 |
| Figura 136. Población que sufre de amputación transradial. | 160 |

| | |
|--|-----|
| Figura 137. Diámetro exterior. | 164 |
| Figura 138. Diámetro interior. | 164 |
| Figura 139. Profundidad interior. | 165 |
| Figura 140. Diámetro agujero lateral. | 165 |
| Figura 141. Diámetro altura exterior. | 166 |
| Figura 142. Diámetro agujero superior. | 166 |
| Figura 143. Altura a chumacera. | 167 |
| Figura 144. Distancia entre chumaceras. | 167 |
| Figura 145. Ancho chumaceras. | 168 |
| Figura 146. Diámetro exterior chumaceras. | 168 |
| Figura 147. Distancia de chumacera a diámetro exterior. | 169 |
| Figura 148. Diámetro exterior disco de soporte de antebrazo. | 169 |
| Figura 149. Ancho de disco de soporte de antebrazo. | 170 |
| Figura 150. Diámetro interior disco de soporte antebrazo. | 170 |
| Figura 151. Largo de varilla de soporte de antebrazo. | 171 |
| Figura 152. Diámetro de varilla de soporte de antebrazo. | 171 |
| Figura 153. Análisis del período de retorno. | 188 |
| Diagrama 1: Estado de reposo, diagrama 2: pulso de duración corta y de poco consumo para el motor, diagrama 3: pulso de duración larga y de alto consumo de potencia para el motor. | 33 |

RESUMEN

Este trabajo de graduación forma parte de la cuarta fase de la Prótesis Biónica Transhumeral ya implementada por los estudiantes de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica de la Universidad del Valle de Guatemala. En esta fase, se buscó mejorar la prótesis original, tomando en cuenta las recomendaciones y observaciones hechas por las fases anteriores del proyecto, buscando que una persona pueda utilizarla.

Esta prótesis cumple con funciones básicas de movimiento, que le ayuden a la persona a realizar tareas simples. Dentro de estos movimientos están: la contracción y distensión de la mano, así como, la flexión hacia adelante y atrás, de la muñeca.

El objetivo principal de esta fase fue mejorar los sistemas de adquisición y procesamiento de señales electromiográfica, mejorar el sistema de control interno de los motores que ejecutan los movimientos de la mano y optimizar el consumo de potencia.

Se decidió mejorar estos aspectos de la prótesis, porque según las fases anteriores tomaban demasiado tiempo capacitar a una persona para aprender a usar la prótesis y con el nuevo sistema de adquisición y procesamiento de señales esto se reduce al mínimo tiempo posible. Ya que la persona solo deberá replicar el movimiento deseado en la prótesis y esta lo ejecutará.

Otra de las motivaciones fue hacer la prótesis más ligera esto se logró mejorando el sistema de potencia ya que se utilizan baterías más pequeñas, por lo tanto la persona tiene que cargar menos peso, mejorando la portabilidad de la prótesis.

Para realizar estos objetivos fue necesario desarrollar el proyecto en dos diferentes fases, primero el diseño y construcción de los sistemas de control y potencia de la prótesis. En esta fase se creó un diseño en el que se busca funcionalidad de un nuevo sistema de control y potencia. Y en la segunda fase, se trabajó haciendo pruebas y ajustes, para asegurar su funcionalidad.

I. INTRODUCCIÓN

Esta fase de megaproyecto pretende seguir con un proceso que se ha llevado a cabo durante varios años en etapas diferentes. Este proceso consiste en construir una prótesis robótica de antebrazo y mano que cumpla con las funciones básicas que desarrolla una persona en su día a día. Una prótesis que no solamente sea de ayuda física, sino también ayuda moral, para facilitar a sus usuarios un cómodo estilo de vida después de perder el miembro.

Para alcanzar esta meta, fue necesario valerse de las herramientas de la ingeniería industrial como control de tiempos, control de actividades, indicadores de desempeño y reuniones cincuenta-cincuenta de retroalimentación grupal. También fue necesario mantener un control del presupuesto disponible, indispensable para el financiamiento del proyecto.

La prótesis se mejoró en cuatro aspectos específicos:

1. Adquisición y procesamiento: se obtuvieron señales electromiográficas del antebrazo para controlar la prótesis y así reemplazar las plantillas que se habían utilizado anteriormente, ahorrando tiempo de entrenamiento a la persona.
2. Control interno: se controlaron los motores para mantener la tensión de los tendones y la fuerza de agarre durante el movimiento de la muñeca. También se tuvo un sistema de retroalimentación de los sensores de presión colocados en las yemas de los dedos para detener el movimiento de los motores y no sobrecargarlos. Se utilizó un botón para determinar el voltaje de operación de los motores.
3. Diseño electrónico: se seleccionaron actuadores para la prótesis que mejoraron las características de etapas anteriores, se diseñó un circuito para los nuevos actuadores con la opción de que estos trabajen a 4.8 o 5 voltios. También se diseñó el circuito para que tenga la retroalimentación de los sensores de presión. Por último se seleccionó el tipo de alimentación para el circuito.
4. Estética: se mejoró la apariencia física de la prótesis reduciendo el tamaño de la muñeca.

El anexo M muestra la interrelación de los módulos que componen al Megaproyecto Diseño e implementación de los sistemas de control y potencia para una prótesis biónica de antebrazo y mano.

II. OBJETIVOS

A. General del Megaproyecto

Mejorar el control y el rendimiento de la prótesis de brazo, al igual que su apariencia física, para que ésta esté en una etapa final en la que el usuario pueda utilizarla en su vida cotidiana.

B. Específicos del Megaproyecto

1. Seleccionar los puntos en los cuales se colocarán los electrodos, para la captación de las señales electromiográfica.
2. Desarrollar un prototipo capaz de filtrar las señales adquiridas.
3. Procesar las señales filtradas para encontrar patrones en las señales.
4. Generar comandos que permitan el control de la prótesis.
5. Controlar los motores obteniendo retroalimentación de posición.
6. Implementar un control digital utilizando el Beagle Bone Black.
7. Separar el BeagleBone del circuito encargado de PWM (PIC16F887).
8. Implementar una vía comunicación entre el Beagle Bone, el circuito de PWM y la interfaz de usuario.
9. Obtener información de los sensores de presión para uso en sistema de control.
10. Implementar un sistema de compensación para el manejo de los servos que se encuentran situados en el antebrazo.
11. Reemplazar y agregar motores que mejoren las características de los motores actuales como el peso, el tamaño, el torque y la velocidad.
12. Diseñar un circuito que cumpla la función de poder controlar los motores y obtenga la presión de los sensores en la yema de los dedos.
13. Diseñar un sistema para disipar la potencia del circuito.
14. Modificar la estética del antebrazo para que tenga un aspecto más natural y menos robótico al que tiene actualmente.
15. Seleccionar baterías para poder alimentar el circuito y los actuadores de la prótesis.
16. Diseñar un sistema de producción para la prótesis, tomando en cuenta que podría ser para el Hospital Roosevelt.
17. Controlar la realización de cada una de las actividades planeadas mediante la realización de un balance scorecard, y cumplir con los tiempos establecidos en el Gantt del proyecto.
18. Realizar un análisis financiero para determinar la viabilidad en la implementación del sistema de producción diseñado.

19. Elaborar un manual de usuario, identificando la mejor metodología para operar el equipo y la información pertinente su uso.
20. Realizar un informe completo acerca de los gastos incurridos en la realización de la prótesis.

III. DELIMITACIÓN DEL TEMA

Este megaproyecto consistió en realizar mejoras en la prótesis de brazo derecho trabajada en años anteriores. Como meta principal se propuso que la prótesis pudiera ser usada por una persona adulta que hubiese sufrido una amputación de antebrazo y mano por debajo del codo. Debido a esto, se descartó la posibilidad de trabajar el codo, pues su anatomía es sumamente compleja y el modelo de codo diseñado en la última etapa presenta un tamaño demasiado grande para el resto de la prótesis. Se trabajaron únicamente el antebrazo, la muñeca y la mano. También se procuró que la prótesis tuviera un aspecto natural que brinde al usuario comodidad física y psicológica al usarla.

Debido a que este trabajo consiste del módulo de potencia del megaproyecto, se limita a la modificación de los componentes electrónicos del circuito y a ciertos aspectos estéticos.

En el diseño electrónico se reemplazaron los actuadores por otros que tienen mejor rendimiento. Se diseñó un nuevo circuito para controlar los actuadores de la prótesis, en donde se obtendrá retroalimentación de los sensores de presión. Se realizó un análisis de consumo de potencia y el calor generado por los componentes electrónicos para que éste sea disipado correctamente. También se estableció una fuente de energía portátil para el circuito de la prótesis.

En cuanto a la estética de la prótesis, se modificó el diseño del antebrazo y se implementó un nuevo espacio para los circuitos y las baterías de alimentación. Los aspectos estéticos que se mejoraron incluyeron la colocación de los cables de forma ordenada, la colocación de una tapadera al antebrazo, la limpieza de la mano, y otros.

IV. MARCO TEÓRICO

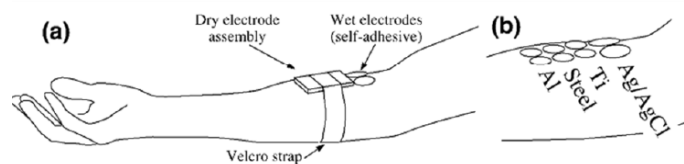
A. Adquisición de datos, procesamiento de señales, control interno y potencia

1. **Electrodos de superficie:** Los electrodos de superficie son transductores que convierten un potencial de membrana, el conjunto de varias reacciones químicas para producir la contracción de un conjunto de músculos, en una señal eléctrica que pueda ser filtrada y procesada (Zeeshan O Khokhar, Zhen G Xiao, y Carlo Menon, 2010).

Existen varias formas de electrodos: barra, redondos, desechables y no desechables. En de este módulo se utilizaron electrodos de superficie redondos y no desechables. Existen varios materiales de construcción para los electrodos; estos incluyen oro, plata, acero inoxidable, platino entre otros. También se encuentran dos grandes grupos de electrodos: secos y húmedos. A. Searle y L. Kirkup realizaron un trabajo de investigación comparando un grupo de electrodos secos (aluminio, acero inoxidable y titanio) contra electrodos húmedos de Ag/AgCl. Las mediciones realizadas observaron cuánta resistencia de contacto ofrecía cada tipo de electrodo. En la Figura 1 se muestra la posición en la que se colocaron los electrodos. Los resultados de este experimento se pueden observar en la Figura 2. Es importante destacar que la resistencia de contacto en los electrodos húmedos debe permanecer lo más constante posible, esto ayuda a que la cantidad de corriente no cambie significativamente entre los diferentes usuarios. Así se podrán detectar patrones en los movimientos de la mano. Los resultados que se muestran en la Figura 2 representan la resistencia de contacto contra tiempo y se puede observar que los de mejor desempeño son los de plata. El estudio fue realizado con un grupo de cinco personas elegidas al azar (Cifuentes Irving, 2010).

La configuración bipolar ofrece dos señales para ser trabajadas con un amplificador operacional diferencial, mientras que la configuración monopolar tiene un único electrodo de referencia y una señal de entrada que puede ser vulnerable al ruido inductivo y al ruido que capta el cuerpo humano, como la señal de 60Hz.

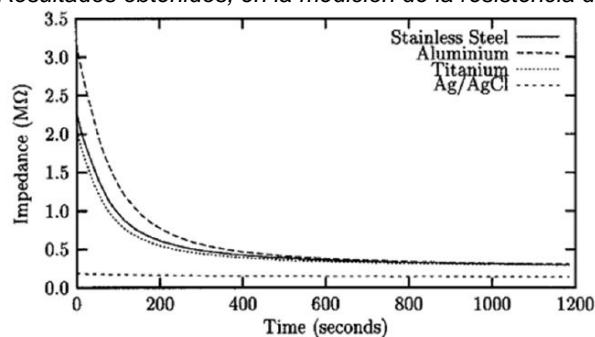
Figura 1. Posición de electrodos secos y húmedos para el estudio realizado.



(Cifuentes Irving, 2010)

Figura 2

Figura 2. Resultados obtenidos, en la medición de la resistencia de contacto.



(Cifuentes Irving, 2010)

De acuerdo con los resultados presentados en este estudio, se llegó a la conclusión de utilizar electrodos de cloruro de plata (Ag/AgCl). Es indispensable, entonces, utilizar un gel para mejorar la conducción entre la piel y los electrodos, para disminuir la resistencia de contacto y mejorar la recepción de la señal.

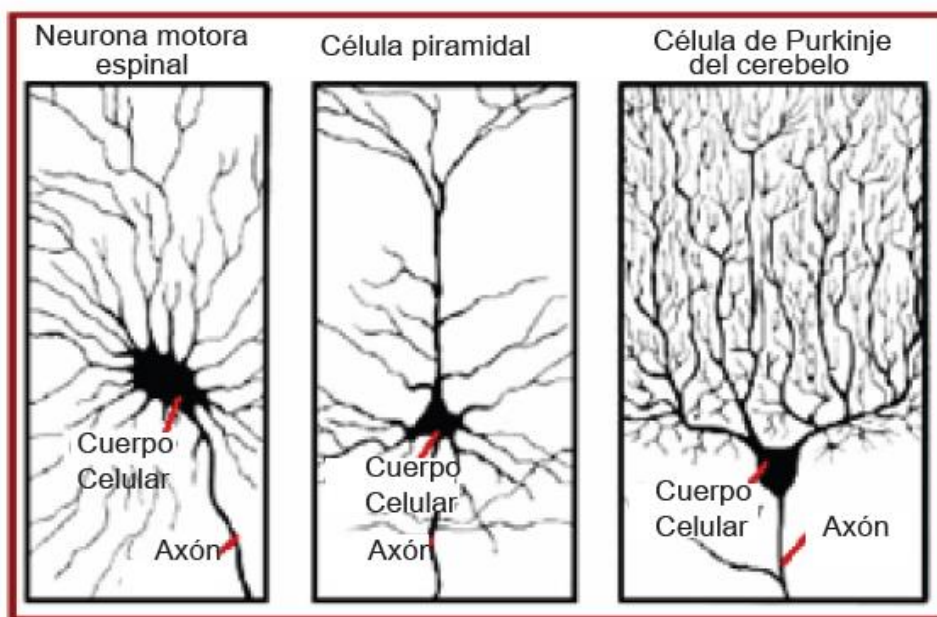
La posición en la que se colocará el electrodo en la piel y la distancia entre electrodos son fundamentales para obtener una señal con la mayor amplitud posible (SENIAM, 2006). Según SENIAM, organización europea dedicada a la investigación de la ubicación, tipo, tamaño, y distancia entre electrodos, se recomienda considerar los siguientes factores (Institute of Neurology, 2002:

- Utilizar electrodos redondos de Ag/AgCl.
- Preparar la piel antes de colocar los electrodos. (Este proceso consta de utilizar alcohol isopropílico para limpiar la piel y posteriormente aplicar un gel conductor.)
- La distancia de separación entre los electrodos debe ser de 2cm entre sí, medidos de centro a centro del electrodo.
- Sujetar los electrodos firmemente.

2. **Funcionamiento de las neuronas:** En el cuerpo humano se encuentran sustancias químicas que están eléctricamente cargadas y por esta razón se les da el nombre de iones. Las neuronas se comunican por un proceso electroquímico. Por tanto, es importante estudiar los iones que se involucran en este proceso. El sodio y el potasio son los dos iones más importantes en la comunicación entre neuronas. Existen dos tipos de potenciales que son importantes para entender por qué se obtiene una señal electromiográfica de la forma resultante (Medical cell biology, 2007).

En la Figura 3 se observan varios tipos de neuronas. En el lado izquierdo de la Figura 3 se observa la neurona que activa el grupo de músculos *extensor digitorum communis*, mientras que la Figura 4 muestra la neurona motora espinal.

Figura 3. Tipos de neuronas.

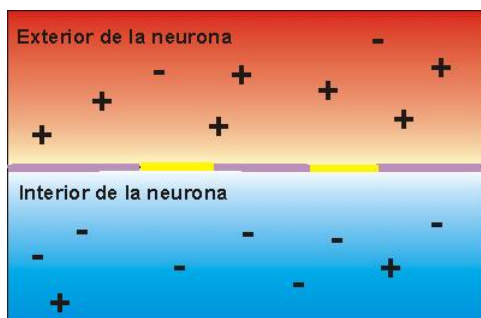


(Foxit Software, 2010)

3. **Potencial de membrana en reposo:** El estado de reposo para una neurona acontece cuando no se están transmitiendo impulsos eléctricos. Como ilustra la Figura 3, esto sucede cuando se encuentra en reposo. Su forma simula un cilindro: en la parte interior tiene iones de potasio mientras que en la parte exterior tiene iones de sodio. Entre la parte externa e interna se tienen canales que son abiertos o cerrados según las necesidades del axón (Foxit Software, 2010).

Cuando el axón está en reposo se puede medir un voltaje de aproximadamente -70mv que varía según cada persona por las concentraciones de potasio y sodio que posee. Esto significa que la concentración de iones en ambos lados del axón no cambia, porque los canales se encuentran cerrados (Foxit Software, 2010).

Figura 4. Esquema del potencial de membrana en reposo para un axón.

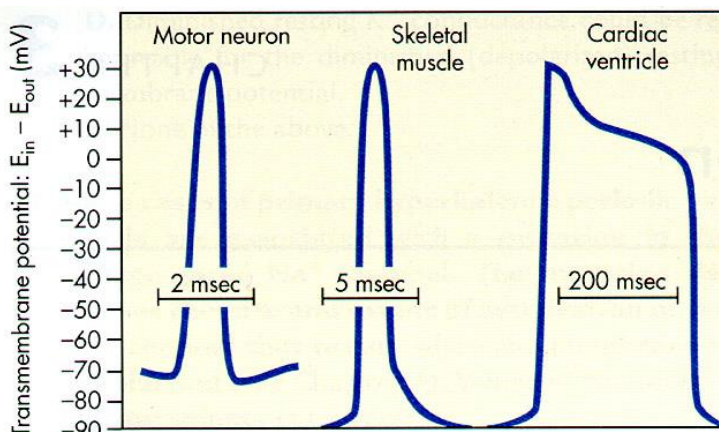


(Intef, 2011)

4. **Potencial de acción:** Contrario al potencial de membrana en reposo, existe el potencial de acción o impulso eléctrico. Este se produce cuando los canales que dividen a la parte externa e interna del axón se abren. Dicho proceso se debe a que se está propagando un impulso por el axón (una orden que el cerebro manda hacia algún miembro del cuerpo), cuando se crea el intercambio de iones de potasio y sodio que produce una despolarización. A este proceso se le conoce de tal manera porque el voltaje que se mide cambia de -70mV a 30mV aproximadamente (Foxit Software, 2010).

Cuando el impulso termina de viajar, los canales se vuelven a cerrar y esto provoca que se vuelva a polarizar el axón, almacenando en su parte interna la mayoría de iones de potasio u en su parte externa la mayoría de iones de sodio. En la Figura 5 se puede observar el proceso de polarización y despolarización de un axón para tres tipos distintos de impulsos (Foxit Software, 2010).

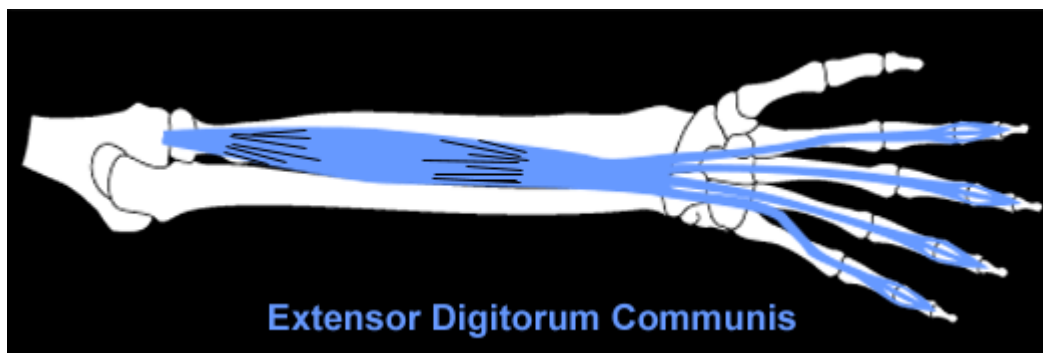
Figura 5. Potenciales de acción para tres tipos de neuronas distintas.



(Medical cell biology, 2007)

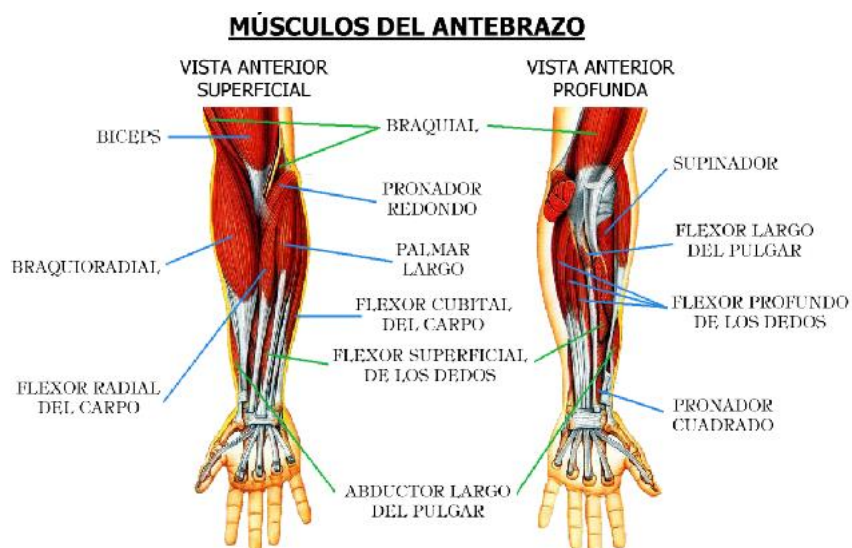
5. **Músculos activados por las neuronas para medir contracciones musculares:** Fue necesario investigar los músculos que contraían los dedos de la mano para ubicar los electrodos en esas posiciones. En la Figura 6 se observa un grupo de músculo *extensor digitorum communis* que controlan el movimiento de los cuatro dedos mayores. Este músculo sirve para levantar la mano. Por lo tanto, se contrae mientras que el flexor radial del carpo, músculo que se encuentra en la parte posterior del antebrazo, se relaja. Todos los grupos de músculos que forman al antebrazo se observan en la Figura 7.

Figura 6. Grupo de músculo *extensor digitorum communis*.



(Neperud Julia, 2011)

Figura 7. Músculos que forman el antebrazo.

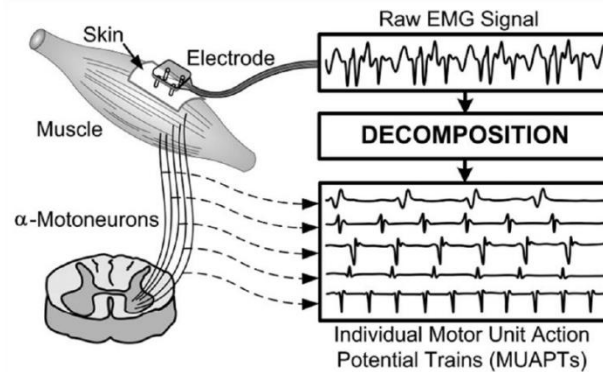


(Fernando, 2009)

6. **La señal electromiográfica:** Es la respuesta de la contracción de varias fibras musculares que son activadas por una neurona. La señal medida es la suma de un conjunto de pulsos eléctricos, pues

los electrodos de superficie no detectan solo la respuesta de una neurona sino la respuesta de un grupo de músculos (Basmajian, J. V, DE Luca C. J, 1985). De Luca fue pionero en el análisis de las señales electromiográficas. Él propuso la separación de la señal electromiográfica en diferentes componentes de frecuencia, como se observa en la Figura 8 (Basmajian, J. V, DE Luca C. J, 1985). En este módulo se procedió a separar los diferentes componentes frecuenciales utilizando filtros pasa bandas para tener el control de los movimientos de la mano.

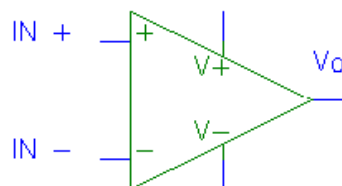
Figura 8. Descomposición de una señal electromiográfica.



(Cifuentes Irving, 2010)

7. El amplificador operacional: El amplificador operacional está compuesto por un conjunto de transistores interconectados de forma que ofrezcan una ganancia determinada a la salida del amplificador operacional. El estudio profundo de un amplificador operacional es complejo por lo que en esta sección solo describiré sus características y usos (M.Parada, F.Simón, 2004). En la Figura 9 se observa el esquema en donde se representa un amplificador operacional. Este consta de dos entradas: una invertida y la otra no invertida. Tiene un nivel de alimentación simétrico y tiene una salida de voltaje (M.Parada, F.Simón, 2004). Para utilizar el nivel de referencia a tierra es necesario hacerlo por medio de resistencias conectadas entre las terminales del amplificador operacional.

Figura 9. Esquema de un circuito amplificador operacional.



(M.Parada, F.Simón, 2004).

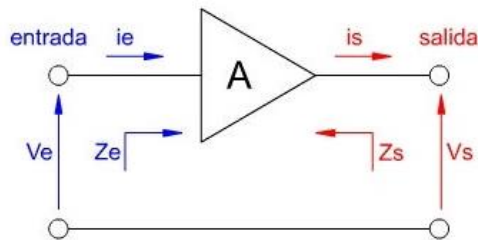
Las características más importantes de un amplificador operacional son:

- A = ganancia del amplificador.
- V_e = tensión de entrada.
- i_e = Intensidad de entrada.
- Z_e = Impedancia de entrada.
- V_s = tensión de salida.
- i_s = Intensidad de salida.
- Z_s = Impedancia de salida.

La ganancia (A) es la relación entre la salida y la entrada. Se puede distinguir entre ganancia de tensión, corriente y potencia (Área tecnológica, 2003). En la Figura 10 se muestran estas características.

- $A_v = V_s/V_e$ ganancia de tensión.
- $A_i = i_s/i_e$ ganancia de corriente.
- $A_p = P_s/P_e = A_v \cdot A_i$ ganancia de potencia.

Figura 10. Representación gráfica de las características de un amplificador operacional.



(Área tecnológica, 2003)

8. Implementación de amplificadores operacionales: La etapa de pre amplificación se implementará con circuitos amplificadores operacionales. Esta etapa requiere un amplificador AD620 y un amplificador AD706. El circuito integrado AD620 posee las siguientes características: un alto rechazo en modo común ($CMRR > 120$ dB) y una alta impedancia de entrada, con una ganancia de 500 veces su valor nominal. Para eliminar los potenciales comunes en los tres electrodos, como ruido ambiental y la alta impedancia proveniente de la piel, se integró una etapa de amplificación diferencial. Para obtener dicha ganancia se aplican las fórmulas preestablecidas para este circuito (Analog Devices, 2003):

Figura 11. Ganancia del circuito AD620.

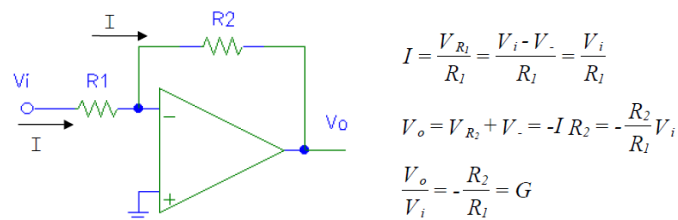
$$R_G = \frac{49.4 \text{ K}\Omega}{G-1}$$

(Analog Devices, 2003).

El circuito AD706 está construido en base de transistores JFET's lo que proporciona la posibilidad de utilizar pequeñas corrientes para la polarización de las entradas (Analog Devices, 2004). Las características de esos dos componentes entran entre los requisitos que conlleva trabajar con señales electromiográficas

Se utilizará el amplificador operacional LF353 debido a que tiene un bajo costo, una rápida respuesta de operación y un diseño basado en JFET's que hace que el consumo de corriente menor (Texas Instruments, 2013) en comparación con el amplificador operacional LM741. Se implementará un amplificador inversor, cuyo esquema de circuito se observa en la Figura 12. Esta configuración ofrece en la salida del amplificador operacional la señal de entrada invertida, con una ganancia descrita en la Figura que se muestra a continuación.

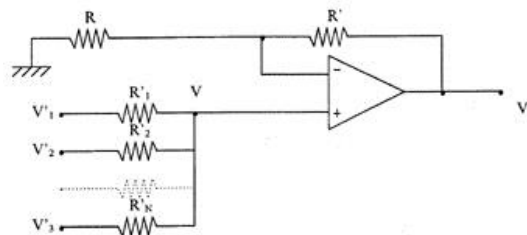
Figura 12. Amplificador inversor y ganancia



(M.Parada, F.Simón, 2004)

El sumador no inversor es un circuito que suma dos o más señales y la salida no es invertida. En la Figura 13 se muestra el diagrama esquemático del sumador.

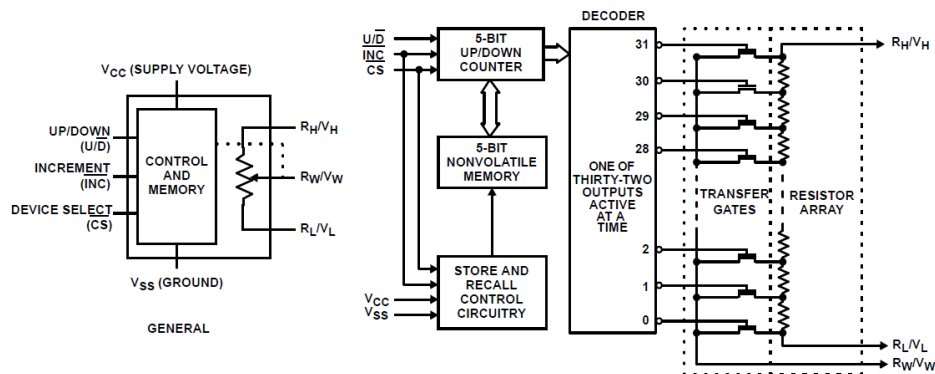
Figura 13. Sumador no inversor.



(M.Parada, F.Simón, 2004)

9. Componentes electrónicos: El X9313 es una resistencia variable, más conocida como potenciómetro. La característica de este componente es que produce cambios en sus resistencia digitalmente. Está compuesta por un arreglo de resistencia, un switch selector digital y una memoria no volátil; utiliza tres pines para producir el cambio en la resistencia de salida. Se puede utilizar las tres terminales como las de un potenciómetro analógico o la configuración de dos. La posición switch está controlada por las entradas CS, U / D, e INC. La posición del selector se puede almacenar en la memoria no volátil y luego ser recordada en un encendido posterior (Intersil, 2008).

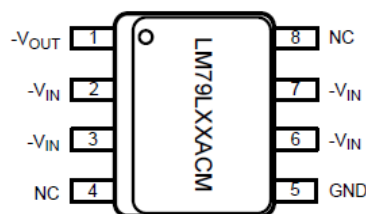
Figura 14. Esquema del potenciómetro digital X9313.



(Intersil, 2008).

El regulador de voltaje LM7905 convierte un voltaje de -12v a -5v, manteniendo una corriente constante en su salida. Para el empaquetado SOIC la corriente de salida es de 100mA, se utilizó este regulador por la alimentación simétrica que es necesaria para los amplificadores operacionales. En la Figura 15 se observa el empaquetado del regulador LM7905 y la configuración de sus pines.

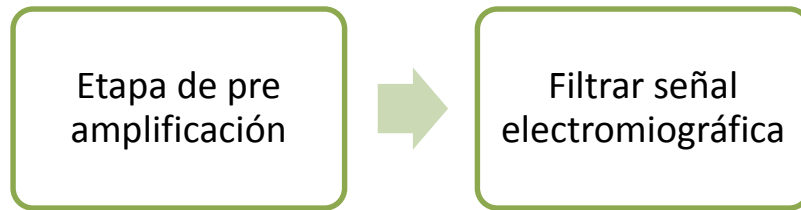
Figura 15. Regulador de voltaje LM7905



Texas Instruments. (1999)

La etapa de procesamiento se divide en pre amplificación de la señal electromiográfica y filtrado de la señal como se muestra en la Figura 16. La etapa de pre amplificación consiste de los circuitos integrados AD620, AD706 y X9313 y el filtrado de la señal se realiza digitalmente con la ayuda del BeagleBone Black.

Figura 16. Esquema del procesamiento de la señal electromiográfica.

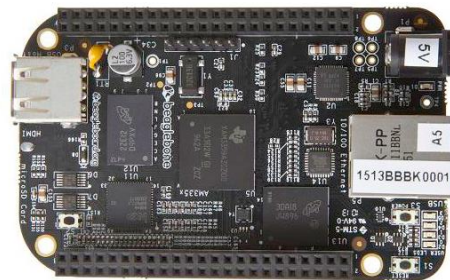


(Solares.M, 2014)

10. Filtrado de la señal electromiográfica: Para el procesamiento de la señal electromiográfica se utilizó un BeagleBone Black, una computadora de hardware abierto del tamaño de una tarjeta de crédito. El BeagleBone Black está basado en un procesador ARM Sitara AM335x Cortex-A8 de Texas Instruments con una velocidad de reloj de 1 GHz. Esto se acompaña de capacidad de almacenamiento de 2 GB, además de almacenamiento extra por MicroSD, así como conectividad vía USB, Ethernet y HDMI (Beagleboard, 2014) en la Figura 17 se observa el BeagleBone Black que trae incorporada un IDE (su propio sistema operativo).

Para la implementación de todo el procesamiento se decidió instalar Debian y sobre esta plataforma instalar Python 2.7. Con este lenguaje de programación se realizará todo el procesamiento de la señal.

Figura 17. BeagleBone Black.



(Beagleboard, 2014)

11. Librerías necesarias para el filtrado de la señal electromiografía: Todo tipo de procesamiento o filtrado de la señal se realizará digitalmente, por esta razón se decidió instalar Python 2.7 que cuenta con varias librerías que proporcionan la implementación de filtros digitales. La librería necesaria para implementar un filtro tipo Butterworth es SciPy. En la página de SciPy.org se encuentra el link para la descarga e instalación de esta librería (SciPy, 2014). Se recomienda seguir los pasos que se muestran a continuación para realizar la instalación con éxito.

- Cambiar el directorio donde se realizará la instalación con el comando CD “nombre del directorio”.
- Realizar la instalación en un directorio diferente al HOME.
- Se copia y pega el link de descarga e instalación.
- Se debe conectar el cable Ethernet al BeagleBone Black y la instalación iniciará.
- Una vez finalizada la instalación es necesario limpiar el directorio para evitar que la memoria interna se llene.

(SciPy, 2014).

12. Filtro Butterworth: Se implementó un filtro pasa banda tipo Butterworth de orden 6. Se decidió implementar este tipo de filtro porque la señal electromiográfica tiene una componente DC con valor de amplitud muy grande con relación a la señal de información, debido a que el cuerpo humano se comporta como una gran antena y la señal se ve afectada por la frecuencia de 60Hz y el espectro de frecuencias se extiende hasta los 4kHz. La información de interés se encuentra entre los rangos de 20Hz a 500Hz. Por esta razón se decidió utilizar un filtro pasa banda para limitar la frecuencia con la que se desea trabajar (Zeeshan O Khokhar, Zhen G Xiao, y Carlo Menon, 2010). Las funciones que se utilizarán para implementar el filtro son las que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de las funciones para crear un filtro butterworth pasa bandas utilizando la librería Scipy.

| Funciones que implementan el filtro pasa bandas tipo Butterworth | | |
|---|---|---|
| Nombre de la función | Descripción de la función | Salida de la función |
| Butter | Sirve para indicar el orden del filtro, los valores de corte de frecuencia, el tipo de filtro y si el filtro es analógico o digital. Los valores de frecuencia se ingresan en Hz. Y se normalizar a la frecuencia de Nyquist. | Devuelve la función de transferencia del filtro según los parámetros indicados. |
| Lfilter | Tiene como entrada el numerador, denominador de la función de transferencia del filtro a implementar. Y la señal que se desea filtrar. | Señal filtrada |

(SciPy, 2013)

Las frecuencias de corte fueron variantes según el músculo que se estaba analizando, para la detección de patrones se realizó por medio de filtros pasa bandas dejando solo la frecuencia de interés.

13. Convertidor Análogo Digital: Adafruit ofrece varias librerías para controlar los módulos del BeagleBone Black entre ellas se encuentra la librería del convertidor análogo digital (ADC). Esta librería ofrece un set de instrucciones para poder inicial el módulo ADC y leer el voltaje del puerto analógico. El rango de voltaje de entrada es de 0 a 1.8v, Por esta razón se utilizó el amplificador operacional LF353 en configuración de sumador no inversor y amplificador inversor: para trasladar la señal electromiográfica pre amplificada a este rango del voltaje de forma que pudiera ser digitalizada sin ningún riesgo para el módulo ADC.

14. Manejo de información: En un sistema electrónico la información es representada con cadenas de unos (1) y ceros (0). Cada dígito de estas cadenas es llamada un 'bit' ("Binary unit") que puede tomar únicamente dos valores, ya sea uno o cero. Los unos y ceros son representaciones visuales de presencia o ausencia de un diferencial de potencial en un punto. Los sistemas binarios son robustos y resistentes a ruido. Un arreglo de ocho bits es llamado un 'byte'. Los bytes son almacenados en registros, dispositivos que almacenan información temporalmente mientras se esté alimentado el dispositivo. Se dice que la información es manejada de manera digital. En la teoría de la información, los datos digitales son discretos y discontinuos.

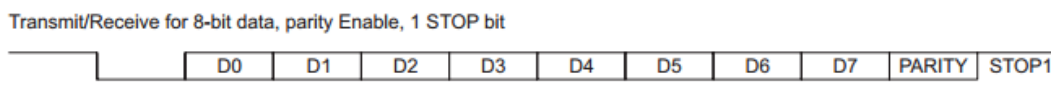
15. Comunicación entre dispositivos: Al utilizar varios dispositivos electrónicos, es necesario intercambiar información entre ellos. Esta información es codificada y modulada para su transmisión y recepción en distintos dispositivos. A continuación se explica brevemente el funcionamiento de los protocolos y la modulación de comunicación. Se recomienda que el lector revise las bibliografías adjuntas para obtener más información sobre las especificaciones completas sobre cada protocolo individualmente.

16. Comunicación serial: La comunicación serial permite el envío de información por medio de un mismo canal o medio de forma secuencial. Existen dos tipos de transmisiones seriales: asíncronas y síncronas. Las transmisiones síncronas son controladas por un dispositivo maestro que controla un reloj que comparte con los demás dispositivos que están escuchando el reloj para saber cuándo se transmite información. Las transmisiones asíncronas no cuentan con un reloj compartido, pero incluyen una secuencia de sincronización y una frecuencia de transmisión definida anterior al uso de los sistemas de transmisión y recepción. Las transmisiones seriales pueden ser catalogadas como 'simplex', 'full dúplex' y 'half dúplex'.

17. Transmisor y receptor asíncrono universal: Un transmisor y receptor asíncrono universal (UART por sus siglas en inglés) es un tipo de comunicación serial asíncrona en la que el receptor y transmisor no cuentan con un reloj para sincronizarse, pero con anterioridad se decide la tasa de

transferencia que tendrá la comunicación. La tasa de transferencia es dada en bits por segundo (bps) y es llamado “baudrate”, las velocidades estándares son: 600, 1200, 3400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800 bps. El transmisor envía primero un ‘Start Bit’ que alerta al receptor que se está iniciando una transmisión de una palabra (ocho bits). Una vez detectado el ‘Start Bit’, se inicia el reloj del receptor. El error entre el reloj del receptor y transmisor debe de estar debajo del 10% por lo que son especificados con anterioridad. Una vez transmitida la palabra, se envía un ‘Stop Bit’, que indica al receptor que se ha enviado toda la palabra. El receptor reconstruye la palabra y la devuelve al usuario, obviando los bits adicionales de “Start”, “Stop” y paridad (Durda, 2014). El transmisor UART no sabe si el receptor recibió correctamente el mensaje por lo que existe una forma simple de hacer un chequeo de errores agregando un bit de paridad (“Parity bit”).

Figura 18. Trama de envío de 8 bits con bit de paridad y bit de Stop



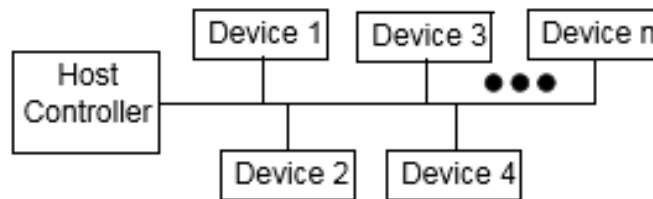
(Texas Instruments, 2010)

18. Circuito inter-integrado: Un circuito inter-integrado (llamado I²C por sus siglas en inglés) es un protocolo de comunicación síncrona entre circuitos integrados. Al ser una comunicación síncrona, depende de dos hilos por los cuales comunicarse: un reloj que indica cuando se está enviando información y un hilo de datos, por el que se transmite la información. El protocolo I²C depende de dos tipos de dispositivos: maestros y esclavos. Los maestros son los dispositivos que establecen el tiempo de transmisión, además que envía comandos de lectura y escritura hacia otros dispositivos. Un dispositivo esclavo está pendiente de las instrucciones que envía el maestro, además de escuchar el hilo de reloj para saber cuándo se está transmitiendo información. Este protocolo permite tener varios dispositivos esclavos y maestros interconectados, sin causar ningún tipo de colisiones ni fallas. La comunicación de maestro a esclavo consta de tres palabras (o bytes) de instrucciones. Además, dentro de cada byte, el esclavo debe responder un bit de “Acknowledge”. Este bit le deja saber al maestro si recibió correctamente la palabra. La primera palabra es de direccionamiento, así que el maestro puede seleccionar a qué esclavo dirigirse. Antes de la palabra se envía un bit de “Start” que deja saber a los esclavos cuando se inicia una transmisión; luego de la palabra de dirección se envía un bit que indica si se quiere leer o escribir al dispositivo. La segunda palabra es de selección de registro. Algunos esclavos poseen registros que pueden ser modificados independientemente, solamente conociendo la dirección de dispositivo y la dirección del registro. Luego de esta palabra se recibe un bit de “Acknowledge”. La

tercera palabra es el dato a enviar, después de la cual se debe recibir un bit de “Acknowledge” cuando simultáneamente se envía un bit de “Stop”, para finalizar la comunicación.

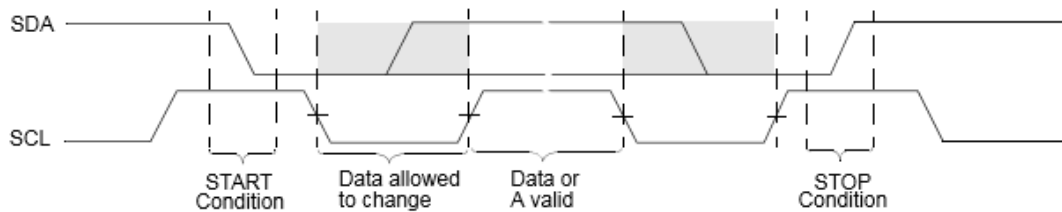
Figura 19. Configuración de un maestro y varios esclavos I2C

Single I²C Bus Configuration



(Microchip, 2009)

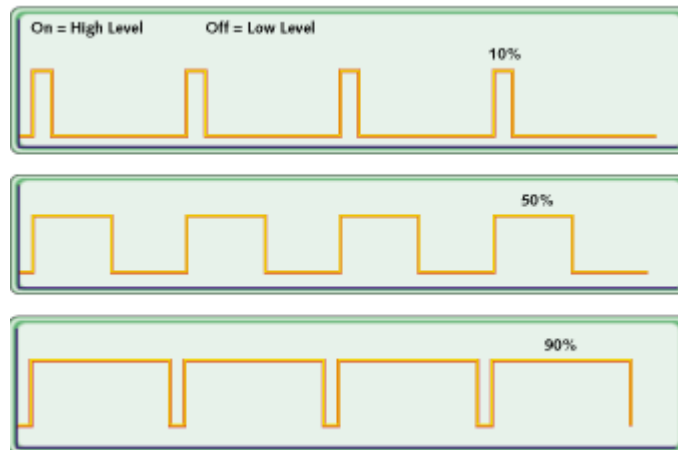
Figura 20. Estados de datos y secuencia de bits en I2C



(Microchip, 2009)

19. Modulación por ancho de pulsos: La modulación por ancho de pulsos (PWM por sus siglas en inglés) es una forma de codificar una señal analógica digitalmente. Las señales PWM trabajan a una frecuencia constante en la cual transmiten único pulso en su periodo. El ancho de pulso, también llamado ciclo de trabajo, es la propiedad que varía para la transmisión del mensaje. Los servos utilizan las señales PWM como señales controladoras; estas señales deben operar a una frecuencia de 50 Hz (Hertz), con anchos de pulso variando entre 0.65 a 2 ms (milisegundos).

Figura 21. Ejemplo de funcionalidad de PWM.

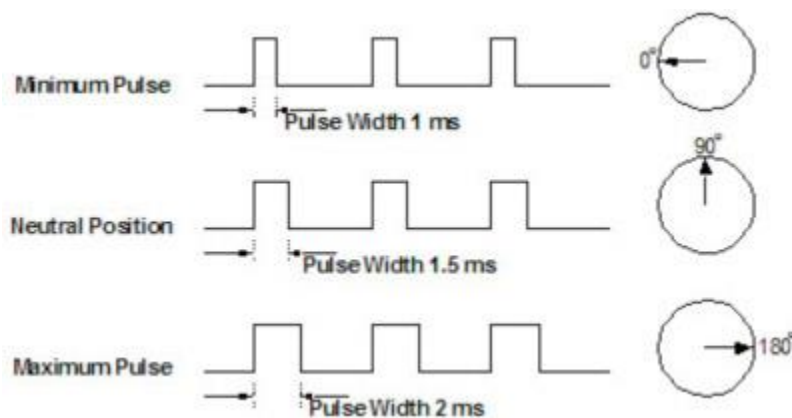


(Barr, 2001)

20. **Servomotores:** Un servo motor es un motor pequeño con gran torque y giro de 180 grados únicamente. Un servo posee un motor de DC (corriente directa) pequeño, un potenciómetro (resistencia variable), engranajes y un circuito de control. El funcionamiento consiste en que cuando el motor DC gira. Este cambia la posición del potenciómetro (variando la resistencia) con el que el circuito de control puede regular precisamente cuando movimiento puede haber y en qué dirección. El servo motor define cuánto girar y hacia dónde por la señal de control que recibe. Esta señal es un PWM, discutido anteriormente, a 50 Hz.

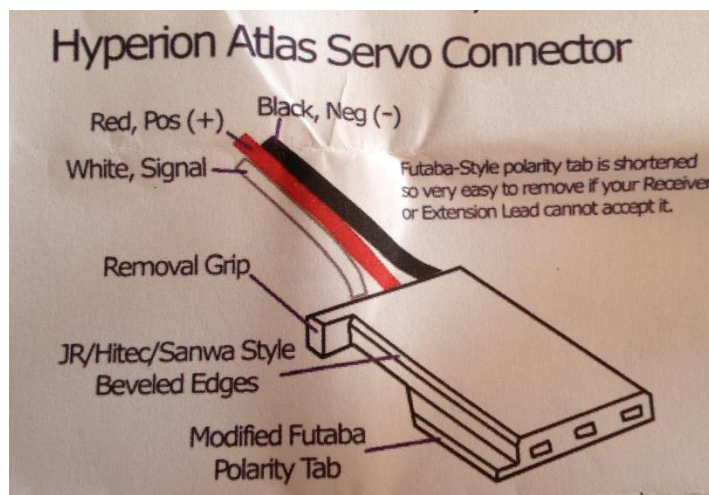
Una imagen básica del PWM y la posición del motor es dada por Figura 22. Los servo motores utilizados son Atlas Hyperion DS11, los cuales poseen el conector que se especifica en la Figura 23. Sus rangos de PWM son especificados en la Figura 24.

Figura 22 Ilustración de PWM versus Angulo de giro de Servo motor



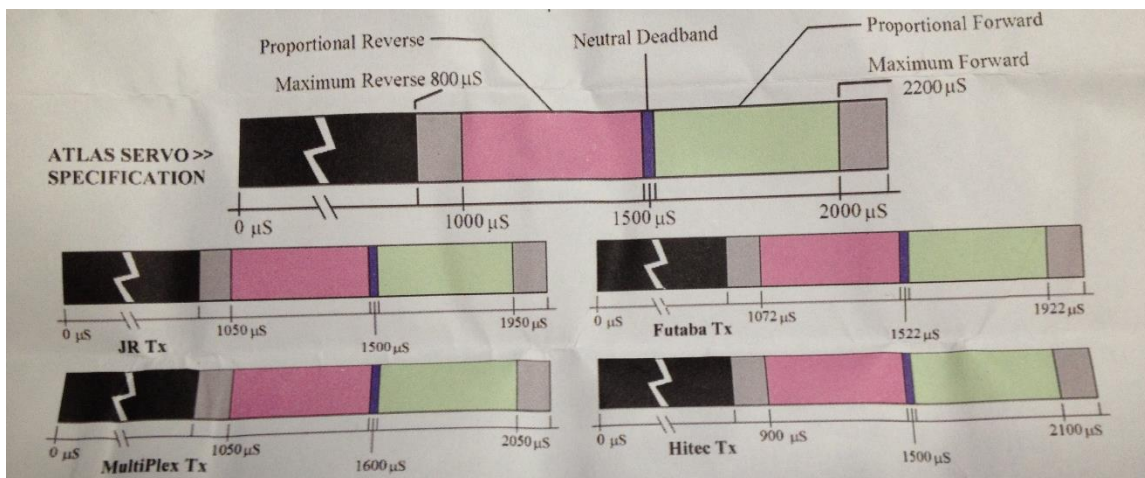
(Reed, 2014)

Figura 23 Conector convencional de Servomotor, especialmente de Atlas Hyperion DS11



(Hyperion, 2014)

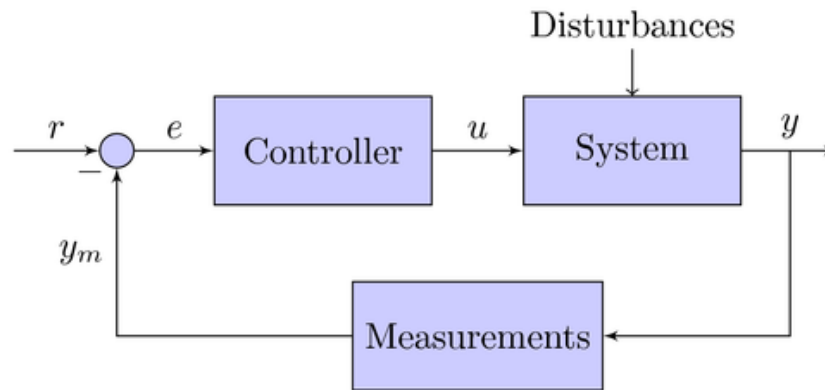
Figura 24 Especificación de Ancho de pulso para servos Atlas Hyperion DS11 y comparación con otras marcas



(Hyperion, 2014)

21. **Sistemas de control:** Un sistema de control es una forma de interconexión de dispositivos que permite regular el comportamiento de un proceso. Los sistemas de control son implementados para mejorar la estabilidad de un proceso, además de garantizar una operación constante, y puede adaptar el proceso ante cualquier tipo de ruido. Un sistema de control típico es ejemplificado en la Figura 25.

Figura 25 Ejemplo de sistema de control

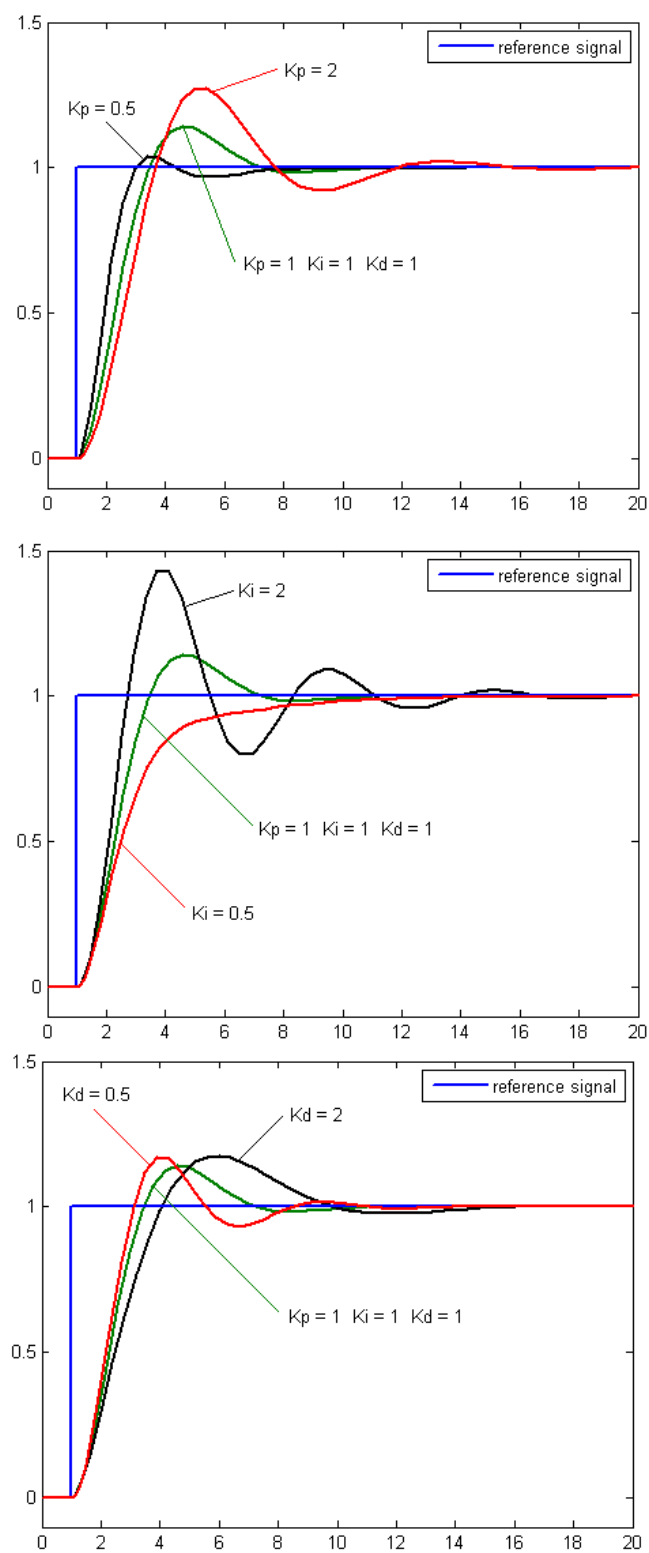


(Fauske, 2006)

22. **Una entrada una salida:** El tipo de control que se utilizará es el de una entrada y una salida. Este tipo de control, como lo dice el nombre, solo actúa con una entrada y genera únicamente una salida. La Figura 25 es un ejemplo de un sistema de una entrada y una salida.

23. **Control PID:** Decir que el control es de tipo PID no indica el tipo de sistema a construir, sino el Controlador indicado en la Figura 25. El control PID a implementar será digital, por lo que lo único necesario es programar el algoritmo que pueda hacer una compensación en errores de salida. El sistema de control PID digital obtiene el error, dado por la resta entre la señal de referencia y la medición de la salida. Este genera una señal de compensación que debe generar el sistema para estabilizarse a lo que la señal de referencia envía. La regulación del controlador digital debe ocurrir con cada muestra obtenida (de un módulo ADC). El controlador PID consiste de tres partes, la proporcional, la integral y la diferencial. La parte proporcional proporciona una compensación del valor inmediato; la parte integral proporciona una compensación tomando en cuenta los errores anteriores; la parte diferencial proporciona una compensación predictiva de los futuros errores. La suma de las tres compensaciones proporciona una compensación final que permite la estabilización del sistema. Los efectos de cada componente pueden verse en la Figura 26.

Figura 26. Efectos de cada componente en un regulador PID



(Sorkmaz, 2012)

El algoritmo base para programar un controlador PID es el siguiente:

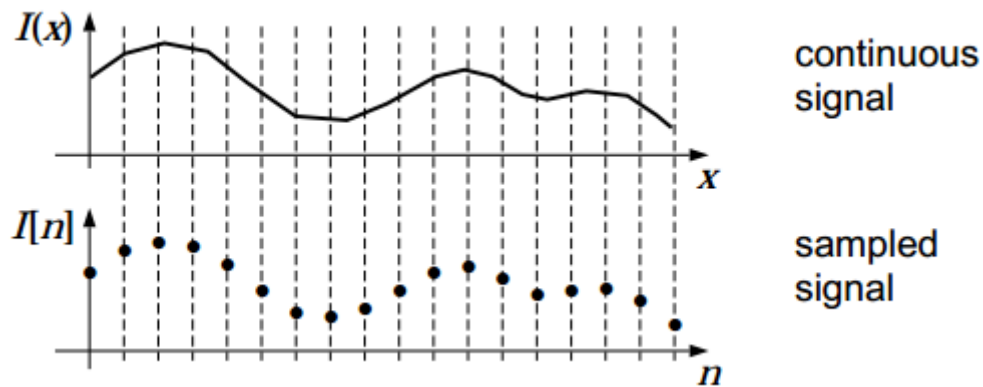
```
previous_error = 0  
  
integral = 0  
  
start:  
  
    error = setpoint - measured_value  
  
    integral = integral + error*dt  
  
    derivative = (error - previous_error)/dt  
  
    output = Kp*error + Ki*integral + Kd*derivative  
  
    previous_error = error  
  
    wait(dt)  
  
    goto start
```

(Icady, 2009)

En este algoritmo el “setpoint” es la señal de referencia. ‘Kp’ es la constante proporcional, ‘Ki’ es la constante integral y ‘Kd’ es la constante diferencial.

24. Muestreo de datos: El mundo está lleno de señales continuas en el tiempo, pero para integrarlas a un sistema discreto y discontinuo, así como un sistema digital, fue necesario tomar muestras de la señal. Muestrear una señal analógica consiste en obtener el valor que posee y codificarlo a un código binario que será la representación del valor obtenido.

Figura 27. Muestreo de señales



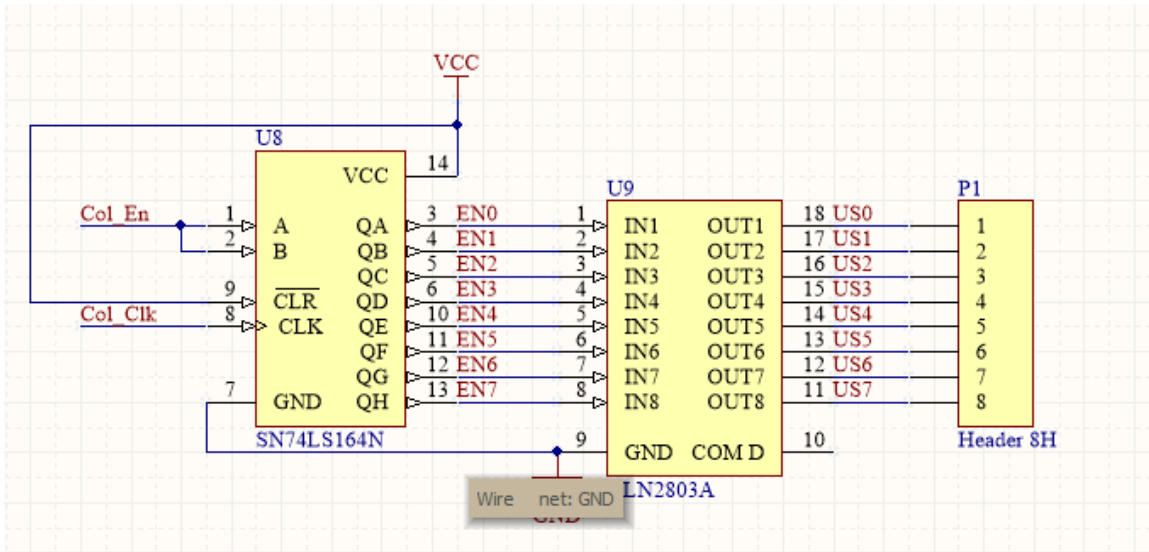
(Jepson y Fleet, 2005)

25. Frecuencia de Muestreo: Para lograr obtener suficientes muestras para representar correctamente la señal muestreada debemos cumplir con el teorema de Nyquist. El teorema de Nyquist para muestreo de señales limitadas en banda y de energía finita dice:

"Una señal limitada en banda de energía sin componentes frecuenciales superiores a W Hz se puede recuperar de forma exacta a partir de sus muestras tomadas a una tasa de $f_s = 2W$ muestras por segundo"

26. Diseño de Placas: El diseño de placas para integrar todos los dispositivos requiere de un esquemático previo de interconexión y el posterior diseño mecánico. Los esquemáticos funcionan para dar una idea básica sobre cómo se interconectarán todos los dispositivos, los pines que se conectarán y los conectores externos. En el proyecto se utilizará el software Altium Designer 2009 para crear los esquemáticos y placas.

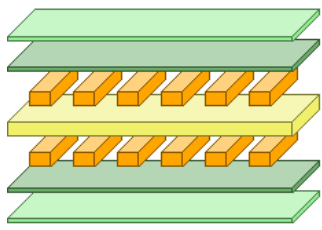
Figura 28. Ejemplo de esquemático de interconexión



(Elaboración propia)

En el esquemático se especifican los componentes a utilizar, y se interconectan de la forma necesaria. Se recomienda que el esquemático esté lo más ordenado posible para evitar confusiones. Luego de tener listo la lista de partes e interconexiones se procede a diseñar la placa. Primero, hay que establecer los parámetros físicos que posee la placa que se diseñará. Estos parámetros nos permiten definir el grosor de cobre, dieléctrico y soldadura con la que se trabajará. En el proyecto únicamente manejaremos dos capas de cobre, la superior (Top Layer) y la inferior (Bottom Layer).

Figura 29. Especificaciones físicas de placa

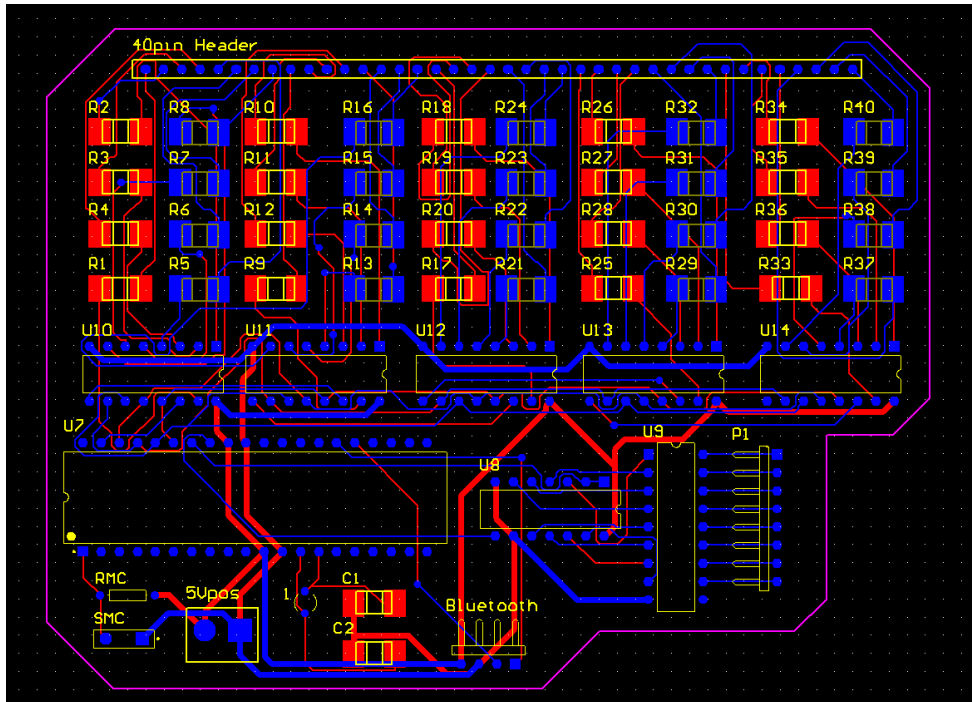


| Layer Name | Type | Material | Thickness (mil) | Dielectric Material | Dielectric Constant |
|----------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| Top Overlay | Overlay | | | | |
| Top Solder | Solder Mask/Co... | Surface Material | 0.4 | Solder Resist | 3.5 |
| Top Layer | Signal | Copper | 2.8 | | |
| Dielectric1 | Dielectric | Core | 12.6 | FR-4 | 4.8 |
| Bottom Layer | Signal | Copper | 2.8 | | |
| Bottom Solder | Solder Mask/Co... | Surface Material | 0.4 | Solder Resist | 3.5 |
| Bottom Overlay | Overlay | | | | |

(Elaboración propia)

Una vez especificadas las propiedades se colocan los componentes en la posición preferida. Luego se procede a diseñar el contorno de la placa, esto permite colocar las placas donde se requieran; al finalizar el contorno, se acomodan los componentes para lograr utilizar el espacio.

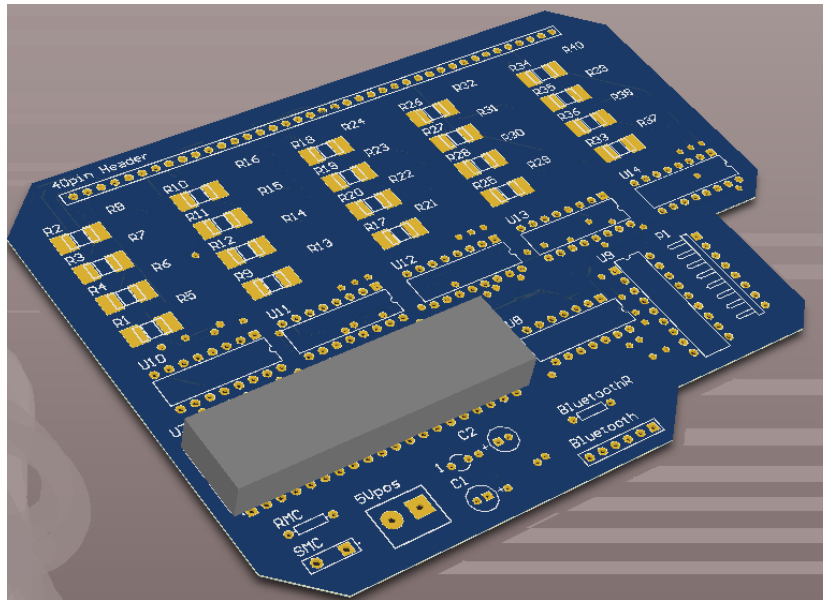
Figura 30. Ejemplo de placa diseñada e interconectada



(Elaboración propia)

En la Figura 13 podemos observar las interconexiones (azul son las conexiones de Bottom Layer, rojo son las conexiones de Top Layer), los dispositivos (amarillo para los que van en la parte superior, y un verde oscuro para los que son colocados en la parte inferior), las salidas y el borde de la placa (Rosado). Una vez tenemos el diseño de la placa, podemos observar una vista previa en 3D, como la Figura 14.

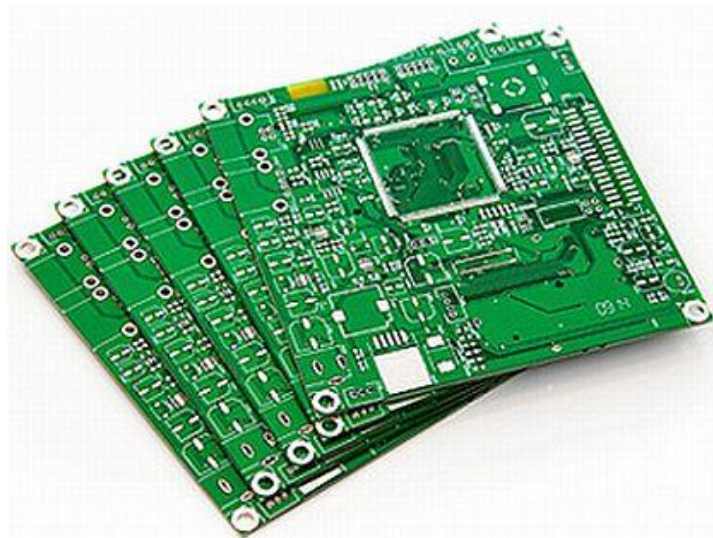
Figura 31. Vista previa en 3D



(Elaboración propia)

La vista 3D nos provee una muestra del resultado final. Se procede a obtener los archivos Gerber de fabricación. Los archivos Gerber son utilizados por la máquina que creará la placa. Además se debe exportar el archivo que posee la ubicación de las perforaciones a hacer. Una vez obtenidos estos archivos, se envían a la máquina para que las procese y comience a hacer la placa.

Figura 32. Ejemplo de placa finalizada, antes de agregar los componentes



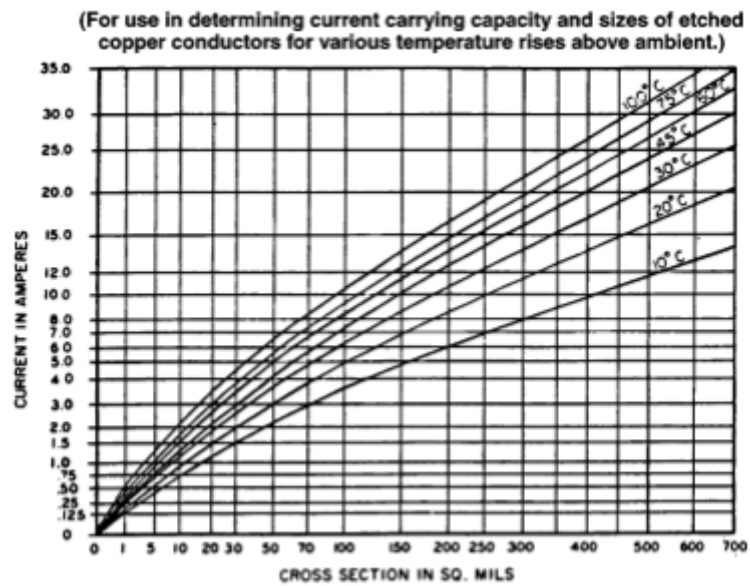
(Keller, 2012)

27. Precauciones y recomendaciones de diseño:

Unas consideraciones a tomar son:

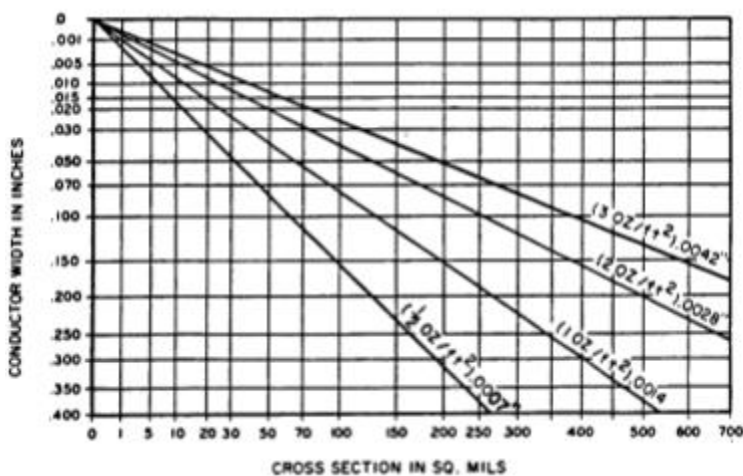
- No colocar pistas a 90 grados.
- Tomar en cuenta las restricciones de manufacturación.
- Utilizar la Figura 33 para diseñar el área transversal de las pistas.
- Utilizar la Figura 34 para obtener el grosor de las pistas con el grosor de cobre.
- Utilizar la Tabla 2 para diseñar la separación mínima entre pistas.

Figura 33. Diseño de área transversal tomando en cuenta corriente y calentamiento



(IPC, 1998)

Figura 34. Ancho de pistas en relación con área transversal requerida y grosor de cobre



(IPC, 1998)

Tabla 2. Espaciamiento dependiendo de voltaje

| Voltage Between Conductors (DC or AC Peaks) | Minimum Spacing | | | | | | |
|---|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Bare Board | | | | Assembly | | |
| | B1 | B2 | B3 | B4 | A5 | A6 | A7 |
| 0-15 | 0.05 mm | 0.1 mm | 0.1 mm | 0.05 mm | 0.13 mm | 0.13 mm | 0.13 mm |
| 16-30 | 0.05 mm | 0.1 mm | 0.1 mm | 0.05 mm | 0.13 mm | 0.25 mm | 0.13 mm |
| 31-50 | 0.1 mm | 0.6 mm | 0.6 mm | 0.13 mm | 0.13 mm | 0.4 mm | 0.13 mm |
| 51-100 | 0.1 mm | 0.6 mm | 1.5 mm | 0.13 mm | 0.13 mm | 0.5 mm | 0.13 mm |
| 101-150 | 0.2 mm | 0.6 mm | 3.2 mm | 0.4 mm | 0.4 mm | 0.8 mm | 0.4 mm |
| 151-170 | 0.2 mm | 1.25 mm | 3.2 mm | 0.4 mm | 0.4 mm | 0.8 mm | 0.4 mm |
| 171-250 | 0.2 mm | 1.25 mm | 6.4 mm | 0.4 mm | 0.4 mm | 0.8 mm | 0.4 mm |
| 251-300 | 0.2 mm | 1.25 mm | 12.5 mm | 0.4 mm | 0.4 mm | 0.8 mm | 0.8 mm |
| 301-500 | 0.25 mm | 2.5 mm | 12.5 mm | 0.8 mm | 0.8 mm | 1.5 mm | 0.8 mm |
| > 500 See para. 6.3 for calc. | 0.0025 mm /volt | 0.005 mm /volt | 0.025 mm /volt | 0.00305 mm /volt | 0.00305 mm /volt | 0.00305 mm /volt | 0.00305 mm /volt |

B1 - Internal Conductors

B2 - External Conductors, uncoated, sea level to 3050 m

B3 - External Conductors, uncoated, over 3050 m

B4 - External Conductors, with permanent polymer coating (any elevation)

A5 - External Conductors, with conformal coating over assembly (any elevation)

A6 - External Component lead/termination, uncoated

A7 - External Component lead termination, with conformal coating (any elevation)

(IPC, 1998)

B. Análisis de corriente, voltaje y potencia para un circuito eficiente

1. **Servomotores:** Los servomotores o servos son motores eléctricos que poseen la opción de ser controlados respecto a su posición y/o velocidad. Un servomotor puede ser digital o analógico. La Figura 35 muestra una imagen de un servomotor. (3)

Figura 35. Imagen de un servomotor

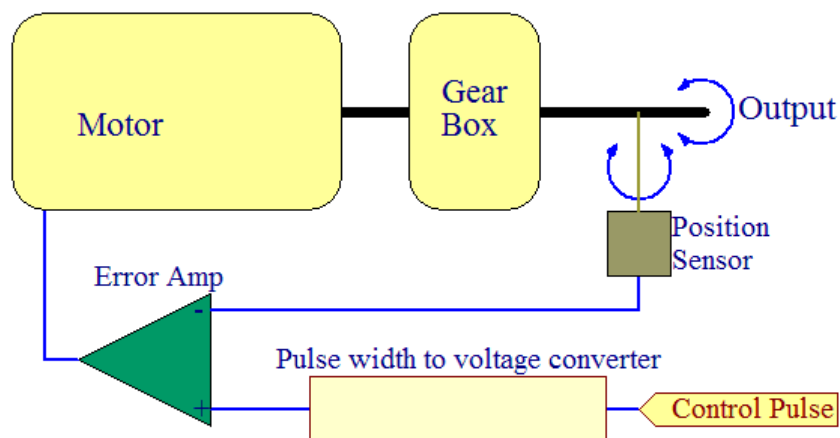


(electroSome, 2014)

El servomotor se controla por medio de pulsos eléctricos. Se utiliza un modulador del ancho de pulsos (PWM: Pulse Width Modulator), el cual genera los pulsos que controlan la posición del servo. Generalmente tienen un periodo de 20 milisegundos y un ancho entre 1 y 2 milisegundos. (1)

Un servomotor está compuesto por un motor de corriente continua, un driver de motor, una caja reductora, un sensor de posición, un amplificador operacional como control de error y un circuito integrado para decodificar los pulsos generados por el modulador de pulsos. En la siguiente Figura 36 se puede observar el diagrama de bloques del servo.

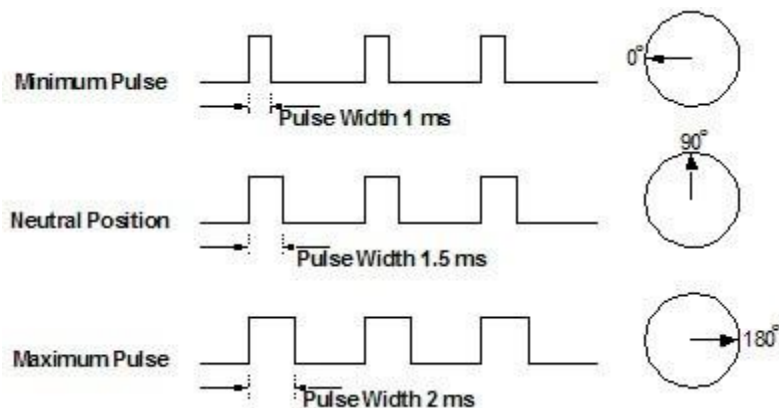
Figura 36. Diagrama de bloques del funcionamiento de un servomotor



(Digital Nemesis, 2014)

El funcionamiento del diagrama de bloques es el siguiente: el convertidor del voltaje de pulsos (Pulse width to voltaje converter) convierte el pulso de entrada en un voltaje de corriente directa, por medio de la descarga de un capacitor que se carga cuando el pulso está en alto (generalmente 5 voltios) y se descarga cuando el pulso está en bajo (0 voltios). La salida de este bloque entra al amplificador operacional, que tiene la función de restarle a este valor el voltaje de salida del sensor de posición, obteniendo así el error del sistema. El sensor de posición funciona comúnmente por medio de un potenciómetro (resistencia variable) que cambia el voltaje de salida dependiendo de la posición del servomotor. El voltaje del error del sistema se regula y se alimenta al motor de corriente continua para colocar el servo en la posición deseada. En la Figura 37 se observa el posicionamiento del servo según el ancho del pulso.

Figura 37. Posición del servomotor respecto al ancho del pulso



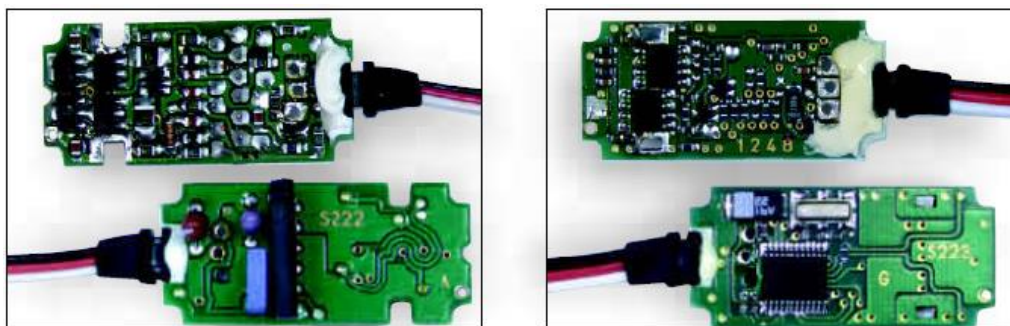
(Society Of Robots, 2014)

2. Servomotores analógicos: están compuestos por los componentes descritos anteriormente en el diagrama de bloques de la Figura 36. Físicamente los componentes que se pueden observar son el motor de corriente directa, la caja reductora (el juego de engranajes para reducir la velocidad de rotación del servomotor), un potenciómetro (para obtener la posición) y un circuito en el cual se encuentran los integrados necesarios para el control de posición. Estos servos reciben sus señales por medio de tres cables. Las señales son voltaje para la alimentación del motor, la tierra para referencia y la señal de control de posición (el pulso modulado). La alimentación de estos servos es generalmente 4.8 o 6 voltios. El poder alimentar un servomotor con 6 voltios en vez de 4.8 permite ventajas como el que el motor tenga más torque y más velocidad, pero a costo de un consumo mayor de corriente. La señal del pulso puede variar para cada motor en cuanto a su periodo, pero generalmente se encuentra entre 10 a 22 milisegundos.

3. Servomotores digitales: Son bastante parecidos a los analógicos. Se diferencian físicamente en que el circuito de control tiene un microprocesador que analiza la señal de entrada, la procesa y controla la posición del motor. Esta diferencia permite que el servo digital supere el analógico en varios aspectos. Uno de estos es que responde con más rapidez que el analógico, debido a que recibe más pulsos por segundo. El motor analógico recibe un pulso cada 20 milisegundos y el digital uno cada 3,3 milisegundos. Como consecuencia de este cambio, el torque es mayor que el de un motor analógico equivalente. Sin embargo, el servomotor digital tiene la desventaja de consumir más energía. Esto se debe a que se tiene que procesar información y se tiene que corregir la posición del eje más veces que en el motor analógico. Otra ventaja que tiene el servomotor digital es que es programable. Entre las características que se puede programar están el sentido de giro, la velocidad de giro, una posición central, el rango de movimiento y qué hacer cuando se pierde alguna señal de control.

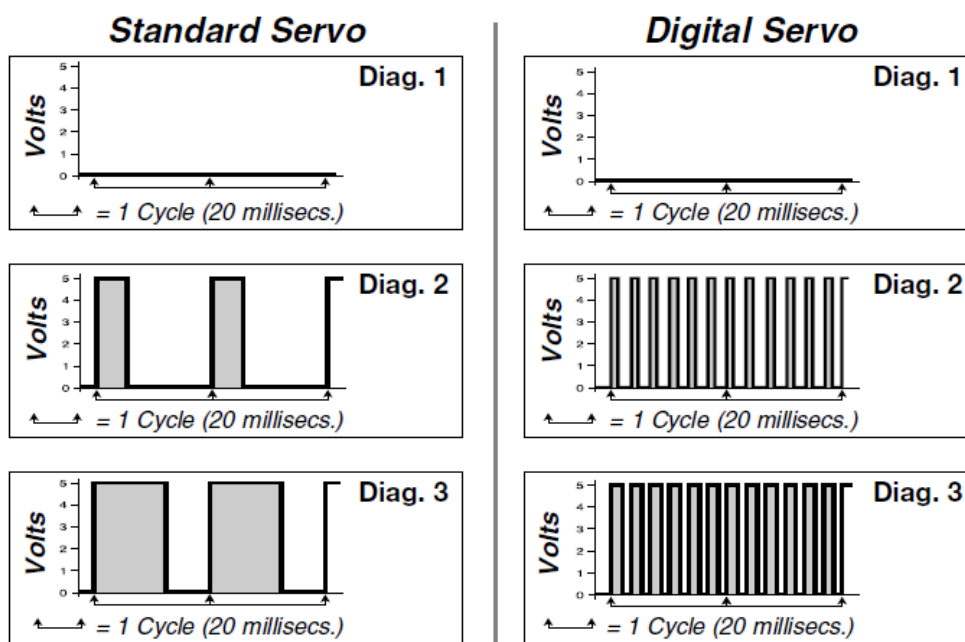
Las Figuras que se encuentran a continuación muestran algunas de las diferencias entre motores analógicos y digitales. La Figura 38 muestra los circuitos de control de los diferentes servomotores, en donde la placa del motor analógico utiliza un integrado de lógica, mientras la placa del motor digital posee un microprocesador controlado por un cristal de cuarzo. La Figura 39 muestra los pulsos que se utilizan para mover el motor de corriente directa. Este varía del pulso de control, ya que su función es permitir la alimentación del motor por el tiempo en el que el pulso esté en alto. Se puede observar aquí que el servomotor digital tiene mayor resolución, debido a que puede cambiar la alimentación más rápidamente, y disminuir la velocidad cuando se está acercando a la posición deseada y el consumo de potencia mayor que posee.

Figura 38. Placa de control del servo analógico (izquierda) vs el servo digital (derecha)



(Futaba)

Figura 39. Diagramas de los pulsos controladores de alimentación de los servomotores. Diagrama 1: Estado de reposo, diagrama 2: pulso de duración corta y de poco consumo para el motor, diagrama 3: pulso de duración larga y de alto consumo de potencia para el motor



(Futaba)

4. Circuito eléctrico: Es un sistema cerrado en el cual hay flujo de electrones. Al flujo de electrones en el tiempo se le conoce como corriente. La corriente es representada por la letra "I" y se mide en amperios (A). La fuerza que inicia el flujo de electrones es el desbalance de electrones entre dos objetos, por ejemplo, dos placas separadas por un aislante de corriente. Al interconectar estas dos placas por medio de un cable, se genera un circuito cerrado que permite el paso de corriente para que las placas lleguen a un balance atómico. A esta fuerza se le conoce como diferencia de potencial, voltaje o tensión, es representada por la letra "V" y se mide en voltios (V).

Así como hay materiales que conducen con facilidad la electricidad, hay otros que se oponen al flujo de electrones. A esta oposición se le conoce como resistencia; se representa con la letra "R" y se mide en ohmios (Ω). La resistencia depende del tipo de material, el área transversal de contacto y su temperatura. Debido a la oposición al flujo de electrones, se crea fricción y a la vez energía térmica. En los circuitos, los cables conductores también ofrecen cierta resistencia. Ésta se encuentra por medio de la ecuación 1.

Resistencia eléctrica según las propiedades del material

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

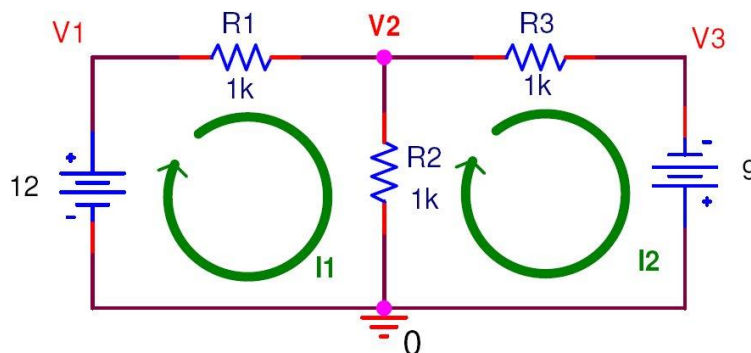
Aquí, R es la resistencia del cable en ohmios, ρ es la resistencia específica del material en ohmios por metro, l es el largo del cable en metros y A es el área transversal al flujo de corriente en metros cuadrados.

5. Ley de Ohm: Es la relación principal que existe entre el voltaje, la corriente y la resistencia. Esta ley consiste en que la corriente de un circuito es directamente proporcional al voltaje que alimenta el circuito. La ecuación 2 presenta la fórmula de la ley de Ohm.

$$V = IR$$

6. Leyes de Kirchhoff: Para entender las leyes de Kirchhoff, es necesario entender dos conceptos primero: los nodos y las mallas. Un nodo es una unión en un circuito de dos o más componentes y una malla es la representación de un circuito cerrado, es decir que conecta el positivo con el negativo de la fuente de voltaje. En la siguiente Figura 40 se puede observar un circuito con dos mallas y 4 nodos.

Figura 40. Circuito con dos mallas (I_1 e I_2) y cuatro nodos (V_1 , V_2 , V_3 y 0)



(Sena, 2007)

7. Ley de corriente de Kirchhoff: Dicta que la sumatoria de las corrientes que entran y salen en un

nodo debe ser cero.

8. **Ley de voltaje de Kirchhoff:** Dicta que la sumatoria de voltajes en una malla es igual a cero.

9. **Potencia:** Además del voltaje y la corriente, existe otro fenómeno que depende de las actividades de los electrones libres: la potencia. La potencia es la disipación de energía en el tiempo por medio de algún componente en el circuito, puede se transforma de energía eléctrica a calor. La potencia está denotada por la letra "P" y se mide en watts "W". Es una función de la corriente y el voltaje, y está dada por la siguiente ecuación.

Ecuación de potencia eléctrica

$$P = VI$$

Por medio del algebra y la Ley de Ohm, se puede representar la potencia según la siguiente ecuación.

Ecuación de potencia eléctrica independiente de la corriente o el voltaje

$$P = \frac{V^2}{R} = I^2R$$

10. **Transferencia de calor:** La termodinámica estudia la cantidad de transferencia de calor en un sistema mientras pasa por un proceso de un estado de equilibrio a otro. En otras palabras, es la transferencia de energía en forma de calor de una materia a otra que se encuentre a una temperatura más baja. La razón de la transferencia de calor (calor transferido en la unidad de tiempo) es estudiada por la ciencia conocida como transferencia de razón. Entre los aspectos que estudia esta ciencia están los tiempos de enfriamiento y calentamiento de un sistema, al igual que los cambios de temperatura. Para entender el funcionamiento de la transferencia de calor, es importante mencionar las leyes de la termodinámica.

En la primera ley se requiere que la razón de la transferencia de energía hacia un sistema sea igual a la razón de la energía razón de incremento de energía de ese sistema. En la segunda ley se requiere que el calor se transfiera en la dirección de la temperatura decreciente (Cengel, 2007:2).

La transferencia de calor se da por medio del desequilibrio térmico. Es decir, es necesario que exista una diferencia de temperatura entre los cuerpos o las sustancias adyacentes. Existen tres formas de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

11. **Conducción:** Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia

hacia las adyacentes, menos energéticas, como resultado de la interacción entre ellas (Cengel, 2007:1). Es decir, la conducción es la transferencia de calor entre dos materias que están en contacto y tengan diferente temperatura. La conducción se da en los sólidos, líquidos y/o gases; sin embargo, se manifiesta de forma diferente.

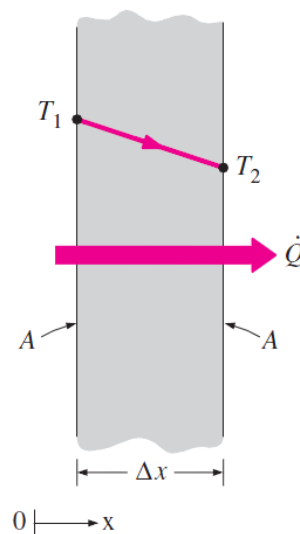
En los sólidos, el calor se transfiere por medio de vibraciones a nivel molecular y transporte de energía por los electrones libres. En los líquidos y gases, la transferencia se da por colisiones y difusiones de las moléculas de forma aleatoria. La razón o rapidez de la transferencia de calor depende de la configuración geométrica del cuerpo, el material del que esté hecho y la diferencia de temperatura a través del mismo. La razón de transferencia de calor está dada por la siguiente ecuación.

Razón de transferencia de calor por conducción

$$Q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Donde Q_{cond} es la razón de transferencia de calor por conducción y se mide en watts, k es la constante de conductividad (dependiente del material), se mide en watt partido metro cuadrado por grado kelvin o watt partido pulgadas cuadradas por grado centígrado, A es el área transversal al flujo de calor en metros cuadrados o pulgadas cuadradas, ΔT es la diferencia de temperatura entre la temperatura hacia donde está fluyendo el calor y desde donde está fluyendo y Δx es el grosor del cuerpo en grados kelvin. La unidad de la razón de calor es vatios o watts (W). En la siguiente Figura se puede observar un ejemplo de un cuerpo por el que se transfiere calor de T_1 a T_2 .

Figura 41. Transferencia de calor a través de una pared



(Cengel, 2007)

12. Convección: es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento, y comprende los efectos combinados de la conducción y del movimiento del fluido (Cengel, 2007:1). En otras palabras, la convección es la transferencia de calor de un cuerpo sólido a un fluido que tenga contacto con el mismo. Mientras más rápido sea el movimiento del fluido, más calor absorberá del sólido. Cuando no hay movimiento del fluido adyacente, la transferencia de calor entre el sólido y el fluido es por conducción únicamente. La energía de un cuerpo sólido es transferida por medio de conducción a su superficie y luego se transfiere a la capa del fluido en contacto por conducción. La convección transfiere la energía lejos de la superficie, por medio de la conducción dentro del aire, el cual se debe al movimiento aleatorio de las moléculas y el movimiento masivo, que remueve el fluido caliente por otro más frío. La convección puede ser forzada o natural. Se diferencian en que la convección forzada es un flujo impulsado por una fuerza externa, como un ventilador por ejemplo, y que la natural es el flujo inducido por las diferencias de densidad causadas por la diferencia de temperatura en el fluido. La convección está dada por la siguiente ecuación.

Razón de transferencia de calor por convección

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty})$$

Donde Q_{conv} es la transferencia de calor por convección en watts, h es el coeficiente de transferencia de calor en watt partido metro cuadrado por grado kelvin, A_s es el área superficial en contacto con el fluido en metros cuadrados, T_s es la temperatura de la superficie en grados Celsius y T_{∞} es la temperatura del fluido lejos de la superficie, también en grados Celsius.

13. Radiación: La *radiación* es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas (Cengel, 2007:1). La radiación es la energía que cada cuerpo cuya temperatura se encuentra arriba del cero absoluto emite en forma de ondas electromagnéticas. La radiación se da en líquidos, sólidos y gases, ya que es un fenómeno volumétrico. Sin embargo para sólidos opacos se considera como un fenómeno superficial, porque la radiación interna nunca llega a la superficie. La razón máxima de transferencia de calor que se puede emitir en forma de radiación de una superficie es:

Razón de transferencia de calor por radiación

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_{alred}^4)$$

Donde Q_{rad} es la transferencia de calor en forma de radiación en watts, ε es la constante de emisividad del material, σ es $5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, A_s es el área superficial en metros cuadrados, T_s la temperatura de la superficie en grados Celsius, T_{alred} la temperatura del material que rodea la superficie, también en grados Celsius.

14. Calor en un circuito eléctrico: La energía eléctrica en un circuito se transforma en diferentes tipos de energía útil por los según los componentes que se encuentren en el mismo, por ejemplo un motor, transforma la energía eléctrica en energía mecánica, un calentador en energía de calor, un foco en energía luminosa, etc. La energía que no es transformada a energía útil, se transforma en calor. Este calor se debe considerar en el diseño de un circuito eléctrico, debido a que aumenta la temperatura de los componentes y puede causar variaciones en el funcionamiento de los mismos o que dejen de funcionar. Para proteger a los componentes se considera la disipación de potencia (energía por unidad de tiempo), asegurando así, que el componente mantenga una temperatura en la que pueda funcionar correctamente.

15. Generación de calor: Se genera calor cada vez que pasa energía eléctrica por un componente y se mide en watts. El calor es equivalente a la potencia del componente, es decir, a la corriente que pasa por el componente multiplicado por el voltaje entre las terminales de entrada y de salida del mismo. Debido a esto, se utiliza la potencia de un componente como referencia para determinar las condiciones de uso que se le puede dar, sin que exceda una temperatura que lo pueda dañar. Además de la potencia, es importante considerar el voltaje y la corriente máxima que pueden soportar los componentes.

Se puede considerar como un ejemplo la potencia que disipa una resistencia. Si se tiene una resistencia que tenga la capacidad de disipar 1 watt y hay 2 voltios entre sus terminales, la corriente máxima que puede pasar por ella es de 0.5 amperios (al despejar la corriente de la ecuación $P = VI$). La ecuación 8 demuestra la operación del ejemplo.

Solución matemática al ejemplo sobre la corriente máxima que puede circular por una resistencia según su disipación de potencia

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1}{2} = 0.5$$

Así como se disipa la potencia en las resistencias, también se disipa en los circuitos integrados (conjunto de componentes electrónicos básicos como resistencias, transistores y diodos, conectados en una lámina de material semiconductor y empaquetados en una caja de plástico).

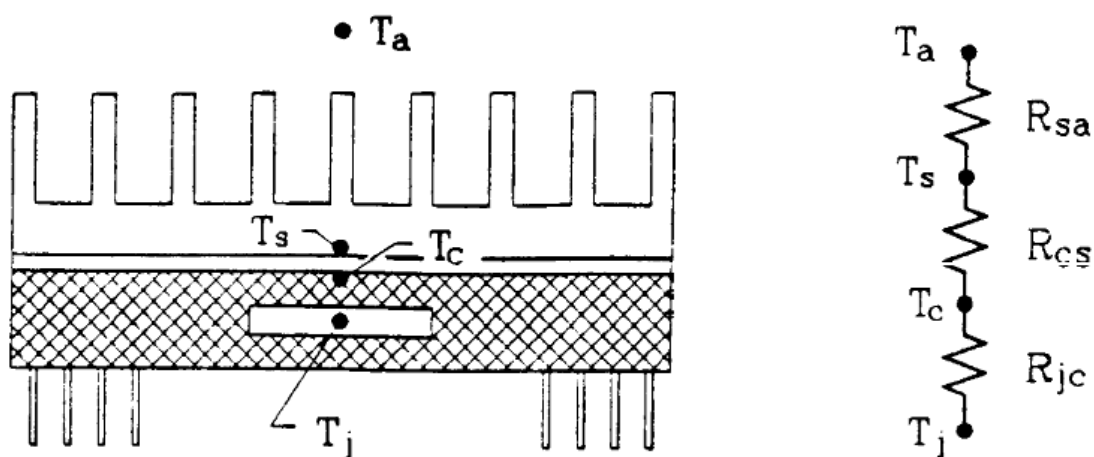
Conforme las tecnologías han avanzado, se ha ido disminuyendo el tamaño de los componentes electrónicos, mejorando su rendimiento y capacidad. Sin embargo, con estos avances, el consumo de potencia sigue siendo un factor problemático. Hay circuitos integrados o componentes que pueden llegar a consumir demasiada potencia a tal punto que el empaquetado no sea capaz de disiparla toda y quede dañado. Algunos de estos componentes son los transistores de potencia, amplificadores operacionales de potencia, procesadores, entre otros. Para que estos componentes funcionen a la potencia máxima que ofrece el integrado, se utilizan métodos de disipación de potencia.

16. **Disipación de potencia:** En cuanto a las conexiones, existen las rutas y los cables. Las rutas son conexiones de cobre en un circuito impreso y los cables son conexiones de alambre en un circuito no impreso. En un circuito impreso, el diseño de las rutas varía en cuanto a su ancho dependiendo de la corriente máxima que pasa por ellas, ya que el espesor de las rutas es fijo. Esto se debe a que mientras más corriente pasa por una ruta, más aumenta la potencia de la misma. Sabemos que $P = I^2R$. Entonces, al aumentar el ancho del material, el área transversal por donde pasa la corriente aumenta y por ende la resistencia de la ruta disminuye, logrando así que aún con el aumento de corriente, la potencia disipada sea tolerable por la ruta. De igual forma se realiza el análisis para el grosor del cable en circuitos no impresos.

La disipación de los circuitos integrados varía un poco dependiendo de si son de superficie o no. Sin embargo, es bastante parecido el análisis, ya que ambos utilizan disipadores de calor para disipar la potencia. Se diferencian en que el integrado de superficie puede utilizar la placa impresa como disipador de calor. Un disipador de calor es un dispositivo que extrae calor de una superficie caliente a un ambiente de menor temperatura.

17. **Modelo de resistencias térmicas:** El análisis que se utiliza para determinar que el integrado opere bajo temperaturas adecuadas es el calcular la temperatura a la que estaría la unión principal de los materiales dentro del integrado, y que ésta no exceda la temperatura máxima sugerida por el fabricante. Para ello se hace un modelamiento de resistencias térmicas, en el cual se considera la resistencia térmica del circuito integrado y de los disipadores de calor involucrados. En la Figura 41 se puede observar un ejemplo del modelo de resistencias térmicas.

Figura 42. Circuito de resistencias térmicas



(Lee)

En la Figura anterior se modelan las resistencias térmicas de un circuito integrado y su disipador de calor. Se puede observar que el modelo de resistencias térmicas es análogo a un circuito eléctrico, donde la resistencia eléctrica es la resistencia térmica, los voltajes son las temperaturas y la corriente es el calor. Las temperaturas que se representan son la temperatura de unión del integrado (T_j), la temperatura del empaquetado (T_c), la temperatura del disipador de calor (T_s) y la temperatura del ambiente (T_a). Todas las temperaturas se encuentran en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Las resistencias térmicas que se representan son la resistencia de unión a empaquetado (R_{jc}), la resistencia de empaquetado a disipador de calor (R_{cs}) y la resistencia de disipador de calor al ambiente (R_{sa}). La siguiente ecuación presenta la relación entre la resistencia, el calor y la diferencia de temperatura.

Relación de la resistencia térmica, el calor y la diferencia de temperaturas

$$\Delta T = QR$$

Al sumar las resistencias en serie o paralelo se puede encontrar una resistencia equivalente y así poder determinar la diferencia de temperatura entre las uniones del transistor y el medio ambiente. Esta relación se observa en la siguiente ecuación.

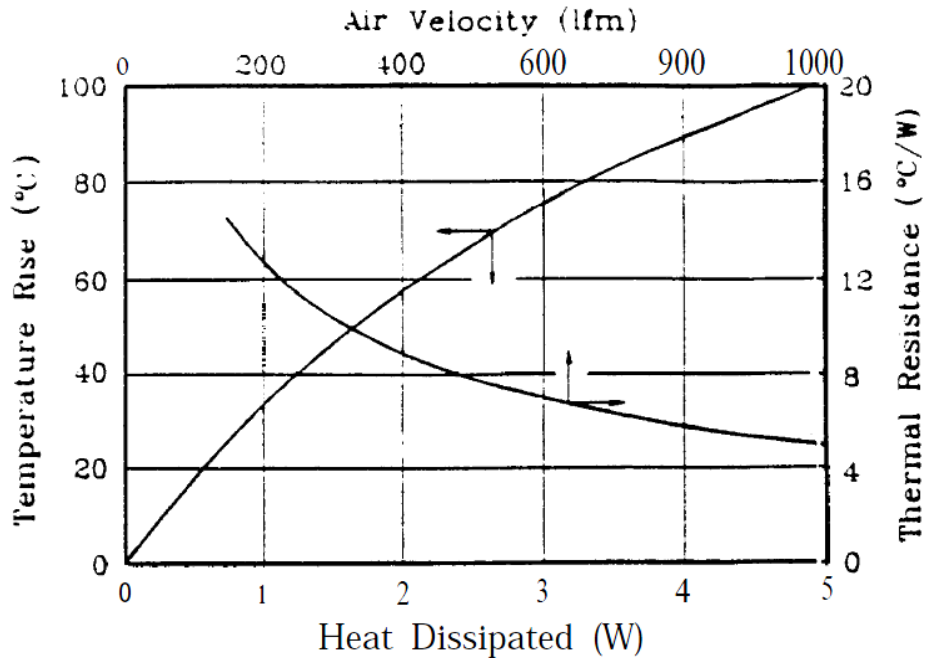
Relación equivalente de la resistencia térmica, el calor y la diferencia de temperaturas

$$T_j - T_a = QR_{ja}$$

Donde R_{ja} es la resistencia equivalente. A partir de esta ecuación se puede encontrar la temperatura a la que operará la unión del integrado. Debido a que generalmente se sabe la potencia máxima a la que trabajará el integrado y que se conoce la temperatura ambiente, se pueden modificar las resistencias térmicas para que la temperatura de la unión no exceda lo sugerido por el fabricante.

18. Diseño de las resistencias térmicas: Las resistencias térmicas deben ser pequeñas para poder disipar potencias altas. De todas las resistencias térmicas, la única que no es modificable es la resistencia de unión a empaquetado, ya que está dada por el diseño interno del integrado. La resistencia de empaquetado a disipador de calor se puede disminuir por medio de pastas de contacto de alta conductividad térmica. La resistencia de un disipador de calor al ambiente se puede obtener por medio de la hoja de datos del mismo, en la cual se utiliza la gráfica de la siguiente Figura.

Figura 43. Gráfica para determinar la resistencia térmica del disipador de calor al ambiente



(Lee)

En esta gráfica se observan dos curvas. La curva que inicia en el punto (0,0) es la que indica el aumento de temperatura (ΔT_{sa}) respecto a la potencia disipada (P o Q). Los ejes de lectura son el aumento de temperatura (Temperature Rise) y el calor disipado (Heat Dissipated). Se utiliza cuando se tiene una convección natural. La segunda curva que se observa en dicha gráfica da la resistencia térmica de un disipador de calor al ambiente cuando se utiliza convección forzada. Para el uso de esta gráfica se asume que el disipador de calor esté colocado correctamente sobre el integrado y respecto al flujo del fluido.

Cuando no se tiene una gráfica o una hoja de datos del disipador de calor a utilizar, se debe recurrir a la teoría para calcular la resistencia térmica del disipador de calor al ambiente. También pueden utilizarse programas que calculen este valor. La fórmula está dada por la siguiente ecuación.

Ecuación para calcular la resistencia térmica a partir del área superficial del disipador de calor y el coeficiente de transferencia de calor del fluido que rodea al disipador de calor

$$\theta_{sa} = \frac{60}{Hc * A * 17.57 * 1.8}$$

Donde θ_{sa} es la resistencia térmica y se mide en grados Celsius partido watt , A es el área total de la superficie del disipador de calor en pies cuadrados, Hc es el coeficiente de transferencia de calor del fluido en BTU partido horas por pies cuadrados por grados Fahrenheit y las constantes son constantes de conversión. 17.57 convierte BTU/minuto a Watts, 1.8 convierte grados Fahrenheit a grados Celsius y el 60 convierte las horas a minutos.

Debido a que calcular el coeficiente de transferencia de calor de un fluido es bastante complejo, ya que depende de factores químicos así como la densidad del fluido, la conductividad térmica, el calor específico y otros, los ingenieros térmicos han desarrollado una fórmula mucho más sencilla para determinar la resistencia térmica de un disipador de calor cuando el fluido que lo rodea es el aire. Esta fórmula está dada por la siguiente ecuación.

Fórmula simplificada para determinar la resistencia térmica de un disipador de calor

$$\theta_{sa} = \frac{\text{Performance Factor}}{\text{Profile Perimeter}}$$

Donde el factor de rendimiento (Performance Factor) está dado por la siguiente ecuación y el perímetro de perfil (Profile Perimeter) es el perímetro transversal al flujo del aire en pulgadas.

Factor de rendimiento

$$\text{Performance Factor} = \frac{916}{\sqrt{V * L}}$$

Donde V es la velocidad del aire en LFM (Linear Feet per Minute por sus siglas, o pies lineales por minuto) y L es el largo del disipador de calor en pulgadas.

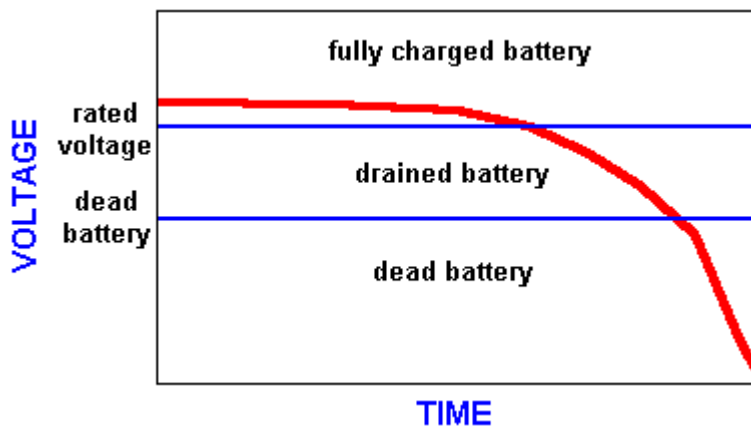
19. Baterías: Las baterías son dispositivos que almacenan energía en forma de voltaje. Existen baterías recargables y no recargables, lo que significa que unas se pueden reutilizar, mientras que las otras son desechables. Hay baterías de diversos tipos: níquel-cadmio (NiCd), níquel-metal (NiMH) y litio (LiPo), entre otras.

La capacidad de una batería es la duración que tiene la batería antes de descargarse. Mientras más corriente se demande de la batería más rápido se descargará y más rápido disminuirá su voltaje. Cada batería ofrece un valor para medir su capacidad, éste está dado en ampere hora (Ah) y se refiere a la capacidad de corriente que puede ofrecer una batería en una hora para quedar completamente descargada. Además de la capacidad de la batería, otra característica es la razón de descarga, lo que implica la máxima corriente que puede ofrecer la batería y está dada en amperios.

Una característica que debe considerarse en las baterías es que el voltaje nominal no es siempre el que ofrece la batería. Esto se debe a que cuando está completamente cargada, la batería tiene un

15% más de carga respecto al voltaje nominal y cuando la batería está a un valor de 15% menos que el voltaje nominal, deja de funcionar con toda su capacidad. La batería continúa descargándose y llega a un estado conocido como batería muerta en donde ya no puede alimentar a un circuito tanto en corriente como voltaje. En la siguiente Figura se puede observar una curva que muestra el voltaje de la batería respecto al tiempo cuando está en uso. Inicia con un voltaje sobre el voltaje nominal, pasa por el 85% del voltaje nominal y llega al estado de batería muerta.

Figura 44. Voltaje nominal (línea azul superior), de batería muerta (línea azul inferior) y voltaje de la batería en color rojo



(Society Of Robots, 2014)

A continuación se presentan las diferencias entre las baterías principales existentes para robótica o usos similares.

20. Níquel-cadmio: Las baterías de níquel-cadmio son baterías recargables que sufren del efecto memoria, es decir que cada vez que se recarga, la batería almacena menos energía que la que tenía y por lo tanto, pierde la capacidad de cargarse hasta el voltaje de fábrica. Este efecto se puede prevenir o disminuir descargando completamente la batería antes de cargarla. Las baterías de níquel-cadmio se recargan en una o dos horas. Cada batería de níquel-cadmio tiene un voltaje de 1.2 voltios.

Figura 45. Paquete de baterías níquel-cadmio



(Society Of Robots, 2014)

21. **Níquel-metal:** Es la batería más común en robots móviles. Son recargables y casi no sufren del efecto memoria, por lo que a cada recarga el voltaje máximo es bastante cercano al voltaje de fábrica. Ofrece la capacidad más alta de todos los tipos de baterías. Tarda aproximadamente 10 horas en cargarse y tiene la desventaja de descargarse aunque no se encuentre en uso. Al igual que las baterías níquel-cadmio, éstas también vienen en celdas de 1.2 voltios.

Figura 46. Paquete de baterías níquel-metal



(Society Of Robots, 2014)

22. **Litio-ion:** Son baterías bastante livianas y presentan la opción de grandes descargas de corriente. Su nivel de voltaje aumenta en múltiplos de 3.7 voltios.

Estas baterías no poseen efecto de memoria, por lo que cada recarga dejará la batería con las características de fábrica. Son las baterías más caras del mercado. Sin embargo, posee la desventaja de ser peligrosas, debido a que si se utilizan de forma incorrecta pueden incendiarse.

Figura 47. Paquete de baterías litio-ion



(Society Of Robots, 2014)

23. **Polímero de litio (LiPo):** Son similares a las baterías de litio-ion, con la ventaja que ofrecen mayor capacidad y razón de descarga de hasta 30 amperios. Estas baterías necesitan cargadores especiales para no dañar la batería o incendiarla como consecuencia de sobrecarga. Tampoco debe ser sobredescargada, ya que esto podría dañar la batería. Es recomendable que si se trabaja con una celda de 3.7 voltios, se descargue hasta 3 voltios, con dos celdas (7.4 voltios) hasta 6 voltios y con 3 celdas (11.1 voltios) hasta 9 voltios.

24. **Alcalinas:** Son las baterías más comunes en el mercado, sin embargo tienen una capacidad baja, son pesadas y poseen una razón de descarga baja.

Figura 48. Baterías alcalinas de marca Energizer



(Society Of Robots, 2014)

C. Administración, manual de usuario y propuesta de producción

1. **Gráficos de Gantt:** «El diagrama de Gantt constituyó probablemente la primera técnica de control y planeación de proyectos que surgió durante los años cuarenta como respuesta a la necesidad de administrar proyectos y sistemas complejos de defensa de una mejor manera. El diagrama de Gantt muestra anticipadamente de una manera simple las fechas de terminación de las diferentes actividades del proyecto en forma de barras graficadas con respecto al tiempo en el eje horizontal. Los tiempos reales de terminación se muestran mediante el sombreado de barras adecuadamente. Si se dibuja una línea vertical en una fecha determinada, usted podrá determinar qué componentes del proyecto están retrasadas o adelantadas.

El diagrama de Gantt obliga al administrador del proyecto a desarrollar un plan con antelación y proporciona un vistazo rápido del avance del proyecto en un momento dado. Desafortunadamente, este diagrama no siempre describe por completo la interacción entre las diferentes actividades del proyecto.

El diagrama de Gantt se puede utilizar también para organizar la secuencia de las actividades de las máquinas en la planta. El diagrama basado en la máquina puede incluir actividades de reparación y mantenimiento marcando el periodo en el que éstas se llevarán a cabo.» (Niebel, 2009)

2. **Balanced scorecard:** «El cuadro de mando integral (CMI) o Balanced Scorecard (BSC) es la herramienta que permite describir y comunicar una estrategia de forma coherente y clara. No se puede aplicar una estrategia que no se puede describir.

El CMI presenta una metodología clara de enlace entre la estrategia de la empresa y la acción, algo que habitualmente no se cumple en la mayoría de planes estratégicos.

Desde la perspectiva desarrollada por los profesores Kaplan y Norton (2001), el CMI tiene como objetivo fundamental, convertir la estrategia de una empresa en acción y resultados, a través de alineación de los objetivos de todas las perspectivas desde las que puede observarse una empresa: financiera, procesos, clientes y capacidades estratégicas.» (Martínez, 2005)

3. **Cadena de suministros:** «La idea central de la administración de la cadena de suministro es aplicar el enfoque de un sistema completo a la administración del flujo de información, materiales y servicios, provenientes de proveedores de materias primas, mientras pasan por las fábricas y los almacenes, hasta llegar al consumidor final. Tendencias recientes, como la subcontratación y la producción personalizada en masa, están obligando a las compañías a encontrar vías flexibles para satisfacer la demanda de los clientes. El punto focal es optimizar las actividades centrales a efecto de maximizar la velocidad de respuesta ante los cambios de las expectativas de los clientes.» (Chase, 2009)

4. Diagrama de operaciones del proceso: «La gráfica del proceso operativo muestra la secuencia cronológica de todas las operaciones, inspecciones, tiempos permitidos y materiales que se utilizan en un proceso de manufactura o de negocios, desde la llegada de la materia prima hasta el empaquetado del producto terminado. La gráfica muestra la entrada de todos los componentes y subensambles al ensamble principal. De la misma manera como un esquema muestra detalles de diseño tales como partes, tolerancias y especificaciones, la gráfica del proceso operativo ofrece detalles de la manufactura y del negocio con sólo echar un vistazo.

Se utilizan dos símbolos para construir la gráfica del proceso operativo: un pequeño círculo representa una operación y un pequeño cuadrado representa una inspección. Una operación se lleva a cabo cuando una parte bajo estudio se transforma intencionalmente, o cuando se estudia o se planea antes de que se realice cualquier trabajo productivo en dicha parte. Una inspección se realiza cuando la parte es examinada para determinar su cumplimiento con un estándar. Observe que algunos analistas prefieren describir sólo las operaciones, por lo que al resultado le llaman gráfica de la descripción del proceso.

Antes de comenzar la construcción real de la gráfica de procesos operativos, los analistas identifican la gráfica por medio del título —Gráfica del proceso operativo—, e información adicional como el número de parte, número de plano, descripción del proceso, método actual o propuesto, fecha y nombre de la persona que elaboró la gráfica. Dentro de la información adicional se pueden incluir datos tales como el número de gráfica, la planta, el edificio y el departamento. Las líneas verticales indican el flujo general del proceso a medida que se realiza el trabajo, mientras que las líneas horizontales que alimentan a las líneas de flujo vertical indican materiales, ya sea comprados o elaborados durante el proceso. Las partes se muestran como ingresando a una línea vertical para ensamblado o abandonando una línea vertical para desensamblado. Los materiales que son desensamblados o extraídos se representan mediante líneas horizontales de materiales y se dibujan a la derecha de la línea de flujo vertical, mientras que los materiales de ensamblado se muestran mediante líneas horizontales dibujadas a la izquierda de la línea de flujo vertical.

En general, el diagrama del proceso operativo se construye de tal manera que las líneas de flujo verticales y las líneas de materiales horizontales no se crucen. Si es estrictamente necesario el cruce de una línea vertical con una horizontal, se debe utilizar la convención para mostrar que no se presenta ninguna conexión; esto es, dibujar un pequeño semicírculo en la línea horizontal en el punto donde la línea vertical lo cruce. Los valores del tiempo, basados en estimaciones o en mediciones reales, pueden asignarse a cada operación o inspección. El diagrama de proceso operativo terminado ayuda a los analistas a visualizar el método en curso, con todos sus detalles, de tal forma que se pueden identificar nuevos y mejores procedimientos. Este diagrama muestra a los analistas qué efecto tendrá un cambio en una determinada operación en las operaciones precedentes y subsecuentes.» (Niebel, 2009)

5. Planificación estratégica de la calidad: «El objetivo de la planeación estratégica de la capacidad es ofrecer un enfoque para determinar el nivel general de la capacidad de los recursos de capital intensivo (el tamaño de las instalaciones, el equipamiento y la fuerza de trabajo completa) que apoye mejor la estrategia competitiva de la compañía a largo plazo. El nivel de capacidad que se elija tiene repercusiones críticas en el índice de respuesta de la empresa, la estructura de sus costos, sus políticas de inventario y los administradores y personal de apoyo que requiere.

Si la capacidad no es adecuada, la compañía podría perder clientes en razón de un servicio lento o de que permite que los competidores entren al mercado. Si la capacidad es excesiva, la compañía tal vez se vería obligada a bajar los precios para estimular la demanda, a subutilizar su fuerza de trabajo, a llevar un inventario excesivo o a buscar productos adicionales, menos rentables, para permanecer en los negocios.» (Chase, 2009)

6. Administración de restricciones: «El sistema de medición de una empresa debe fomentar el aumento de las ganancias netas, el rendimiento sobre la inversión y la liquidez. Una empresa lo puede lograr si, a nivel de operaciones, recompensa el desempeño con base en la cantidad de producción, inventario y gasto operativo que se haya generado, que es esencial para el éxito de la empresa.

Para controlar la producción, inventario y gastos operativos, se debe analizar el sistema para encontrar los cuellos de botella y los recursos restringidos por la capacidad. Sólo entonces puede definir la compañía un tambor de control, reservas para garantizar la producción y sogas para transmitir la información correcta a los sitios indicados, al tiempo que en otras partes se minimiza el trabajo sin terminar. Sin este enfoque, no se pueden diagnosticar adecuadamente los problemas y los procedimientos de solución son imposibles.

Un cuello de botella se define como cualquier recurso cuya capacidad sea menor que su demanda. Un cuello de botella es una restricción en el sistema que limita la producción. En el proceso de manufactura, es el punto donde el caudal se adelgaza hasta ser una corriente flaca. Un cuello de botella puede ser una máquina, falta de trabajadores capacitados o una herramienta especial. En las observaciones de la industria se ha visto que la mayoría de las plantas tienen muy pocas operaciones con cuellos de botella.

Esta teoría general de restricciones provoca que las compañías busquen qué les impide alcanzar sus metas y la forma de rodear esta limitación. Si, en un entorno manufacturero, la limitación es la insuficiencia de capacidad, entonces la manera de romper con la restricción sería el tiempo extra, herramientas especializadas, equipo de soporte, trabajadores excepcionalmente hábiles, subcontratistas, rediseño del producto o proceso, rutas alternativas y así sucesivamente.» (Chase, 2009)

7. Sistema de acumulación de costos: «La acumulación del costeo es la recopilación de información de costos en forma organizada a través de un sistema contable. Por ejemplo, una editorial que compra rollos de papel para imprimir revistas recopila (acumula) los costos de los rollos individuales que se utilizan en cualquier mes para obtener el costo total mensual de comprar papel.

Más allá de la acumulación de costos, los gerentes, con ayuda de los contadores administrativos, asignan costos a los objetos del costo designados (tales como las diferentes revistas que la compañía pública) para poder tomar decisiones estratégicas (tales como la fijación de precios de las diferentes revistas y a cuales prestar más atención). Los gerentes también asignan costos a los objetos del costo para implementar la estrategia.» (Horngren, 2007)

8. Análisis beneficio costo: «El estudio de la viabilidad técnica evalúo si era físicamente posible hacer el proyecto. El objetivo del estudio técnico que se hace dentro de la viabilidad económica de un proyecto es netamente financiero.

La relación beneficio-costo compara el valor actual de los beneficios proyectados con el valor actual de los costos, incluida la inversión. El método lleva a la misma regla de decisión del valor actual neto, ya que cuando este es cero, la relación beneficio-costo será igual a uno. Si el valor actual neto es mayor a cero, la relación será mayor a uno, y si el valor actual neto es negativo, esta será menor que uno.» (Chain, 2007)

9. Análisis financiero: «La contabilidad es un proceso que consiste en identificar, registrar, resumir y presentar información económica a quienes toman decisiones. La contabilidad financiera se centra en las necesidades específicas de aquellas personas externas a la empresa que toman decisiones, entre ellos los accionistas, los proveedores, los bancos y los organismos gubernamentales.» (Horgren, 2000)

10. Valor presente neto: «El valor presente es el valor actual de una entrada o salida futura de efectivo.» (Horgren, 2000)

11. Planificación de los requerimientos de materiales: «Las siglas MRP corresponden, en principio, a las palabras ingresadas material requirements planning o planificación de necesidades de materiales.

El MRP consiste esencialmente en un cálculo de necesidades netas de los artículos (productos terminados, subconjuntos, componentes, materia prima, etc.)» (Pascual, 1999)

«La causa es que MRP es un método lógico y fácil de entender para abordar el problema de determinar el número de piezas, componentes y materiales necesarios para producir cada pieza final. MRP también proporciona un programa para especificar cuándo hay que producir o pedir materiales, piezas y componentes. MRP se basa en la demanda dependiente, la que es resultado de la demanda de

artículos de nivel superior.”» (Chase, 2009)

12. Sistemas de producción: «Empezamos con la definición de un proceso genérico para el desarrollo de productos que describe los pasos básicos necesarios para diseñar un producto. El proceso representa la secuencia básica de los pasos o actividades que la empresa sigue para concebir, diseñar y llevar un producto al mercado.

Muchas de estas tareas implican actividades intelectuales, en lugar de físicas. Algunas empresas definen y siguen un proceso de desarrollo preciso y detallado, mientras que otras tal vez ni siquiera puedan describir sus procesos. Toda organización emplea un proceso diferente que el de las demás organizaciones; de hecho, la misma organización podría aplicar distintos procesos a diferentes grupos de productos.

Los productos personalizados son pequeñas variantes de una configuración estándar y por lo general se crean para responder al pedido específico de un cliente. Algunos ejemplos son los interruptores, los motores, las baterías y los recipientes. El desarrollo de estos productos consiste primordialmente en establecer los valores de las variables del diseño, como las dimensiones físicas y los materiales. Las compañías pueden ser muy aptas para producir con rapidez estos productos personalizados utilizando un diseño muy estructurado y un proceso de desarrollo estructurado en torno a las capacidades del proceso que se utilizará.”»

(Chase, 2009)

13. Inventarios: «Inventario son las existencias de una pieza o recurso utilizado en una organización. Un *sistema de inventario* es el conjunto de políticas y controles que vigilan los niveles del inventario y determinan aquellos a mantener, el momento en que es necesario reabastecerlo y qué tan grandes deben ser los pedidos.

Por convención, el término *inventario de manufactura* se refiere a las piezas que contribuyen o se vuelven parte de la producción de una empresa. El inventario de manufactura casi siempre se clasifica en *materia prima*, *productos terminados*, *partes componentes*, *suministros* y *trabajo en proceso*. En los servicios, el término *inventario* por lo regular se refiere a los bienes tangibles a vender y los suministros necesarios para administrar el servicio.

El propósito básico del análisis del inventario en la manufactura y los servicios es especificar 1) cuándo es necesario pedir más piezas, y 2) qué tan grandes deben ser los pedidos. Muchas empresas suelen establecer relaciones con los proveedores a más largo plazo para cubrir sus necesidades quizá de todo un año. Esto cambia las cuestiones de “cuándo” y “cuántos pedir” por “cuándo” y “cuántos entregar”.» (Chase 2009)

V. ANTECEDENTES

Esta es la cuarta etapa del megaproyecto de la prótesis transhumeral, por lo que es importante mencionar lo que se implementó en las primeras partes y cómo quedó la prótesis después de la tercera etapa.

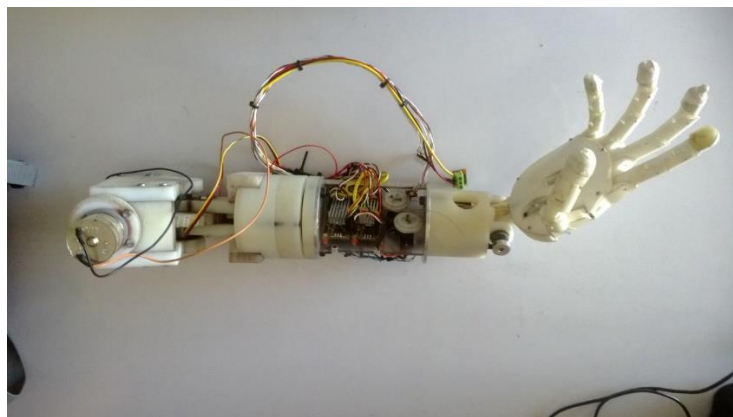
En la primera parte se diseñó una mano biónica controlada por seis servomotores, uno para cada dedo. El diseño permitió agarrar algunos objetos como una pelota de tenis o un lápiz. También se implementó el uso de sensores de presión para determinar cuando el objeto ya había sido agarrado. La interfaz de usuario implementada fue por medio de señales electromiográficas en el antebrazo que accionaban rutinas predeterminadas.

La segunda etapa del megaproyecto consistió en agregarla a la mano biónica un antebrazo y codo, enfocándose en los movimientos de flexión y extensión del codo y la muñeca y el movimiento de pronosupinación del antebrazo. La interfaz de usuario empleada fue por medio de unas plantillas de presión colocadas en los pies que accionaban rutinas predeterminadas.

La tercera parte fue el mejorar el mecanismo del movimiento de los dedos y sus actuadores, que la mano tuviera un aspecto más humano. También consistió en mejorar el mecanismo del codo para que éste fuese más eficiente.

A continuación se presenta una imagen que muestra el diseño final de las tres etapas.

Figura 49: Prótesis Transhumeral terminada luego de la tercera fase de Megaproyecto



(Elaboración propia)

La prótesis no poseía un sistema de control, lo que tenía eran rutinas establecidas para comandos específicos enviados por la interfaz de usuario.

VI. METODOLOGÍA

A. Adquisición de datos y procesamiento de señales electromiográficas

Los pasos que se llevarán a cabo para realizar la adquisición y procesamiento de señales electromiográficas fueron los siguientes:

1. Ubicar los electrodos en los músculos correctos.
 - a. Realizar pruebas con diferentes tipos de electrodos para elegir el más preciso en la adquisición de la señal eléctrica proveniente de las contracciones musculares. muscular.
 - b. Realizar mediciones en diferentes músculos del brazo para ubicar dónde se encuentran los músculos que controlan el movimiento de los dedos.
 - c. Realizar varias pruebas para conocer cuál es la mejor distancia de separación entre los electrodos.
 - d. Colocar los electrodos en un solo músculo para evitar que se midan dos músculos a la vez.
2. Filtrar y procesar la señal electromiográfica.
 - a. Investigar sobre las características de las señales electromiográficas.
 - b. Investigar sobre los componentes electrónicos que permitan el filtrado de señales electromiográficas.
 - c. Investigar sobre fuentes de ruido que pueden afectar.
3. Producir comandos que permitan el control de la prótesis.
 - a. Utilizar un algoritmo de programación para generar códigos que permitan el control de la prótesis de mano.
4. Realizar pruebas con voluntarios.
 - a. Seleccionar un grupo de voluntarios al azar que cumplan con los requisitos necesarios del proyecto.
 - b. Realizar pruebas con los voluntarios para conocer cómo responde el prototipo.

B. Potencia

Se investigó acerca de los motores actuales y los motores en el mercado para encontrar si se puede mejorar una o más características y así el movimiento de las falanges y de la muñeca.

Una vez se seleccionó los actuadores, se diseñó un circuito que alimente y controle los motores. Este circuito además tiene los divisores de voltaje para obtener la retroalimentación de los sensores de presión colocados en las yemas de los dedos. También se implementó una opción para poder cambiar la alimentación de los motores de 4.8 a 6 voltios, ofreciéndole así mayor torque y velocidad a la prótesis cuando sea necesario o útil.

Durante la elaboración del circuito se implementó cálculos para poder determinar corrientes, voltajes, potencia, área superficial de soldadura de componentes, tamaño de los disipadores de calor y la opción de colocar un ventilador. También se realizó un análisis para disminuir la temperatura de los componentes y así proteger a los mismos y alargar su vida útil.

Por último se seleccionaron baterías para alimentar el circuito y los motores, considerando que tengan una durabilidad aceptable antes de descargarse. También se diseñó y seleccionó un sistema para transportar las baterías.

Al tener la prótesis funcionando se medirá temperatura de los componentes y disipadores de calor para poder comparar el valor experimental con el teórico. También se harán pruebas sobre el rendimiento de los motores, las cuales serán comparadas con las mediciones de la prótesis de la fase 3. En paralelo se estará diseñando y mejorando el diseño físico para que la prótesis sea atractiva en cuanto a su estética.

C. Administración, manual de usuario y propuesta proceso de producción

Este proyecto fue realizado por un equipo de estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala, conformado por: tres estudiantes de ingeniería electrónica, dos estudiantes de psicóloga y uno de ingeniería industrial, que fue el responsable de la administración del proyecto.

Se definieron los módulos y junto con estos, las actividades que realizaron cada uno de los integrantes. Utilizando un diagrama de Gantt. Se realizó el cronograma a seguir durante la ejecución del proyecto. Se realizaron reuniones semanales en las que se llevó control de las actividades, esto con el objetivo de seguir la planificación realizada previamente en el cronograma. Se utilizó también la herramienta de balanced scorecards, para llevar el control de cada miembro del grupo, y sus actividades.

Durante todo el proyecto, se documentaron todas las actividades realizadas, y se puso a disposición de todos los miembros del grupo, esto para que todos conocieran los avances y tomaran de esta información la que necesitaran.

En la primera parte del proyecto se evaluó las fallas y deficiencias que se habían tenido en las etapas anteriores a este megaproyecto. Tomando eso como base se prosiguió a realizar el nuevo diseño de los sistemas de control y potencia que fue utilizado. Con el diseño y la planeación realizada, se prosiguió a la búsqueda de materiales y componentes. En esta parte se buscaron y se seleccionaron los proveedores con los que se realizó la compra de las partes utilizadas, tomando en cuenta su costo y que cumpliera con las características requeridas, tomando como base el presupuesto disponible.

Con los materiales ya a disposición se procedió a la programación y al ensamble de los diferentes componentes. Esto se realizó utilizando las herramientas e instrumentos que estaban a nuestra disposición en los laboratorios de Ingeniería Electrónica.

Durante el proceso de programación y ensamble se investigó las necesidades que los posibles usuarios tienen, y se entendió el proceso de amputaciones y lo que esto conllevaba. Todo lo anterior se realizó también gracias al Dr. Juan Carlos García, quien fue el apoyo en el área médica durante el proyecto.

Con la prótesis ya en sus etapas finales, se procedió a realizar pruebas y ajustes. Seguido de finalizar la renovación del sistema de control y potencia de la prótesis biónica, se procedió a realizar un manual para el usuario. Para realizar este manual se investigó diferentes metodologías, y se utilizó la más adecuada según al grupo de personas al que va dirigido.

Teniendo todos los datos para la fabricación de la prótesis, se procedió, por último, a realizar un diseño de un sistema de producción, con un análisis financiero, que permitiera reducir su costo de fabricación. Este diseño se realizó investigando diferentes proveedores de materia y de maquinaria. Luego de haber elegido a los más convenientes, se diseñó el sistema de producción, tomando en cuenta diferentes aspectos, para luego evaluarlo financieramente.

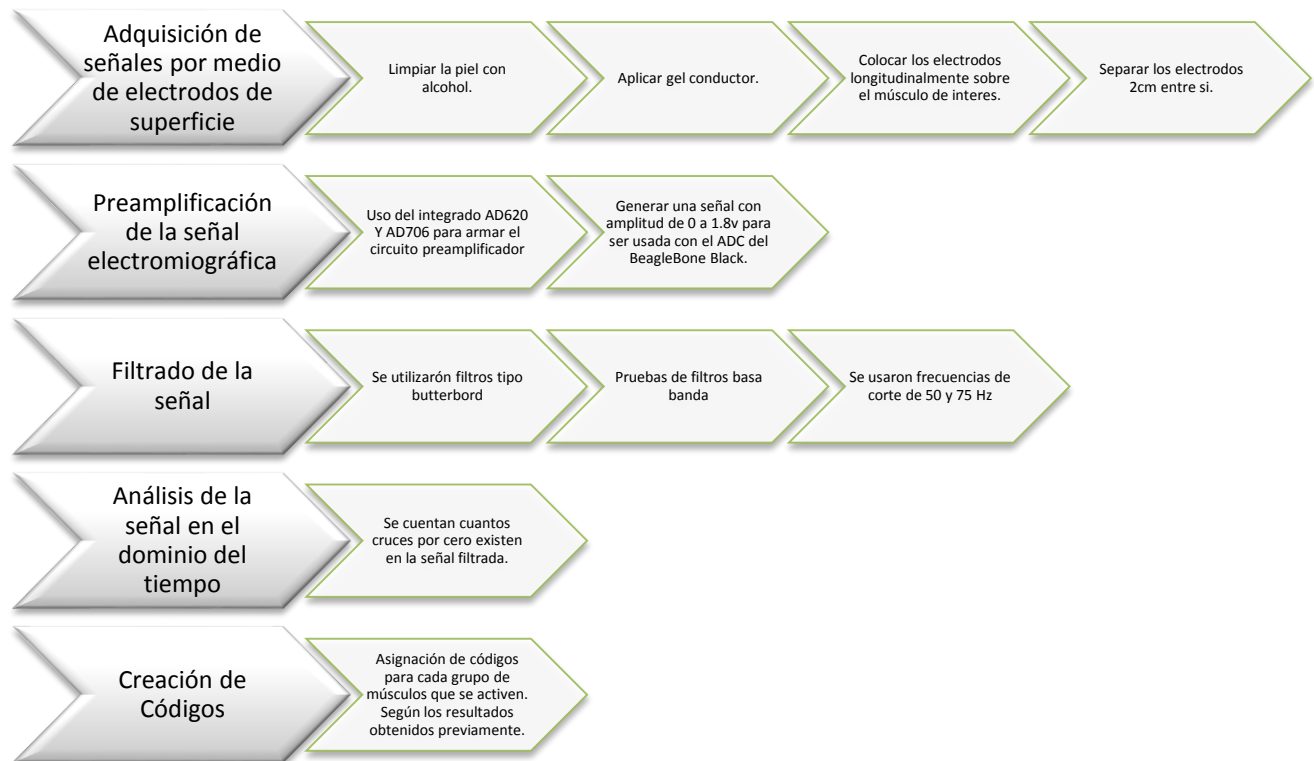
Se espera que en los próximos años se le dé seguimiento a este proyecto, por lo que fue importante llevar una documentación adecuada, para que en el futuro se disponga de la información necesaria y se haga más fácil el proceso de investigaciones y cotizaciones.

VII. DESARROLLO DEL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES ELECTROMIOGRÁFICAS POR MEDIO DE ELECTRODOS DE SUPERFICIE

A. Resultados

1. Sub etapas para la adquisición de datos y procesamiento de señales electromiográficas. En la siguiente Figura se observa el orden en el cual se fueron trabajando todas las sub etapas del módulo de adquisición de datos y procesamiento de señales electromiográficas por medio de electrodos de superficie. Para obtener resultados exitosos fue necesario trabajar todas las etapas en el orden siguiente:

Figura 50. Orden de los procesos que se fueron realizando.



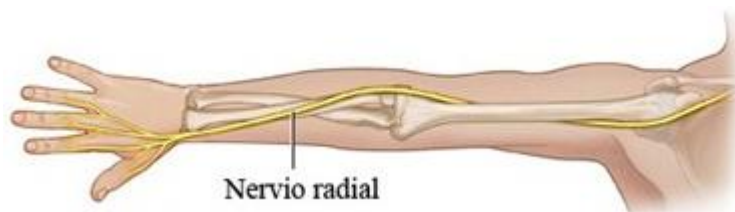
(Solares.M, 2014)

En las pruebas preliminares realizadas con estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala, se pudo observar que el nivel de voltaje de la señal de entrada que proviene de los electrodos ubicados en el nervio radial Figura 50 varía con las personas que se sometieron a dichas pruebas.

Se observó que la señal electromiográfica medida en el nervio radial por medio de electrodos de superficie, es una superposición de muchas ondas, entre las ondas más destacadas se encuentra la frecuencia de 60Hz, 120Hz y 180Hz como se observa en la Figura 22 b.

Se realizó un análisis con profundidad de estas frecuencias, porque se observó que a partir de 60Hz todas las ondas con amplitudes grandes eran los armónicos de la señal de 60Hz. Por lo tanto para realizar el análisis de la ubicación de los músculos de interés se usaron filtros pasa bandas que eliminarán las frecuencias de 60Hz y la mayoría de sus armónicos al igual que la señal dc que también se encuentra presente en el cuerpo.

Figura 51. Nervio Radial



(Arydol, 2008)

2. Adquisición de las señales por medio de electrodos de superficie. Se realizaron varias pruebas con dos distintos tipos de electrodos, y se utilizaron electrodos con recubrimiento de oro y de plata cloruro de plata, con un diámetro de 3mm y una distancia de separación de 2cm entre si como se observa en la Figura 51.

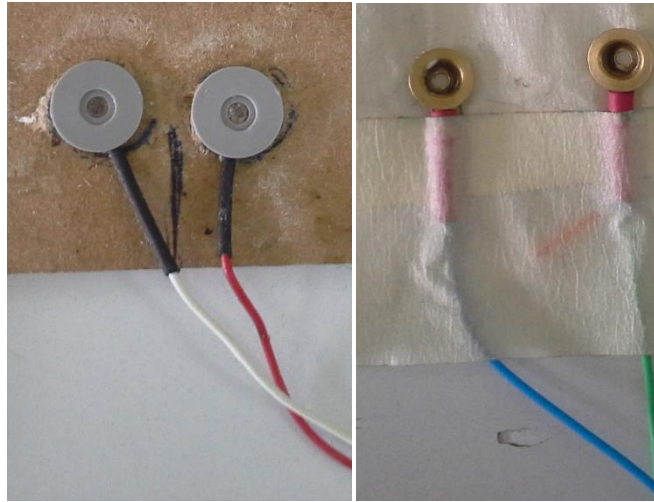
En la Tabla 3 se observan los resultados obtenidos para ambos electrodos. Para realizar pruebas con ambos electrodos se siguieron todos los pasos que se observan en la Figura 18 en la primera etapa.

Tabla 3. Resultado obtenido con electrodos de plata cloruro de plata y recubrimiento de oro.

| Tipo de electrodo | | | |
|--|--|---|--|
| Recubrimiento de oro | | Plata cloruro de plata | |
| Ventaja | Desventaja | Ventaja | Desventaja |
| La señal no se ve afectada por los armónicos de 60Hz | La señal captada no presenta variaciones cuando se producen contracciones musculares. | La señal presenta varias modificaciones cuando se producen contracciones musculares. | La señal es afectada por ruido dc, 60Hz y varios armónicos de 60Hz |
| | | Los cables miden 60cm de largo y se encuentran trenzados para evitar ruido inductivo. | |
| | El electrodo tiene un diámetro de 3mm y el área de contacto no es lo suficiente para percibir cambios en la señal. | Los electrodos tiene un diámetro de 11mm y su área de contacto es mayor que la de los electrodos de 3mm, por lo tanto se pueden percibir cambios en la señal. | |
| | | No producen variación en la impedancia de contacto entre el electrodo y la piel. | |

(Solares. M, 2014)

Figura 52. a.) Electrodo de plata cloruro de plata b.) Electrodo con recubrimiento de oro.



(Solares. M, 2014)

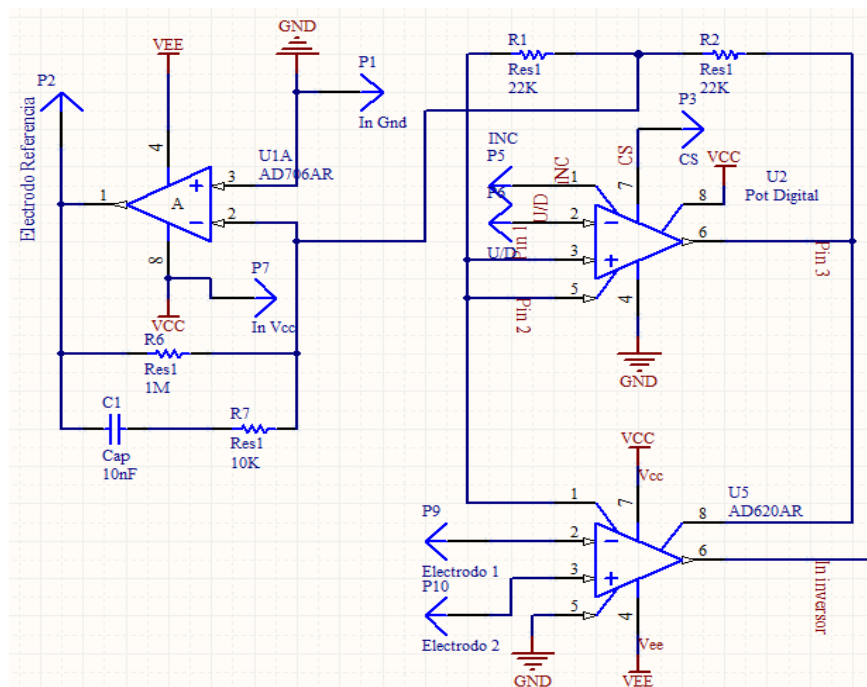
En el marco teórico se mencionan configuraciones para colocar los electrodos, se decidió utilizar la configuración bipolar, porque provee dos señales electromiográficas que se pueden utilizar para alimentar un amplificador operacional y así evitar ruido electromagnético.

Se midió la señal a la salida de los tres electrodos y se pudo observar que para cualquier persona el rango de voltaje de entrada está entre los 300 a 500 mv, para los tres electrodos. Con estos resultados se decidió colocar un potenciómetro digital para ajustar la ganancia del amplificador operacional según las necesidades de cada individuo.

3. Pre amplificación de la señal electromiográfica. Se utilizaron los circuitos integrados AD620 Y AD706, para la implementación de la etapa preamplificadora de la señal electromiografía proveniente de los electrodos de superficie. En la Figura 21 se observan los circuitos implementados para esta etapa. Se utilizó un potenciómetro digital para producir las variaciones de ganancia en la etapa preamplificadora. Estas variaciones dependen de cada persona y están controladas por medio de un ADC que se encuentra dentro del BeagleBone Black.

En las mediciones que se realizaron con los electros de superficie se observó que la señal de entrada se encontraba entre -50 a 50mv, por lo tanto se necesitaba una ganancia en la etapa de pre amplificación de por lo menos 16 dB para tener una señal de 0.5v aproximadamente. El ADC del BeagleBone Black solo permite niveles de voltaje de 0 a 1.8v, por lo que fue necesario subir la señal de voltaje 0.6v. En la Figura 52 se observa el circuito utilizado para la etapa de pre amplificación de las señales electromiográficas.

Figura 53. Etapa pre amplificación de la señal electromiográfica.



(Solares. M, 2014)

En la anterior se observa la señal electromiográfica pre amplificada. En el dominio de frecuencia Figura 53b se observa todos los armónicos que se han mencionado anteriormente. También se observa la señal DC; las perturbaciones que se observan son las contracciones producidas por el nervio radial, para observar las amplitudes que se generan es necesario eliminar la mayoría de los armónicos de 60Hz y la señal DC.

Para eliminar estas frecuencias se utilizaron filtros pasa banda con frecuencias de cortes definidas según las frecuencias que se producen al contraer determinados músculos.

Figura 54. a.) Señales electromiográficas pre amplificadas en el dominio del tiempo. b.) Señal electromiográfica pre amplificada en el dominio de frecuencia.

Figura 54. a

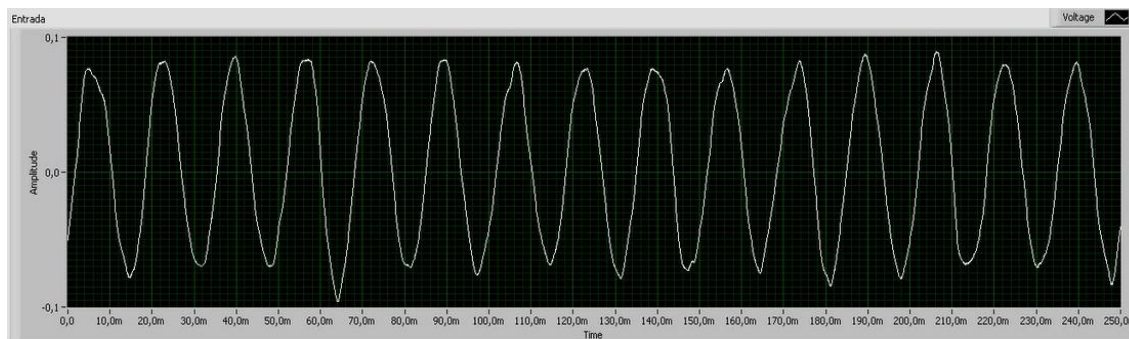
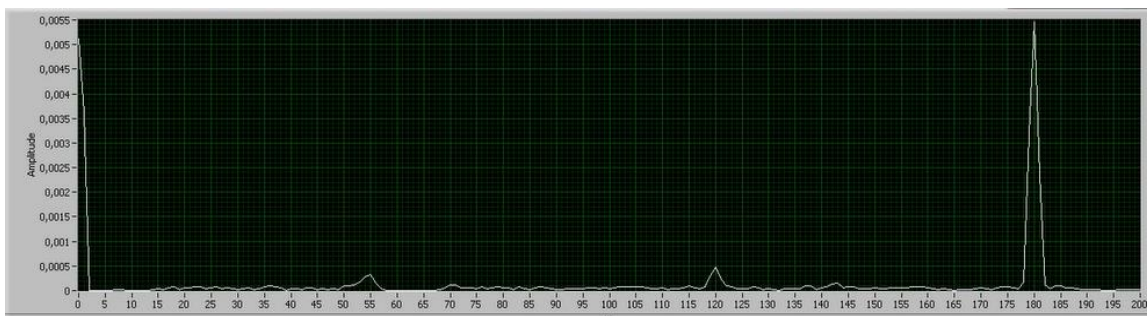


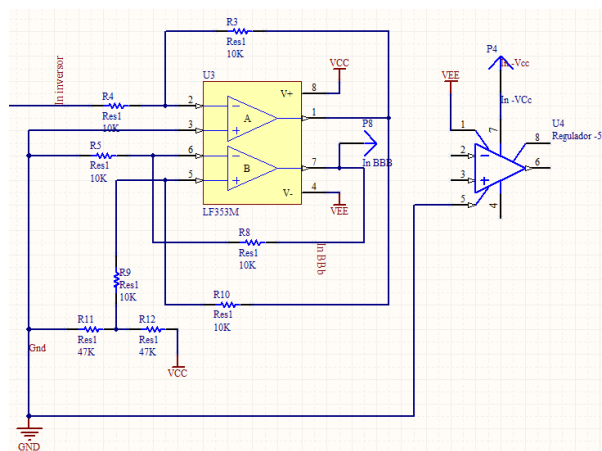
Figura 54. b



(Solares. M, 2014)

En la Figura 55 se observa la segunda parte de la etapa de pre amplificación en donde se utilizó el circuito integrado LM353 que posee dos amplificadores operacionales. Estos se utilizarán para amplificar y subirla la señal electromiográfica. En esta parte es donde se lleva a cabo la calibración para cada nivel de voltaje que proviene de los electrodos. El potenciómetro digital configura la ganancia de los amplificadores especializados para la captación de señales electromiográficas.

Figura 55. Segunda parte de la etapa pre amplificadora.



(Solares. M, 2014)

4. Procesamiento de la señal electromiográfica. Unos de los objetivos de este módulo era poder realizar varios tipos de agarre entre ellos se encuentran los que se observan en la Figura 55. Para alcanzar este objetivo fue necesario realizar el procesamiento de la señal en forma digital. Se inició observando la señal en el dominio del tiempo, los resultados que corresponden a la mano levantada, relajada y pinza de tres dedos se observan en la Figura 57. Se observó que la señal de entrada (gráfica azul) de todas las gráficas tiene cambios en amplitud y frecuencia.

En las primeras pruebas que se realizaron fueron observando el comportamiento de la señal en el dominio del tiempo, pero fue imposible determinar un patrón debido a que la señal cambia de forma arbitraria y no es periódica.

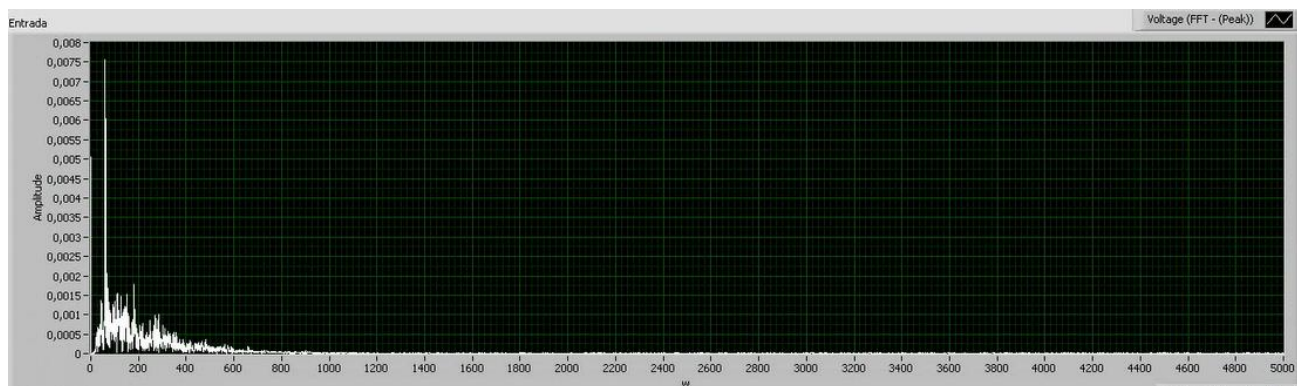
Figura 56. Tipos de agarre para la mano



(Buchón G, 2007)

El siguiente paso fue analizar la señal en el dominio de frecuencia para esto se utilizó la transformada rápida de Fourier, con una ventana de 250 us. Obteniendo como resultado el análisis del contenido espectral que se observa en la Figura 56. Los resultados fueron que la mayor cantidad de información se encuentra entre 20 a 500Hz. Para observar el contenido espectral de la señal de entrada se utilizó el software Labview 2013 con el convertidor MyDAQ es una terminar que permite realizar varias funciones entre ellas realizar conversiones de señales analógicas a digitales que es la función que se utiliza para este parte. La frecuencia de muestreo que se utilizó fue de 10kHz.

Figura 57. Contenido espectral de la señal de entrada.



(Solares. M, 2014)

Teniendo definido el espectro de análisis, se procedió a realizar varios filtros pasa banda para ubicar que frecuencia se producía cuando se contraía el grupo de músculos que se conecta con el nervio radial Figura 19. En la Figura 57a se observan cuatro tipos de filtros que se representan por colores distintos y la señal de entrada que corresponde cuando el músculo se encuentra relajado. Fue necesario utilizar los mismos cuatro tipos de filtros para comparar todas las contracciones, en la Figura 57b se observan los mismos filtros, pero con una señal de entrada que corresponde a la pinza de tres dedos y en las Figuras siguientes puede observarse.

Figura 58a. Músculo relajado. Y 58b. Pinza de tres dedos

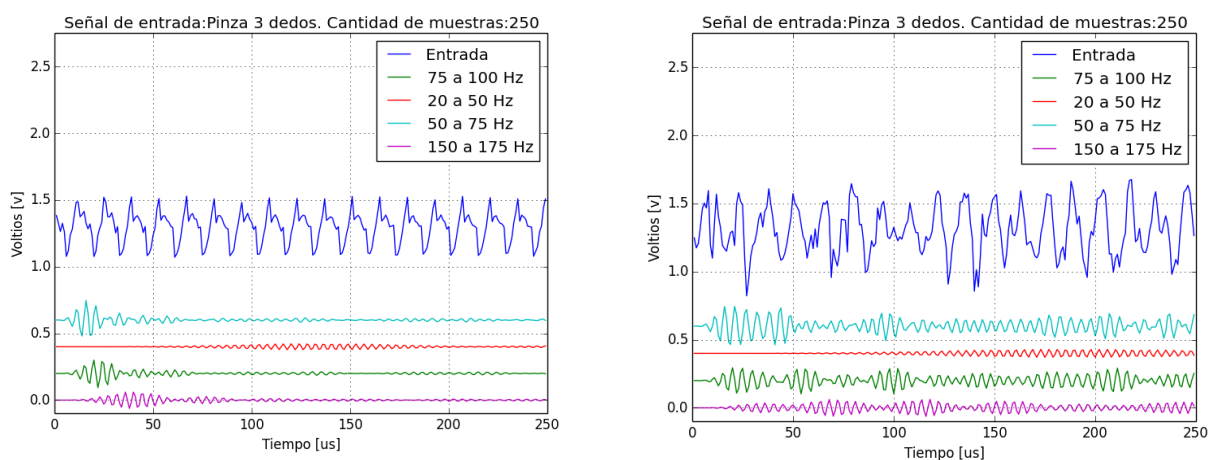
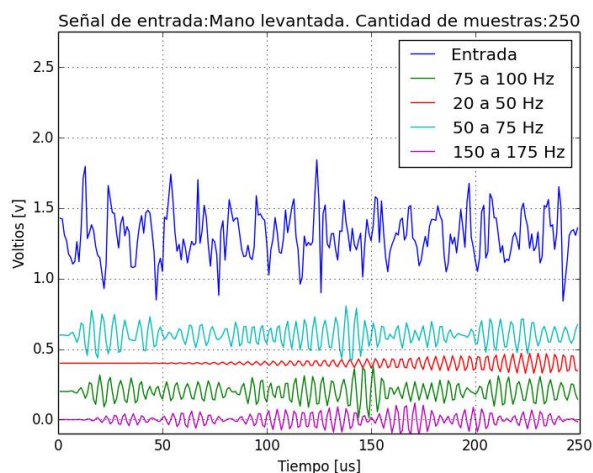


Figura 58c. Mano levantada.



(Solares. M, 2014)

Después de haber observado el comportamiento de los cuatro filtros se decidió contar cuántos

cruces por cero existían en cada señal después de ser filtrada. Este procedimiento sirvió para saber qué tipo de movimiento produce frecuencias alta o bajas en la banda de paso de los filtros utilizados. En la Tabla 4 se observa el rango de cruces por cero y el tipo de movimiento que corresponde.

Tabla 4. Cantidad de cruces por cero, según el movimiento realizado.

| Movimiento | Cantidad de Cruces por cero |
|---------------------|-----------------------------|
| Mano relajada | 0 a 50 |
| Pinza de tres dedos | 51 a 87 |
| Mano levantada | 88 a 120 |

(Solares.M, 2014)

El filtro que se decidió utilizar fue el que tiene frecuencias de corte de 50 a 75Hz, en la Tabla 5 se observan los errores obtenidos utilizando tres métodos para detectar el movimiento en la señal de entrada. Los resultados que se muestran en la Tabla tres son para un sujeto en específico. Para cada se debe calibrar el sistema.

La energía de la señal fue otro parámetro que se tomó en cuenta para poder reconocer que tipo de movimiento se estaba realizando. Se observó mayor cantidad de energía en los movimientos que usaban una contracción más grande para producir el movimiento necesario.

Usando análisis en el dominio de frecuencia, se decidió utilizar un filtro pasa banda y utilizando los criterios en el dominio del tiempo mencionados anteriormente se pudo obtener los porcentajes de error que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparación de métodos de detección en movimientos de la mano.

| Método | Porcentaje de Error |
|---------------------------------|---------------------|
| Dominio del tiempo | 96% |
| Dominio de Frecuencia | 83% |
| Dominio del tiempo y frecuencia | 17% |

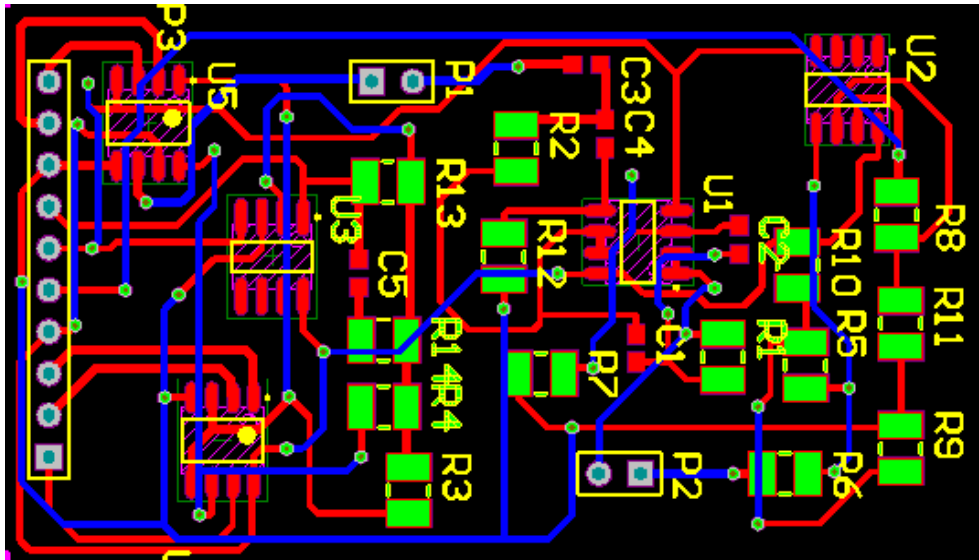
(Solares. M, 2014)

5. Diseño de placa. Para el diseño de la placa se usaron componentes de superficie. Es necesario que la placa se encuentre desbastada de ambos lados para evitar inducciones y problemas de interferencias de señales. Uno de los criterios que se emplearon para la fabricación fue intercalar las señales de alimentación entre los tracks que manejan señales que cambian durante el tiempo.

Esto se realizó con la finalidad que las señales que cambian no se afecten por la interferencia de tracks vecinos. El consumo de potencia de la placa de procesamiento de señales y filtrado es de 50mW. Por esta razón se decidió utilizar tracks de 10mils que soportan una corriente de hasta 500mA.

En la Figura 58 se muestra el esquema de la placa, los caminos o tracks rojos se encuentran en el top de la placa y los tracks azules en la parte inferior. Se colocaron pines de control para poder inyectar señales de prueba en cada una de las etapas. Con la finalidad de poder medir etapa por etapa para verificar su correcto funcionamiento y detectar posibles errores.

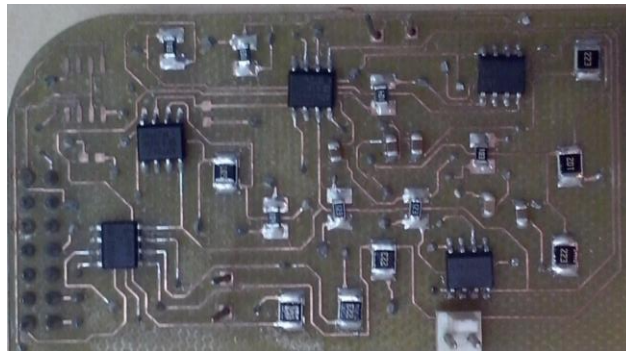
Figura 59. Diseño de la placa utilizando componentes de superficie.



(Solares. M, 2014)

En la Figura 60 se muestran una fotografía de la placa soldada con todos los componentes de superficie. Es recomendable utilizar pasta y estaño mezclados, se debe aplicar una pequeña porción sobre el pad y posteriormente colocar el componente. Con el cautín a una temperatura de 250 grados centígrados el estaño se puede derretir y los componentes no se quemarán. Por último se puede limpiar la placa con limpia contactos para evitar dejar residuos de la pasta para soldar.

Figura 60. Fotografía de la placa soldada.



(Solares. M, 2014)

B. Discusión

1. **Adquisición de las señales por medio de electrodos de superficie.** Se tuvieron varios inconvenientes cuando se estaban realizando las pruebas con los electrodos de superficie. La mayor dificultad fue que los cables de los electrodos deben estar de preferencia trenzados para evitar ruido por inducción eléctrica, al inicio de las pruebas se habían elegido los electrodos de oro, sobre los de plata, pero cuando se separaron los electrodos se observó que la respuesta en el dominio del tiempo era distinta y no se podía recuperar las perturbación producidas por el grupo de músculos que se encuentran conectados al nervio radial. Por esta razón se decidió utilizar los electrodos de plata, porque los cables no son tan largos y por lo tanto no producen ruido por inducción eléctrica, los electrodos de plata producen una mejor respuesta a señal electromiográficas con amplitudes pequeñas en comparación de los electrodos de oro. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 1.

2. **Pre amplificación de la señal electromiográfica.** Los diseños de los circuitos para esta parte del módulo fueron los que se realizaron en el Megaproyecto: control no convencional e implementación de una silla de ruedas eléctrica diseñada para subir gradas, controlada a través de electromiografía y apoyada mediante visión por computadora. El diseño que se tenía para la pre amplificación no era automática. Para mejorar este aspecto se decidió colocar un potenciómetro digital el cual funciona con modos de aumentar o disminuir la resistencia, cambiando así la ganancia de la etapa de pre amplificación.

Como se ha mencionado anteriormente, la siguiente etapa después de la pre amplificación de la señal EMG es el procesamiento digital, para esta etapa se requiere un ADC el cual se utilizó del BeagleBone Black dicha interfaz posee un rango de voltaje de entrada de 0 a 1.8v. Posteriormente ingresa a una siguiente sub etapa donde ingresa a un filtro pasa altas con frecuencia de corte de 20Hz esto es para evitar que la señal tenga una componente DC. Esto afectaba grandemente al módulo debido a que todas las personas tienen diferentes niveles de voltaje DC, pues este voltaje se produce

cuando el potencial de acción decae.

Al eliminar la componente DC se amplificó la señal con una ganancia de 16dB. De esta forma cualquier persona puede utilizar el módulo de adquisición y procesamiento de señales electromiográfica sin dañar los circuitos empleados por un sobre voltaje.

3. Procesamiento de la señal electromiográfica. En el proceso de desarrollar un método capaz de detectar los diferentes movimientos producidos por la mano se empezó analizando la señal en el dominio del tiempo. Los resultados no fueron satisfactorios debido a que la señal EMG presenta un comportamiento no predecible, porque no muestra ningún patrón, y cambia abruptamente en intervalos muy cortos. Se realizaron varias pruebas y se observó que el porcentaje de error para este método era del 100%, por lo que se descartó.

La siguiente opción fue realizar un análisis en el dominio de frecuencia, observando el espectro de la señal de entrada se pudo detectar que el rango de frecuencias más aceptable para detectar los patrones era de 50 a 75Hz. Se programaron los filtros utilizando las librerías Scipy de Python.

Se realizaron varias pruebas y se pudo observar que para obtener resultados con un porcentaje de error del 25% o menor era necesario mantener el músculo lo más contraído posible; se notó que el músculo quedaba doliendo debido a que el esfuerzo que se realizaba era muy grande. Es muy probable que para personas con una amputación de mano no pudieran realizar tanto esfuerzo en el músculo por lo que se decidió seguir investigando.

El último método consiste de una combinación en ambos dominio tanto en frecuencia como en tiempo. Se decidió filtrar la señal para tener un rango de frecuencia más corto y trabajar con él. Como se observa en la Figura 26 hay cambios significativos entre cada movimiento, por lo que se decidió, después de filtrar la señal, contar cuántos cruces por cero existían en la señal filtrada. Así se determina qué tipo de movimiento se está desempeñando.

Debido a que la señal EMG es estocástica es decir es aleatoria no se puede utilizar solo la transformada de Fourier para analizar la señal, porque cambia en intervalos de tiempo muy pequeños y no es periódica. Por ello se decidió utilizar otras técnicas para obtener las características de la señal de entrada y poder determinar qué movimiento se estaba produciendo. Las técnicas que se utilizaron para analizar la señal EMG se muestran a continuación:

- Filtrar la señal con un filtro pasa bandas usando frecuencias de corte de 50 a 75Hz.
- Contar los cruces por cero de la señal filtrada.
- Crear rango que limiten cada movimiento
- Identificar entre qué rango se encuentra el resultado para determinar el movimiento que se realizó.

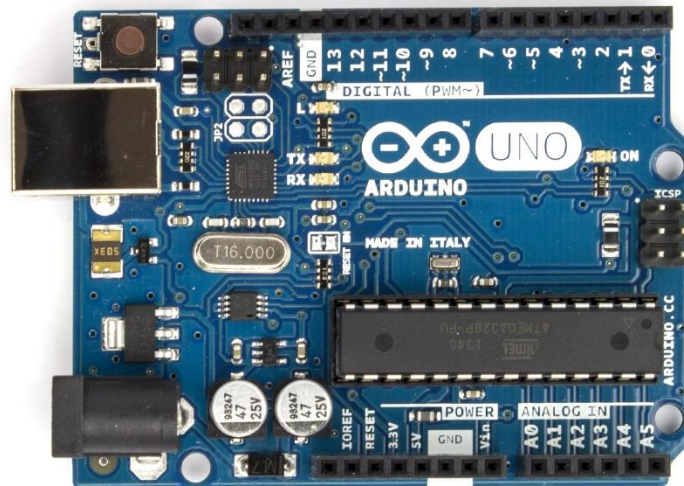
VIII. DESARROLLO DEL MÓDULO DE CONTROL INTERNO

A. Resultados

1. Selección de dispositivo para implementar módulo de control. La selección de una o varias plataformas de desarrollo del sistema debe cubrir las necesidades de velocidad de procesamiento: una cantidad de por lo menos 8 entradas y salidas digitales, por lo menos 12 entradas analógicas, y capacidad para futuras expansiones y usos. La velocidad de procesamiento es requerida para procesar el módulo de control, lograr comunicación con otros equipos a través de protocolos estándares, mostrar los datos y procesar el módulo de interfaz de usuario sin sufrir retrasos significativos. Las posibles plataformas revisadas fueron el Arduino Uno, microcontrolador Microchip PIC 16F887, Raspberry Pi y el BeagleBone Black (BBB).

a. Arduino Uno

Figura 61. Arduino Uno



(Arduino, 2014)

El Arduino Uno es una plataforma de desarrollo que consiste de un microcontrolador y una memoria Flash.

El Arduino posee su propio ambiente de programación que es compatible con todas las plataformas de desarrollo de la familia.

El ambiente de Arduino trabaja con lenguaje C++ de programación, cada código es guardado como un 'sketch'. El Arduino posee varias librerías que permiten expandir las aplicaciones posibles. La facilidad de uso lo hace una opción viable para el proyecto. La Tabla 6 muestra las especificaciones del Arduino Uno.

Tabla 6. Resumen de características de Arduino Uno

| Descripción | Especificación |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Microcontrolador | ATmega328 |
| Voltaje de Operación | 5V |
| Voltaje de entrada (recomendado) | 7 – 12V |
| Voltaje de entrada (límites) | 6 – 20V |
| Pines Entrada/Salida Digitales | 14 (6 son PWM) |
| Pines Analógicos | 6 |
| Corriente DC por pin Entrada/Salida | 40mA |
| Corriente DC para pin 3.3V | 50mA |
| Memoria Flash | 2KB (ATmega328) |
| SRAM | 2KB(ATmega328) |
| EEPROM | 1KB(ATmega328) |
| Reloj | 16MHz |
| Comunicación | UART |

(Arduino, 2014)

b. Raspberry Pi Modelo B

Figura 62. Raspberry Pi



(Raspberry Pi, 2014)

La Raspberry Pi (Raspi) es una computadora pequeña del tamaño de una tarjeta de crédito. La Raspi está diseñada para la exploración de computación. Esta puede conectarse a un monitor y utilizar su propio teclado y mouse para operar como una computadora de escritorio. El ambiente de desarrollo de la Raspi es una versión de Linux/Debian implementada para esta arquitectura llamada Raspbian. Al igual que el Arduino, las Raspi poseen varias librerías disponibles para descargar, que permiten el uso completo de sus recursos. La Tabla 7 provee especificaciones del Raspi Modelo B.

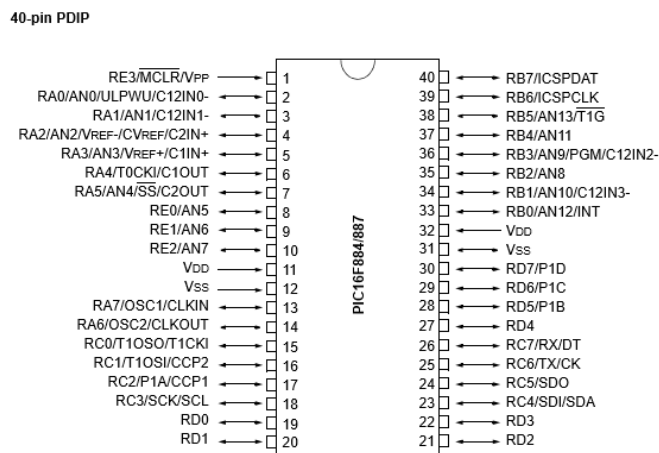
Tabla 7. Especificaciones Raspi

| Descripción | Especificación |
|-----------------------|---------------------------|
| Velocidad de reloj | 700MHz |
| RAM | 512MB |
| Almacenamiento | Dependiente de tarjeta SD |
| Alimentación | 5V (700mA) |
| Pines E/S disponibles | 17 |
| Comunicación | I2C, UART |
| Pines analógicos | Ninguno |

(Raspberry Pi, 2014)

c. Microchip PIC 16F887

Figura 63. Diagrama de PIC 16F887



(Microchip, 2014)

El Microchip PIC 16F887 es un microcontrolador de 8 bits, que aparte del procesador, posee periféricos que vuelven versátil a este dispositivo. El microcontrolador es programado en lenguaje ensamblador (de bajo nivel), aunque existe una plataforma que permite programar en lenguaje C++ llamado mikroC. La plataforma utiliza rutinas de una librería para generar código. Al igual que algoritmos de cambio entre C++ y ensamblador.

Tabla 8. Especificaciones de PIC 16F887

| Descripción | Especificación |
|-----------------------|----------------|
| Memoria de programa | 14KB |
| RAM | 368 bytes |
| EEPROM | 256 bytes |
| Alimentación | 2V - 5.5V |
| Pines E/S disponibles | 35 |
| Comunicación | I2C, UART, SPI |
| Pines analógicos | 14 canales |
| Oscilador interno | 32kHz – 8MHz |
| Oscilador externo | 20MHz |

(Microchip, 2014)

d. BeagleBone Black rev. B

Figura 64. Beagleboard Black rev. B



(Beagleboard.org, 2014)

El BeagleBone Black (BBB) es una computadora pequeña al igual que la Raspberry Pi, con la diferencia que este no posee una tarjeta de gráficos como tal, el puerto USB puede ser expandible con un HUB que este alimentado por aparte para utilizar teclado y mouse. El BBB posee una distribución inicial de Angstrom y puede cambiarse por Ubuntu o Debian para desarrollar aplicaciones. El BBB tiene por estándar de fábrica unos pines destinados a la salida de video y de la tarjeta de memoria, que no pueden ser utilizados; aun así estas funciones pueden deshabilitarse para liberar los pines.

Tabla 9. Especificaciones BeagleBone Black Rev. B

| Descripción | Especificación |
|-----------------------|-----------------|
| Velocidad de reloj | 1GHz |
| RAM | 512MB |
| Almacenamiento | 2GB eMMC |
| Alimentación | 5V (440mA pico) |
| Pines E/S disponibles | 2x46 |
| Comunicación | I2C, UART, SPI |
| Pines analógicos | 7 |

(BeagleBoard, 2014)

2. Decisión de selección de sistemas. El Arduino fue descartado como opción ya que no posee suficientes pines analógicos para la cantidad de muestreos requeridos, la señal de reloj no lograría muestrear, generar un PWM con características deseadas, comunicarse y procesar el módulo de control. El Raspi es descartado como opción por su velocidad baja de procesamiento a comparación del BBB; su falta de opción para toma de muestras y pocos pines no permite futura expansión. La dependencia de una tarjeta SD para almacenamiento de datos y sistema operativo puede ser considerada una vulnerabilidad, ya que el usuario puede quitar la tarjeta SD y esta puede ser extraviada. La corriente consumida por el Raspi es aproximadamente el doble de la que consume el BBB en su funcionamiento pico, lo cual impide el objetivo de disminuir el consumo.

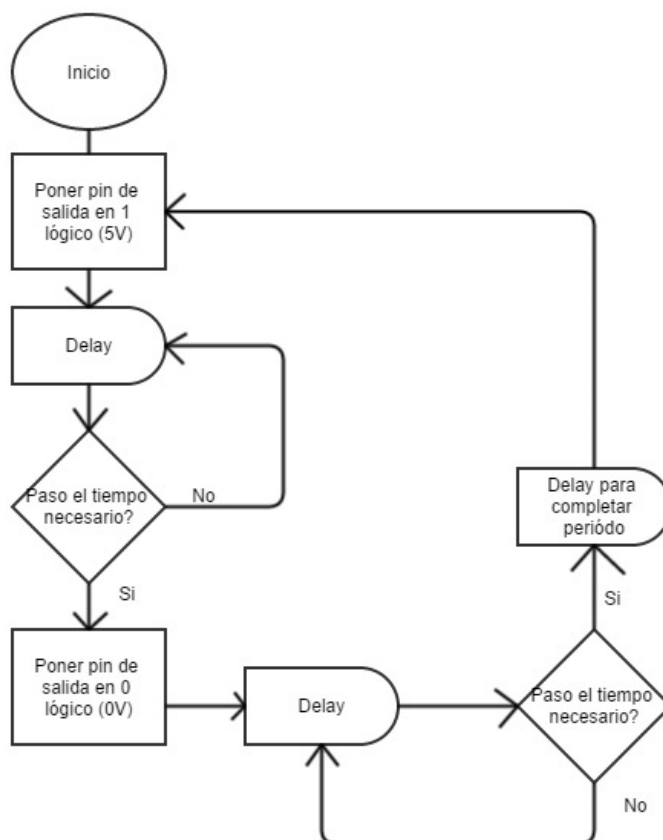
La decisión final fue utilizar una combinación de PIC 16F887 y BBB. El PIC se encarga de la generación de PWM y muestreo de datos, recibirá y enviará información a través del módulo UART de comunicación al BBB. El BBB se encargará de procesar el módulo de control, el módulo de interfaz de usuario, enviar el PWM requerido hacia el PIC, recibir información del PIC hacia el módulo de control y configurar el voltaje que deberán utilizar los servomotores. Ambos dispositivos se integrarán por medio de una placa.

3. Programación y configuración de dispositivos. Cada dispositivo posee un propósito, por lo que a continuación se proveen los algoritmos y configuraciones utilizadas para programar cada dispositivo.

a. **Configuración del PIC.** El PIC 16F887 se configuró para que utilizara un reloj interno de 8MHz. Todas las entradas analógicas se activaron. Los puertos A, B y D se configuraron para ser entradas (ya que estos poseen los pines analógicos); los puertos D y C (excepto el pin RC6) se configuraron para ser salidas, y el pin RC6 se configuró como entrada ya que recibe los datos del módulo de comunicación UART.

b. **Generación de PWM.** El PIC 16F887 utilizado posee una funcionalidad de PWM. Al hacer pruebas con dicho módulo se llegó a la conclusión que no podía utilizarse ya que la frecuencia requerida es baja a comparación de la señal de reloj base utilizado por el PIC. Además, al hacer variar el PWM, este recorría desde 0% al 100% de ciclo de trabajo de la señal. Los ciclos de trabajo utilizados por los servos aceptados son desde 0.3% hasta un 10%. Es necesario generar las señales de PWM manualmente, por lo que se implementa el algoritmo dado por la Fig. 64.

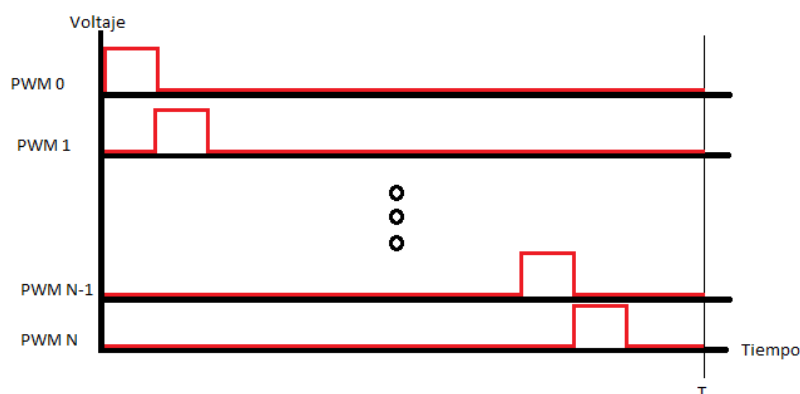
Figura 65. Diagrama de algoritmo que genera un PWM



(Elaboración propia)

Utilizando este algoritmo se genera un único PWM. Ya que requerimos de 8 señales de PWM, es necesario modificar el algoritmo e insertarle el retardo adecuado para lograr que este logre cumplir con los requerimientos de ser una señal periódica de 50 Hz. Tomamos en cuenta que el periodo de la señal de 50 Hz es de veinte milisegundos (20ms), y el periodo máximo utilizado por cada servo es de 2 ms, por lo que en un mismo periodo podemos incorporar hasta 10 PWM. El ejemplo visual está dado por la Fig. 65.

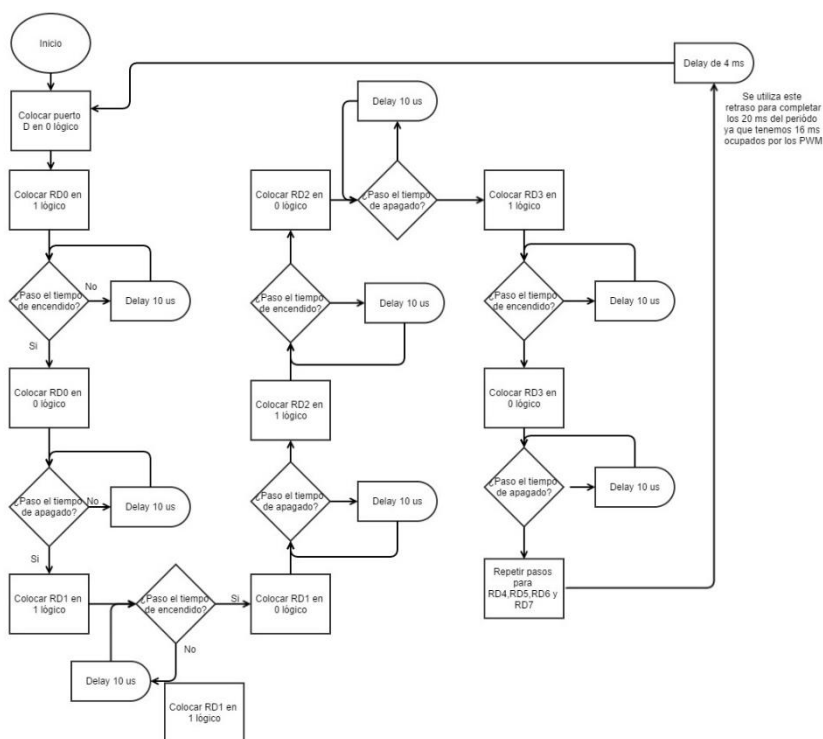
Figura 66. Múltiples PWM en un mismo período



(Elaboración propia)

Se utilizará el puerto 'D' del PIC, el puerto es un registro de 8 bits que tienen pines externos y pueden ser utilizados como entradas o salidas cada pin está designado como 'Dx', donde 'x' es el número de pin (la numeración va del 0 al 7). El algoritmo de la Fig. 66 muestra cómo implementar varios PWM en un mismo período. La cantidad de tiempo es recibida de un arreglo enviado por el BBB.

Figura 67. Algoritmo que implementa 8 PWMs, en el puerto D del PIC 16F887

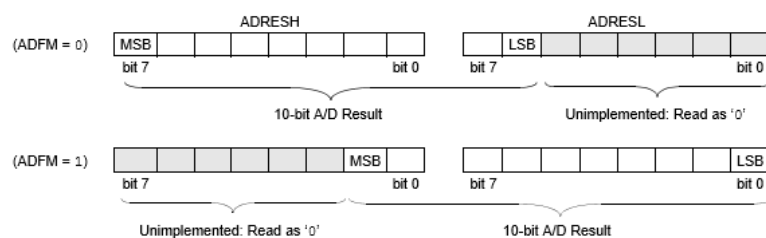


(Elaboración propia)

Cada PWM posee su propio tiempo de encendido, el tiempo de apagado es dado por la resta entre el tiempo máximo de encendido menos el tiempo dado de encendido. Con esto nos aseguramos de tener un periodo de 2 ms por PWM.

c. Muestreo de datos. El muestreo de datos se hace con el módulo convertidor analógico digital (ADC) del PIC 16F887. El módulo ADC cuenta con 14 canales para muestrear señales analógicas, además puede configurarse un pin para que sea la referencia de máximo y otro que sea referencia de mínimo, aunque solo utilizamos el pin de referencia de máximo. El módulo muestrea con una resolución de 10 bits, que guarda en 2 registros distintos. Por facilidad, utilizaremos únicamente los 8 bits de la parte alta del resultado de la muestra, obteniendo la primera configuración mostrada en la Fig. 67.

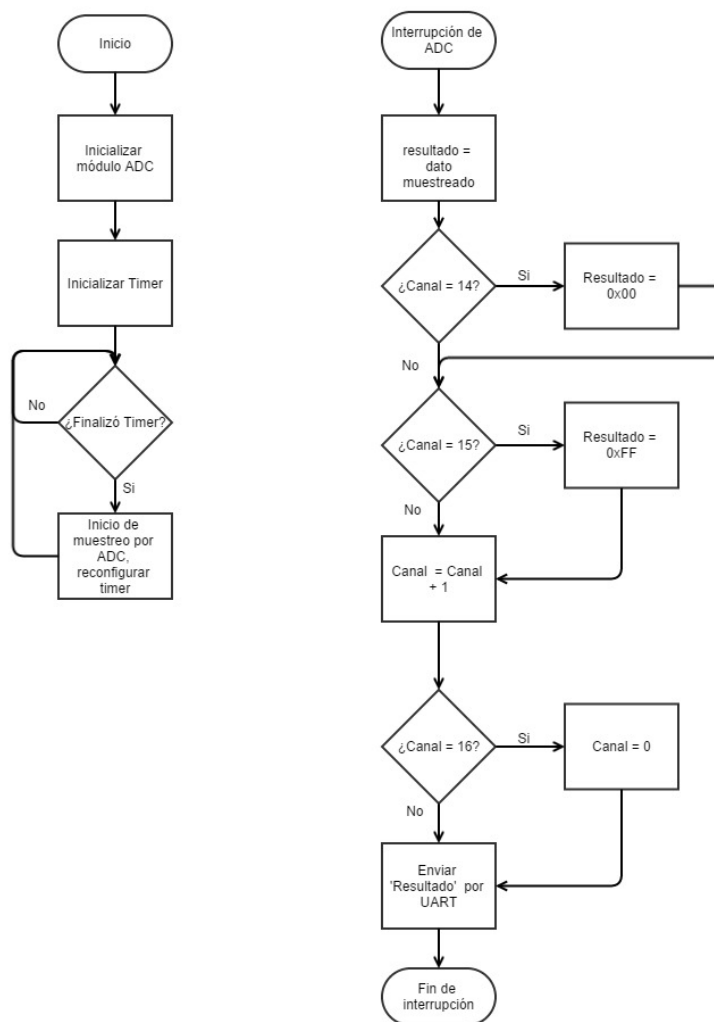
Figura 68. Formatos de resultado de muestras de ADC



(Microchip, 2009)

El algoritmo de muestreo está dado por la Fig. 68. El módulo ADC solo puede muestrear un canal a la vez, por lo que se requiere que cambiemos de canal cada vez que muestreemos. Se desean muestrear 13 canales con una velocidad de muestreo de 650 Hz, más del doble de la velocidad de muestreo requerida por el teorema de Nyquist. Utilizamos el temporizador cero para iniciar un muestreo. El temporizador activa una interrupción cada 102 microsegundos (us), el tiempo de muestreo que toma obtener un valor es de un micro segundo por lo que no hay interferencia entre interrupciones de temporizador e interrupción de finalización de muestreo. Al tomar un dato, cambiamos de canal y muestreemos de nuevo. Todos los canales son muestreados a una frecuencia de 650 Hz, cada canal individual se muestrea cada 9.765 kHz. Una vez obtenido un nuevo dato, este es enviado por UART. Suponemos que muestreemos 15 canales, enviando como resultado de los canales 14 y 15 (que son inexistentes) 0x00 (00000000 en binario) y 0xFF (11111111 en binario), que le servirán al receptor de UART para ordenar correctamente los datos recibidos.

Figura 69. Algoritmo de ADC



(Elaboración propia)

d. Programación y configuración de Beaglebone Black. Al recibir el BBB, debemos conectarnos a él, por lo que de la memoria que se ve desde “Mi computadora” en Windows, debemos acceder a esa memoria e instalar los drivers requeridos. Estos drivers permitirán la conexión por medio de SSH al BBB.

El BBB rev. B posee una versión de Angstrom (distribución de Linux) instalada previamente, se requiere cambiar a una distribución Ubuntu o Debian para lograr utilizar la librería de programación para Python proveída por la empresa Adafruit. Lo primero fue seguir los pasos mostrados en eLinux.org, en el que se requería montar una versión de Debian en una tarjeta microSD para montar la nueva distribución en la tarjeta multimedia instalada en el BBB.

Luego de varios intentos fallidos se recurrió a las instrucciones proveídas por Tunti Jakaveri, en la que se montaba una distribución ejecutable de Debian o Ubuntu en la tarjeta microSD e inicializamos el sistema operativo desde ahí. Luego en una memoria USB colocábamos una distribución en imagen sin compresión, formateado en formato FAT32. Montamos la distribución de Debian en el BBB desde la USB. Las instrucciones completas una vez ejecutando el sistema operativo desde la SD y tener insertada la memoria USB son:

<<

```
Mkdir /mnt/foo
```

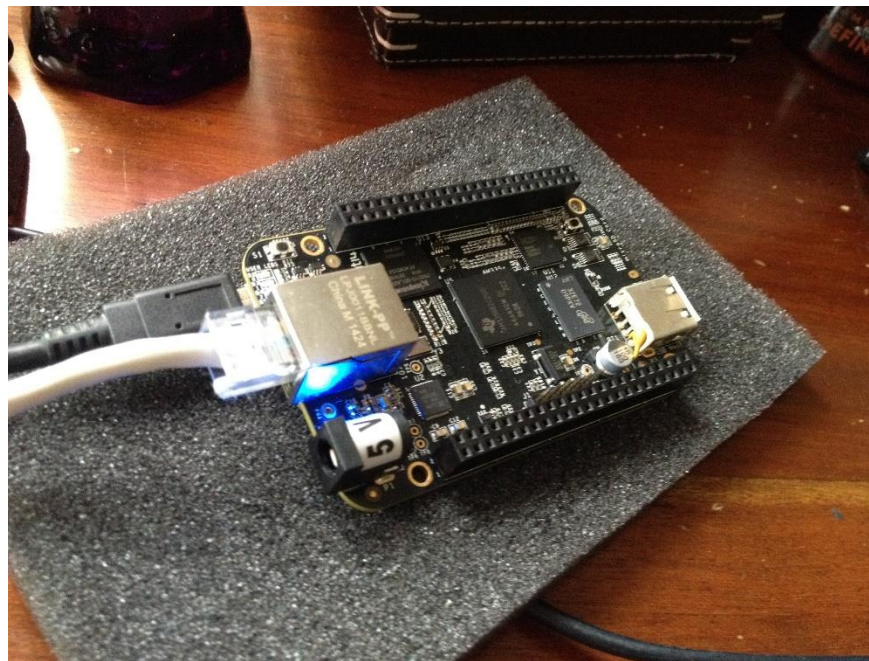
```
Mount /dev/sda1 /mnt/foo
```

```
Dd bs=1M if=/mnt/foo/bb-debian-7.6-console-armhf-2014-08-13-2gb.img of=/dev/mmcblk1
```

>>

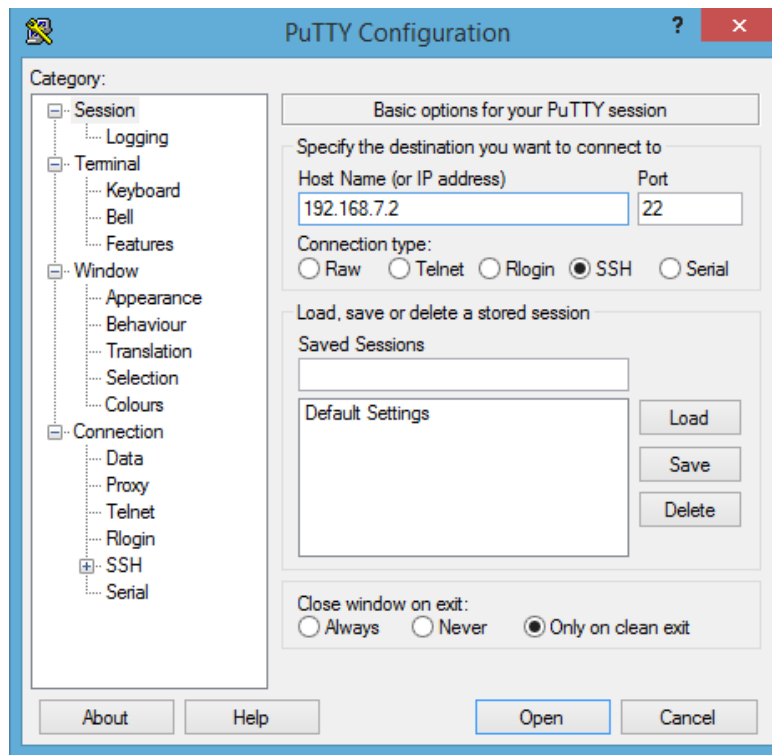
Una vez finalizamos la instalación de la nueva distribución de Debian, procedemos a instalar las librerías de entradas y salidas de BBB proveídas por Adafruit. La instalación debe hacerse con el BBB conectado a una computadora por el host miniUSB, al internet por un cable de Ethernet y por medio de un protocolo de comunicación SSH, podemos programar y utilizar el BBB.

Figura 70. BeagleBone Black conectado



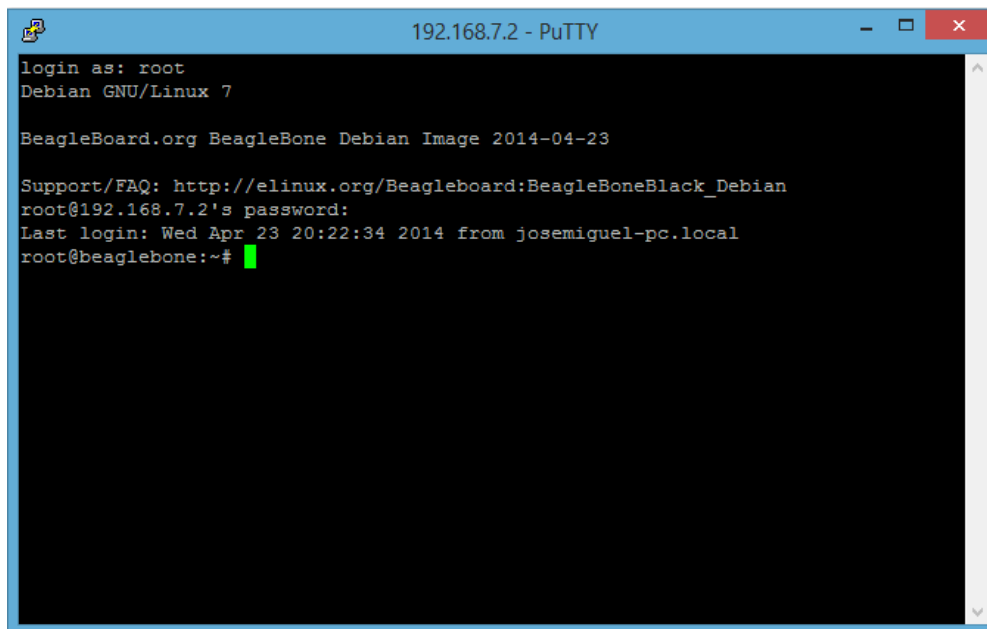
(Elaboración propia)

Figura 71. Ventana de comunicación SSH con BBB



(Elaboración propia)

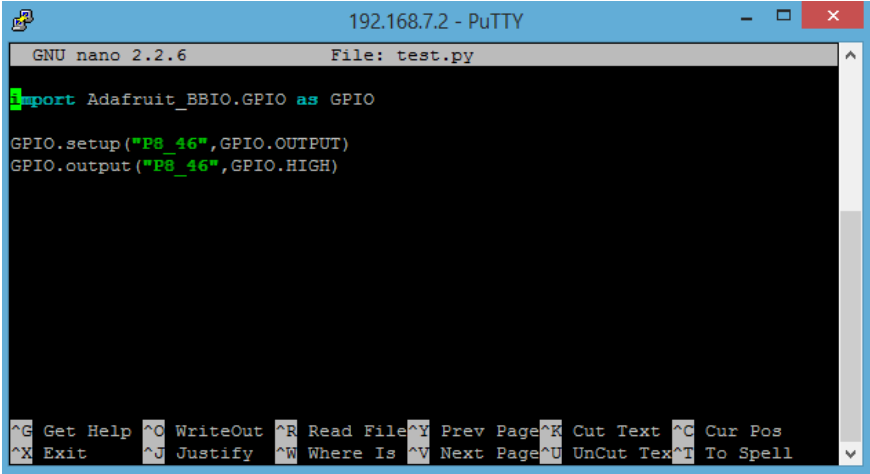
Figura 72. Ventana principal de BBB al conectarse por SSH



(Elaboración propia)

Para crear un nuevo programa en cualquier lenguaje utilizamos el comando “nano (nombre de archivo). (extensión)”. El editor de Linux se iniciará con un documento vacío. En caso el archivo no exista, y si el documento existe, abre el archivo y despliega su contenido.

Figura 73. Editor de Linux



```

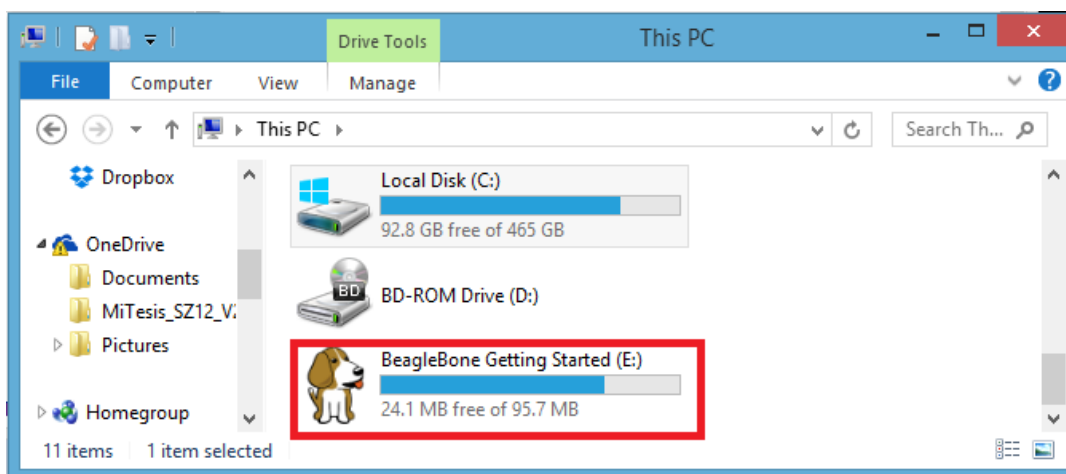
GNU nano 2.2.6 File: test.py
import Adafruit_BBIO.GPIO as GPIO
GPIO.setup("P8_46", GPIO.OUTPUT)
GPIO.output("P8_46", GPIO.HIGH)
^G Get Help ^O WriteOut ^R Read File ^Y Prev Page ^K Cut Text ^C Cur Pos
^X Exit ^J Justify ^W Where Is ^V Next Page ^U UnCut Text ^T To Spell

```

(Elaboración propia)

La Fig. 73 muestra el editor, además de la importación de la librería de Adafruit usada para programar. Ya que por la aplicación que le damos al BBB el módulo de video no es utilizado, podemos desactivarlo para liberar pines de entrada y salida. Para deshabilitar el módulo HDMI de video debemos ingresar a al partición de memoria que posee el BBB, que es vista desde la computadora a la que estamos conectados como una memoria USB.

Figura 74. Partición de memoria vista por PC



(Elaboración propia)

Dentro de esa memoria existe un archivo uEnv.txt, que posee las condiciones para que el BBB inicie el sistema operativo. En este documento hay varios comandos comentados por un '#'. La activación de los comandos requiere únicamente que se elimine el símbolo de comentario ('#'). El comando a activar es el "optargs=capemgr.disable_partno=BB-BONELT-HDMI,BB-BONELT-HDMIN". Esto liberará 20 pines digitales, que funcionaban para el HDMI inicialmente.

Cada función que necesite correr todo el tiempo se correrá por medio de una forma de hacer "multitasking", hacer varias cosas al mismo tiempo, con ayuda de la clase de Python llamada "threading". Esta clase permite poner en varios hilos (Threads) una secuencia de comandos que necesitan correr simultáneamente, la forma en que funcionará es ejecutar hilo por hilo, compartiendo recursos. La velocidad con la que ejecuta cada pedazo de programa no afecta el tiempo de ejecución de cada función.

e. Comunicación entre PIC, Beaglebone Black, módulo de interfaz de usuario y módulo de potencia. La comunicación del BBB con el PIC y los demás módulos fue decidida por los integrantes del Megaproyecto. El módulo de interfaz de usuario funcionará en el BBB por medio de un hilo ejecutado al mismo tiempo que el módulo de control, por lo que la comunicación entre módulos queda únicamente por medio de una variable que es leída por el módulo de control y modificada por el módulo de interfaz de usuario.

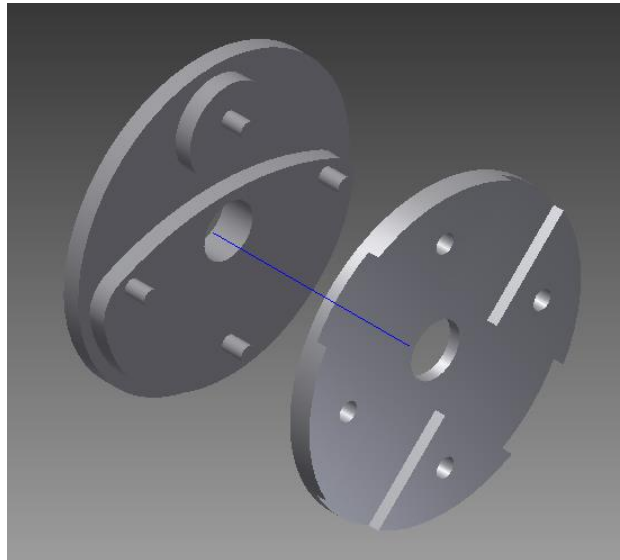
El PIC se comunica con el BBB por medio del protocolo UART. El BBB envía los anchos de pulsos que necesitan los servos y recibe las señales de retroalimentación de presión y posición. El baudrate predefinido por ambos dispositivos es de 9600, sin bit de paridad.

El módulo de potencia necesita una forma de comunicación ya que este cambia el voltaje de alimentación de los servos, desde 4.8 V hasta 6 V. La forma en que lo hace es variando un potenciómetro digital, que podemos variar enviando información por medio de I²C. Los valores enviados para hacer los cambios son: 0x62 para 4.8 V y 0x40 para 6 V. Estos valores representan un valor de 5 k Ω y 10 k Ω de resistencia. El cambio de voltajes sucederá cada vez que el usuario presione un botón.

4. **Módulo de compensación.** El módulo de compensación es necesario ya que existen 4 servos que no se encuentran dentro de la palma, por lo que los tendones (hilos de pescar) utilizados se aflojan y tensan con el movimiento de la muñeca. Contrarrestar este efecto se logra al agregar un eje adicional por el que se deban mover los tendones.

a. **Diseño mecánico de compensación.** La compensación se logra al agregar un eje adicional que posee forma de disco. El punto de seleccionar esta forma es reducir lo más posible los efectos de fricción, permite generar una compensación girando 180 grados (que es lo que proporciona el servo) y funciona como guía para los hilos.

Figura 75. Acople de servo para compensación (Explosión)



(Elaboración propia)

Los hilos pasarán por este eje previo a pasar al servo que controla la posición, por lo que el servo que se encarga de manipular la posición no considera el movimiento de muñeca. En código, la cantidad de movimiento que debe poseer el eje es exactamente igual al movimiento generado por la muñeca.

5. Implementación de sistema de control. Como es mencionado anteriormente, el algoritmo de control para un tipo PID ya está establecido. El algoritmo se implementa como un método de un objeto. Ya que se trabaja con un control digital, podemos implementar cuatro objetos tipo control. Cada uno de estos objetos se encarga de corregir la posición del dedo deseado (a excepción del meñique y anular, estos se mueven conjuntamente). Por la posición en la que está colocado el servo del dedo medio, es necesario implementar una corrección para que el movimiento que genere sea exactamente contrario al requerido.

a. Adaptación con interfaz de usuario. La interfaz de usuario entra en juego al momento de querer cambiar el dato en el arreglo que se envía. El controlador PID siempre está generando la corrección; sin embargo, debe satisfacer una condición de si al dedo debe implementarse la corrección. Si la condición es falsa, el dedo se coloca en posición de reposo; si la condición es verdadera, el dedo recibe las correcciones enviadas por el controlador PID.

b. Calibración de constantes. Existen varios métodos de calibración para las constantes. Aun así, el método utilizado fue el experimental. El método experimental consiste en observar el comportamiento del sistema y modificar las constantes "al ojo", para lograr una estabilidad rápida. El método no es eficiente o rápido. Esto se debe a que la función de transferencia de un servo motor es compleja.

Las constantes utilizadas son:

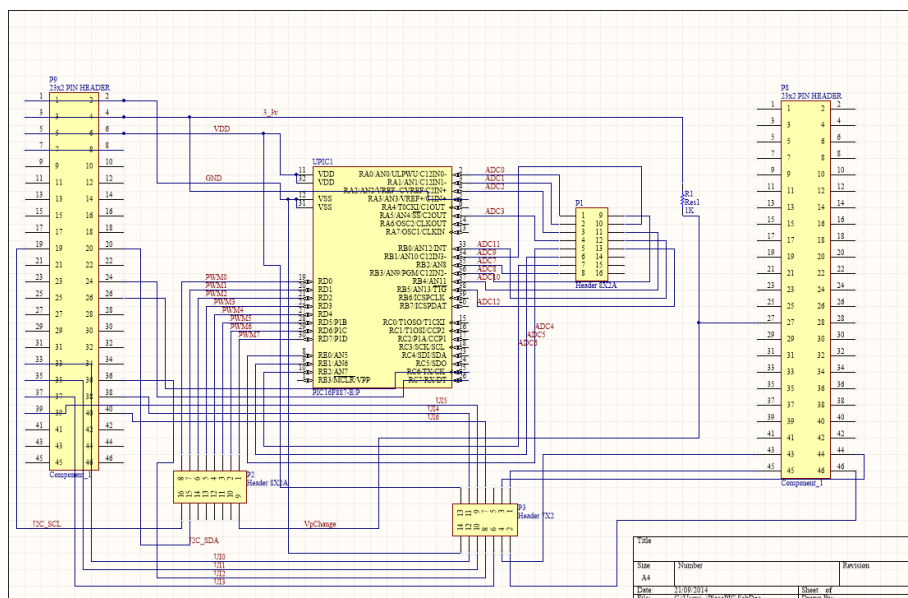
- $K_P = 1$
- $K_D = 0$
- $K_I = 0$

Todos los objetos de control utilizaron las mismas constantes.

6. Placa para expansión de módulo. Se diseña una placa donde se unirá el BBB con el PIC, esto hace que el espacio requerido sea compacto y se dejarán conexiones a pines que utilizará el módulo de interfaz de usuario.

a. Diseño. El esquemático del diseño de las placas se observa en la Fig. 76.

Figura 76. Esquemático de Placa

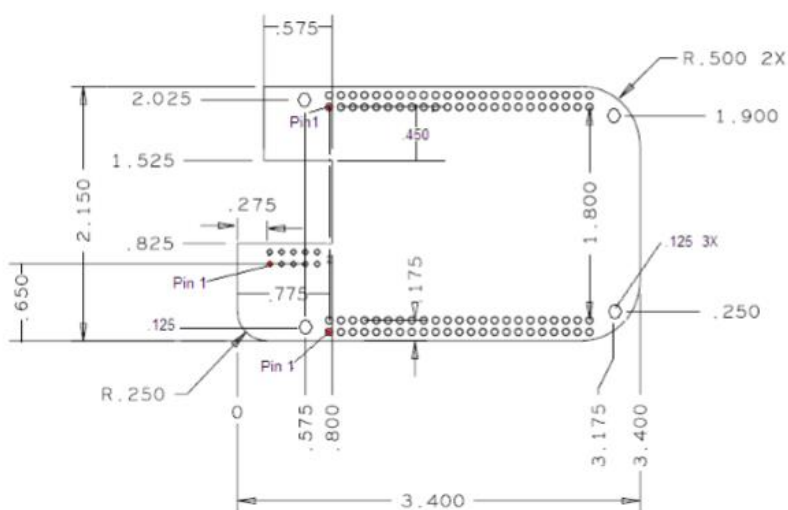


(Elaboración propia)

Como se observa, el esquemático únicamente incluye los dispositivos a utilizar y las interconexión necesarias entre los pines. No se especifica en que capa se conectarán, ni se especifican reglas de diseño.

El BBB, en su manual y hoja de datos, incluye una sección de creación de placas de expansión. Esta sección incluye la imagen en Figura 77, que especifica las dimensiones que la placa podría tener.

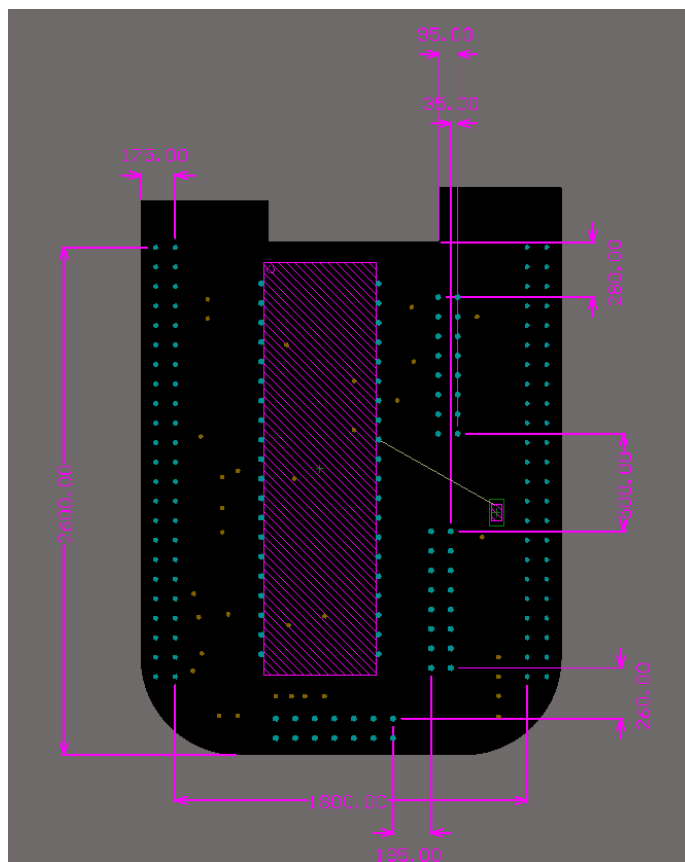
Figura 77. Dimensiones recomendadas placa de expansión



(Coley, 2013)

Tomando en cuenta estas dimensiones, se diseña el contorno de la placa. El contorno se modificó para solucionar un conflicto con la entrada de alimentación, por lo que el contorno es el de la Fig. 78.

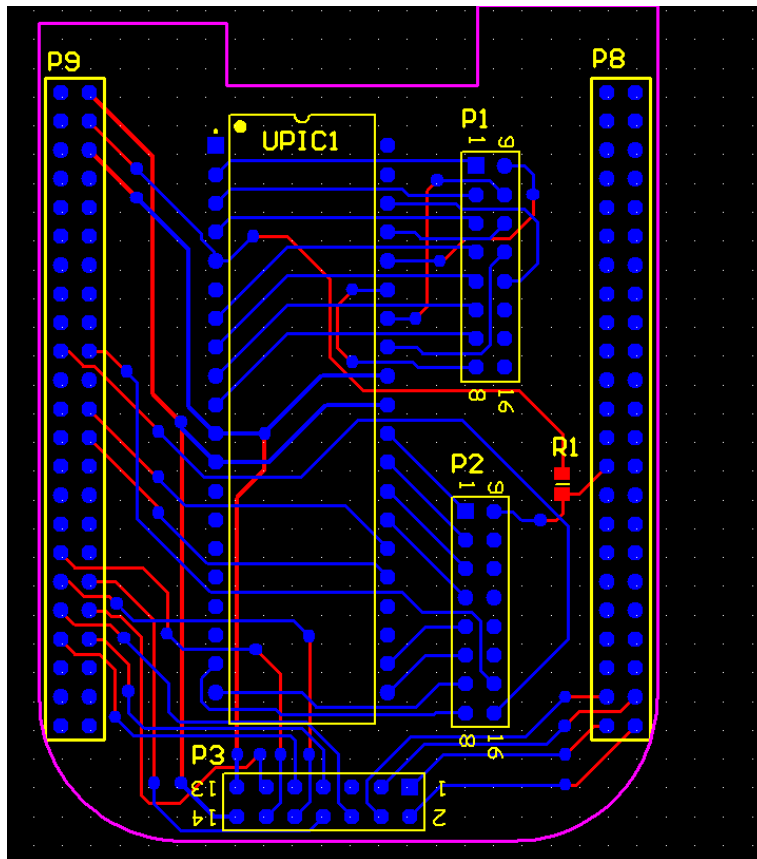
Figura 78. Contorno de placa



(Elaboración propia)

Una vez creado el contorno de la placa, se procedió a colocar los dispositivos de manera que las rutas fueran lo menos enredadas posible. El diseño final, se muestra en la Fig. 79.

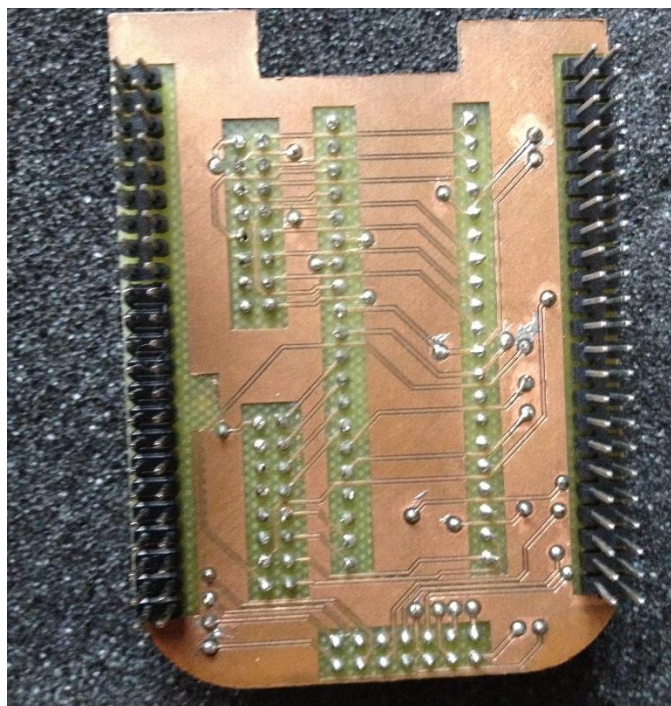
Figura 79. Diseño final de placa



(Elaboración propia)

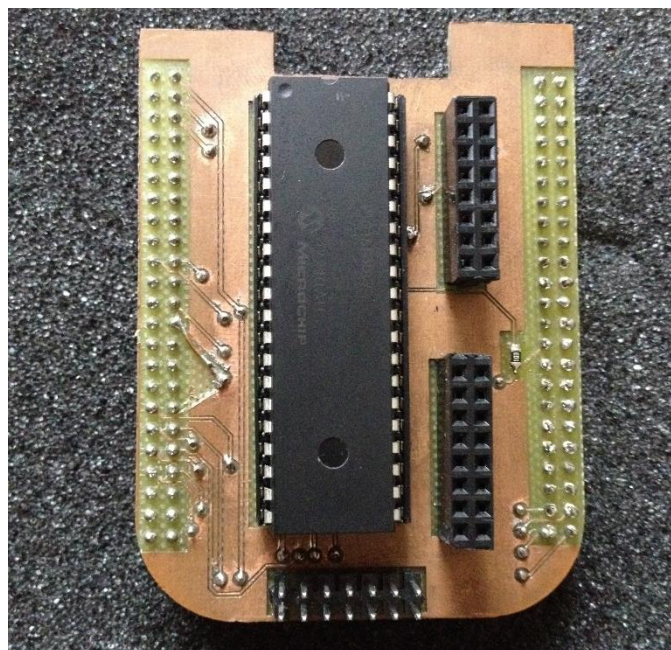
b. Placa final. Se manda a fresar la placa, se sueldan los componentes y obtenemos como resultado la placa mostrada en las Figs. 80, 81, 82 y 83.

Figura 80. Placa final vista inferior



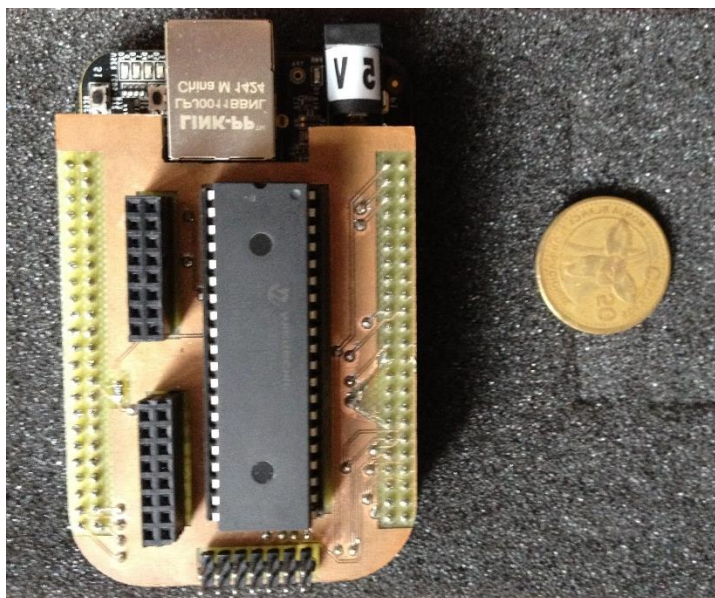
(Elaboración propia)

Figura 81. Placa final vista superior



(Elaboración propia)

Figura 82. Placa montada sobre BBB, moneda de 50c para referencia



(Elaboración propia)

Figura 83. Vista de lado, moneda de 50c para referencia



(Elaboración propia)

B. Discusión

1. **Selección de dispositivos.** El uso de múltiples dispositivos reparte la carga de procesamiento, lo que permite que el BBB se enfoque en el procesamiento de la interfaz de usuario. Ya que el BBB es una computadora por su cuenta, está ejecutando más procesos que únicamente los programas que se agregaron por lo que es ineficiente para controlar procesos que son sensibles al tiempo. El PIC puede especificarse el uso de su tiempo por instrucción. Cada instrucción es ejecutada cada 2MHz (0.5 μ s); el tiempo requerido para un retraso mínimo de PWM es de 80 μ s, lo que permite que dentro de cada retraso se puedan ejecutar 160 instrucciones. Si suponemos que se ejecutan todas las instrucciones de las interrupciones al mismo tiempo, contamos con 95 instrucciones. Cada bit recibido y enviado por UART tarda 104 μ s en llegar a su destino. Tomando en cuenta ambos casos de máximo retraso por parte de interrupciones, el PIC no se ve afectado en su rendimiento en ejecución del tiempo. El BBB aunque posee una velocidad de reloj 500 veces más rápido, no es deseable que tome parte de ese poder de procesamiento para tomar tiempos.

2. **Compensación.** En la fase anterior, la manipulación de los dedos es hecho por un servo motor por dedo (con excepción del dedo anular y meñique). El movimiento de la muñeca introduce un error de tensión o aflojamiento (dependiente del movimiento que haya hecho la muñeca) que previene un funcionamiento correcto de los servos puestos en el antebrazo. El eje adicional provee como solución agregar o liberar tensión del hilo. Como medida adicional se restringió la salida de los hilos desde la mano, para que estuvieran a una menor distancia de la muñeca, lo que restringe la longitud de hilo que hay que tensar o destensar para compensar. Si se toma como punto inicial el servo a 0 grados, y como punto final un giro de 180 grados, la longitud de tensión final que se obtiene es de 8 cm (considerando una carga liviana). Los cinco centímetros de movimiento corrigen, como una opción inicial, el movimiento de muñeca.

3. **Sistema de control.** La calibración del sistema de control, dejando únicamente la constante de proporcionalidad en uno, indica que un controlador PID es innecesario, a pesar de que la retroalimentación negativa provee más estabilidad al sistema. No se utilizó un método de calibración, como es mencionado anteriormente, y esto influye el resultado, ya que los valores que fueron probados no fueron suficientemente significativos para observar un cambio favorable.

4. **Funcionamiento de placa.** La placa por su tamaño optimiza el espacio utilizado por la composición de dispositivos. Las salidas puestas en la parte inferior son pines utilizados por la placa que utilizará el módulo de interfaz de usuario. El ancho de las pistas que manejan señales digitales y señales analógicas, es de 10 milésimas de pulgada (mils); la separación entre las pistas es de 10 mils. Los cabezales ("Headers") al costado del PIC permiten diferenciar claramente entre entradas y salidas a pesar que un pin del header de salidas está destinado a ser entrada para cambio del voltaje del módulo de potencia.

IX. DESARROLLO DEL MÓDULO DE POTENCIA

A. Diseño experimental

En la elaboración del módulo de potencia de la prótesis, se realizaron varios análisis y diseños para poder obtener resultados que cumplieran con los objetivos del módulo y así mejorar el rendimiento general de la prótesis. Entre estos aspectos está el reemplazar los servomotores ya instalados por unos que tengan mejor torque, menor peso y tamaño más pequeño. También se agregarán motores para mejorar el movimiento de los dedos y la relación de movimiento dedos-muñeca, es decir, que se corregirá el movimiento del dedo pulgar, ya que en la versión anterior el pulgar no se podía estirar completamente y se quiere arreglar esto para que la prótesis tenga un aspecto parecido al de una mano real. La relación del movimiento dedos-muñeca se piensa mejorar en el sentido que en la etapa anterior, cuando los dedos estaban cerrados y los tendones estaban tensos, el movimiento de la muñeca provocaba que los tendones de los dedos se destensaran. Esto se corregirá en el módulo de control interno, pero para ello se debe de agregar dos motores en el antebrazo para tensar y destensar los tendones cuando se mueva la muñeca. Otro aspecto de este módulo es el encontrar una batería que tenga las características necesarias para alimentar el circuito, tanto de control como de potencia, que utiliza la prótesis. Por otro lado, el circuito de potencia implementará la opción de utilizar los motores a 4.8 y 6 voltios, permitiendo así un incremento en la fuerza de agarre. Por último se realizará un diseño de disipación de potencia para proteger el circuito y así permitir que éste funcione correctamente.

Los estudios, análisis y diseños se realizaron en paralelo a lo largo de la elaboración del proyecto. Sin embargo, se fue completando cada parte por separado. La primera parte en ser terminada fue la de la selección de los actuadores, seguida por el diseño de los circuitos y las placas, la cual se realizó en varias etapas hasta obtener el diseño final. Una vez completado el diseño del circuito, se realizaron el estudio y diseño para disipar la potencia generada. Por último se terminó la parte de la selección de la batería, ya que al tener el circuito de la prótesis completa se determinaron las características que debía tener la batería. A lo largo de todo el proyecto se ha ido modificando la estética de la prótesis.

1. Selección de actuadores. Se investigó acerca de los servomotores que habían sido instalados en la prótesis en las etapas de megaproyecto anteriores y acerca de los motores que se encuentran actualmente en el mercado, para así utilizar los motores con mejores características para el movimiento de la prótesis. Entre los aspectos que se buscó mejorar están el torque, la velocidad de respuesta, la precisión y la reducción de peso y tamaño.

Al finalizar la tercera etapa del megaproyecto de la prótesis transhumeral, se estaba utilizando un total de 7 motores. Un motor de corriente directa para el movimiento del codo y 6 servomotores, 4 para el movimiento de los dedos, uno para el de la muñeca y otro para el antebrazo.

Se consideró modificar los motores de la muñeca y de los dedos principalmente, porque se consideró que el codo debía ser modificado y mejorado en un módulo aparte (esto incluía la selección de los motores para el movimiento del codo y del antebrazo). Debido a esto se consideraron para los diferentes análisis los motores del codo ya instalados, mientras se encontraba a un estudiante que trabajara en el codo. Sin embargo, al no encontrar un sujeto, se optó por la opción de no utilizar el codo en la prótesis.

Al finalizar el análisis se terminó con un total de 8 servomotores. Siete fueron para el movimiento de los dedos y uno para el movimiento de la muñeca. Se realizaron tres tablas comparativas, una para los servomotores que realizarían el movimiento de abrir y cerrar los dedos, una para el servomotor del movimiento de la muñeca y la última para un servomotor que se añadió para estirar completamente el dedo pulgar.

a. **Servomotores para los dedos.** La selección de los servomotores de los dedos se basó en la comparación de los motores en el mercado con el FUTABA S3102, ya que éste fue el motor utilizado en la tercera etapa. Como prioridad se buscó disminuir el tamaño para realizar los cambios que mejorarían el control interno de los mismos, ya que se deberían colocar dos motores más en la parte del antebrazo y uno más pequeño en la palma para estirar completamente el pulgar. En segundo lugar se buscó disminuir el peso de los motores, porque al disminuir el peso de la palma, el motor de la muñeca tendría que ejercer menos trabajo para moverla o podría cargar un objeto más pesado que el que se logró cargar en la tercera etapa de la elaboración de la prótesis. También había que considerar que se le estaba agregando motores tanto a la mano como al antebrazo y había que compensar esto con la reducción del peso de los mismos. Por último se buscó mejorar el torque y la velocidad de reacción del motor. En la Tabla 10 se puede observar los diferentes motores que cumplían con el requisito de menor tamaño que el FUTABA S3102 (Número 1 de la Tabla 10). En esta Tabla se encuentran únicamente los motores de los cuales se pudo encontrar información completa y respaldada por la compañía que los fabrica.

Tabla 10. Comparación de las características de motores más pequeños que el FUTABA S3102

| | MOTOR | TIPO | TAMAÑO | PESO | VOLTAJE | TORQUE | VELOCIDAD | PRECIO |
|---|---------------------------------|-----------|--|--------|----------------|--------------------------|--------------------------|----------|
| 1 | FUTABA S3102 | Analógico | L: 27.9 mm W: 13.0 mm H: 30.0 mm | 21.0 g | 4.8 V 6.0 V | 3.67 kg/cm 4.61 kg/cm | 0.25 s/60° 0.20 s/60° | \$ 36.99 |
| 2 | AIRTRON ICS 94761Z | Digital | L: 26.9 mm W: 11.9 mm H: 30.0 mm | 23.0 g | 4.8 V 6.0 V | 3.96 kg/cm 4.75 kg/cm | 0.15 s/60° 0.12 s/60° | \$ 59.99 |
| 3 | BLUE BIRD BMS- 385DMAX | Digital | L: 25.4 mm W: 12.7 mm H: 25.4 mm | 16.7 g | 4.8 V 6.0 V | 4.10 kg/cm 4.46 kg/cm | 0.15 s/60° 0.13 s/60° | \$ 34.27 |
| 4 | BLUE BIRD BMS- 885DMAX | Digital | L: 25.9 mm W: 13.0 mm H: 25.9 mm | 16.5 g | 4.8 V | 4.10 kg/cm | 0.15 s/60° | \$ 42.50 |
| 5 | GRAUPN ER C 351 | Analógico | L: 27.9 mm W: 13.0 mm H: 30.0 mm | 24.9 g | 4.8 V | 3.67 kg/cm | 0.15 s/60° | \$ 55.99 |
| 6 | GRAUPN ER DS 292 MG | Digital | L: 21.6 mm W: 10.9 mm H: 21.1 mm | 11.0 g | 4.8 V 6.0 V | 5.7 kg/cm 7.6 kg/cm | 0.17 s/60° 0.14 s/60° | NA |
| 7 | GWS NARO SUPER SD | Digital | L: 26.9 mm W: 12.7 mm H: 24.6 mm | 19.0 g | 4.8 V 6.0 V | 4.46 kg/cm 4.97 kg/cm | 0.10 s/60° 0.08 s/60° | \$ 25.00 |
| 8 | HEXTRO NIK SSV- 9320MG | Analógico | L: 25.9 mm W: 13.0 mm H: 25.9 mm | 20.2 g | 4.8 V | 3.80 kg/cm | 0.15 s/60° | \$ 17.77 |

Continuación Tabla 10

| | MOTOR | TIPO | TAMAÑO | PESO | VOLTAJE | TORQUE | VELOCIDAD | PRECIO |
|----|-------------------------------------|-----------|---|--------|----------------|--------------------------|--------------------------|----------|
| 9 | HEXTRO NIK SSV- 9320MG 180 | Analógico | L: 25.9 mm W: 13.0 mm H: 25.9 mm | 20.2 g | 4.8 V | 3.8 kg/cm | 0.15 s/60° | € 30.00 |
| 10 | HYPERIO N DS11- AMB | Digital | L: 23.6 mm W: 11.4 mm H: 21.1 mm | 10.5 g | 4.8 V 6.0 V | 4.20 kg/cm 5.00 kg/cm | 0.18 s/60° 0.15 s/60° | \$ 33.95 |
| 11 | JR DS361 | Digital | L: 27.9 mm W: 13.0 mm H: 20.1 mm | 22.1 g | 4.8 V | 3.82 kg/cm | 0.24 s/60° | € 17.00 |
| 12 | JR DS368 | Digital | L: 27.9 mm W: 13.0 mm H: 30.0 mm | 22.7 g | 4.8 V | 3.82 kg/cm | 0.21 s/60° | \$ 69.99 |
| 13 | POWER HD HD- 2213MG | Digital | L: 22.9 mm W: 11.9 mm H: 25.4 mm | 15.8 g | 4.8 V 6.0 V | 3.9 kg/cm 4.6 kg-cm | 0.21 s/60° 0.16 s/60° | \$ 21.75 |
| 14 | TURNING Y BMS- 380MAX | Analógico | L: 25.9 mm W: 13.0 mm H: 25.9 mm | 17.4 g | 4.8 V 6.0 V | 4.10 kg/cm 4.70 kg/cm | 0.16 s/60° 0.14 s/60° | \$ 26.50 |

Una vez completada la Tabla se obtuvo un total de 13 motores que superaban o igualaban al FUTABA S3102 en cuanto al tamaño. Como segunda característica importante en el proceso de eliminación de los servomotores se consideró el peso del mismo y se descartó todo motor que fuese más pesado que el FUTABA S3102 (AIRTRONICS 94761Z, GRAUPNER C351, JR DS361 y JR DS368). Como se deseaba tener la opción de aumentar la fuerza de agarre de la prótesis, se debía incrementar el torque de los motores, por lo que se tomó la decisión de optar por motores que tuviesen la cualidad de operar bajo 4.8 y 6 voltios. Entre los motores que no poseen esta capacidad están el HEXTRONIK HXT 9320MG y HEXTRONIK HXT 9320MG-180, por lo que fueron descartados. De los cinco servos

restantes, se comparó las características que poseían para determinar cuál era el mejor para reemplazar al FUTABA S3102 y se llegó a la conclusión que el mejor motor es el GRAUPNER DS 292MG (Número 6 de la Tabla I). Este motor posee el tamaño más pequeño, es el segundo más liviano, tiene el torque más grande y una velocidad aceptable. Sin embargo este servomotor no se encontró disponible en alguna tienda, por lo que no se pudo comprar. Debido a esto se optó por el segundo mejor motor. Este es el HYPERION DS11-AMB (Número 10 de la Tabla I). El HYPERION DS11-AMB supera al FUTABA S3102 en todas las características. Sin embargo, consume más corriente, ya que es un servomotor digital y no un analógico como el Futaba. Se colocaron dos servomotores en la palma de la prótesis para el movimiento del dedo medio y el índice. Los otros cuatro servomotores se colocaron en el antebrazo: dos para el movimiento del pulgar y dos para el movimiento del meñique y anular (estos dos dedos se mueven juntos, ya que el ser humano promedio no posee la capacidad de mover el meñique sin mover el anular al mismo tiempo). Se utilizó dos servomotores para estos movimientos para corregir la tensión de los hilos que cierran y abren los dedos cuando se mueve la muñeca.

b. Servomotor para la muñeca. El análisis que se hizo para seleccionar el servomotor del movimiento de la muñeca es bastante similar al anterior. Se diferencia en que la característica principal a mejorar fue el torque, porque la función principal de este motor es mover la mano y cualquier objeto que esté agarrando. Una vez hecha la búsqueda de los servomotores con un tamaño igual o menor que el HITEC HS.7955TG, se encontró que no había ninguno que tuviese mejor torque que el ya instalado, por lo que se realizó otra búsqueda donde se utilizó un torque mejor como parámetro principal de búsqueda. También se consideró la disminución del peso y un aumento de tamaño poco significativo. Se obtuvo un total de siete motores. Estos se encuentran tabulados en la Tabla II.

Tabla 11. Comparación de las características de motores con el HITEC HS-7955TG

| | MOTOR | TIPO | TAMAÑO | PESO | VOLTAJE | TORQUE | VELOCIDAD | PRECIO |
|----------|-----------------|---------|--|--------|----------------|--------------------------|--------------------------|-----------|
| 1 | HITEC HS-7955TG | Digital | L: 39.9 mm W: 19.8 mm H: 36.8 mm | 65.0 g | 4.8 V 6.0 V | 18.0 kg/cm 24.0 kg/cm | 0.19 s/60° 0.15 s/60° | \$ 119.95 |
| 2 | HITEC HS-5955TG | Digital | L: 40.1 mm W: 20.1 mm H: 37.1 mm | 61.5 g | 4.8 V 6.0 V | 18.0 kg/cm 24.0 kg/cm | 0.19 s/60° 0.15 s/60° | \$ 98.98 |

Continuación Tabla 11

| | MOTOR | TIPO | TAMAÑO | PESO | VOLTAJE | TORQUE | VELOCIDAD | PRECIO |
|---|-------------------------------|-----------|--|--------|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| 3 | GRAUPNE R DS 8511 | Digital | L: 39.1 mm W: 19.1 mm H: 39.1 mm | 59.0 g | 4.8 V | 18.5 kg/cm | 0.11 s/60° | \$ 144.99 |
| 4 | HYPERION DS20-UMD | Digital | L: 39.9 mm W: 19.6 mm H: 37.8 mm | 53.0 g | 4.8 V 6.0 V | 20.9 kg/cm 23.5 kg/cm | 0.23 s/60° 0.18 s/60° | \$ 38.95 |
| 5 | JR 791 | Analógico | L: 43.9 mm W: 22.4 mm H: 23.6 mm | 45.4 g | 4.8 V | 18.7 kg/cm | 1.55 s/60° | \$ 59.99 |
| 6 | XQ- POWER XQ- S4020D | Digital | L: 40.1 mm W: 20.1 mm H: 39.1 mm | 56.0 g | 4.8 V 6.0 V | 18.5 kg/cm 21.8 kg/cm | 0.15 s/60° 0.13 s/60° | \$ 34.08 |
| 7 | XQ- POWER XQ- S4618D | Digital | L: 40.1 mm W: 20.1 mm H: 38.9 mm | 60.0 g | 4.8 V 6.0 V | 26.5 kg/cm 29.6 kg/cm | 0.12 s/60° 0.10 s/60° | \$ 114.67 |

Igual que con los servomotores encargados del movimiento de los dedos, se descartaron los motores que no operaban a 4.8 y 6 voltios (el JR 791 y el DS 8511). De los cuatro restantes se compararon los torques y la velocidad de respuesta y se concluyó que el motor más calificado para sustituir el HITECH HS-7955TG es el XQ-POWER XQ-S4618D (Número 7 de la Tabla II). Sin embargo, también se dio el caso que éste no se logró encontrar disponible en tienda alguna. Por esta razón se optó por la segunda mejor opción, el HYPERION DS20-UMD (Número 4 de la Tabla II).

Este servomotor es más liviano que HITEC HS-7955TG, tiene 1.016 milímetros más alto y mejor torque cuando está operando a 4.8 voltios. En las características restantes son bastantes similares. Ambos motores son digitales. Otra razón por la que se optó por este motor es el precio, el cual es un tercio del HITEC HS-7955TG aproximadamente.

c. Servomotor para estirar completamente el pulgar. Al considerar este servomotor se consideró como características principales el tamaño y el peso. Esto se debe a que este motor se añadiría a la palma de la mano en el espacio no ocupado por los dos motores ya instalados. El torque y la velocidad no tuvieron mayor influencia en este análisis, porque este motor no ejercerá movimientos de trabajo pesado, sino que solo estirará el pulgar. Se realizó una búsqueda de servomotores con un peso menor a 4 gramos y un tamaño menor que el del HYPERION DS11-AMB, los resultados se tabularon en la Tabla 12.

Tabla 12. Comparación de las características de servomotores para añadir a la palma de la prótesis

| | MOTOR | TIPO | TAMAÑO | PESO | VOLTAJE | TORQUE | VELOCIDAD | PRECIO |
|----------|-------------------------|-----------|--|-------|----------------|------------------------|--------------------------|----------|
| 1 | BLUE BIRD BMS-303DD | Analógico | L: 19.1 mm W: 7.37 mm H: 15.5 mm | 3.7 g | 4.8 V 6.0 V | 0.8 kg/cm 1.0 kg/cm | 0.11 s/60° 0.09 s/60° | \$ 17.12 |
| 2 | BLUE BIRD BMS-303JST | Analógico | L: 19.1 mm W: 7.37 mm H: 15.5 mm | 3.4 g | 4.8 V | 0.8 kg/cm | 0.11 s/60° | NA |
| 3 | SCANNER RC SSV-9103 | Analógico | L: 20.8 mm W: 9.40 mm H: 20.3 mm | 3.8 g | 4.8 V | 1.0 kg/cm | 0.12 s/60° | NA |
| 4 | WAYPOIN T W-038CL | Analógico | L: 15.5 mm W: 7.62 mm H: 19.1 mm | 3.8 g | 4.8 V | 0.7 kg/cm | 0.11 s/60° | \$ 20.95 |
| 5 | WAYPOIN T W-038CL-J | Analógico | L: 15.5 mm W: 7.62 mm H: 19.1 mm | 3.4 g | 4.8 V | 0.7 kg/cm | 0.11 s/60° | \$ 18.8 |

Se encontraron cinco motores que cumplían con las características de la búsqueda. De estos cinco se seleccionó el BLUE BIRD BMS-303DD (Número 1 de la Tabla 12), porque es el más pequeño junto con el BLUE BIRD BMS-303JST (Número 2 de la Tabla 12) y es el único que opera a 4.8 y 6 voltios.

Después de haber seleccionado los motores se realizó una Tabla comparativa entre los motores utilizados en la tercera etapa y los nuevos motores para obtener la diferencia de corriente, diferencia de peso y la cantidad de motores instalados. El consumo máximo de corriente de los servomotores se obtuvo de la hoja de datos de los motores. Este dato también se comprobó experimentalmente. El

consumo de corriente máximo del BLUE BIRD BMS-303DD se determinó únicamente experimentalmente, porque de este servo no se encontró hoja de datos.

Tabla 13. Comparación de motores de la tercera fase con los nuevos.

| Motor | Tipo | Peso (gramos) | Cantidad | Corriente máxima (miliamperios) |
|----------------------------|-----------|---------------|----------|--|
| FUTABA S3102 | Analógico | 21.0 | 4 | 490 (4.8 voltios) |
| HYPERION DS11-AMB | Digital | 10.5 | 6 | 400 (4.8 voltios) 450 (6.0 voltios) |
| HITEC HS-7955TG | Digital | 65.0 | 1 | 3,200 (4.8 voltios) 4,200 (6.0 voltios) |
| HYPERION DS20-UMD | Digital | 53.0 | 1 | 1,500 (4.8 voltios) 2,000 (6.0 voltios) |
| BLUE BIRD BMS-303DD | Analógico | 3.7 | 1 | 250 (4.8 voltios) 300 (6.0 voltios) |

Los dos servomotores FUTABA S3102 que estaban en la palma fueron reemplazados por dos HYPERION DS11-AMB y el BLUE BIRD BMS-303DD. Se puede concluir que el peso de la palma disminuyó de 42 gramos a 24.7 gramos. El motor HYPERION DS20-UMD que reemplazó al HITEC HS-7955TG disminuyó el peso de la muñeca en 12 gramos. El peso de los motores del antebrazo siguió igual, ya que los dos FUTABA S3102 pesan 42 gramos y los 4 HYPERION DS11-AMB también. Sin embargo, el hecho de haber agregado dos motores mejorará el movimiento de los dedos.

Se sabe que un servomotor analógico consume menos corriente que un servo digital, pero para el análisis de consumo de corriente total máximo de los motores se asumió que la corriente se demandaba continuamente y no por los intervalos de los pulsos de control del servomotor. En la etapa anterior se tenía un total de 5,160 miliamperios, porque se trabajaba únicamente con 4.8 voltios, y con los nuevos motores instalados el consumo de corriente máximo es de 5000 miliamperios, por lo que aún con los motores que se añadieron el consumo de corriente es muy similar. Esto se debe a que el servomotor de la muñeca consume menos de la mitad del utilizado en la tercera fase de la prótesis.

2. Diseño del circuito. El diseño del circuito de la prótesis se dividió en varias fases. La primera fase fue el diseño a nivel de simulación, la segunda fase fue el diseño e implementación de las placas, la tercera fase fue el análisis de disipación de calor de los componentes de potencia. Por último se realizó una fase en la que se arregló los errores encontrados en el circuito de la segunda fase, y se modificaron las placas para asegurar la función de las mismas y para colocar los disipadores de calor.

Durante la elaboración del diseño se consideró varias opciones para alimentar los servomotores.

Una de estas fue el utilizar reguladores de voltaje como se había hecho en la tercera fase de este megaproyecto. Como se optó por seleccionar servomotores que funcionaran a 4.8 y 6 voltios, se consideró utilizar reguladores de 5 y 6 voltios. Esta opción era poco eficiente, ya que por cada motor se necesitarían dos circuitos casi idénticos y algún dispositivo que funcionara como interruptor para estar trabajando con un regulador o el otro. La segunda opción fue utilizar un regulador de 5 voltios y un amplificador operacional conectados entre sí, para que, al cambiar una resistencia de 5 a 10 kilo ohmios de la configuración del amplificador operacional. El voltaje variara de 4.8 a 6 voltios. Sin embargo, esta opción se descartó porque el amplificador operacional no tenía las características para soportar la corriente que el regulador daba para la alimentación del servomotor. La tercera opción que se consideró fue utilizar un amplificador operacional como sumador de voltajes y descartar el uso de los reguladores. El voltaje de una de las entradas del sumador variaría por medio de la variación de un potenciómetro digital. Esta última opción fue modificada, porque los amplificadores operacionales no podían proporcionar la corriente que necesitan los servomotores para operar, por lo que se agregó a la salida del sumador de voltaje un transistor de potencia cuya función es la de un seguidor de voltaje.

Además del circuito alimentador de los motores, se diseñó un circuito para controlar los servomotores. Este se realizó con optoacopladores para aislar el sistema de control de los motores. También se implementó circuitos reguladores de voltaje de 5, 7 y -5 voltios para los circuitos de control. Por último se agregó un circuito de sensores de presión, los cuales se encuentran en la yema de los dedos, un botón para cambiar de 4.8 a 6 voltios, un ventilador y un circuito indicador de batería baja.

Una vez diseñados los circuitos, se investigó acerca de los componentes electrónicos en el mercado. Se buscó que estos fuesen de superficie, para que el tamaño de las placas fuese compacto, también se consultó la hoja de datos de cada componente para ver las características máximas a las que puede operar el componente y verificar que cumplieran con los requerimientos de los circuitos.

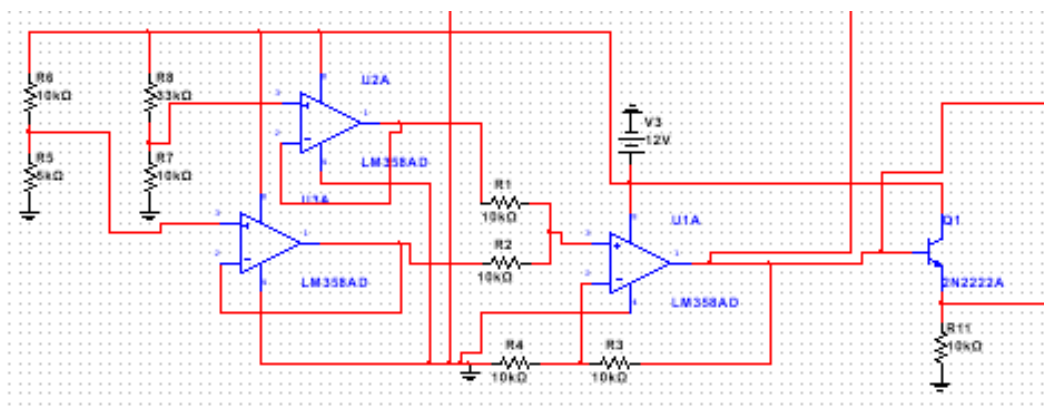
a. Simulación del circuito. Un circuito se diseña primero en un programa para tener una aproximación de su funcionamiento en la vida real. Es bastante sencillo realizar modificaciones mientras se diseña el circuito en el programa, por lo que si hay alguna falla, se puede arreglar sin preocupación alguna. En cambio si se hubiese implementado el circuito físicamente, la falla podría causar daños en alguno de los componentes.

El programa que se utilizó para realizar la simulación del funcionamiento de los circuitos fue Multisim 13.0 de la empresa National Instruments. Se diseñó el circuito alimentador de un motor y el circuito indicador de batería baja. Después de simularlo se implementaron los diseños en Protoboard para verlos funcionar físicamente.

El Circuito alimentador de un motor se puede observar en la Figura 16. Consta de dos divisores de voltaje por medio de resistencias, seguidas de un amplificador operacional con la función de seguidor

de voltaje. Estos voltajes se suman utilizando otro amplificador operacional. La salida de este amplificador operacional va a la base del transistor, el cual funciona como seguidor de voltaje y alimenta el motor. El transistor utilizado en la simulación no fue uno de potencia, ya que únicamente se quería verificar el funcionamiento con las conexiones correctas.

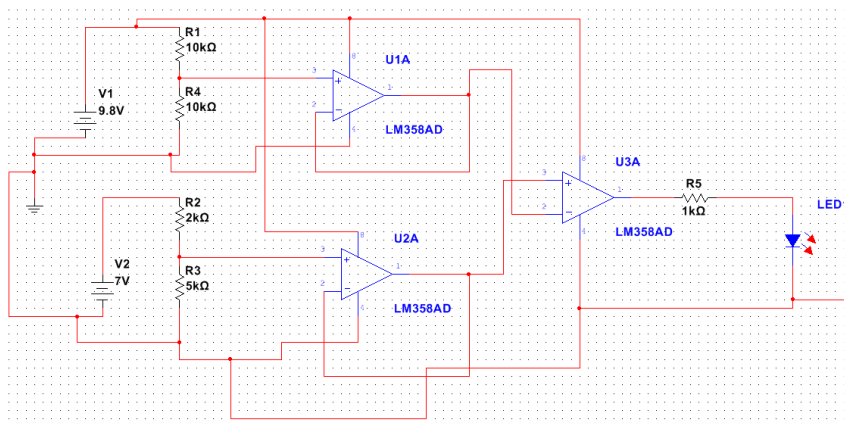
Figura 84. Circuito alimentador de un motor con un transistor en la salida



(Elaboración propia)

En la Figura 84 se puede observar el circuito indicador de la batería. Este contiene 3 amplificadores operacionales, 5 resistencias y un diodo emisor de luz. 4 resistencias tienen la función de formar dos divisores de voltajes, uno de los cuales estará fijo a un valor de 5 voltios y el otro irá variando conforme varíe el voltaje de la batería. Cada divisor de voltaje es seguido por un amplificador operacional cuya función es la de un seguidor de voltaje. Los dos voltajes entran a un comparador de voltaje. Si el voltaje de la batería es menor a 10 voltios, el comparador alimentará el diodo emisor de luz y éste indicará que se debe cargar la prótesis para prevenir que el voltaje de la batería disminuya a más de 9 voltios y se dañe. Las fuentes de voltaje de 9.8 y 7 voltios representan la batería y el regulador de 7 voltios respectivamente.

Figura 85. Circuito indicador de batería baja



(Elaboración propia)

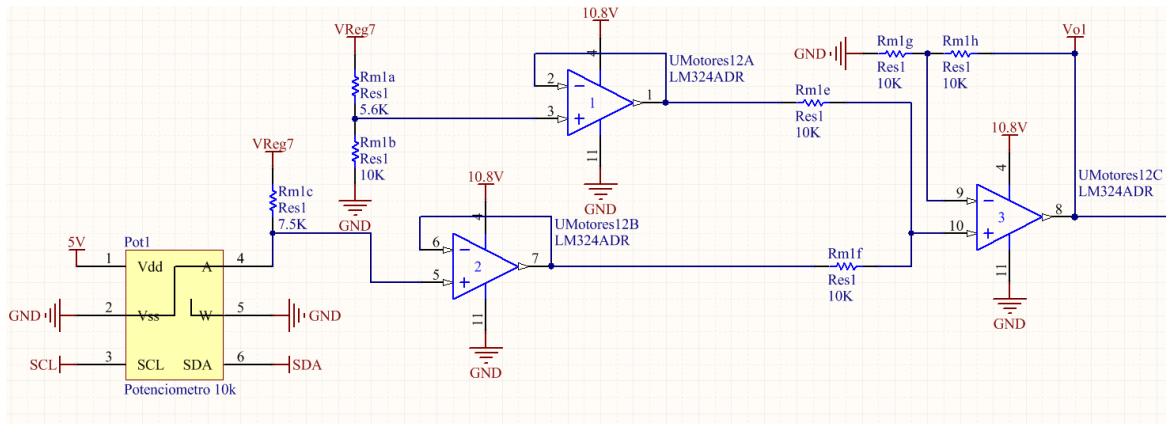
b. Diseño de las placas. Una vez verificado que la simulación funcionara correctamente, se implementó el circuito en Protoboard para observar el funcionamiento con componentes reales. Luego se diseñó las placas con componentes de superficie, a excepción de los optoacopladores y los headers. Este diseño se realizó en un programa llamado Altium. Para poder diseñar las placas, se tuvo que diseñar los esquemáticos primero (diagramas de los circuitos). Se diseñó un total de cuatro esquemáticos y tres placas. Esto se debió a que se dividió el diseño en diferentes placas considerando la colocación dentro del antebrazo. Se imprimieron dos placas y realizó las soldaduras correspondientes, según el diseño inicial. Para la tercera placa se modificó el diseño inicial, ya que se tomó la decisión de que los circuitos ya no irían en el antebrazo como se tenía pensado inicialmente.

Los esquemáticos diseñados en este programa varían de los diseñados en Multisim, porque aquí se colocaron todos los componentes necesarios para que funcionara el circuito cuando estuviesen en placa. Se agregó headers (salidas y entradas para la conexión entre placas), el circuito de alimentación de los motores se realizó 8 veces (uno por motor), se implementó el regulador de 7 voltios, los circuitos de control y los circuitos de los sensores de presión. La razón por la que se realizaron más de un esquemático es para facilitar el colocar los componentes en las placas durante el diseño de las mismas. También se agregó un ventilador de 5 voltios pensando en la disipación de potencia que había que realizar.

En la Figura 86, 87 y 88 se muestran los circuitos para alimentar los motores, junto con el regulador de voltaje de 7 voltios, el cual utiliza dos capacitores para funcionar correctamente. El circuito alimentador varía del mostrado en el esquemático del simulador en que se utilizó un potenciómetro digital en vez de una resistencia. Esto es porque se implementó un botón para realizar el cambio de 4.8 a 6 voltios y viceversa. Cuando el botón es presionado, se le manda un comando al potenciómetro digital para variar su valor resistivo, como consecuencia el valor del divisor de voltaje y el voltaje de

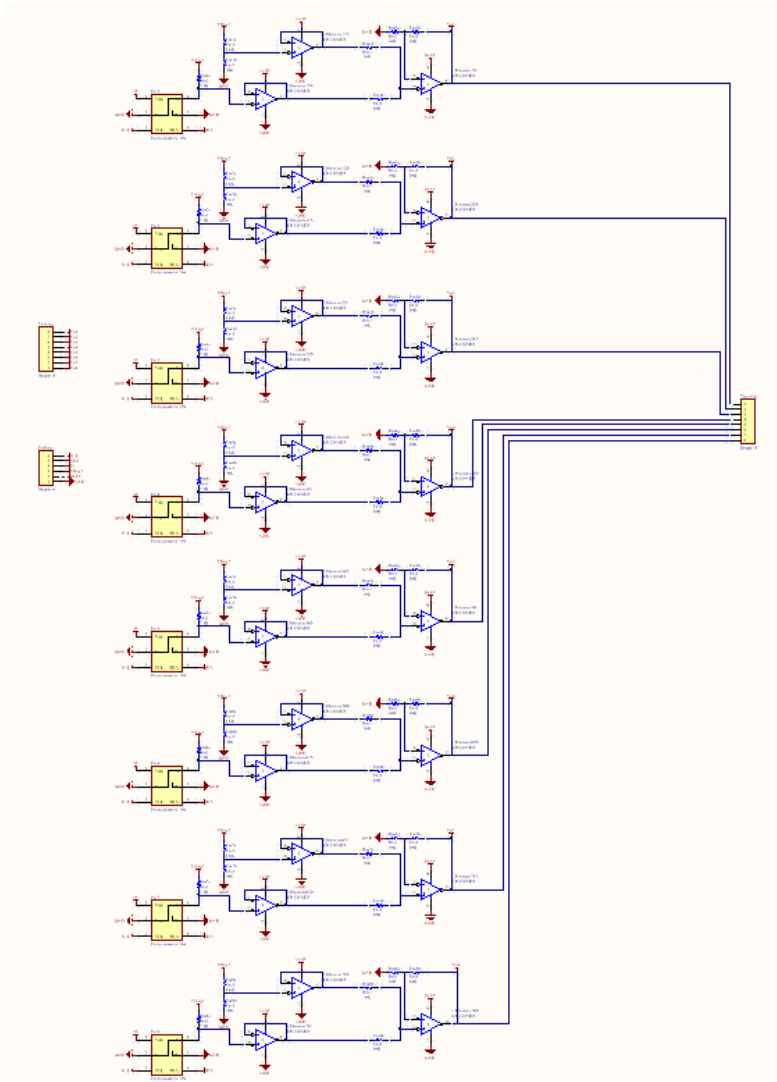
alimentación del motor.

Figura 86. Circuito alimentador de voltaje sin el transistor de potencia y con el potenciómetro digital implementado



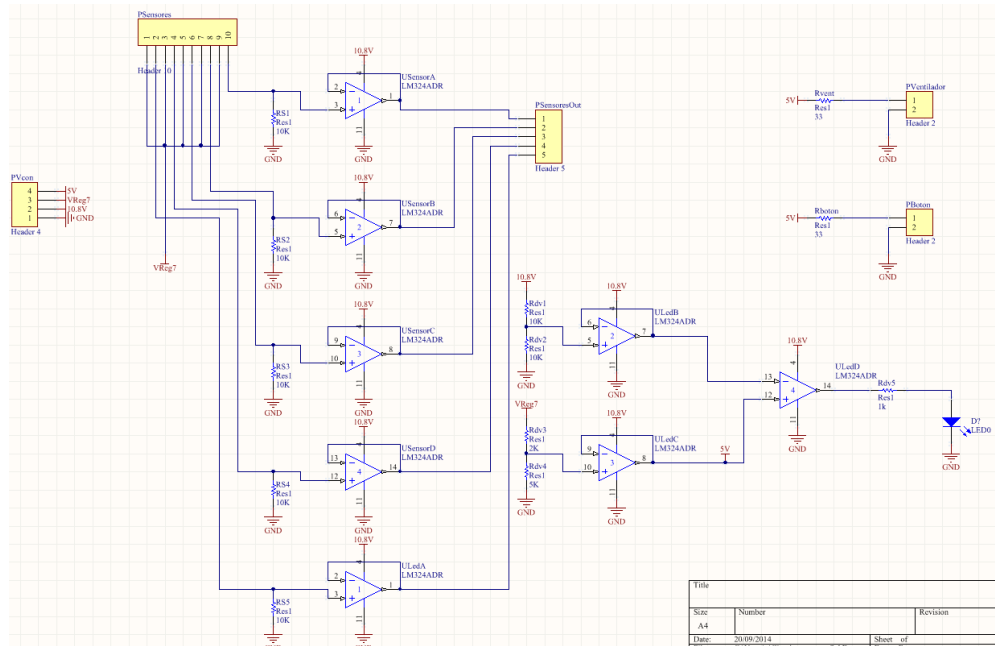
(Elaboración propia)

Figura 87. Esquemático con todos los circuitos alimentadores de voltaje sin los transistores de potencia



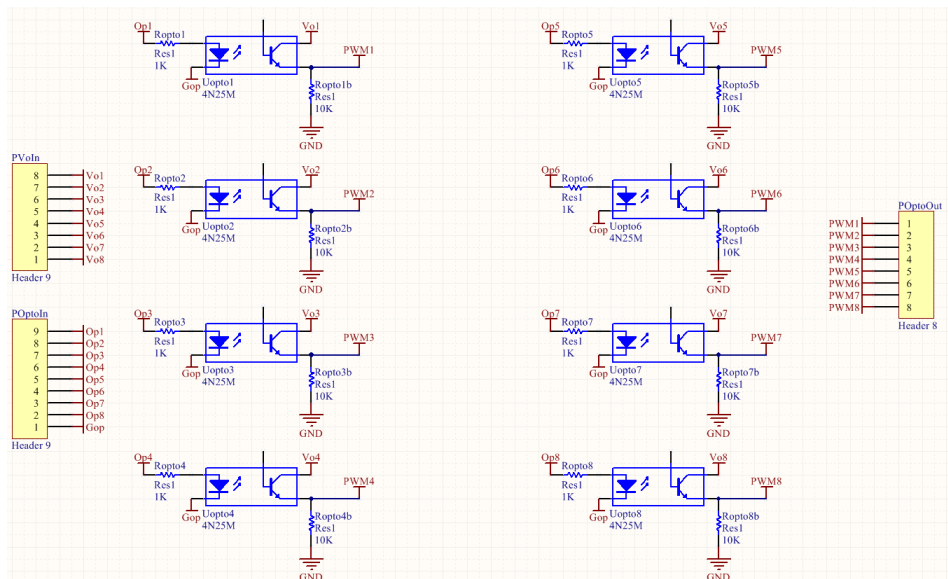
(Elaboración propia)

Figura 89. Esquemático con los circuitos de los sensores, el circuito indicador de batería baja y los headers para conectar el botón y el ventilador



(Elaboración propia)

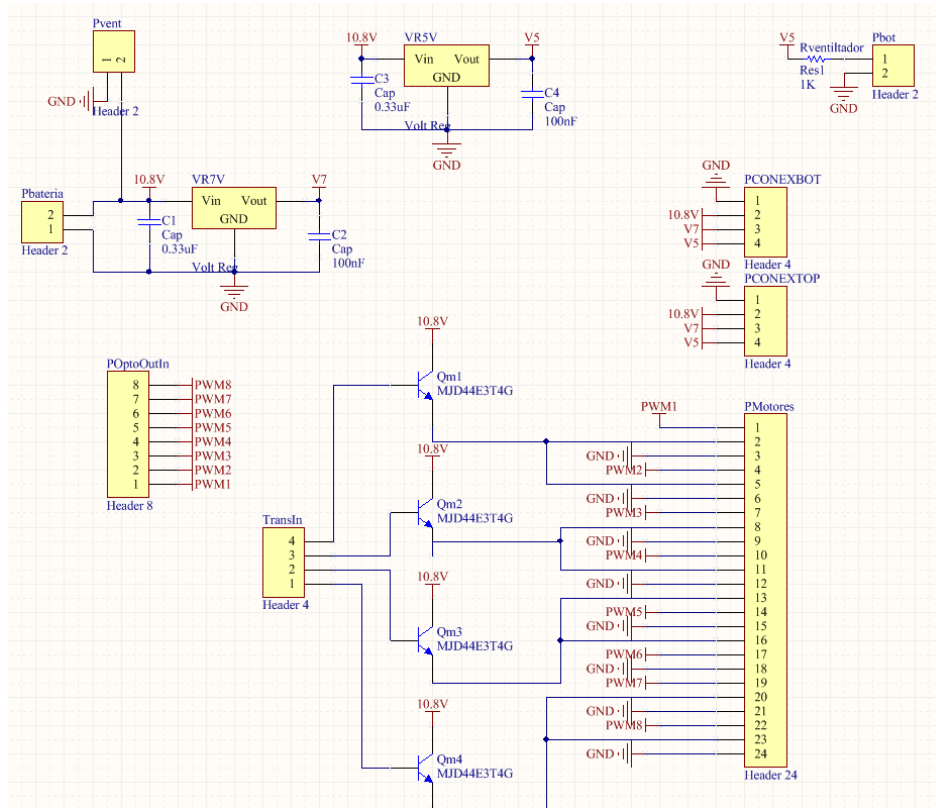
Figura 90. Esquemático con los circuitos para controlar los motores



(Elaboración propia)

El esquemático de los transistores se modificó del diseño original, porque antes de imprimir la placa se observó que un transistor podía alimentar a dos motores sin sobrepasar la potencia máxima que se especifica en su hoja de datos. También se le agregó un header para un ventilador, porque después de realizar algunos cálculos de disipación de potencia, se concluyó que el flujo que se necesitaba no lo podía proporcionar el ventilador de 5 voltios que se había considerado anteriormente. El ventilador que se estaría utilizando para el proyecto es un ventilador de 12 voltios fabricado por Intel. Por último se agregó un regulador de 5 voltios, para poder alimentar el circuito de control de la prótesis. El esquemático utilizado para la impresión de la placa se puede observar en la Figura 90.

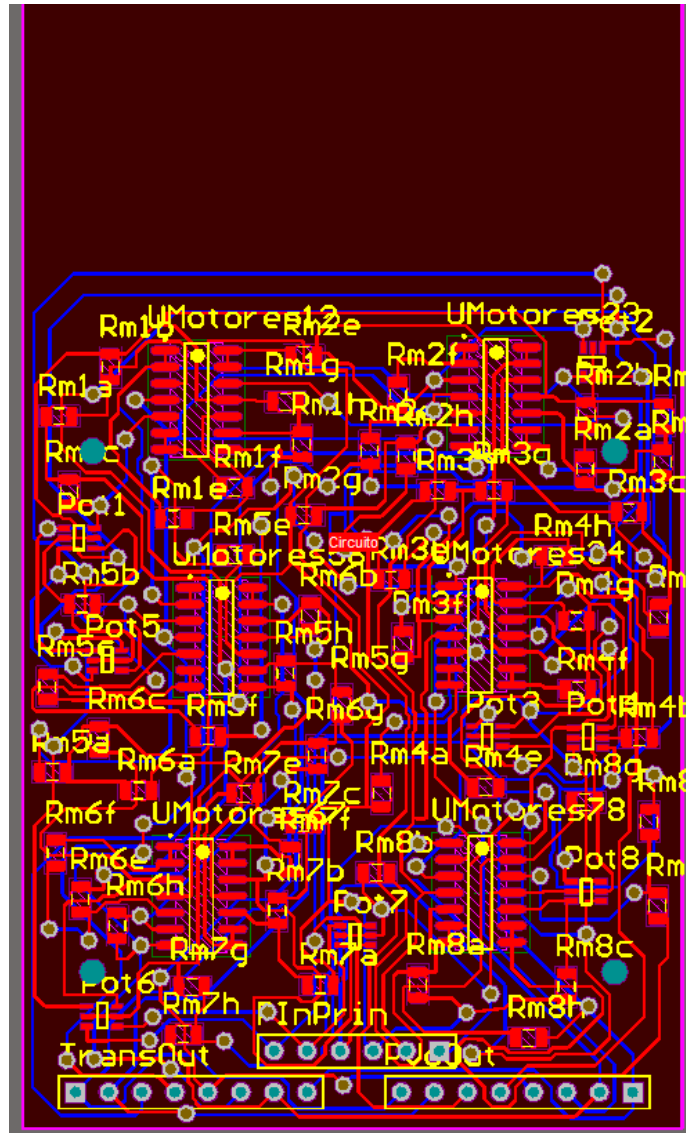
Figura 91. Esquemático de los transistores modificado, con el regulador de 5 y 7 voltios



(Elaboración propia)

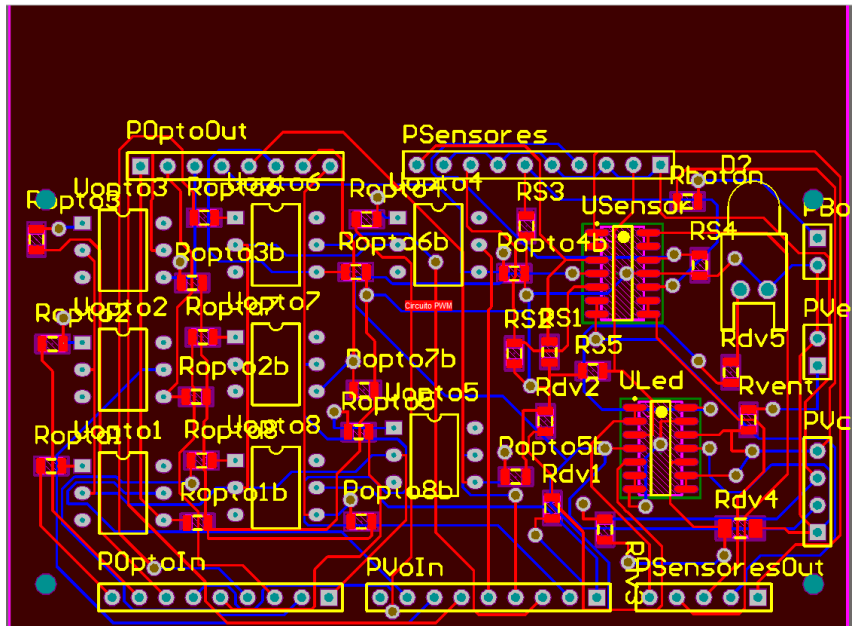
Una vez terminados los esquemáticos se procedió a diseñar las placas para luego imprimirlas y soldarlas. Los diseños de las placas se pueden observar en las Figuras 91 a la 93. Estas placas tienen dos colores principales, el azul y el rojo, los cuales indican las partes de las caras de la placa que deben quedar con cobre, después de desbastarlas.

Figura 92. Placa diseñada a partir del esquemático de la Figura 19



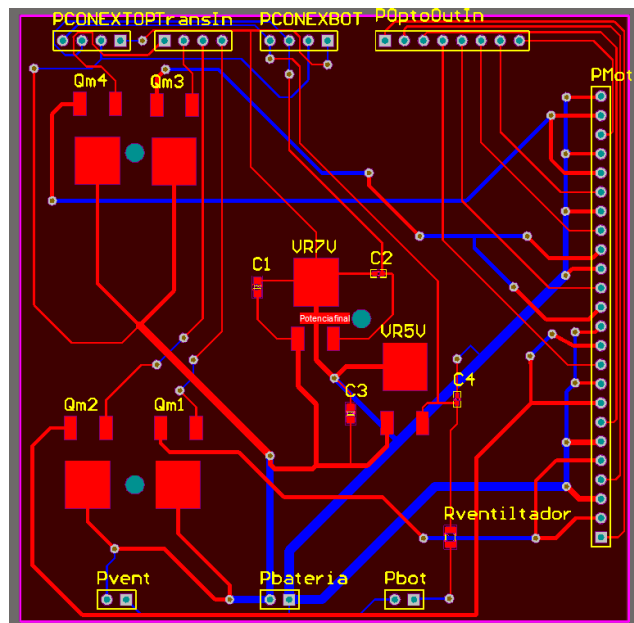
(Elaboración propia)

Figura 93. Placa diseñada a partir de los esquemáticos de las Figuras 21 y 22



(Elaboración propia)

Figura 94. Placa diseñada a partir del esquemático de la Figura 23



(Elaboración propia)

c. Disipación de potencia. En paralelo con los diseños de la placa se realizó el análisis de disipación de potencia. Esto se hizo determinando cuánta potencia consumiría cada componente multiplicando la corriente que pasa a través del mismo por el voltaje entre sus terminales. Con este dato y la hoja de datos de los componentes, se pudo verificar que los componentes no se sobrecalentaran.

Una vez completado el análisis, se observó que había algunos componentes que generaban más calor del que podían soportar si se dejaban únicamente soldados bajo las condiciones mínimas que proporcionan las hojas de datos. Estos componentes son los transistores de potencia y reguladores de voltaje. Para determinar la potencia que generarían los componentes en forma de calor se debió de analizar la corriente máxima que pasaría por los mismos y el voltaje máximo que habría entre sus terminales.

Los reguladores de voltaje disiparán una potencia máxima cuando la batería está completamente cargada y el consumo de corriente del circuito es máximo. El voltaje entre las terminales del regulador se obtiene al restarle al voltaje de la batería el voltaje de regulación. Para el regulador de 5 voltios el voltaje máximo entre sus terminales es de 5.35 voltios. Esto es porque la batería del circuito de control es de 9 voltios que se utilizará al estar completamente cargada tiene un voltaje de 10.35 voltios (115% el voltaje nominal), y 10.35 menos 5 es 5.35 voltios. El voltaje máximo entre las terminales del regulador de 7 voltios es de 3.35 voltios. Al saber la corriente máxima que el circuito demanda de cada regulador, se obtiene la corriente que pasa por el mismo y así se puede calcular la potencia. Como la corriente máxima que se exige del regulador de 5 voltios es de 1 amperio, la potencia máxima del regulador de 5 voltios es 5.35 watts:

$$P = VI = 5.35 \text{ voltios} * 1 \text{ amperio} = 5.35 \text{ watts}$$

En el caso del regulador de 7 voltios de la placa de control, la corriente máxima es de 0.1 amperios, por lo que su potencia máxima es de 0.335 watts. El inversor de 5 voltios a -5 voltios disipa de 0.5 watts, porque la corriente máxima que pasa por el integrado es 0.1 amperios y hay un voltaje de 5 voltios entre sus terminales.

Al analizar la placa de potencia se analizó las diferentes potencias de los transistores. La potencia del regulador de 7 voltios de esta placa no se consideró, ya que la corriente que circulaba a través de él es insignificante. Como se utilizó una batería de 11.1 voltios, el voltaje máximo de la misma es 12.765 voltios. La potencia que disipa cada transistor depende de qué servomotores estén alimentando. El resto de las partes del circuito que eran alimentadas por algunos transistores de potencia se despreció en este cálculo, ya que la corriente que demandaban era insignificante en comparación a la de los motores.

Para determinar cuál es la potencia máxima que disipará un transistor se tuvo que hacer una comparación de los servomotores que alimenta cada uno con los motores funcionando a 4.8 voltios y a

6 voltios. De esta forma se podría determinar si se disipa más potencia a 4.8 o 6 voltios, ya que la demanda de corriente máxima a través del transistor varía, al igual que el voltaje entre sus terminales. El voltaje entre las terminales del transistor se obtuvo al restarle el voltaje de operación del servomotor al voltaje de la batería cuando ésta estuviese completamente cargada. Esta comparación se puede observar en la Tabla 14.

Tabla 14. Comparación de potencia disipada por los transistores con los servomotores funcionando a 4.8 y 6 voltios

| Cantidad y qué motores alimenta el transistor | Voltaje (voltios) | Corriente máxima (amperios) | Voltaje máximo entre las terminales del transistor (voltios) | Potencia (watts) |
|--|-------------------|-----------------------------|--|------------------|
| 2 HYPERION DS11-AMB | 4.8 | 0.80 | 7.965 | 6.372 |
| | 6.0 | 0.90 | 6.765 | 6.089 |
| 2 HYPERION DS11-AMB | 4.8 | 0.80 | 7.965 | 6.372 |
| | 6.0 | 0.90 | 6.765 | 6.089 |
| 2 HYPERION DS11-AMB 1 BLUE BIRD BMS-303DD | 4.8 | 1.05 | 7.965 | 8.363 |
| | 6.0 | 1.20 | 6.765 | 8.118 |
| 1 HYPERION DS20-UMD | 4.8 | 1.50 | 7.965 | 11.95 |
| | 6.0 | 2.00 | 6.765 | 13.53 |

Al saber la potencia máxima que debe disipar cada uno de los componentes, se puede proceder a calcular la temperatura a la que estaría la unión de cada componente sin un disipador de calor y así concluir si es necesario el uso de disipadores de calor o no. Para ello se utilizó la resistencia térmica de unión al ambiente proporcionada por la hoja de datos, la potencia que disiparía cada componente y una temperatura ambiente de 25°C. Se utilizó la fórmula en la ecuación 10, de la cual se despejó T_j (Temperatura de unión del componente). Estos resultados se pueden observar en la Tabla 15.

Tabla 15. Cálculos para determinar si es necesario utilizar un disipador de calor para disipar la potencia de los reguladores, transistores y el inversor de voltaje

| Componente | Potencia a disipar (W) | Temperatura de unión máxima recomendada por el fabricante (°C) | Resistencia térmica de unión al ambiente (°C/W) | Temperatura de unión sin disipador de calor (°C) |
|--|------------------------|--|---|--|
| Regulador de 5V | 5.35 | 125 | 65 | 372.65 |
| Regulador de 7V | 0.335 | 150 | 125 | 66.88 |
| Inversor de 5V a -5V | 0.5 | 150 | 170 | 110.0 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 6.372 | 150 | 71.4 | 480.0 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | 8.363 | 150 | 71.4 | 622.1 |
| Transistor del motor de la muñeca | 13.53 | 150 | 71.4 | 991.0 |

De la Tabla 15 se puede concluir que los 4 transistores (hay dos transistores que alimentan dos motores HYPERION) y el regulador de 5 voltios necesitan disipadores de calor. Para encontrar un disipador de calor se tuvo que realizar cálculos similares a los anteriores, dejando fijos la temperatura máxima de la unión, la temperatura ambiente, la potencia y la resistencia térmica de unión a empaquetado. La fórmula a utilizar es $T_j - T_a = Q(R_{jc} + R_{ch} + R_{ha})$, donde R_{jc} es la resistencia térmica de unión a empaquetado (disponible en la hoja de datos de los componentes), R_{ch} es la resistencia térmica de empaquetado a disipador de calor y R_{ha} es la resistencia térmica de disipador de calor al ambiente. Se tiene entonces dos variables en la ecuación: R_{ch} y R_{ha} . La resistencia térmica de empaquetado a disipador de calor se puede reducir utilizando una pasta térmica, por lo que se seleccionó una pasta con valor de resistencia térmica por unidad de área que fuera baja. La pasta que se seleccionó fue de la empresa AAVID THERMALLOY y tenía una resistencia térmica por unidad de área de $0.03 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{in}^2/\text{W}$. Este valor se divide dentro del área del empaquetado que estará en contacto con el disipador de calor para obtener la resistencia térmica que utiliza la fórmula. El área se obtiene de la hoja de datos de cada componente.

Para el transistor es de 0.235 pulgadas por 0.250 pulgadas y para el regulador de 5 voltios el área es de 0.232 pulgadas por 0.252 pulgadas. Entonces la resistencia térmica del empaquetado al disipador de calor del transistor es $0.5106 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ y la del regulador de 5 voltios es $0.5131 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$. A partir de estos valores se pudo calcular la resistencia térmica que debían tener los disipadores de calor como

máximo. En la Tabla 16 se puede observar este valor.

Tabla 16. Valor máximo de resistencias térmicas de disipadores de calor al ambiente necesarias para no dañar los transistores

| Componente | Q (W) | $\Delta T (T_j - T_a)$ (°C) | R_{jc} (°C/W) | R_{ch} (°C/W) | R_{ha} máximo (°C/W) |
|---|-------|-----------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| Regulador de 5V | 5.35 | 100 | 5 | 0.5131 | 13.18 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 6.372 | 125 | 6.25 | 0.5106 | 13.26 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | 8.363 | 125 | 6.25 | 0.5106 | 8.591 |
| Transistor del motor de la muñeca | 13.53 | 125 | 6.25 | 0.5106 | 2.883 |

Una vez completados los cálculos se prosiguió a buscar disipadores de calor que cumplieran con los requisitos de resistencia térmica. Se analizó varias opciones para colocar los disipadores de calor y ver si se podía utilizar un disipador de calor para uno o más componentes. Se realizó el análisis con dos disipadores de calor diferentes para los transistores de potencia, los cuales fueron seleccionados por su tamaño, forma y resistencia térmica. Los disipadores de calor que se seleccionaron para el análisis son el ATS-1181-C1-R0 y el ATS-1101-C1R0 fabricados por maxiFLOW. El análisis se realizó para dos casos diferentes, uno con el flujo de un ventilador de 5 voltios y el otro con el de un ventilador de 12 voltios. El flujo de aire del ventilador de 5 voltios es de 293.35 pies lineales por minuto (LFM) y el del ventilador de 12 voltios es de 683.16 pies lineales por minuto. Con este valor se pudo observar en la hoja de datos de los disipadores de valor la resistencia térmica de disipador de calor al ambiente.

También se verificó el dato con una herramienta de internet que calcula la resistencia térmica de un disipador de calor con aletas. Esta herramienta está respaldada por la empresa AAVID THERMALLOY. El valor de la resistencia térmica del disipador obtenido se multiplicó por 1.33 para tener un factor de seguridad. Para simplificación se realizó la suma de la resistencia térmica de unión a empaquetado con la de empaquetado a disipador de calor, ya que éstas son valores fijos en el análisis. Los resultados se pueden observar en la Tabla 19, 20, 21 y 22. En estas Tablas se utilizan las variables utilizadas en la representación de resistencias térmicas del diagrama de la Figura 9. Para entender esta

Tabla es necesario entender que representa cada columna. Las columnas que se observan en la Tabla son el arreglo de componentes, Q_{Total} , T_a , R_{ha} , T_s , $Q_{individual}$, $R_{jc} + R_{ch}$ y T_j . El arreglo de componentes quiere decir qué componentes están en contacto con un disipador de calor, ya que puede haber más de uno. Q_{Total} es la suma del calor generado por cada componente en contacto con el disipador de calor. T_a es la temperatura del medio ambiente. R_{ha} es la resistencia térmica del disipador de calor al medio ambiente. T_s es la temperatura entre el empaquetado y el disipador de calor. $Q_{individual}$ es el calor generado por un componente, $R_{jc} + R_{ch}$ es la suma de las resistencias térmicas de unión a empaquetado y empaquetado a disipador de calor y T_j es la temperatura de unión de cada componente. Se realizó la Tabla de esta manera, porque al tener varios componentes en contacto con el mismo disipador, se considera el punto de la temperatura T_s como un nodo en el que se suman los calores de los diferentes componentes. Esto es análogo a un nodo en ingeniería eléctrica donde se suman las corrientes eléctricas.

Tabla 17. Análisis del ATS-1181-C1-R0 a un flujo de 293.35 LFM

| Arreglo de componentes | Q_{Total} (W) | T_a (°C) | R_{ha} (°C/W) | T_s (°C) | $Q_{Individual}$ (°C) | $R_{jc} + R_{ch}$ (°C/W) | T_j (°C) |
|---|-----------------|------------|--------------------|---------------|--------------------------|-----------------------------|------------|
| Transistor de dos motores Hyperion | 6.372 | 25 | 3.273 | 45.86 | 6.372 | 6.761 | 88.94 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | 8.363 | 25 | 3.273 | 52.37 | 8.363 | 6.761 | 108.92 |
| Transistor del motor de la muñeca | 13.53 | 25 | 3.273 | 69.29 | 13.53 | 6.761 | 160.76 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 12.74 | 25 | 3.273 | 66.70 | 6.372 | 6.761 | 109.78 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | | 6.372 | 6.761 | 109.78 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 21.11 | 25 | 3.273 | 94.10 | 6.372 | 6.761 | 137.18 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | | 6.372 | 6.761 | 137.18 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | | | | | 8.363 | 6.761 | 150.64 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 34.64 | 25 | 3.273 | 138.3 | 6.372 | 6.761 | 181.46 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | 8 | 6.372 | 6.761 | 181.46 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | | | | | 8.363 | 6.761 | 194.92 |
| Transistor del motor de la muñeca | | | | | 13.53 | 6.761 | 229.86 |

Tabla 18. Análisis del ATS-1181-C1-R0 a un flujo de 683.16 LFM

| Arreglo de componentes | Q_{Total} (W) | T_a (°C) | R_{ha} (°C/W) | T_s (°C) | $Q_{Individual}$ (°C) | $R_{jc} + R_{ch}$ (°C/W) | T_j (°C) |
|---|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------------|--------------------------|------------|
| Transistor de dos motores Hyperion | 6.372 | 25 | 2.145 | 38.67 | 6.372 | 6.761 | 81.75 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | 8.363 | 25 | 2.145 | 42.94 | 8.363 | 6.761 | 99.48 |
| Transistor del motor de la muñeca | 13.53 | 25 | 2.145 | 54.03 | 13.53 | 6.761 | 145.50 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 12.74 | 25 | 2.145 | 52.33 | 6.372 | 6.761 | 95.41 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | | 6.372 | 6.761 | 95.41 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 21.11 | 25 | 2.145 | 70.29 | 6.372 | 6.761 | 113.37 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | | 6.372 | 6.761 | 113.37 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | | | | | 8.363 | 6.761 | 126.83 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 34.64 | 25 | 2.145 | 99.30 | 6.372 | 6.761 | 142.38 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | | 6.372 | 6.761 | 142.38 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | | | | | 8.363 | 6.761 | 155.84 |
| Transistor del motor de la muñeca | | | | | 13.53 | 6.761 | 190.78 |

Tabla 19. Análisis del ATS-1101-C1-R0 a un flujo de 293.35 LFM

| Arreglo de componentes | Q_{Total} (W) | T_a (°C) | R_{ha} (°C/W) | T_s (°C) | $Q_{Individual}$ (°C) | $R_{jc} + R_{ch}$ (°C/W) | T_j (°C) |
|---|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------------|--------------------------|------------|
| Transistor de dos motores Hyperion | 6.372 | 25 | 2.245 | 39.31 | 6.372 | 6.761 | 82.39 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | 8.363 | 25 | 2.245 | 43.78 | 8.363 | 6.761 | 100.32 |
| Transistor del motor de la muñeca | 13.53 | 25 | 2.245 | 55.38 | 13.53 | 6.761 | 146.85 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 12.74 | 25 | 2.245 | 53.60 | 6.372 | 6.761 | 96.68 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | | 6.372 | 6.761 | 96.68 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 21.11 | 25 | 2.245 | 72.39 | 6.372 | 6.761 | 115.47 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | | 6.372 | 6.761 | 115.47 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | | | | | 8.363 | 6.761 | 128.94 |

Continuación Tabla 19

| Arreglo de componentes | Q _{Total} (W) | T _a (°C) | R _{ha} (□C/W) | T _s (°C) | Q _{Individual} (°C) | R _{jc} + R _{ch} (□C/W) | T _j (°C) |
|---|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------------|--|---------------------|
| Transistor de dos motores Hyperion | 34.64 | 25 | 2.245 | 102.7 | 6.372 | 6.761 | 145.85 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | 7 | 6.372 | 6.761 | 145.85 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | | | | | 8.363 | 6.761 | 159.31 |
| Transistor del motor de la muñeca | | | | | 13.53 | 6.761 | 194.35 |

Tabla 20. Análisis del ATS-1101-C1-R0 a un flujo de 683.16 LFM

| Arreglo de componentes | Q _{Total} (W) | T _a (°C) | R _{ha} (□C/W) | T _s (°C) | Q _{Individual} (°C) | R _{jc} + R _{ch} (□C/W) | T _j (°C) |
|---|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------------|--|---------------------|
| Transistor de dos motores Hyperion | 6.372 | 25 | 1.471 | 34.37 | 6.372 | 6.761 | 77.45 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | 8.363 | 25 | 1.471 | 37.30 | 8.363 | 6.761 | 93.84 |
| Transistor del motor de la muñeca | 13.53 | 25 | 1.471 | 44.90 | 13.53 | 6.761 | 136.38 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 12.74 | 25 | 1.471 | 43.74 | 6.372 | 6.761 | 86.82 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | | 6.372 | 6.761 | 86.82 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 21.11 | 25 | 1.471 | 56.05 | 6.372 | 6.761 | 99.13 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | | 6.372 | 6.761 | 99.13 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | | | | | 8.363 | 6.761 | 112.59 |
| Transistor de dos motores Hyperion | 34.64 | 25 | 1.471 | 75.96 | 6.372 | 6.761 | 119.04 |
| Transistor de dos motores Hyperion | | | | | 6.372 | 6.761 | 119.04 |
| Transistor de dos motores Hyperion y el Blue Bird | | | | | 8.363 | 6.761 | 132.5 |
| Transistor del motor de la muñeca | | | | | 13.53 | 6.761 | 167.54 |

Se busca utilizar el mínimo de disipadores de calor posible, porque así el diseño sería óptimo y lo menos caro posible. De las Tablas 18 a la 21 se puede concluir que se puede utilizar únicamente dos disipadores de calor para las placas de potencia en vez de tres o cuatro. No se puede utilizar únicamente uno, porque en la última fila de la Tabla 21 se puede observar que el transistor que alimenta el servomotor de la muñeca excede la temperatura de unión de 150 recomendada por el fabricante del componente. Los arreglos que permiten un diseño de dos disipadores de calor son de la Tabla IX el colocar un disipador sobre el transistor que alimenta al servomotor de la muñeca y el otro sobre los otros

componentes, al igual que en la Tabla 19 y 20. Después de saber que arreglos se pueden tener con dos disipadores de calor sin sobrepasar la temperatura de unión máxima de los componentes, se escogió el arreglo en el cual el transistor que alimenta a la muñeca tuviera la temperatura de unión más baja, ya que es el componente con la temperatura máxima más cercana a la recomendada por el fabricante. Este fue el arreglo, utilizando el disipador ATS-1101-C1-R0 con un flujo de 683.16, de colocar un disipador sobre el transistor que alimenta al servomotor de la muñeca y el otro sobre los otros componentes. La temperatura máxima de las uniones de los transistores serían 99.13°C para los transistores que alimentan dos HYPERION DS11-AMB, 112.59°C para el transistor que alimenta a dos HYPERION DS11-AMB y el BLUE BIRD BMS-30DD, y 136.38°C para el transistor que alimenta al HYPERION DS20-UMD.

Por último se realizó el análisis del regulador de 5 voltios de la placa de control. Para ello se consideró el disipador de potencia que se había utilizado en la fase anterior de este megaproyecto. El disipador de calor tiene una resistencia térmica sin flujo de aire de 63.721°C/W y de 11.765°C/W con el flujo de 293.35 LFM que proporciona el ventilador de 5 voltios. Como la resistencia térmica del disipador de calor con el uso del ventilador de 5 voltios es menor a la necesaria, se optó por utilizar este.

La temperatura de unión del regulador que se obtiene es de 117.44°C.

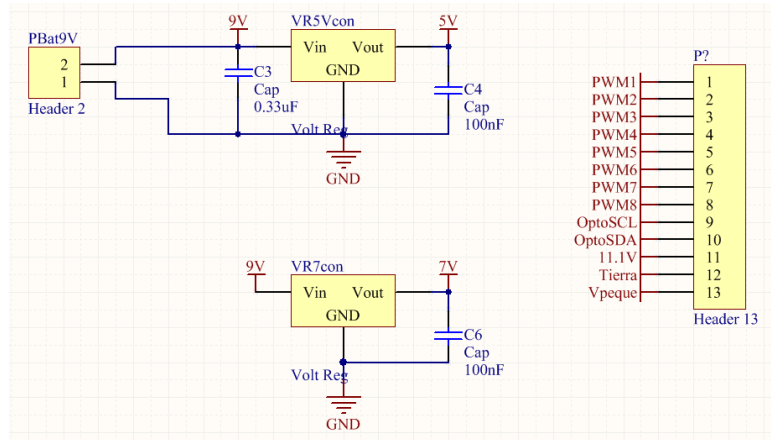
d. Diseño final del circuito. Una vez que se tuvieron todas las placas impresas y soldadas, se realizaron pruebas de funcionamiento. Durante estas pruebas se logró observar algunas fallas, componentes que se estaban utilizando de más y componentes que debían agregarse. Entre los cambios que se hicieron están el utilizar únicamente un circuito alimentador de voltaje con cuatro transistores en la salida para la alimentación de los servomotores, aislar completamente el circuito de control del circuito de potencia poder medio de optoacopladores tanto en las señales para controlar los servomotores, como en las señales para modificar el potenciómetro digital. También se agregó un ventilador al circuito de control para que el regulador de 5 voltios disipara la potencia necesaria. Se observó que se necesitaba un capacitor para el transistor que alimentaba el circuito comparador de voltaje para determinar el voltaje de operación de la prótesis y los optoacopladores presentaba ruido, por lo que se le colocó un capacitor de 100 uF, como únicamente se tenía trabajando un motor se consideró un capacitor con capacitancia de 1000 uF. Se modificó el circuito detector de batería baja, ya que el que se tenía dependía de que el voltaje de la batería fuera disminuyendo y no consideraba el que la batería podía ya no estar funcional a la hora de encender la prótesis.

Se diseñó un total de 4 esquemáticos, uno para cada placa. Dos de éstos fueron para el circuito de potencia y dos para el circuito de control.

En las Figura 94 a la 100 se pueden observar los esquemáticos de los circuitos para las placas, en las Figuras 101 a la 104 el diseño de las placas y en las Figuras 105 a la 112 las placas implementadas.

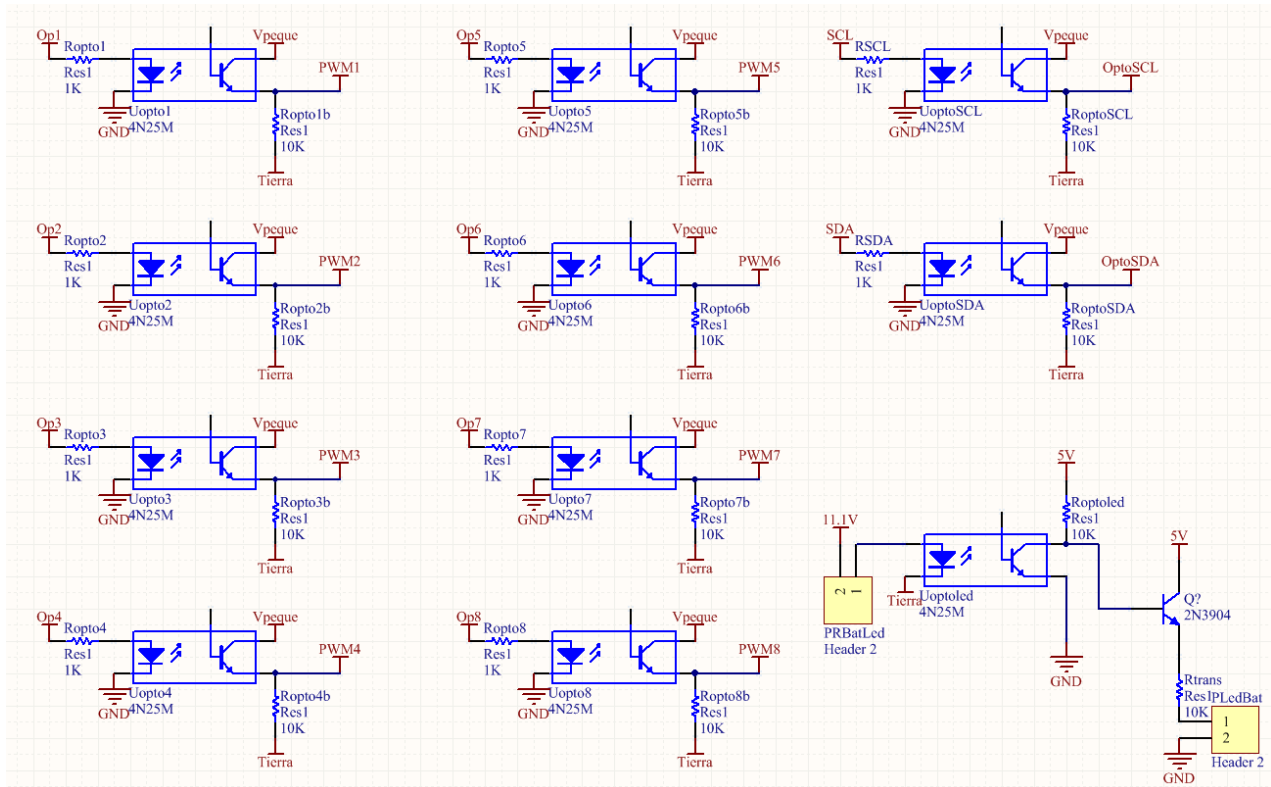
y terminadas.

Figura 95. Esquemático de los reguladores de voltaje y el header de entrada del circuito de control



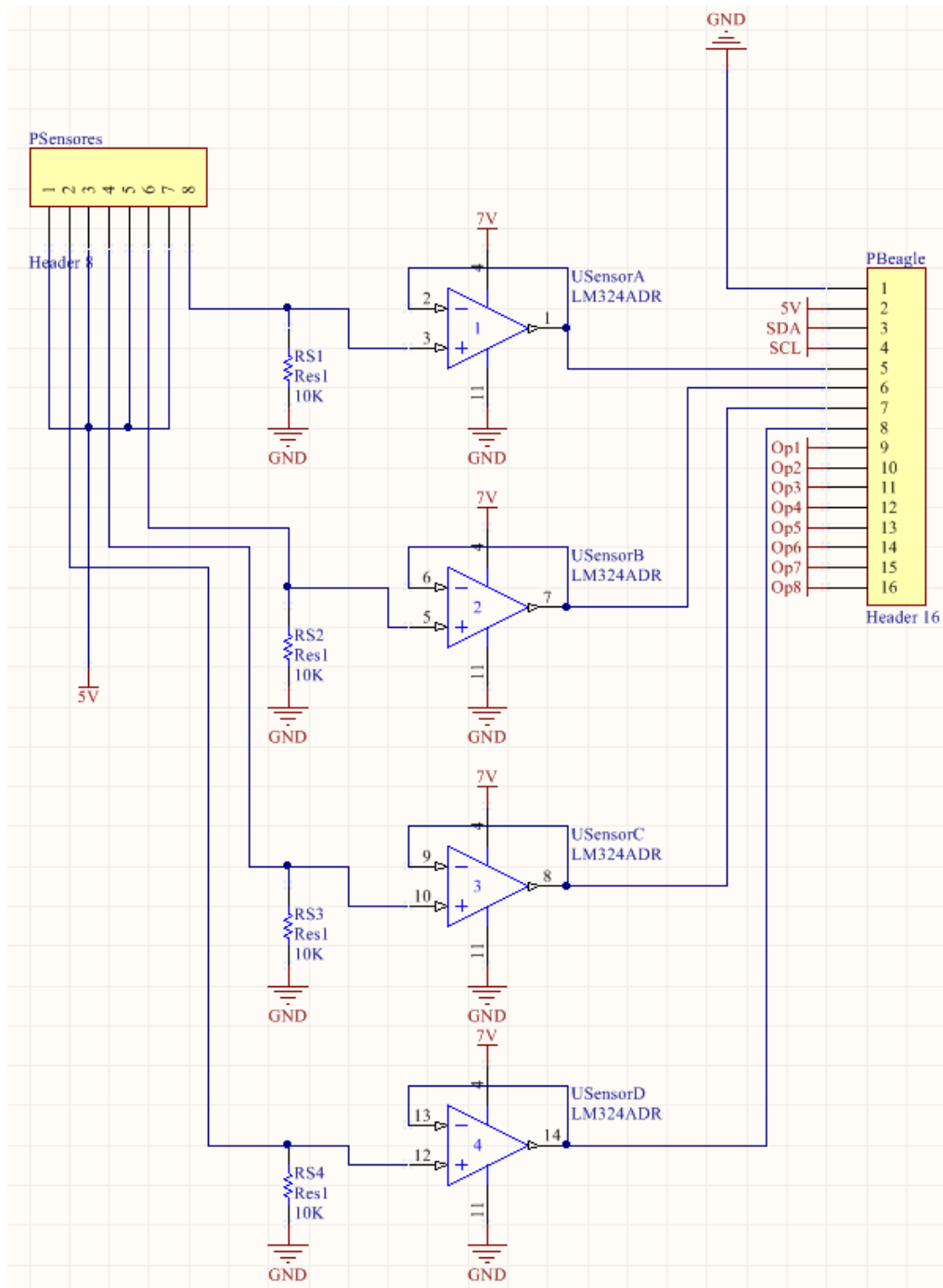
(Elaboración propia)

Figura 96. Esquemático de la parte aislante del circuito de control



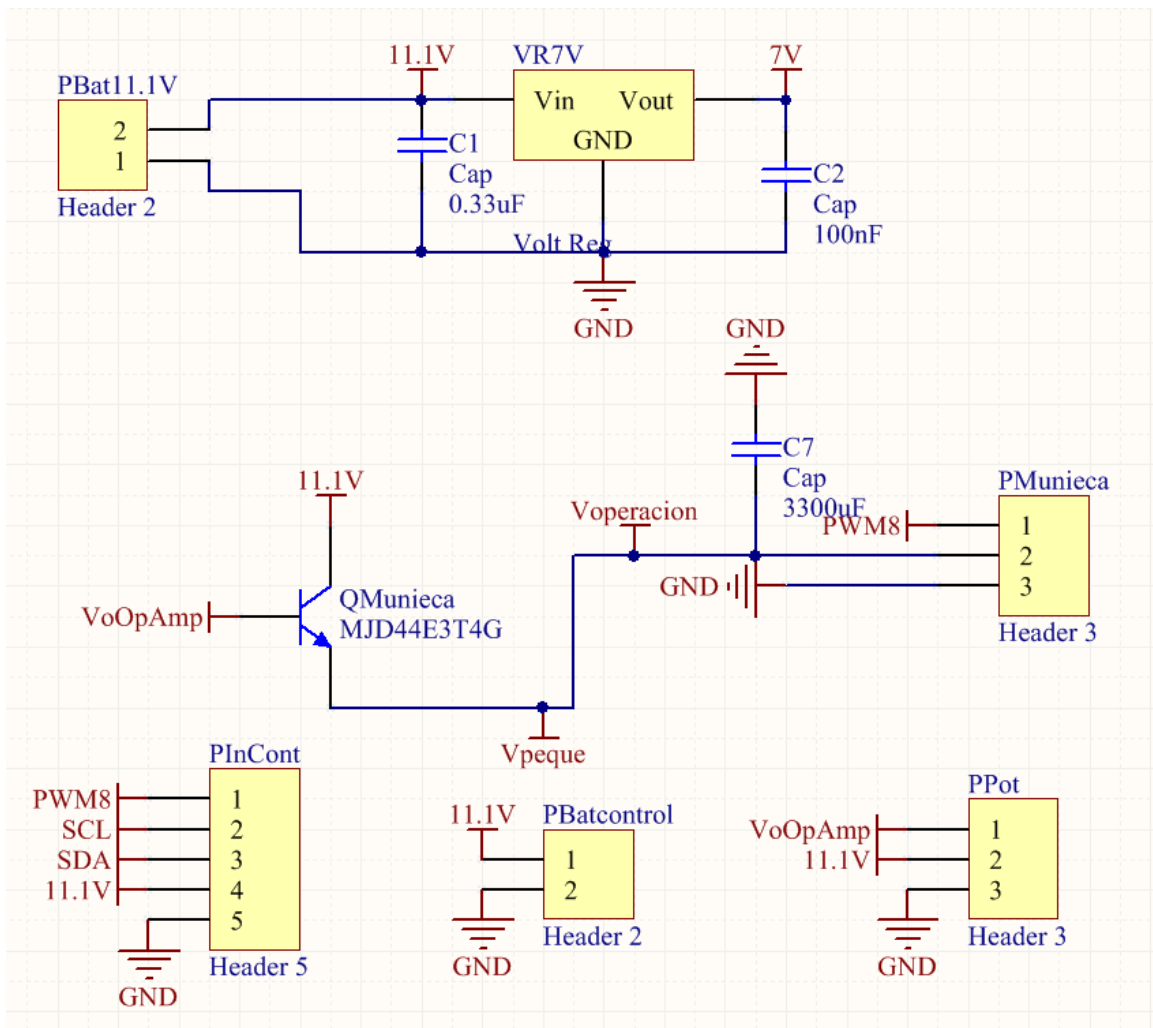
(Elaboración propia)

Figura 97. Esquemático del circuito de la placa de control



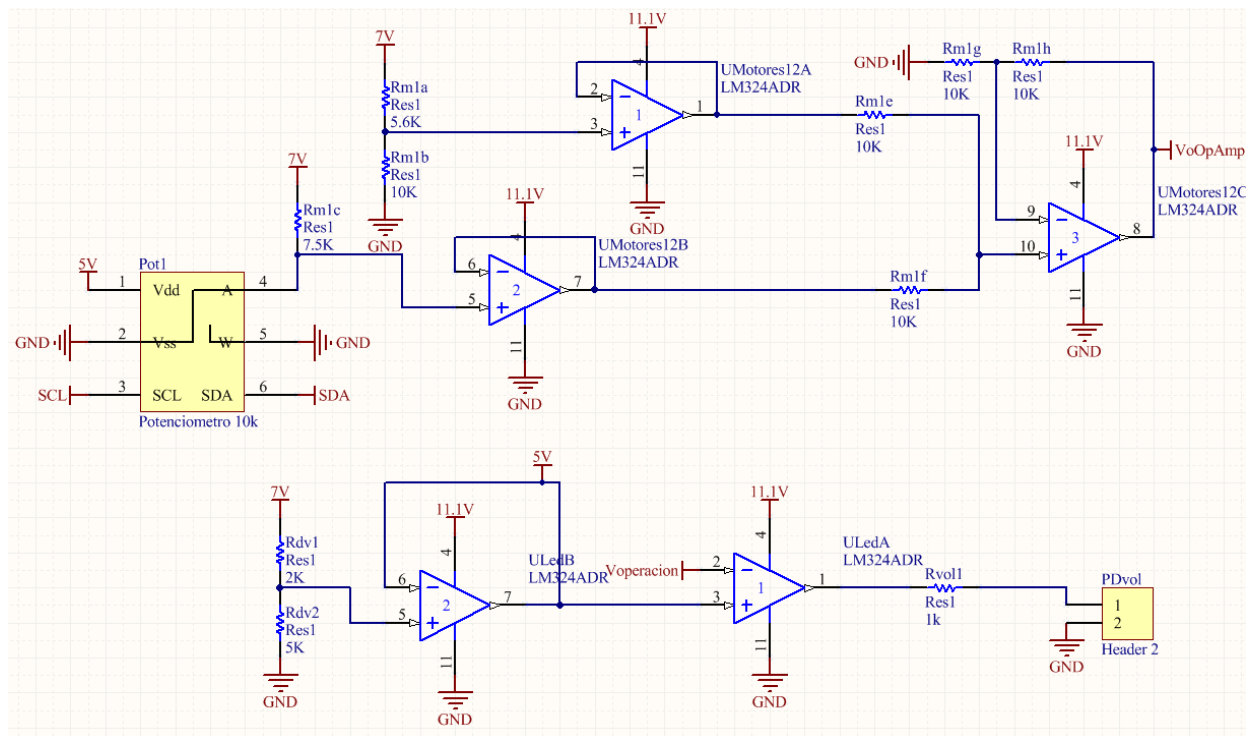
(Elaboración propia)

Figura 98. Esquemático del regulador de voltaje, el transistor que alimenta a la muñeca y los headers de salida y entrada de la primera placa de potencia



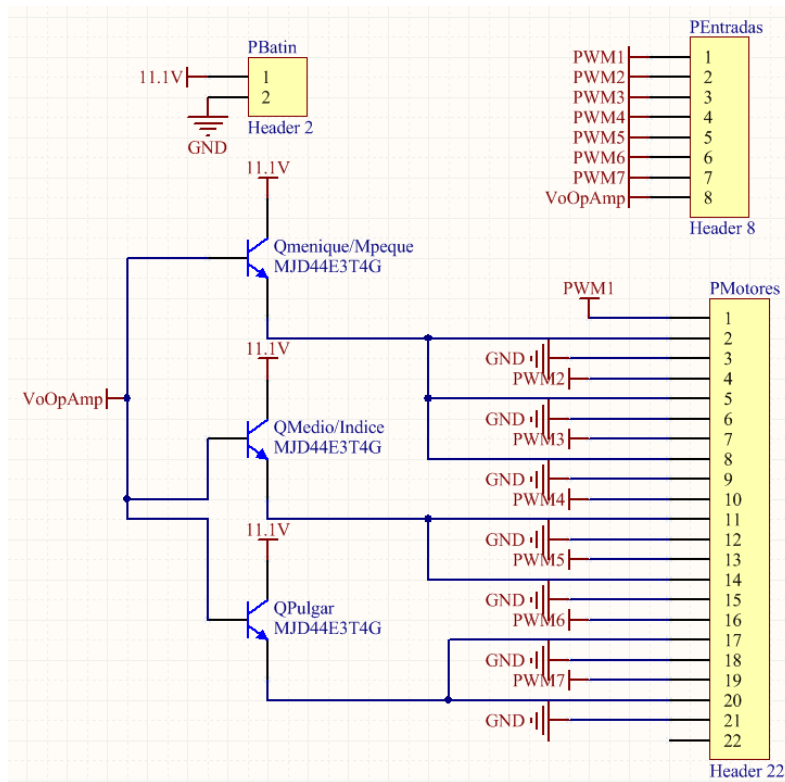
(Elaboración propia)

Figura 99. Esquemático del circuito que define el voltaje de operación de los servomotores y el de comparación para determinar el voltaje al que están operando los servomotores



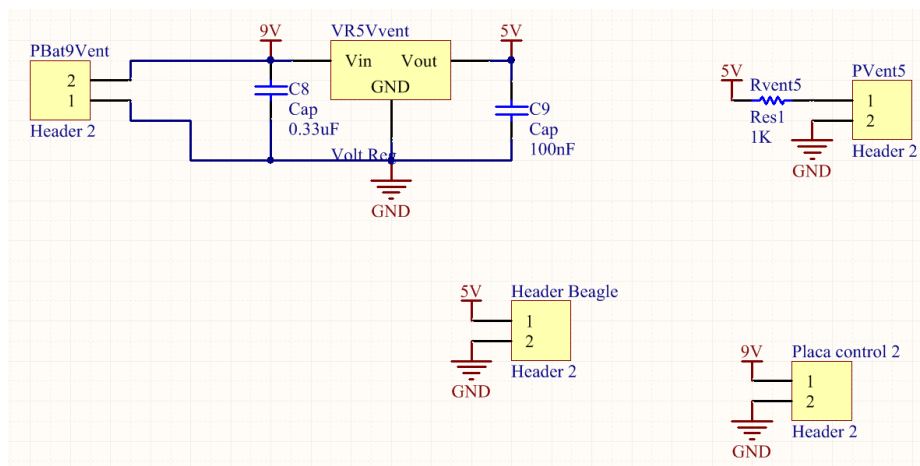
(Elaboración propia)

Figura 100. Esquemático de la otra placa de potencia, donde están los tres transistores restantes de potencia



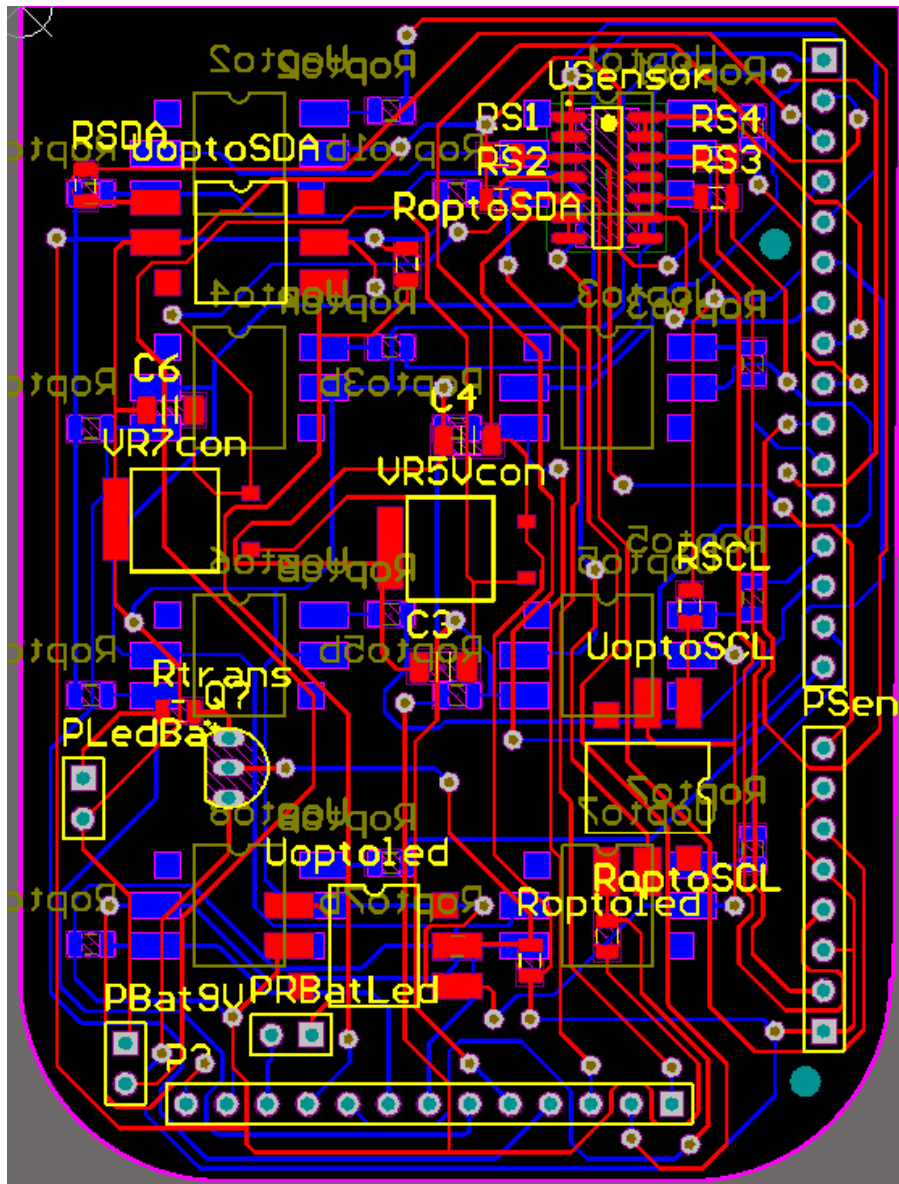
(Elaboración propia)

Figura 101. Esquemático del regulador de 5 voltios para alimentar el ventilador y el Beaglebone Black



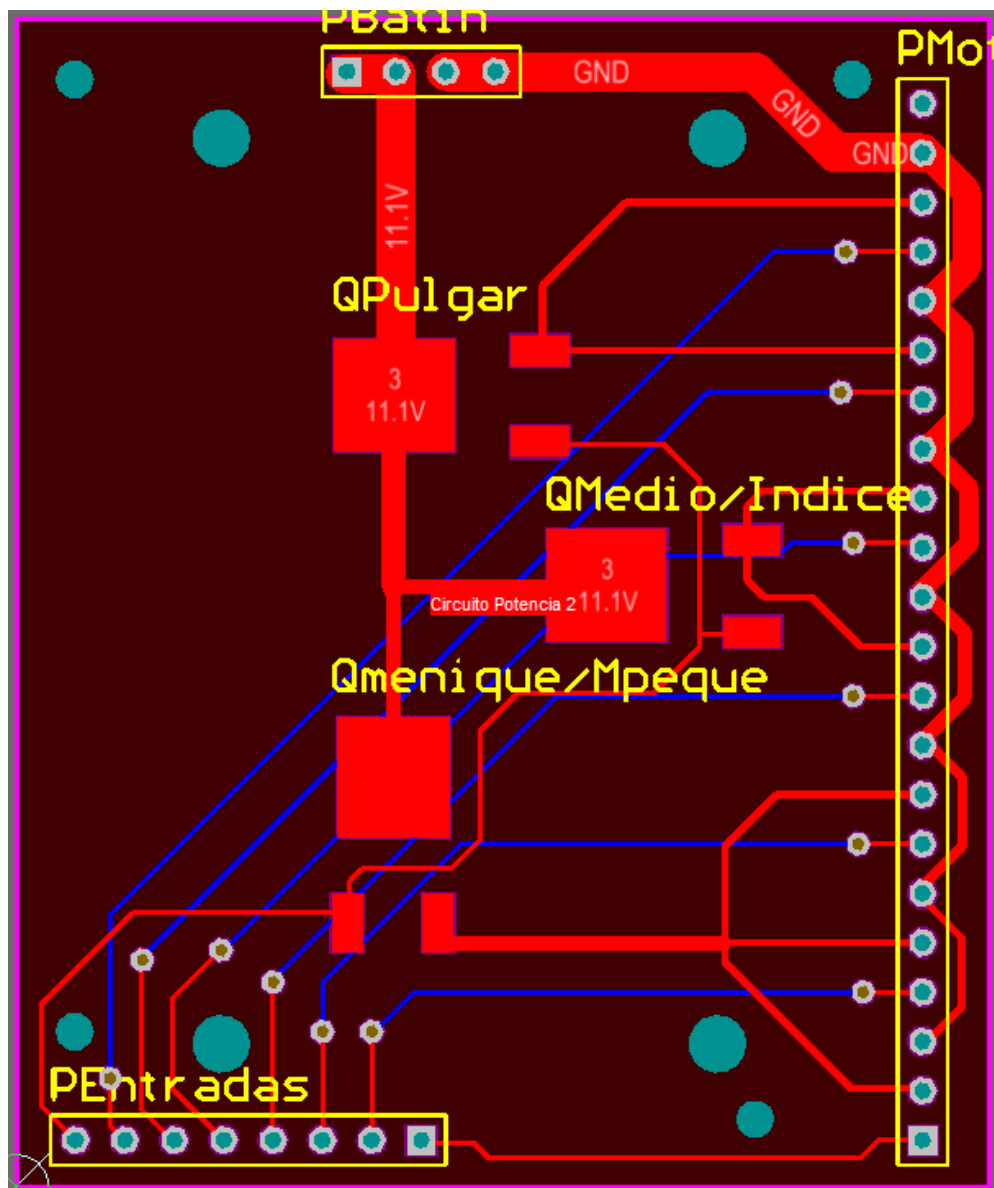
(Elaboración propia)

Figura 102. Diseño de la placa de control



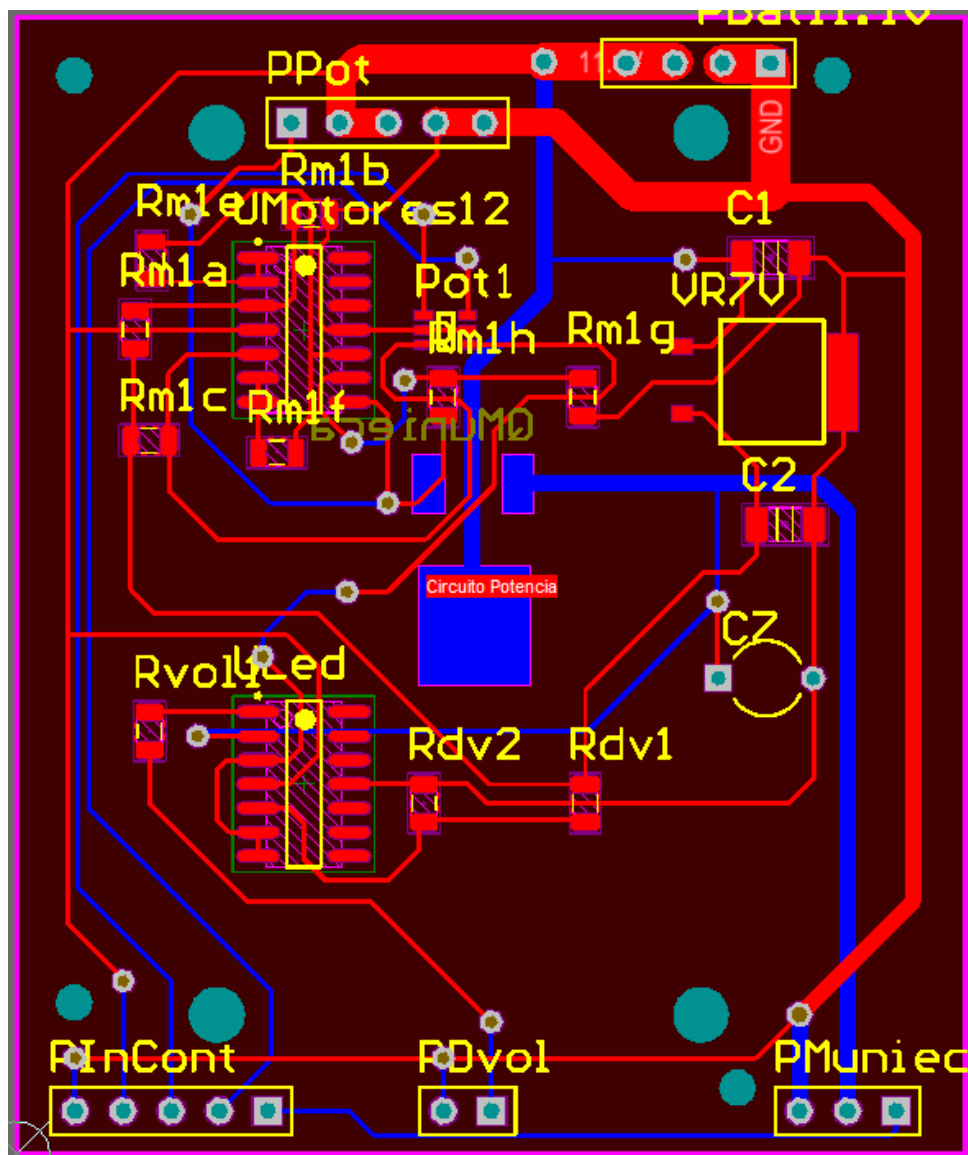
(Elaboración propia)

Figura 103. Diseño de la placa de potencia con tres transistores



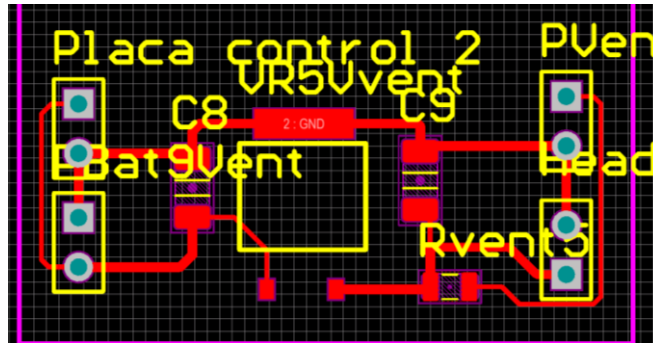
(Elaboración propia)

Figura 104. Diseño de la placa de potencia con 1 transistor



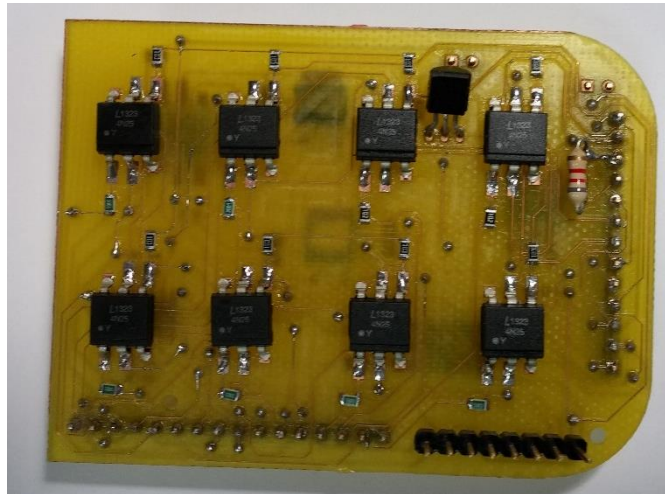
(Elaboración propia)

Figura 105. Diseño de la placa de potencia con 1 transistor



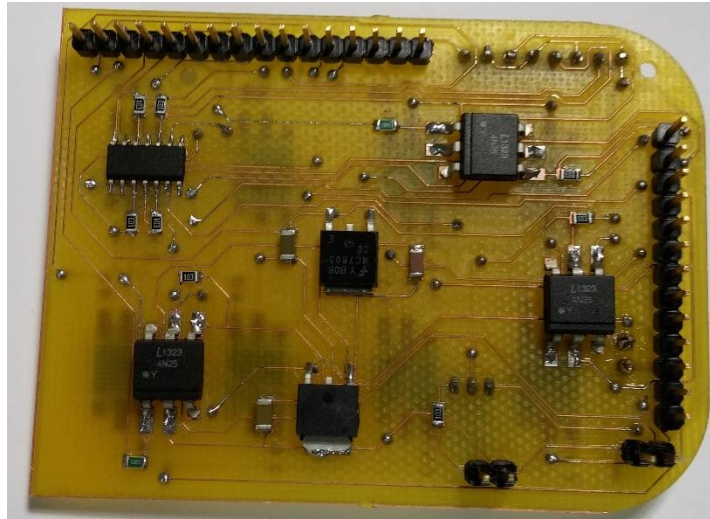
(Elaboración propia)

Figura 106. Placa de control terminada



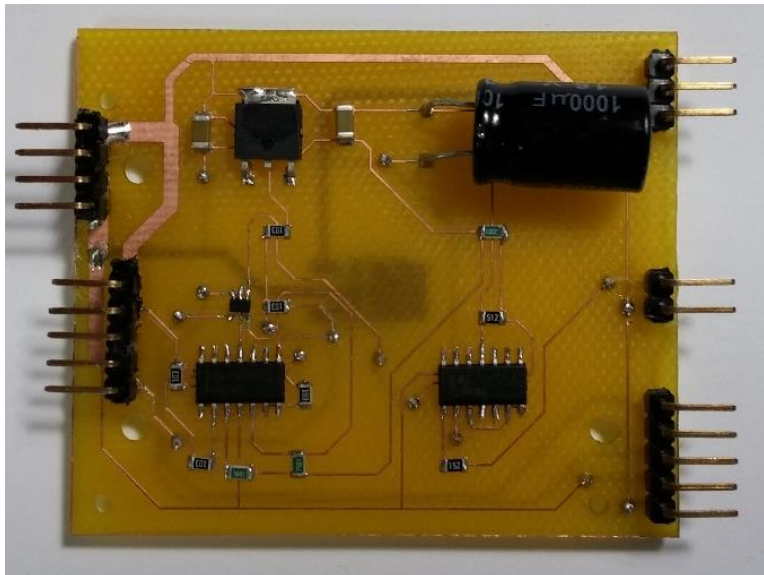
(Elaboración propia)

Figura 107. Placa de control terminada (otro lado)



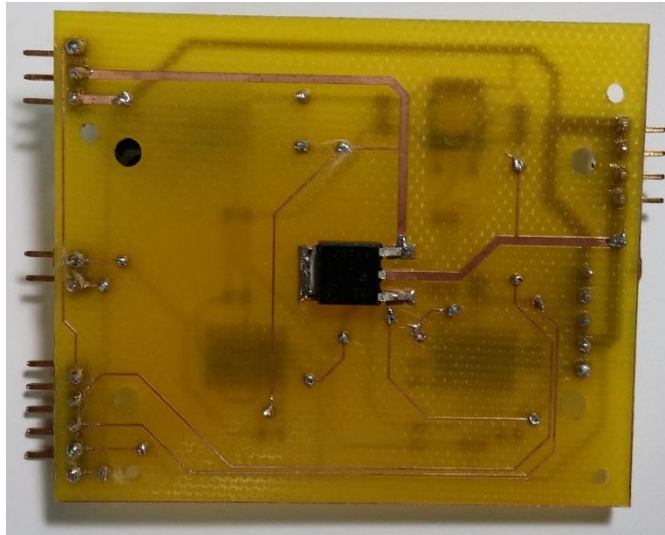
(Elaboración propia)

Figura 108. Placa de potencia con un transistor terminada



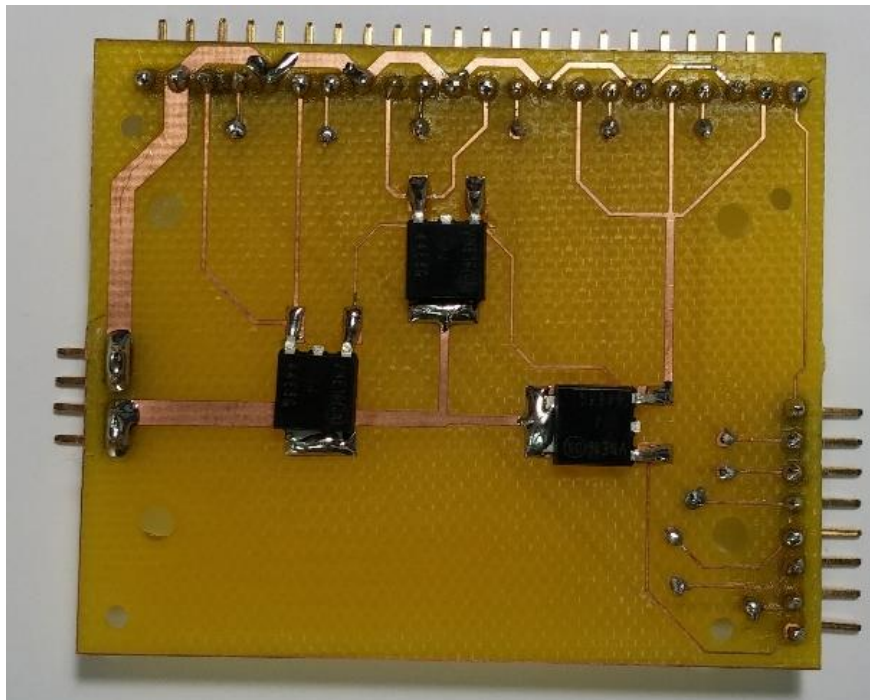
(Elaboración propia)

Figura 109. Placa de potencia con un transistor terminada (otro lado)



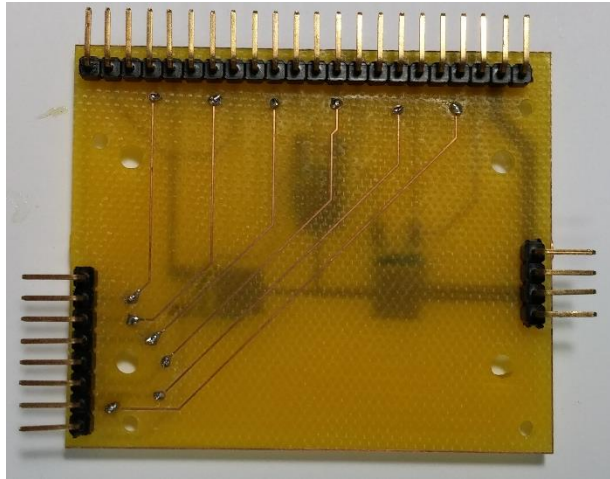
(Elaboración propia)

Figura 110. Placa de potencia con tres transistores terminada



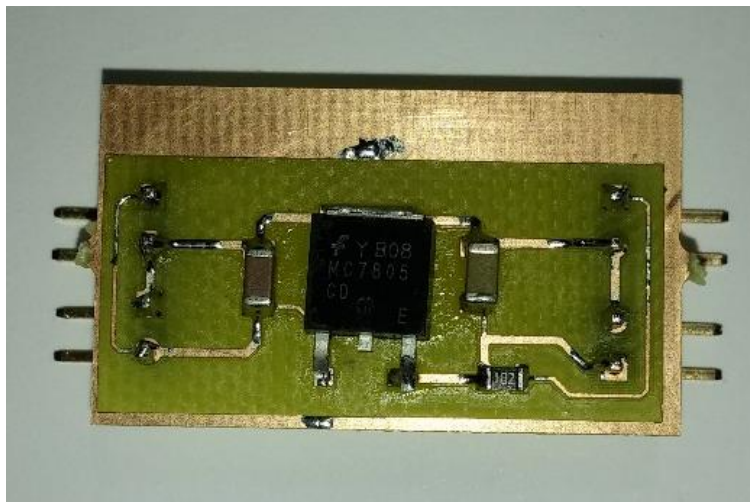
(Elaboración propia)

Figura 111. Placa de potencia con tres transistores terminada (otro lado)



(Elaboración propia)

Figura 112. Placas de potencia colocadas con el ventilador y los disipadores de calor



(Elaboración propia)

3. Selección de baterías. Como todo circuito necesita estar alimentado por una fuente de poder, se realizó una investigación y un análisis para poder escoger una o varias baterías que alimentaran al circuito de potencia y de control. Para ello se tuvieron que calcular el voltaje y la corriente máxima que necesitan los circuitos. Además se consideró el peso de las baterías, la portabilidad y la capacidad. Se seleccionó una batería para el circuito de control y otra para el circuito de potencia, para tener los dos sistemas aislados.

Se investigó acerca de los diferentes tipos de baterías que se usan en diseños de robótica y se llegó a la conclusión que las mejores baterías eran de polímero de litio y las de níquel metal. Para verificar esta información teórica se realizó una Tabla comparativa de diferentes baterías que tuviesen el voltaje deseado, la razón de descarga necesaria y una capacidad aceptable.

El voltaje que necesitaba el circuito potencia se obtuvo al analizar cuál era el componente que necesita más voltaje para funcionar correctamente. Para ello se utilizó el circuito de las primeras placas. Con una fuente de voltaje se fue variando el voltaje simulando el funcionamiento de una batería en descarga. Se deseaba que el circuito siguiese funcionando correctamente antes de que la batería llegará al estado de tener 85% del voltaje nominal. Se concluyó que la batería debía tener un mínimo de 10 voltios, porque si este no era el caso, no se podía proporcionar el voltaje necesario en la salida del sumador de voltajes para obtener los 6 voltios en la salida del transistor. De igual forma se realizó el análisis del circuito de potencia y se observó que el regulador de voltaje de 7 voltios necesitaba un mínimo de 8.2 voltios en la entrada para funcionar correctamente.

En cuanto a la corriente que consumía el circuito de potencia, se realizó un análisis para determinar la corriente máxima que necesitaba el diseño final del circuito. Así se podría determinar la razón de descarga que debe tener la batería como mínimo. También a partir de la capacidad de la batería se podría estimar el mínimo de tiempo que duraría la batería si la prótesis consumiera la corriente máxima mientras estuviese funcionando. La corriente se obtuvo por medio de la Ley de Ohm en los componentes resistivos. A este valor se le sumó la corriente máxima que exigen los motores. Se tiene 450 miliamperios por cada servomotor HYPERION DS11-AMB, 300 miliamperios por el BLUE BIRD BMS-303DD Y 2000 miliamperios por el HYPERION DS20-UMD. Al sumar la corriente consumida por todos los motores se tiene 5,000 miliamperios. El circuito de alimentación sin tomar en cuenta los transistores (la corriente de los transistores es la misma que la de los motores) es aproximadamente 16 miliamperios y el ventilador consume 250 miliamperios, por lo que las placas de potencia consumen un total de 5,266 miliamperios. En cuanto al circuito de control, se consumen 1,000 amperios por el BeagleBone Black (sistema de integrados que procesan las señales de la prótesis y del usuario), 30 miliamperios en los circuitos para aislar el sistema, el de los sensores de presión y los reguladores, y 160 miliamperios en el ventilador de 5 voltios. Se tiene un total de 1,190 miliamperios como consumo máximo en el circuito de control. En la Tabla 21, se puede observar los valores que necesitan las baterías según el circuito que van a alimentar.

Tabla 21. Características mínimas de las baterías para la alimentación de los circuitos

| Circuito | Voltaje de batería | Corriente mínima que debe proporcionar la batería |
|----------------------|---------------------------|--|
| Circuito de control | 8.2 voltios | 1,190 miliamperios |
| Circuito de potencia | 10 voltios | 5,266 miliamperios |

Al tener ya los datos necesarios para seleccionar la batería, se investigó acerca de las baterías en el mercado que podían cumplir con las necesidades de los circuitos. El análisis se basó en el voltaje nominal de la batería, su capacidad, razón de descarga, peso y tamaño. En las Tablas 22 y 23 se pueden observar las tres baterías que cumplían con los requisitos necesarios y tienen características de peso y tamaño adecuado. Todas las baterías de la Tabla son de marca TENERGY.

Tabla 22. Comparación de baterías en el mercado para el circuito de potencia

| Batería | Voltaje (voltios) | Razón de descarga (Amperios) | Capacidad (Amperehora) | Peso (gramos) | Dimensiones (milímetros) |
|----------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1) LiPo | 11.1 | 9 | 16 | 1,100 | L: 170 W: 150 H: 22 |
| 2) LiPo | 11.1 | 6 | 11 | 650 | L: 190 W: 71 H: 22 |
| 3) LiPo | 11.1 | 125 | 5 | 382 | L: 134 W: 41 H: 31 |

Tabla 23. Comparación de baterías en el mercado para el circuito de control

| Batería | Voltaje (voltios) | Razón de descarga (Amperios) | Capacidad (Amperehora) | Peso (gramos) | Dimensiones (milímetros) |
|----------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1) LiPo | 11.1 | 6.5 | 2.6 | 150.25 | L: 70 W: 55 H: 18 |
| 2) LiPo | 11.1 | 6.5 | 2.2 | 150.25 | L: 70 W: 55 H: 18 |
| 3) NiMH | 9.6 | No se obtuvo este dato | 2 | 226 | L: 101.6 W: 50.8 H: 12.7 |

De la Tabla 22 se seleccionó la tercera opción, debido a que tiene mayor portabilidad que las otras debido al tamaño y el peso. Tiene una capacidad menor a las otras dos, pero aún con el circuito exigiendo la corriente máxima, la batería duraría aproximadamente 57 minutos. De la Tabla 23, se seleccionó la primera opción, ya que cumple con las necesidades y tiene un peso bastante liviano. Esta batería duraría 131 minutos con el circuito consumiendo la máxima corriente.

4. Estética. A lo largo de la elaboración del proyecto se fue modificando la prótesis y mejorando su estética. Entre los cambios que se realizaron están el descartar el codo como parte de esta fase de megaproyecto, la reducción del antebrazo, la colocación estratégica de los circuitos, el sistema de control y las baterías.

La eliminación del codo se realizó porque el modelo que se tenía era muy grande para el resto de la prótesis. Se intentó que un cuarto integrante trabajara en la modificación del codo, pero no se logró conseguir a uno dispuesto a hacerlo o con las calificaciones necesarias.

El antebrazo se redujo pensando en etapas futuras en las cuales se esté trabajando con pacientes. Cuando se le amputa el brazo a un paciente, se corta cerca de la muñeca o a mitad del húmero, y por eso la mayoría de las prótesis del mercado son de estos dos tipos. Si se dejaba el antebrazo como estaba, el paciente a realizar pruebas tendría que tener dos amputaciones, una para poder probar la prótesis y otra para poder utilizar una prótesis del mercado; esto sería éticamente incorrecto. Sin embargo, se podría darle una copia de la prótesis utilizada, pero para esto, la prótesis debería estar lista para uso diario. Debido a esto, se optó por reducir el antebrazo. También en futuras etapas se le podría agregar un codo adecuado y colocar el circuito en el antebrazo como estaba originalmente.

X. DESARROLLO DEL MÓDULO DE ADMINISTRACIÓN, MANUAL DE USUARIO Y PROPUESTA DE PRODUCCIÓN DEL PROYECTO

A. Control de actividades

Para mantener el control de las actividades se utilizaron diferentes herramientas. Al principio del proyecto se realizó un diagrama de Gantt en el que se graficó las diferentes actividades con sus respectivos períodos de realización. En el primer diagrama de Gantt realizado se tomaron en cuenta las actividades que se pensaron iban a ser las necesarias para concluir el proyecto. *Anexo A.*

Durante el mes de enero se fue trabajando conforme a lo planeado, pero a medida que iba pasando el tiempo, surgieron otras actividades necesarias. Para corregir esto fue necesario ir modificando el diagrama, adecuándolo a las nuevas actividades que debíamos agregar.

La primera modificación necesaria se hizo en el mes de mayo. En esta modificación se hicieron tres importantes cambios tomando en cuenta las necesidades del grupo. Primero se tomó en cuenta que la creación de los filtros para el módulo de control no sería tan sencillo como se pensaba. Para esto se tuvo que tener una reunión y se llegó a la conclusión que se iba a tener que trabajar en conjunto en esta parte y que debíamos tomarnos tres semanas, en vez de dos. La segunda modificación se hizo en las selecciones de servomotores. En esta parte se tuvo que modificar el tiempo de la actividad, ya que cuando hicimos el pedido nos dimos cuenta de que el tiempo en el que iban a venir las piezas, no iba a ser de una semana, sino dos semanas. Y lo mismo sucedió con el encargo de las placas y motores. Sabiendo los nuevos datos, se procedió a modificar el Gantt para tener un diagrama más preciso. *Anexo B.*

La segunda modificación se hizo en julio. En este caso, el cambio de fechas surgió a raíz de la implementación de nuevos componentes electrónicos en el sistema de control de la palma. En este caso, como en algunos anteriores, no se contaba con el retraso que causaría la importación de dichos componentes. *Anexo C.*

Y la última modificación realizada, fue debido a que el tiempo que debía tomar la implementación de los sistemas de retroalimentación de servos, fue subestimado. Al analizar completamente la situación se llegó a la conclusión de que se debían agregar dos semanas a esta actividad para que la misma pudiera ser concluida con éxito. *Anexo D.*

Otra herramienta utilizada para el control de las actividades fue el balanced scorecard. Con esta herramienta se llevó el control de las actividades que se iban realizando durante el desarrollo del proyecto. Se detalló las actividades que se tenían, y cada mes, aproximadamente, se revisaba como iba cumpliendo cada integrante con sus tareas. La forma de evaluación en la Tabla es con colores de clasificación (semáforo). Se marcaron con color verde las actividades que ya se habían realizado con éxito, con amarillo las actividades que se tenían en proceso, y con color rojo las actividades que aún no se habían siquiera empezado. Con estos datos se calculó el porcentaje de actividades que llevaban terminadas, por módulo, para luego hacer un promedio y obtener el progreso total del proyecto (en porcentaje).

Todos los porcentajes de las actividades realizadas se actualizaban automáticamente conforme se iba cambiando la cantidad de actividades realizadas. Ver Tabla 24.

Tabla 24. Modelo de Balanced Scorecard utilizado.

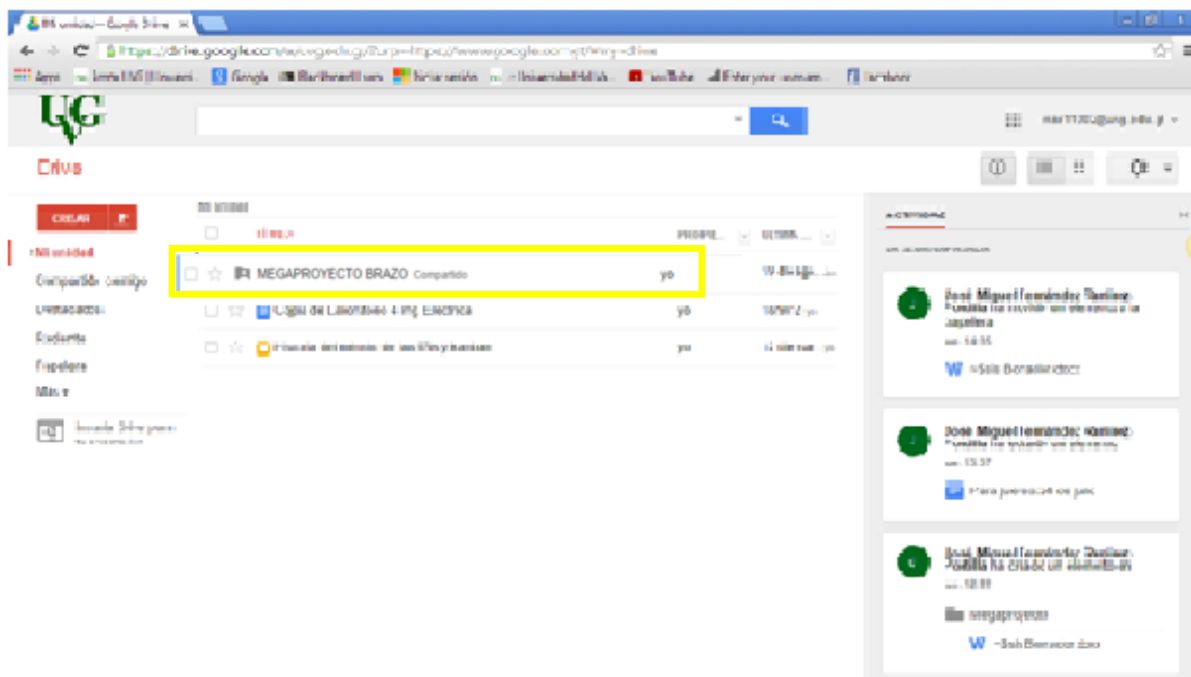
| Integrante | Actividades por realizar | Actividades realizadas | Numero de actividades realizadas | Progreso | Restante |
|------------------------------|--|------------------------|----------------------------------|----------|----------|
| CAROL | 1 Pruebas de Sensores | | 0 | 0% | 100% |
| | 2 Prueba circuitos de sensores | | | | |
| | 3 Prueba codigos de movimiento, con combinaciones de posiciones de sensores | | | | |
| | 4 replicar codigos con mov. del joystick | | | | |
| | 5 prueba de captacion de contracciones con electrodos | | | | |
| | 6 Mediciones en musculos | | | | |
| | 7 Similitudes en contracciones para crear filtro | | | | |
| | 8 crear filtro | | | | |
| | 9 patrones de contracciones para crear movimientos en brazo | | | | |
| JOSE MIGUEL | 1 selección de sistema de control para pares de servos | | 0 | 0% | 100% |
| | 2 implementación de sistema | | | | |
| | 3 Selección de sistema de control para servos individuales | | | | |
| | 4 implementación de sistema | | | | |
| | 5 Selección de sistema de control para motor DC de codo | | | | |
| | 6 Implementación de sistema | | | | |
| | 7 Selección de sistema de control para movimiento de pronación y supinación | | | | |
| | 8 Implementar sistema | | | | |
| | 9 Implementar módulo de comunicación de Raspberry PI con sistema de control de usuario | | | | |
| | 10 Comunicación Raspberry PI con sistemas | | | | |
| | 11 Diseñar máquina de estados finitos | | | | |
| DEREK | 1 Dimensionar y seleccionar servomotores y pedirlos | | 0 | 0% | 100% |
| | 2 Dimensionar y seleccionar batería para operar los servomotores y el motor DC | | | | |
| | 3 Diseñar circuito para controlar los servos y el motor DC y/o mejorar el diseño para las placas de los sensores | | | | |
| | 4 Imprimir placas y probarlas | | | | |
| | 5 Ensamblar placas y motores | | | | |
| | 6 Instalar el diseño en el brazo robótico con las baterías y los cables necesarios del circuito | | | | |
| | 7 Observar si hay fallas en algún parámetro de potencia y realizar pruebas del brazo | | | | |
| | 8 Empezar trabajo escrito y colocar tapaderas para mejorar estética | | | | |
| PROGRESO DEL PROYECTO | | | | 0% | |

(Elaboración propia)

Esta herramienta trabaja junto con el Gantt, ya que las actividades a realizar son las mismas, por ende, algunas de las modificaciones realizadas en el Gantt fueron necesarias de hacerlas también en el balanced scorecard. El control de dicha herramienta durante el desarrollo del proyecto se representa en los anexos E, F, G y H. Cabe destacar que aunque en el balanced scorecard se marca el porcentaje del proyecto que va realizado, este no toma en cuenta el tiempo que toma en realizarse cada actividad, por lo que los porcentajes no reflejan la cantidad de trabajo restante en cuanto a tiempo.

Cabe destacar también que, como una herramienta extra, se utilizó un control de tareas semanal. Esta herramienta fue creada con el objetivo de revisar que las actividades semanales se fueran realizando, para así garantizar el cumplimiento de la culminación de tareas, en las fechas establecidas. La modalidad de uso de esta herramienta, en este caso, fue diferente a las anteriores. Se inició creando una carpeta compartida vía internet. Figura 113.

Figura 113. Carpeta compartida vía internet

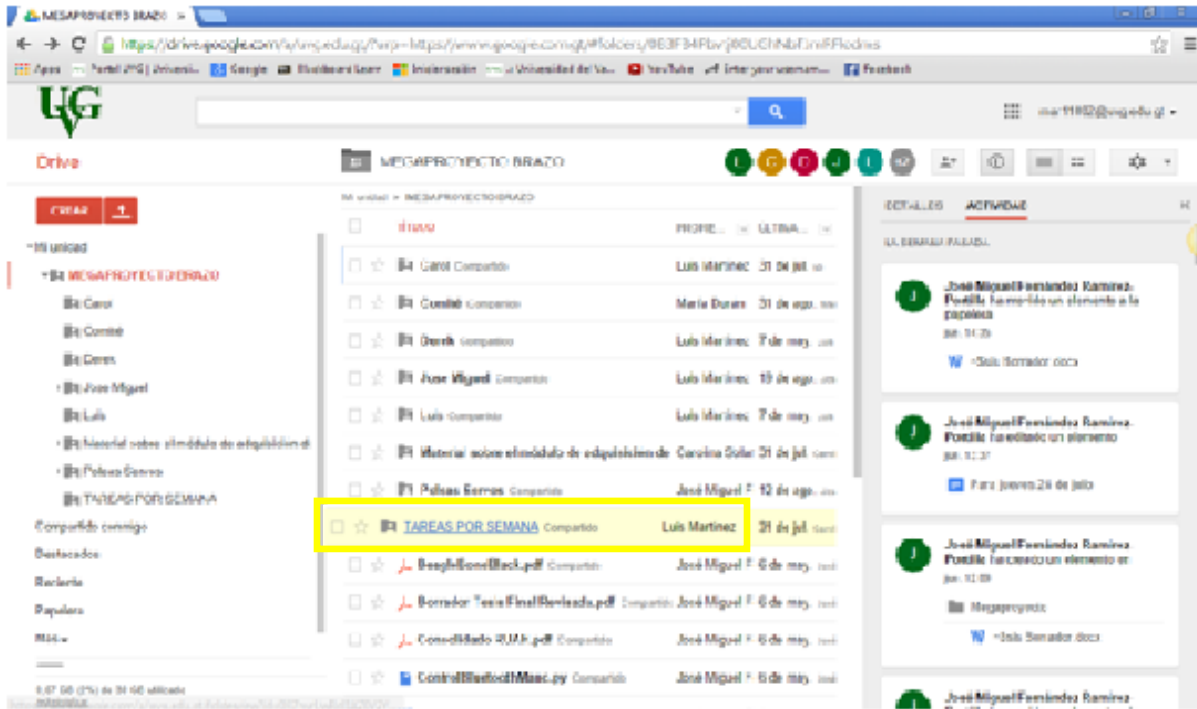


(Elaboración propia)

En estas carpetas todos los integrantes del grupo pueden subir archivos desde sus computadoras, y ya que está compartida, cualquier otro integrante del grupo puede acceder a dichos documentos desde sus computadoras vía internet. En dicha carpeta se creó un documento con el título, "Tareas por semana". Figura 114. En este documento se iban detallando, semanalmente, todas las actividades específicas que iba a realizar cada integrante del grupo, y que debía entregar a la semana siguiente.

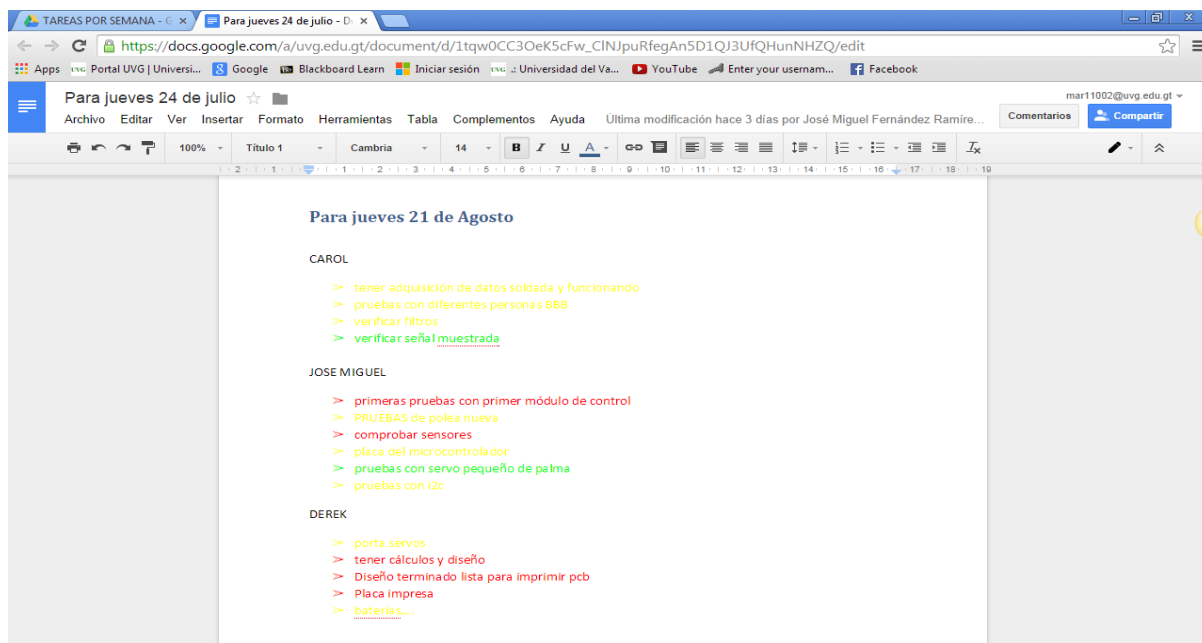
Para calificar la entrega de cada actividad se utilizó también un código de colores tipo semáforo, verde para actividades realizadas, amarillo las que estaban en proceso y rojo para las no realizadas. Todas las actividades marcadas como amarillo o rojo, eran actividades que pasaban automáticamente a ser parte de los entregables de la semana próxima. Figura 114.

Figura 114. Archivo creado para control semanal



(Elaboración propia)

Figura 115. Ejemplo de códigos de control utilizado



(Elaboración propia)

En muchos de los casos de atrasos y cambios de fechas, existen diferentes soluciones que pueden ser aplicadas. Algunos de los problemas típicos que se podrían presentar, y algunas de las recomendaciones, son las siguientes:

Tabla 25. Problemas típicos y recomendaciones.

| <i>Tipo de problema</i> | <i>Interno o Externo</i> | <i>Controlable</i> | <i>Recomendaciones</i> |
|--|--------------------------|--------------------|--|
| Falta de especificación en las tareas a realizar | <i>Interno</i> | <i>sí</i> | <i>Una recomendación en este tipo de problemas, es tener una reunión específicamente orientada a pensar y organizar A DETALLE cada una de las actividades que van a realizar los integrantes</i> |
| Mala estimación de tiempos | <i>Interno</i> | <i>sí</i> | <i>En este caso, es recomendable exigir a los integrantes del grupo que se "empapen" bien en sus temas y conozcan A DETALLE lo que cada actividad conlleva, para así hacer mejores estimaciones de tiempo</i> |
| Atrasos en compras y pedidos | <i>Interno y externo</i> | <i>no</i> | <i>Muchas veces no se puede hacer nada para que el pedido venga antes de tiempo, en especial si se hacen los pedidos a otros países. En este caso es recomendable que los integrantes sean capaces de trabajar en paralelo sus actividades. Es decir, si en una actividad se tiene problemas y no se puede seguir, momentáneamente, ser capaces de trabajar en otra actividad mientras se soluciona el problema.</i> |

Continuación Tabla 25.

| <i>Tipo de problema</i> | <i>Interno o Externo</i> | <i>Controlable</i> | <i>Recomendaciones</i> |
|---|--------------------------|--------------------|---|
| Utilización de nuevos componentes no contemplados anteriormente | <i>Interno</i> | <i>sí</i> | <i>Nuevamente, es importante que los integrantes sepan con toda certeza los pasos que van a tener que seguir para lograr cumplir con sus actividades, así como saber qué componentes son los que necesitarán.</i> |

(Elaboración propia)

B. Manual de usuario

1. Perfil del usuario. El usuario al que va dirigida la prótesis es una persona de escasos recursos, y el nivel de educación que se maneja no es muy alto, por lo que se pensó y diseñó un manual que fuera fácil de comprender a través de explicaciones sin muchos tecnicismos. Ver anexo L para perfil de usuario.

El manual será utilizado como una guía de utilización, comenzando de lo más básico que es el "¿cómo empezar?", describiendo las características del producto, explicando cómo darle mantenimiento, detallando sus movimientos y contracciones para realizar para realizar ciertas actividades, y otros temas pertinentes. También servirá como una fuente de consulta para cuando el usuario tenga dudas acerca de la prótesis biónica.

A parte de servir como una fuente de consulta para los usuarios, este manual servirá también como una fuente de información para los grupos de otras etapas que le den seguimiento a este proyecto, pudiendo sacar información clave que les sea de utilidad y también pudiéndolo tomar como base para crear nuevos manuales de usuario.

2. Introducción a la prótesis. Esta prótesis biónica de antebrazo y mano es una herramienta que le servirá al usuario para realizar tareas simples, pero necesarias en el día a día. Es muy importante conocer al detalle este producto así como las características que este posee. Esta prótesis le ayudará a realizar actividades de las que se requiera ambas manos, y ya que es estéticamente agradable, siempre pasará desapercibida por las demás personas. Problemas como la pérdida de movimiento en la articulación del miembro afectado, ya no será problema ya que gracias al uso de esta prótesis se mantendrá activo y con movilidad constante.

Esta prótesis es para el uso exclusivo del paciente. No dejar al alcance de los niños.

La utilización de esta prótesis tiene requerimientos que el usuario debe cumplir para su utilización exitosa.

- Situación psicológica estable. El usuario debe saber que esta prótesis no será un sustituto total de su miembro perdido. Sin embargo le ayudará a realizar ciertas actividades que antes ejecutaba con regularidad, como tomar objetos.
- Predisposición al aprendizaje. El usuario debe saber que para utilizar esta prótesis se necesita práctica y consistencia. No se obtiene el éxito desde el principio, pero con un poco de práctica se podrá llegar a utilizar con naturalidad.
- Buen estado físico. Ya que la prótesis se controla por medio de señales producidas por los músculos, es importante que los músculos del miembro afectado se encuentren en buen estado, de esa forma será más fácil la interacción.

3. ¿Cómo empezar a utilizar la prótesis? Después de haber destapado la prótesis y haberse familiarizado con la misma, es preciso que lea los requerimientos necesarios para utilizarla. Si cumple con las especificaciones requeridas, puede empezar a utilizar la prótesis.

Esta prótesis es controlada por medio de señales emitidas por sus músculos, ciertas contracciones y movimientos de los mismos provocaran diferentes contracciones en la prótesis por lo que es necesario que se familiarice con el movimiento de sujeción.

a. ¿CÓMO PONERSE LA PRÓTESIS? La prótesis será sujeta de la parte amputada, por medio de un arnés que permitirá que esta se mantenga en su posición. El arnés es de sujeción simple y es fácil de utilizar. Se coloca como se ve en la *Figura 115*, y se abrocha en la parte trasera con un clip de sujeción tipo mochila. *Figura 116*.

Figura 116. Arnés de sujeción de prótesis.



Figura 117. Clip de sujeción tipo mochila.



b. ¿CÓMO CONECTAR LAS BATERÍAS? Para recargar correctamente las baterías se utilizará un cargador HYPERION AC/DC EOS0606iAD-C. Figura 117. A continuación se presentarán los pasos, en el orden adecuado, para conectar correctamente las baterías al cargador. Siempre debe seguirse la siguiente secuencia para conectarlo, y para desconectarlo corresponde la misma secuencia, pero en reversa. Utilizar Figura 117 como referencia de las diferentes partes.

Figura 118. Cargador de baterías.



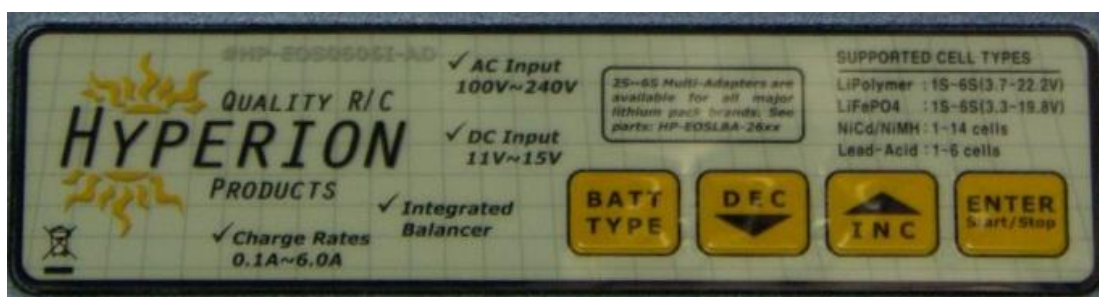
Primero, se debe conectar el juego de cables cortos de un extremo a los conectores, y el otro extremo en los sockets localizados a la derecha del cargado. Segundo, corresponde conectar a fuente de energía de pared, o a batería de automóvil. En el caso de conectarse a una batería de carro, utilizar los cables de lagarto para ajustarlos a las terminales de la batería.

El usuario debe asegurarse de que el cable rojo se conecte a la terminal positiva (+) y el negro a la negativa (-).

En caso de conectarse a pared, debe conectarse el cable para pared en el lado izquierdo del cargador y luego conectar directamente al enchufe, es necesario un voltaje de 100V~240V.

Tercero, debe seleccionarse el tipo de baterías que se va a recargar utilizando los botones de configuración del cargador. *Figura 119.* Este paso no será necesario ya que el cargador ya está configurado y listo para usar con las baterías proporcionadas.

Figura 119. Botones de configuración del cargador.



IMPORTANTE: NO CONECTAR A BATERÍA DE CARRO Y A CORRIENTE DE PARED AL MISMO TIEMPO.

El cargador dará un mensaje de ERROR EN CORRIENTE DE ENTRADA si la corriente suministrada al mismo está fuera del rango aceptable (11V a 15V).

Por último, se deben conectar las baterías a uno de los conectores para permitir que la misma se recargue.

c. ¿CÓMO CONECTAR LOS SENSORES? El grupo de electrodos que sirven para tomar señales de los músculos están ubicados en una banda negra que va sujeta al antebrazo por medio de bordes de Velcro para evitar que la misma se desplace de su posición óptima. Ver Figura 119. Esta banda negra está señalizada para que el usuario se le coloque en la posición necesaria. Luego de ubicar y alinear las marcas de la banda con el antebrazo, los sensores se encuentran listos para captar las señales.

Figura 120. Banda que va sujeta al brazo, con sensores.



d. ¿CÓMO ENCENDER LA PRÓTESIS? Luego de haber leído los requerimientos y haber seguido todos los pasos anteriores, ya se puede proseguir a encender la prótesis. La forma de encenderla es bastante sencilla, únicamente se debe presionar el botón que se encuentra aislado sobre la prótesis. Los dedos de la misma van a presentar unos ligeros movimientos, lo que nos indica que la prótesis ya recibe potencia y está lista para empezar a ser utilizada (luego de ser calibrada).

e. CALIBRACIÓN. Luego de tener todos los elementos de la prótesis colocados adecuadamente en los lugares respectivos, y de haber encendido la prótesis, se puede pasar a la calibración. Este paso le permitirá al sistema de control ajustarse a las señales emitidas por los músculos de diferentes usuarios. Por medio de esto se podrá ser más certero con los movimientos. El método para realizar la calibración es sencillo. Luego de haber seguido los pasos de este manual, y de haber encendido la prótesis, solo hace falta presionar el botón que se encuentra en la prótesis que dice "CALIBRAR". Notar que al momento de presionar este botón, se enciende una luz (LED) roja. Esto indica que la prótesis no está calibrada. Al momento de ver esta luz, el usuario debe de realizar un movimiento de sujeción en el brazo en donde se encuentra la prótesis colocada, es decir, debe contraer los músculos de su brazo, intentando recrear un movimiento de cerrado de puño.

Esto le permitirá a la prótesis captar sus señales musculares, para luego poder interpretarlas más fácilmente. Luego de haber realizado la contracción muscular, los sensores captaran las señales y la prótesis estará calibrada. Para saber que la prótesis se calibro correctamente, la luz (LED) tuvo que haber cambiado de color rojo a verde. Si la luz no cambia de color, es necesario volver a realizar el mismo procedimiento hasta que esta cambie a verde.

4. MOVIMIENTO DE SUJECIÓN. Luego de haber calibrado la prótesis, esta ya está lista para ser utilizada normalmente. La prótesis biónica de antebrazo y mano será de gran utilidad para realizar tareas simples, pero necesarias en el día a día. Actividades como la sujeción de objetos de diferentes tamaños y pesos ya no serán problema. Lo único que se necesita hacer es crear contracciones de sujeción en el brazo, y la prótesis lo replicará con precisión. Y para controlar sujeciones especiales que requieran delicadeza, o mucha fuerza, se cuenta con un potenciómetro que permite medir la fuerza de agarre.

5. AJUSTE DE POTENCIA. Como se mencionaba anteriormente, para controlar sujeciones especiales que requieran delicadeza, o mucha fuerza, se cuenta con un potenciómetro. Este potenciómetro es una perilla giratoria que permite ajustar la potencia suministrada a la mano y así ayuda a controlar la fuerza de la sujeción. Basta con girar esta perilla en contra de las agujas del reloj para bajarle la potencia Ver Figura 10, y a favor de las manecillas del reloj para subir la potencia. Un sistema muy similar al de subir y bajar el volumen de un aparato de sonido. Ver Figura 120. Con la práctica y la familiarización con la prótesis, se aprende pronto a controlar este sistema y manejar cualquier tipo de sujeción simple que se necesite.

Figura 121. Perilla giratoria para control de potencia.



6. CUIDADOS Y RECOMENDACIONES

- Es necesario conservar el brazo biónico en un lugar fresco y seco.
- No poner la misma en contacto directo con líquidos ya que pueden dañar los componentes internos.
- No dejar al alcance de los niños o mascotas.
- El uso del cargador es exclusivo para la batería que trae adjunta, no utilizar con otras baterías.
- No utilizar baterías en otros aparatos.
- Siempre colocar el cargador en un lugar nivelado, y en superficies no inflamables.
- No colocar el cargador, ni las baterías cerca de materiales inflamables.
- Siempre estar atento a las baterías cuando se estén recargando.
- No destapar ninguno de los componentes tanto de brazo biónico, como del cargador y de la mano.

- No obstaculizar las áreas de ventilación del brazo ni del cargador.
- Siempre seguir las instrucciones descritas en este manual, y en el orden presentado.

C. Informe de gastos de la prótesis

El primer paso en esta etapa fue buscar entre todos los documentos de compras del departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad, para verificar las compras que habían realizado en las fases anteriores de este Megaproyecto, e investigar en qué partes de la prótesis se había invertido capital y cuál era el monto de dichas inversiones. Esto se hizo porque algunas de las piezas compradas anteriormente iban a continuar siendo de nuestro uso en esta etapa. *Tabla 26*. En color verde se marcaron los costos de las partes a las que se les siguió dando uso, y en rojo los costos de la piezas a las que ya no se les dio uso.

En el segundo paso para realizar el informe, se realizó una tabla con un presupuesto proyectado, tomando en cuenta las nuevas partes y accesorios que deberían ser comprados para lograr completar las metas. En esta parte se hace una predicción de los gastos en los que se incurrirá durante el desarrollo del proyecto. *Tabla 27*. Dos de los integrantes del grupo no tenían datos exactos de las compras que realizarían, ya que estas compras eran de montos relativamente pequeños que no tendrían gran peso en el costo total de la prótesis. Por ese motivo, después de analizar, en conjunto, las compras que necesitaban realizar, se le asignó un monto de \$100 dólares a cada uno, estimando que sus compras no sobrepasarían esa cifra. Al final se puede ver que el valor total del presupuesto proyectado asciende a \$ 717.95, que convertidos a quetzales, suman un total de Q 5,743.60. (Tasa de cambio utilizada de 7.9, consultada en, banco de Guatemala [5, enero de 2014])

Basándose en que se disponía de Q 20,000 patrocinados por el departamento de Ingeniería Electrónica, quedaba una diferencia de Q 14,256.40. Con esto se identificó que esta etapa de la prótesis no iba a ser tan costosa, monetariamente hablando, como la etapa anterior, ya que se utilizó piezas con las que ya se contaba en el departamento de ingeniería electrónica. *Ver Tabla 27*.

Tabla 26. Informe de costos anteriores

costos anteriores tomados en cuenta

costos anteriores NO tomados en cuenta

| CANTIDAD | DESCRIPCION | VALOR/U | VALOR | TOTAL FACTURA |
|------------------------|--|-----------|-----------|---------------|
| 22 agosto 2012 | | | | |
| 1 | conector pulgar palma2 | \$ 14.000 | \$ 14.00 | |
| 1 | palma4 | \$ 59.790 | \$ 59.79 | |
| 1 | palma4 superior | \$ 39.910 | \$ 39.91 | |
| 1 | shipping | \$ 6.500 | \$ 6.50 | \$ 120.20 |
| 20 agosto 2012 | | | | |
| 20 | transistor, M MBT3904, NPM, SMT part No. 94967 | \$ 0.070 | \$ 1.40 | |
| 20 | Dual Op AM p/liner Part. No. 902821 | \$ 0.250 | \$ 5.00 | |
| 100 | Resistor SMT 0805 10K ohm, part No2078944 | \$ 0.0099 | \$ 0.99 | |
| 100 | Resistor SMT 0805 1K ohm, part No2078590 | \$ 0.0099 | \$ 0.99 | |
| 100 | Resistor SMT 0805 220 ohm, part No1879408 | \$ 0.0099 | \$ 0.99 | |
| 100 | Cap. CER Chip 0402 Y 5V 0.1uF part No. 543777 | \$ 0.0099 | \$ 0.99 | |
| 100 | Cap. Chip CERM 1210 33UF 50V part No. 651647 | \$ 0.0099 | \$ 0.99 | |
| 5 | 5V 500MA POS REG IN DPAK part No. 902514 | \$ 0.950 | \$ 4.75 | |
| 4 | Header ST Male 1RW 40 PIN CTR 25 PST 23 GOLD Tail Part no. 160882 | \$ 0.750 | \$ 3.00 | |
| 10 | Small outline optocoupler darlington input part No. 998325 | \$ 0.450 | \$ 4.50 | \$ 23.60 |
| 9 julio 2012 | | | | |
| 6 | poleas | \$ 4.870 | \$ 29.22 | |
| 1 | Palma5 | \$ 36.110 | \$ 36.11 | |
| 1 | conector pulgar palma | \$ 10.630 | \$ 10.63 | |
| 1 | Tax | \$ 6.500 | \$ 6.50 | \$ 82.46 |
| 13 junio 2012 | | | | |
| 1 | Kit Pines 360 Pcs stainless steel watch band spring bars strap link pins | \$ 4.390 | \$ 4.39 | |
| 16 | Kits de cojinetes Esky bearing set (1.41.5*4*2mm) | \$ 2.630 | \$ 42.08 | |
| 1 | shipping | \$ 37.120 | \$ 37.12 | \$ 83.59 |
| 13 junio 2012 | | | | |
| 1 | dedo anular part 1 F | \$ 5.340 | \$ 5.34 | |
| 1 | dedo indice part 2 F | \$ 5.740 | \$ 5.74 | |
| 1 | dedo indice part 3 F | \$ 6.650 | \$ 6.65 | |
| 1 | dedo medio part 1 F | \$ 5.420 | \$ 5.42 | |
| 1 | dedo medio part 2 F | \$ 6.990 | \$ 6.99 | |
| 1 | dedo medio part 3F | \$ 6.990 | \$ 6.99 | |
| 1 | dedo menique part 1F | \$ 4.170 | \$ 4.17 | |
| 1 | dedo menique part 2F | \$ 3.700 | \$ 3.70 | |
| 1 | dedo menique part 3F | \$ 3.880 | \$ 3.88 | |
| 1 | dedo pulgar part 1 F | \$ 9.310 | \$ 9.31 | |
| 1 | dedo pulgar part 2F | \$ 9.100 | \$ 9.10 | |
| 1 | conector pulgarF | \$ 7.020 | \$ 7.02 | |
| 1 | dedo indice part 1F | \$ 5.340 | \$ 5.34 | |
| 1 | dedo anular part 2 F | \$ 5.740 | \$ 5.74 | |
| 1 | dedo anular part 3F | \$ 6.650 | \$ 6.65 | \$ 92.04 |
| 18 mayo 2012 | | | | |
| 4 | SERVO S3102 Codigo FUTM0034 | \$ 39.990 | \$ 159.96 | \$ 159.96 |
| 28 marzo 2012 | | | | |
| | manufactura de dedo partes descritas en cotizacion | | \$ - | |
| 1 | Part 1 FA | \$ 6.710 | \$ 6.71 | |
| 1 | Part 2 FA | \$ 5.450 | \$ 5.45 | |
| 1 | Part 2 FB | \$ 2.870 | \$ 2.87 | |
| 1 | Part 3 FA | \$ 6.860 | \$ 6.86 | |
| 1 | Part 3 FB | \$ 2.910 | \$ 2.91 | |
| 1 | tax | \$ 6.500 | \$ 6.50 | \$ 31.30 |
| 28 marzo 2012 | | | | |
| 10 | sensores de presion SEN-09673 | \$ 5.950 | \$ 59.50 | \$ 59.50 |
| 28 marzo 2012 | | | | |
| 1 | digital meter gear servo 16g/4.6 kg/.16se (servo) Codigo HD-2213MG | \$ 12.990 | \$ 12.99 | \$ 12.99 |
| 10 febrero 2012 | | | | |
| 1 | falange 1 | \$ 5.690 | \$ 5.69 | |
| 1 | falange 2 | \$ 8.350 | \$ 8.35 | |
| 1 | falange 3 | \$ 12.600 | \$ 12.60 | |
| 1 | shipping | \$ 6.500 | \$ 6.50 | \$ 33.14 |
| ANIMA | | | | |
| 1 | ATMEGA8 | \$ 8.500 | \$ 8.50 | |
| 1 | digikey | \$ 16.540 | \$ 16.54 | |
| 1 | Newark | \$ 77.310 | \$ 77.31 | |
| 1 | CEF | \$ 24.380 | \$ 24.38 | |
| 1 | Shipping | \$ 48.150 | \$ 48.15 | \$ 174.88 |

(Elaboración propia)

Tabla 27. Presupuesto proyectado

| COMPONENTE | COSTO | CANTIDAD | TOTAL | LINK |
|---|----------|----------|-------------------|---|
| Opto acoplador 4N25M | \$ 0.34 | 16 | \$ 5.44 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/Fair |
| Regulador de 7 voltios BA7807FO-E2 | \$ 0.90 | 3 | \$ 2.70 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/ROF |
| Capacitor 0.1 uF C0402T104K4RALTU | \$ 0.61 | 6 | \$ 3.66 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/Ken |
| Capacitor 0.33 uF C1608X7R1H334K080AC | \$ 0.24 | 6 | \$ 1.44 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/TDK |
| Op Amp LM324ADR | \$ 0.27 | 16 | \$ 4.32 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/Tex |
| Resistencia 1KΩ TNPW08051K00BEEA | \$ 0.48 | 18 | \$ 8.64 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/Visl |
| Resistencia 2 KΩ TNPW08052K00BEEA | \$ 0.48 | 3 | \$ 1.44 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/Visl |
| Resistencia 5 KΩ RN732BTTD5001B25 | \$ 0.50 | 3 | \$ 1.50 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/KO/ |
| Resistencia 5.6 KΩ TNPW08055K60BEEA | \$ 0.47 | 16 | \$ 7.52 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/Visl |
| Resistencia 6 KΩ RN732BTTD6001B25 | \$ 0.50 | 3 | \$ 1.50 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/KO/ |
| Resistencia 7.5 KΩ TNPW08057K50BEEA | \$ 0.47 | 16 | \$ 7.52 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/Visl |
| Resistencia 10 KΩ ERA-6AEB103V | \$ 0.09 | 110 | \$ 9.57 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/Pan |
| Potenciómetro digital MCP4018T-103E/LT | \$ 0.51 | 16 | \$ 8.16 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/Mic |
| Transistor MJD44E3T4G | \$ 0.52 | 16 | \$ 8.32 | http://gt.mouser.com/ProductDetail/ON- |
| Bateria Tenergy D 10000mA NiMH recargable | \$ 8.15 | 12 | \$ 97.80 | http://www.all-battery.com/nimhdsizel |
| Tarjeta microSD | \$ 16.88 | 1 | \$ 16.88 | |
| HYPERION DS11-AMB | \$ 33.95 | 7 | \$ 237.65 | http://www.heliflightcenter.com/HYPERI |
| HYPERION DS20-UMD | \$ 38.95 | 1 | \$ 38.95 | http://www.rcdude.com/servlet/the-113 |
| BLUE BIRD BMS-303DD | \$ 9.99 | 1 | \$ 9.99 | http://www.hobbyking.com/hobbyking/ |
| BEAGLE BONE BLACK | \$ 44.95 | 1 | \$ 44.95 | http://www.digikey.com/product-search |
| Gastos Carol... | | | \$ 100.00 | |
| Gastos Jose Miguel... | | | \$ 100.00 | |
| TOTAL | | | \$ 717.95 | |
| TOTAL (Quetzales) | | | Q 5,743.60 | |
| Presupuesto | | | Q20,000.00 | |
| DISPONIBLE | | | Q14,256.40 | |

(Elaboración propia)

Sumando los costos de las piezas que había sido compradas anteriormente en otras etapas, y que utilizamos, más los costos de presupuesto proyectado por la compra de nuevo material, se obtuvo que el costo total proyectado de la prótesis era de Q 11,160.48. *Ver Tabla 28.* (Tasa de cambio utilizada de 7.9, consultada en, banco de Guatemala [5, enero de 2014])

Tabla 28. Costo total proyectado de prótesis.

| | | |
|---|------------------|--------------------|
| costos tomados en cuenta como parte del nuestro | subtotal parte 1 | \$ 677.11 |
| presupuesto proyectado | subtotal parte 2 | \$ 717.95 |
| TOTAL | | \$ 1,395.06 |
| TOTAL | | Q 11,160.48 |

(Elaboración propia)

Al finalizar las compras de componentes de la prótesis, se planteó nuevamente una Tabla con los costos incurridos, esta vez con los datos exactos de las compras realizadas. *Ver Tabla 29.* Se puede observar que se tuvo una variación de un poco más de 100 dólares. *Ver Tabla 30.*

A pesar de haber intentado predecir los costos que se iban a tener durante el desarrollo del proyecto, se tuvo una variación del 15% en la estimación de los mismos (ver Tabla 30). Esto se debió a que, conforme se iba avanzando en el proyecto, surgieron nuevas necesidades de componentes que no se habían previsto. Para disminuir a lo más mínimo posible esta variación, entre los costos reales y los proyectados, es recomendable que se estudie a detalle el proceso que se va a llevar a cabo para la elaboración de las diferentes partes de la prótesis. De esta forma se adquiere más conocimiento de lo que se va a requerir y surgen menos imprevistos. También sería recomendable investigar si se tienen datos históricos de etapas pasadas de este proyecto o informes relacionados con el mismo.

Tabla 29. Costos incurridos durante esta fase de megaproyecto.

| COMPONENTE | COSTO | CANTIDAD | TOTAL |
|--|----------|----------|-------------------|
| Opto acoplador 4N25M | \$ 0.34 | 16 | \$ 5.44 |
| Regulador de 7 voltios BA7807FO-E2 | \$ 0.90 | 3 | \$ 2.70 |
| Capacitor 0.1 uF C0402T104K4RALTU | \$ 0.61 | 6 | \$ 3.66 |
| Capacitor 0.33 uF C1608X7R1H334K080AC | \$ 0.24 | 6 | \$ 1.44 |
| Op Amp LM324ADR | \$ 0.27 | 16 | \$ 4.32 |
| Resistencia 1K Ω TNPW08051K00BEEA | \$ 0.48 | 18 | \$ 8.64 |
| Resistencia 2 K Ω TNPW08052K00BEEA | \$ 0.48 | 3 | \$ 1.44 |
| Resistencia 5 K Ω RN732BTTD5001B25 | \$ 0.50 | 3 | \$ 1.50 |
| Resistencia 5.6 K Ω TNPW08055K60BEEA | \$ 0.47 | 16 | \$ 7.52 |
| Resistencia 6 K Ω RN732BTTD6001B25 | \$ 0.50 | 3 | \$ 1.50 |
| Resistencia 7.5 K Ω TNPW08057K50BEEA | \$ 0.47 | 16 | \$ 7.52 |
| Resistencia 10 K Ω ERA-6AEB103V | \$ 0.09 | 110 | \$ 9.57 |
| Potenci3metro digital MCP4018T-103E/LT | \$ 0.51 | 16 | \$ 8.16 |
| Transistor MJD44E3T4G | \$ 0.52 | 16 | \$ 8.32 |
| Bateria Tenergy D 10000mA NiMH recargable | \$ 8.15 | 12 | \$ 97.80 |
| Tarjeta microSD | \$ 16.88 | 1 | \$ 16.88 |
| HYPERION DS11-AMB | \$ 33.95 | 7 | \$ 237.65 |
| HYPERION DS20-UMD | \$ 38.95 | 1 | \$ 38.95 |
| BLUE BIRD BMS-303DD | \$ 9.99 | 1 | \$ 9.99 |
| BEAGLE BONE BLACK | \$ 44.95 | 1 | \$ 44.95 |
| Capacitor 100 uF | \$ 1.18 | 5 | \$ 5.90 |
| Capacitor 0.33 uF | \$ 0.24 | 5 | \$ 1.20 |
| LM324 | \$ 0.41 | 3 | \$ 1.23 |
| 4N25 | \$ 0.13 | 16 | \$ 2.08 |
| LM2662 | \$ 2.15 | 5 | \$ 10.75 |
| disipadores | \$ 16.54 | 2 | \$ 33.08 |
| Pasta t3rmica | \$ 65.90 | 1 | \$ 65.90 |
| IC POT DGTL 1K OHM 8-SOIC | \$ 3.40 | 10 | \$ 34.00 |
| IC OPAMP GP 800KHZ 8SOIC | \$ 5.69 | 8 | \$ 45.52 |
| IC OPAMP INSTR 1MHZ 8SOIC | \$ 8.17 | 8 | \$ 65.36 |
| IC OPAMP JFET 4MHZ 8SO | \$ 0.57 | 10 | \$ 5.70 |
| RES 1M OHM 1/4W 5% 1210 SMD | \$ 0.09 | 25 | \$ 2.25 |
| RES 10K OHM 1/4W 5% 1210 SMD | \$ 0.09 | 50 | \$ 4.50 |
| RES 22K OHM 1/4W 5% 1210 SMD | \$ 0.05 | 100 | \$ 5.00 |
| RES 1K OHM 1/4W 5% 1210 SMD | \$ 0.09 | 25 | \$ 2.25 |
| RES 47K OHM 1/4W 5% 1210 SMD | \$ 0.09 | 25 | \$ 2.25 |
| RES 33K OHM 1/4W 5% 1210 SMD | \$ 0.09 | 25 | \$ 2.25 |
| RES 100K OHM 1/4W 5% 1210 SMD | \$ 0.09 | 25 | \$ 2.25 |
| RES 4.7K OHM 1/4W 5% 1210 SMD | \$ 0.09 | 25 | \$ 2.25 |
| RES 220 OHM 1/4W 5% 1210 SMD | \$ 0.09 | 25 | \$ 2.25 |
| RES 3.3K OHM 1/4W 5% 1210 SMD | \$ 0.09 | 25 | \$ 2.25 |
| CAP CER 10000PF 10V 10% X7R 0603 | \$ 0.44 | 25 | \$ 11.00 |
| IC REG LDO -5V 0.1A 8SOIC | \$ 0.69 | 10 | \$ 6.90 |
| SOLDER PASTE NO-CLEAN LF 5CC SYR | \$ 15.30 | 1 | \$ 15.30 |
| TOTAL | | | \$ 849.37 |
| TOTAL (Q) | | | Q 6,794.96 |

(Elaboraci3n propia)

Tabla 30. Diferencia entre costos reales y costos proyectados.

| | |
|--------------------|------------------|
| Costos reales | \$ 849.37 |
| Costos proyectados | \$ 717.95 |
| DIFERENCIA | \$ 131.42 |
| VARIACIÓN | 15.47% |

(Elaboración propia)

Teniendo ya los costos de las piezas que había sido compradas anteriormente en otras etapas y los costos reales en los que se incurrió, se puede calcular el costo real que se tuvo al realizar la prótesis. Ver Tabla 31.

Tabla 31. Costo de prótesis.

| | |
|---|--------------------|
| costos tomados en cuenta como parte del nuestro | \$ 677.11 |
| Costos reales | \$ 849.37 |
| | |
| TOTAL | \$ 1,526.48 |
| TOTAL (Q) | Q 12,211.84 |

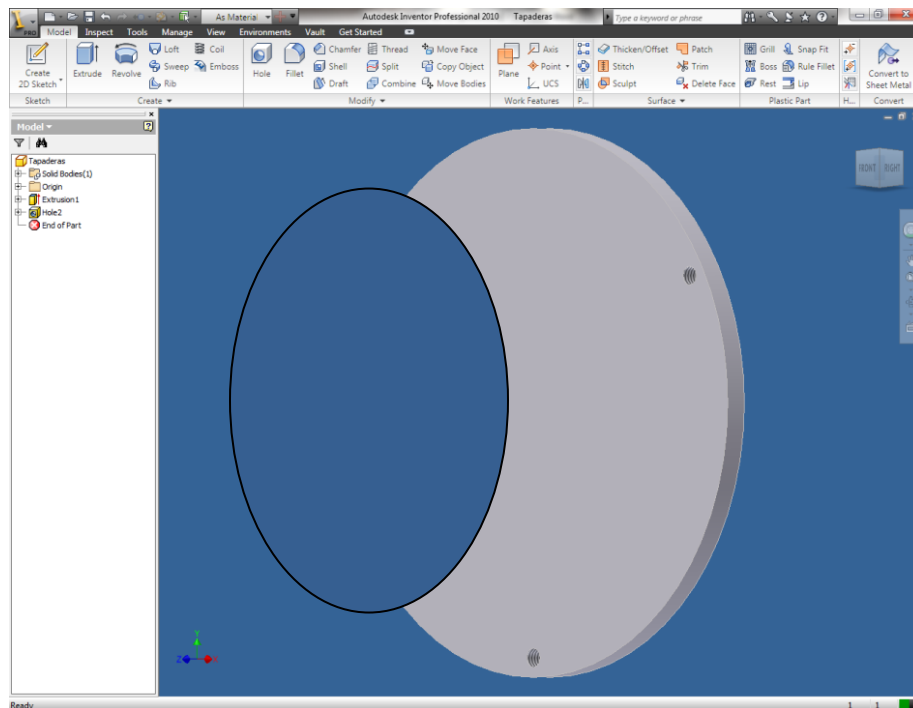
(Elaboración propia)

D. Diseño del sistema de producción

1. Análisis del proceso actual de fabricación de prototipo de la prótesis biónica de antebrazo y mano. El diseño y la fabricación del antebrazo y muñeca fue desarrollado por un grupo de estudiantes que trabajaron en una de las fases anteriores a este megaproyecto (año 2010). El nombre de este megaproyecto fue "Prótesis Biónica Transhumeral". Para diseñar las partes que formarían el antebrazo y la muñeca, se utilizó el software asistido por computadora AutoCAD™.

El antebrazo consiste de dos tapaderas de soporte laterales, y tres cilindros que van atornillados a este para crear un espacio longitudinal. Figuras 121 y 122.

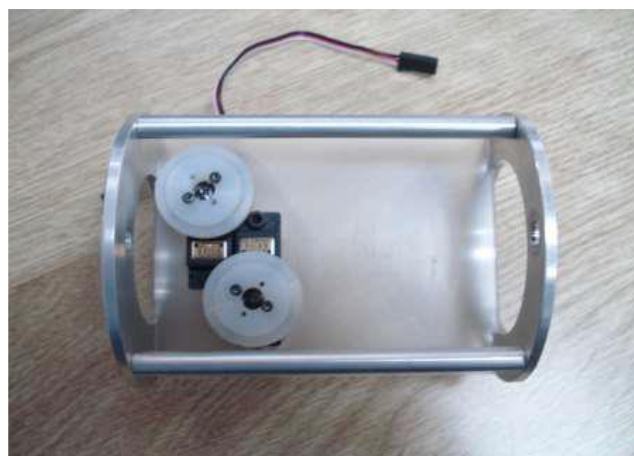
Figura 122. Diseño de tapaderas de antebrazo 3D



(RUAH, 2010)

Se fabricaron dos de estas tapas, así como también 3 varillas de aluminio de forma cilíndrica. Estas irían atornilladas en sus extremos a las dos tapaderas del antebrazo. En medio de la armazón del antebrazo, le colocaron una placa de plexiglás rectangular, que sería en la que se sujeten algunos servos y placas de componentes electrónicos. Esta placa de plexiglás les tomó pocos recursos para fabricar, ya que solo tuvo que ser cortada y perforada. *Figura 122.*

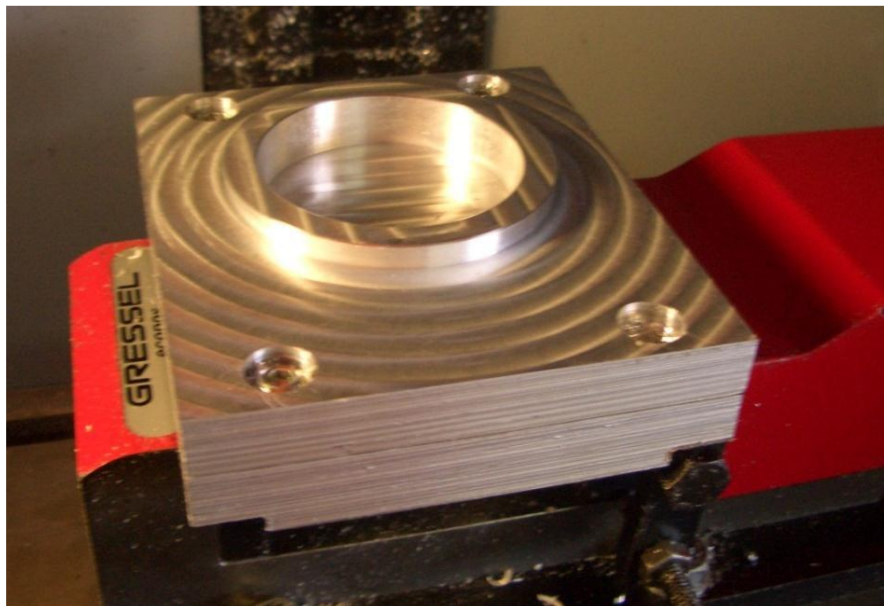
Figura 123. Antebrazo ensamblado con placa porta servos.



(Mazariegos, 2012)

Las varillas, así como las dos tapas, fueron elaborados con aluminio a partir de bloques que fueron tallados con máquinas de control numérico por computadora (CNC). *Figura 123.*

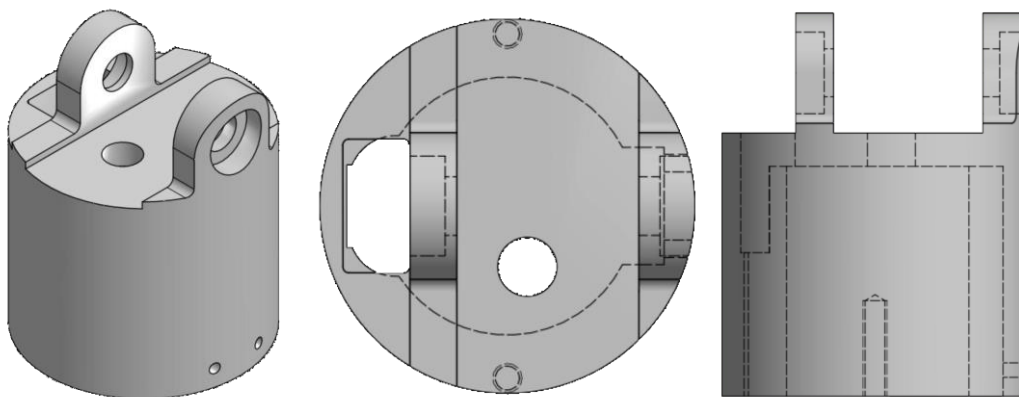
Figura 124. Maquinado de CNC de piezas de antebrazo.



(RUAH, 2010)

La muñeca, después de ser diseñada, pasó a ser fabricada en maquinaria CNC, al igual que el antebrazo. Esta vez se decidió utilizar el polímero ertalón por su bajo costo, buena maquinabilidad, poco peso y su resistencia a esfuerzos y al desgaste. *Figura 125.*

Figura 125. Diseño de la muñeca.



(RUAH, 2010)

El costo de la fabricación de las piezas del antebrazo y muñeca se presenta en la *Tabla 32*.

Tabla 32. Costos de fabricación de estructura de antebrazo y muñeca.

| Componente | Material | Costo de fabricación |
|-----------------------------------|-----------|----------------------|
| Muneca | ertalon | Q 1,105.00 |
| Tapas de antebrazo y varillas | aluminio | Q 487.50 |
| Placa porta sevos | plexiglas | Q 50.00 |
| COSTO TOTAL DE FABRICACION | | Q 1,642.50 |

(Elaboración propia)

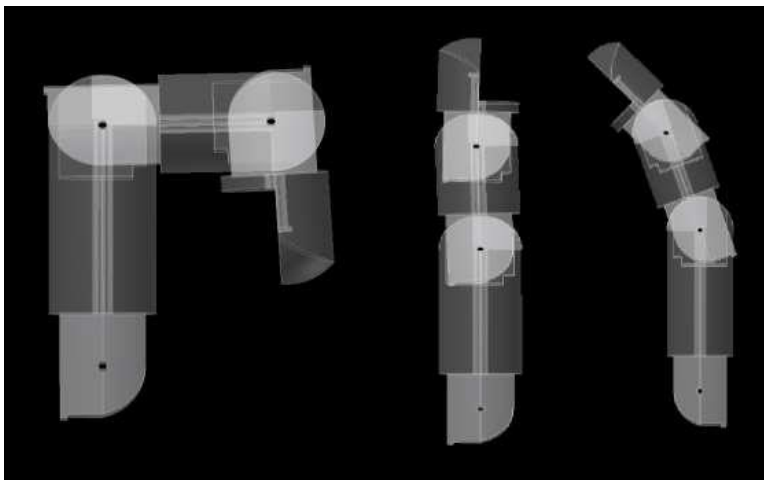
En los costos anteriores va incluida la mano de obra y los materiales.

El diseño y la fabricación de la palma de la mano, y los cinco dedos de esta, fueron desarrollados por un grupo de estudiantes que trabajaron en una fase anterior a esta etapa. Su elaboración fue desarrollada por Pablo Daniel Mazariegos de la Cerda, en 2012, en el grupo de megaproyecto que se encargó del "Diseño e implementación de un nuevo modelo de la mano de la Prótesis Biónica Transhumeral".

El diseño de dichas piezas fue realizado en un software asistido por computadora llamado Autodesk Inventor™. Este diseño fue realizado tomando en cuenta aspectos mecánicos y de esfuerzos.

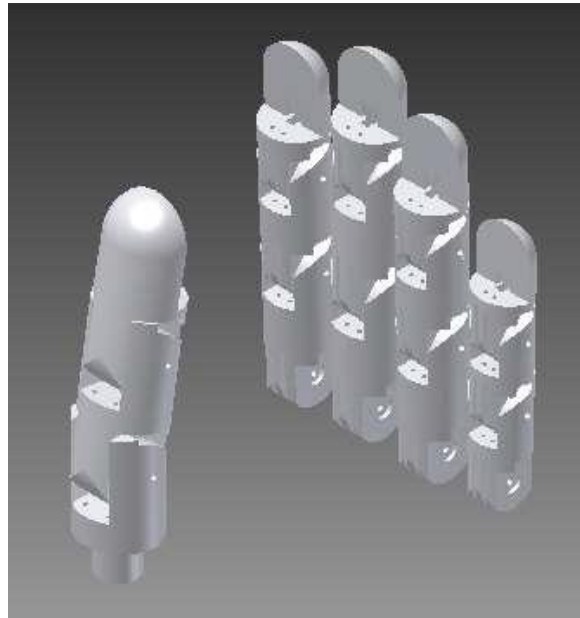
Después de tomar las debidas mediciones y realizar diferentes pruebas, se llegó al diseño final que tendrían los dedos y la palma de la mano. (*Imágenes 126, 127, 128, 129 y 130*)

Figura 126. Diseño de falanges de los dedos ensamblados.



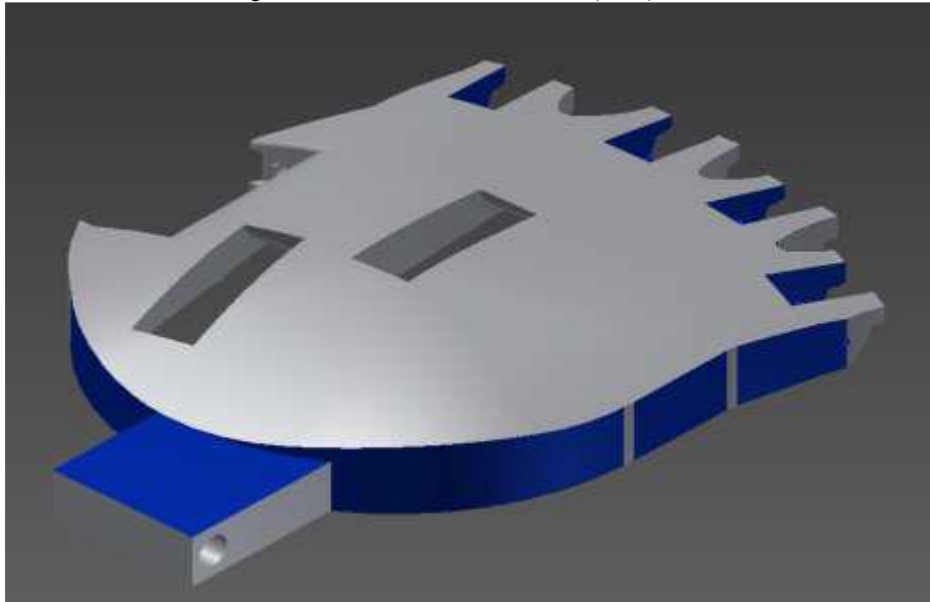
(Mazariegos, 2012)

Figura127. Diseño final de dedos de la mano.



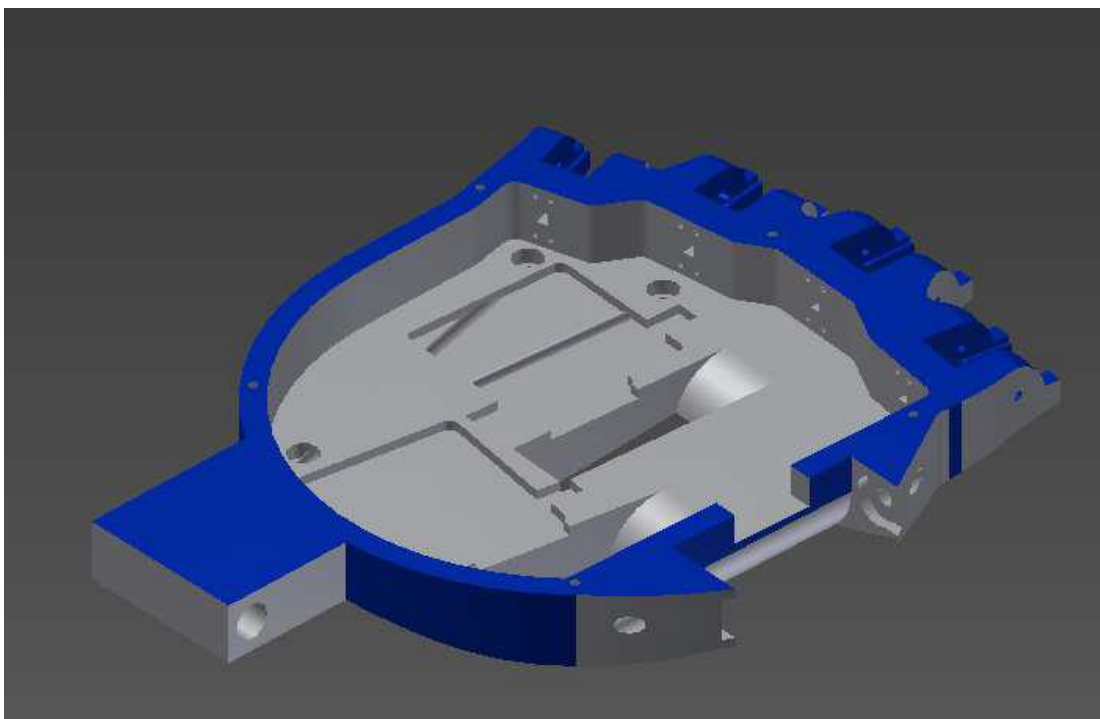
(Mazariegos, 2012)

Figura 128. Palma de la mano con tapa superior.



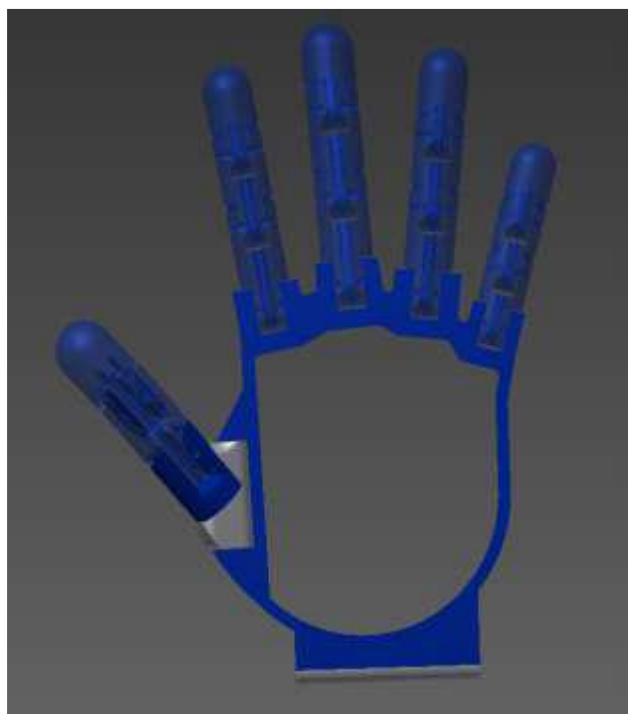
(Mazariegos, 2012)

Figura 129. Palma de la mano con tapa inferior



(Mazariegos, 2012)

Figura 130. Palma de mano, sin tapas, con dedos ensamblados



(Mazariegos, 2012)

Ya que lo que iban a producir era un prototipo, se decidió que la forma más económica de hacerlo iba a ser utilizar la impresión 3D. Ver cotizaciones en la *Tabla 33*.

Tabla 33. Cotizaciones de impresión 3D

| Lugar | Precio Manufactura | Material | Shipping | Tax | Total |
|--------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------|------------|--------------|
| Ponoko | \$31.63 | Durable Gloss Plastic - Black | \$11.23 | -- | \$42.86 |
| Shapeways | \$26.64 | White Strong & Flexible | \$6.50 | -- | \$33.14 |
| Redeye | \$175 | White ABS | \$8.18 | -- | \$183.18 |
| Quickparts | \$177 | PolyJet | \$8.18 | -- | \$185.18 |

(Mazariegos, 2012)

Basándose en los costos, la opción a utilizar fue Shapeways, elaborando las partes con el polímero llamado White Strong and Flexible. Esta empresa es estadounidense, por lo que la importación de las piezas tuvo un costo adicional al de la manufactura.

Esta empresa logró realizar la manufactura de las piezas tomando como base los diseños realizados en 3D, que fueron enviados a ellos vía internet. El costo total de todas las piezas anteriormente descritas se presenta en la *Tabla 34*.

Tabla 34. Costo de impresión 3D de la palma y dedos de la mano.

| CANTIDAD | DESCRIPCIÓN | COSTO/U | COSTO | TOTAL FACTURA |
|---------------------------------|------------------------|-----------|----------|---------------|
| 1 | conector pulgar palma2 | \$ 14.000 | \$ 14.00 | |
| 1 | palmaV4 | \$ 59.790 | \$ 59.79 | |
| 1 | palmaV4 superior | \$ 39.910 | \$ 39.91 | |
| 1 | shipping | \$ 6.500 | \$ 6.50 | \$ 120.20 |
| 1 | Palma5 | \$ 36.110 | \$ 36.11 | |
| 1 | conector pulgar palma | \$ 10.630 | \$ 10.63 | |
| 1 | Tax | \$ 6.500 | \$ 6.50 | \$ 53.24 |
| 1 | dedo anular part 1 F | \$ 5.340 | \$ 5.34 | |
| 1 | dedo indice part 2 F | \$ 5.740 | \$ 5.74 | |
| 1 | dedo indice part 3 F | \$ 6.650 | \$ 6.65 | |
| 1 | dedo medio part 1 F | \$ 5.420 | \$ 5.42 | |
| 1 | dedo medio part 2 F | \$ 6.990 | \$ 6.99 | |
| 1 | dedo medio part 3F | \$ 6.990 | \$ 6.99 | |
| 1 | dedo menique part 1F | \$ 4.170 | \$ 4.17 | |
| 1 | dedo menique part 2F | \$ 3.700 | \$ 3.70 | |
| 1 | dedo menique part 3F | \$ 3.880 | \$ 3.88 | |
| 1 | dedo pulgar part 1 F | \$ 9.310 | \$ 9.31 | |
| 1 | dedo pulgar part 2F | \$ 9.100 | \$ 9.10 | |
| 1 | conector pulgarF | \$ 7.020 | \$ 7.02 | |
| 1 | dedo indice part 1F | \$ 5.340 | \$ 5.34 | |
| 1 | dedo anular part 2 F | \$ 5.740 | \$ 5.74 | |
| 1 | dedo anular part 3F | \$ 6.650 | \$ 6.65 | \$ 92.04 |
| 1 | Part 1 FA | \$ 6.710 | \$ 6.71 | |
| 1 | Part 2 FA | \$ 5.450 | \$ 5.45 | |
| 1 | Part 2 FB | \$ 2.870 | \$ 2.87 | |
| 1 | Part 3 FA | \$ 6.860 | \$ 6.86 | |
| 1 | Part 3 FB | \$ 2.910 | \$ 2.91 | |
| 1 | tax | \$ 6.500 | \$ 6.50 | \$ 31.30 |
| 1 | falange 1 | \$ 5.690 | \$ 5.69 | |
| 1 | falange 2 | \$ 8.350 | \$ 8.35 | |
| 1 | falange 3 | \$ 12.600 | \$ 12.60 | |
| 1 | shipping | \$ 6.500 | \$ 6.50 | \$ 33.14 |
| TOTAL DE COSTOS EN IMPRESION 3D | | | | \$ 329.92 |

(Elaboración Propia)

Por último se tiene la fabricación de las yemas de los dedos. En este proceso, utilizaron moldes de yemas de dedos creados con masilla (*Figura 130*) Y para la yemas utilizaron silicona sellante transparente ya que les ayudaba a aislar los sensores de presión, y ofrece resistencia a los rayos UV, al agua y a otros agentes atmosféricos. *Figura 131*.

Figura 131. Moldes creados con masilla



(Mazariegos, 2012)

Figura 132. Fabricación de yemas de dedos con silicona sellante transparente



(Mazariegos, 2012)

El costo de la silicona y de la masilla se presenta en la *Tabla 35*.

Tabla 35. Costos de fabricación de yemas de dedos.

| Componente | Material | Costo |
|----------------------|----------|---------|
| Moldes | masilla | Q 30.00 |
| yemas de dedos | silicona | Q 50.00 |
| Costo total de yemas | | Q 80.00 |

(Elaboración propia)

Figura 133. Yema acoplada a dedo.



(Mazariegos, 2012)

Si se reúnen todos los procedimientos anteriores, se tiene la fabricación de la estructura principal de una prótesis de antebrazo y mano. La descripción de cada una de las partes y los costos de los diferentes procedimientos se pueden observar en la *Tabla 36*.

Tabla 36. Descripción de partes, procedimientos y costos.

| Parte de la prótesis | Tipo de fabricación | Costo |
|-------------------------------|---------------------|-----------|
| Yemas de dedos | artesanal | \$ 10.00 |
| Dedos | impresión 3D | \$ 156.48 |
| Palma de mano | impresión 3D | \$ 173.44 |
| Muñeca | CNC | \$ 138.13 |
| Antebrazo | CNC | \$ 67.19 |
| TOTAL DE COSTO DE MANUFACTURA | | \$ 545.23 |

(Elaboración propia)

Convertido a quetzales, a una tasa de 7.9 (tasa consultada en banco de Guatemala [5, enero de 2014]), se obtiene un costo total de Q 4,307.32.

Si al maquinado se le agrega el costo de todos los componentes electrónicos utilizados, se obtiene el costo total de la fabricación de una prótesis de antebrazo y mano. Ver *Tabla 37*.

Tabla 37. Costo total de prótesis, incluyendo la manufactura y los componentes electrónicos.

| | |
|--|-------------|
| TOTAL DE COSTO DE MANUFACTURA | \$ 545.23 |
| TOTAL DE COSTO DE COMPONENTES ELECTRONICOS | \$ 981.25 |
| COSTO DE FABRICACION TOTAL | \$ 1,526.48 |
| COSTO DE FABRICACION TOTAL | Q 12,211.84 |

(Elaboración propia)

2. DEMANDA. Después de investigar en las bibliotecas de tesis de la Universidad del Valle de Guatemala. Se encontró un Megaproyecto que trata acerca de "Prótesis abiertas para amputaciones transradiales". En dicha tesis, realizada en el año 2013, se encontró un estudio, con sus respectivos cálculos, acerca de la demanda que existe, de prótesis de transradiales de brazo, en Guatemala. Ya que el estudio es reciente, se decidió utilizar dicho estudio, para calcular la demanda que sería tomada como referencia para mi sistema de producción.

Determinación de la demanda

- Se optó por una búsqueda en páginas de internet relacionadas con temas específicos a las necesidades de prótesis en Guatemala o bien temas generales de discapacidad. Al igual que búsquedas de número de amputados a nivel nacional que brindaran un aproximado de la demanda de prótesis al tener el proceso de ensamblaje se debía cumplir.
- Al no obtener información suficiente y significativa en la búsqueda online, se optó por consultas a entidades a nivel nacional relacionadas con el tema. Como el Ministerio de Salud, Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (IGSS) y entidades internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), entre otras.
- Se optó por consultas físicas a dichos lugares con el propósito de obtener la información necesaria y cumplir con todos los requisitos.
- Se consultaron datos y documentos de la Cruz Roja y de la OMS, en donde finalmente se obtuvieron indicadores que permitieron realizar las proyecciones para la determinación de la demanda probable. *(López, M. 2013)*

En los siguientes gráficos se representa la demanda de prótesis transradiales, en Guatemala, y la proyección de los mismos hasta el 2018. *Tabla 38 y Figura 133.*

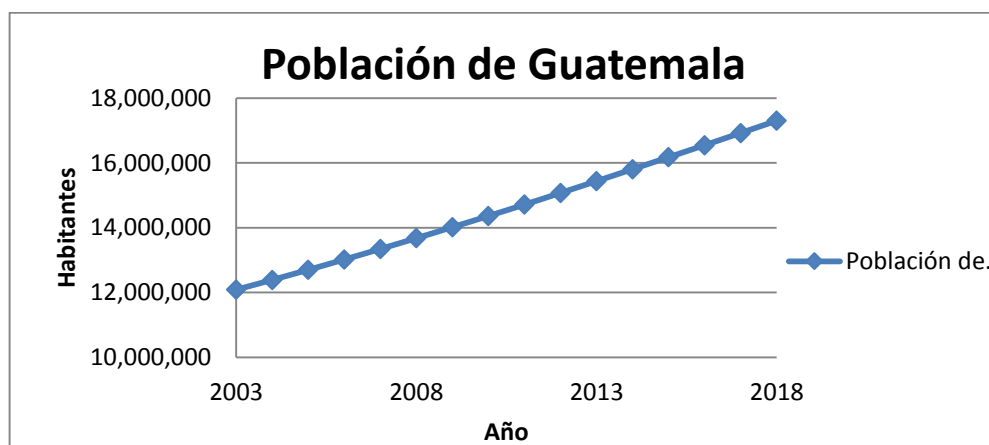
Tabla 38. Determinación de la demanda de prótesis de antebrazo y mano.

| | | Población de Guatemala | | | | | | |
|---------------------------|-------|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
| Población total | | 12,087,014 | 12,390,451 | 12,700,611 | 13,018,759 | 13,344,770 | 13,677,815 | 14,017,057 |
| Necesitan prótesis | 0.10% | 12,087.01 | 12,390.45 | 12,700.61 | 13,018.76 | 13,344.77 | 13,677.82 | 14,017.06 |
| Amp. Transradiales | 8% | 967 | 991 | 1,016 | 1,042 | 1,068 | 1,094 | 1,121 |

| | | Población de Guatemala | | | | | | | | |
|---------------------------|-------|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Población total | | 14,361,666 | 14,713,763 | 15,073,375 | 15,438,384 | 15,806,675 | 16,176,133 | 16,548,168 | 16,924,190 | 17,302,084 |
| Necesitan prótesis | 0.10% | 14,361.67 | 14,713.76 | 15,073.37 | 15,438.38 | 15,806.68 | 16,176.13 | 16,548.17 | 16,924.19 | 17,302.08 |
| Amp. Transradiales | 8% | 1,149 | 1,177 | 1,206 | 1,235 | 1,265 | 1,294 | 1,324 | 1,354 | 1,384 |

(López, M. 2013)

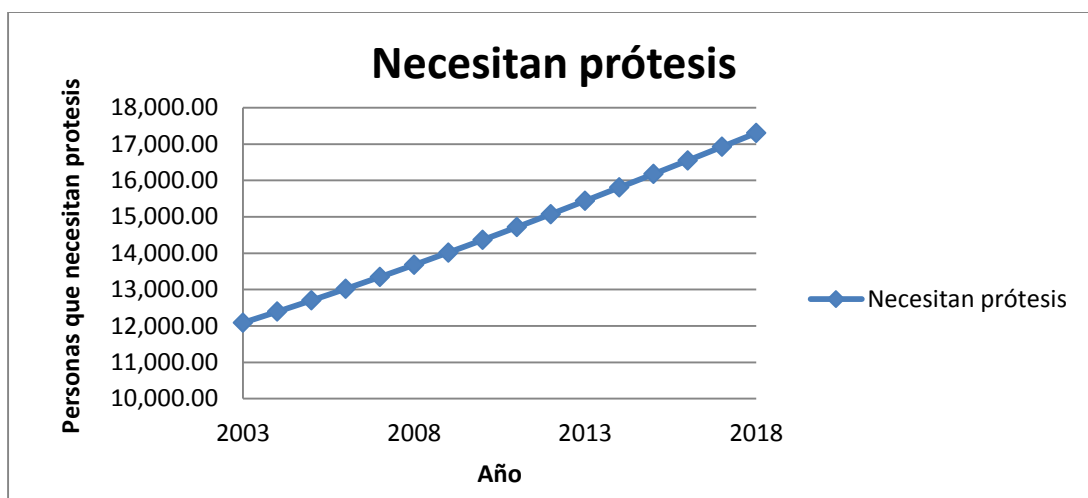
Figura 134. Habitantes en Guatemala.



(Elaboración propia)

Según los cálculos realizados por el megaproyecto "Prótesis abiertas para amputaciones transradiales", mediante la investigación y la toma de datos, resultó que un aproximado del 0.10% de la población total sufre de la falta de un miembro (sin especificar causas). *Figura 134.*

Figura 135. Población Guatemalteca que sufre de amputación.

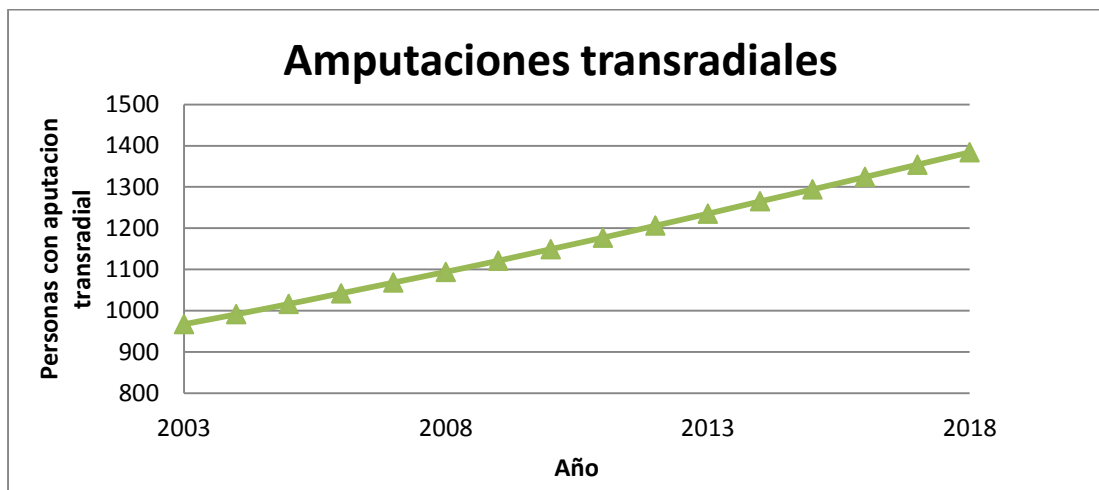


(Elaboración propia)

De ese 0.10% de la población que sufre de amputación, un 8% es de amputación transradial.

Figura 136

Figura 136. Población que sufre de amputación transradial.



(Elaboración propia)

Se pudo notar que la cantidad de personas que actualmente necesitarían una prótesis es de 1,265. A partir de estos datos, se puede observar que sí existe demanda para este tipo de prótesis, y que esta va en aumento cada año. Hay que notar, también, que dentro de esta demanda no se toma en

cuenta todos los casos, por lo que esta cifra podría ser más alta. Este dato será tomado únicamente como referencia para plantear la forma en que se podría ir abasteciendo dicha demanda. Se utilizará la capacidad del sistema de producción como demanda mensual.

3. ADMINISTRACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTROS

a. Administración del Inventario de Materia Prima. Se utilizará un sistema *Kanban* para administrar la materia prima. Este método consiste en un sistema de tarjetas utilizadas para realizar los pedidos cuando sean necesarios. Habrá una alerta que les indique a los proveedores cuando se necesite reabastecer del algún material. Los pedidos de materia se harán con un método *pull*.

Esto consiste en realizar los pedidos de materia adecuándose a las necesidades en la planta, y no como muchas veces se hace con el sistema *push*, que la planta se tiene que adecuar al material que se le mande. Este sistema ayuda a que siempre se esté abastecido de materia prima y se tenga un control adecuado de los inventarios. Se realizó también un inventario "ABC" para controlar la materia prima, en este se clasifican los materiales de la siguiente manera: A clasificación de materia más costosa y B- C clasificaciones de materia con costos bajos.

Será necesario prestarle especial atención a la materia prima Ertalón, látex y a los componentes electrónicos. Ya que según el inventario "ABC" realizado, estos representan más del 96% (materia clasificación A) del total de los costos de materiales (ver Anexo I). Por lo que hay que llevar un control adecuado de este material para evitar pérdidas, y por ende costos extra. Se le debe almacenar en orden y en un lugar seguro (para evitar robos).

b. Abastecimiento. El abastecimiento de los materiales será controlado utilizando la capacidad del sistema de producción como demanda, con una planificación de las necesidades del material (MRP) *Material requirement planning*. El MRP se presenta en la *Tabla 39*. A través de este se obtiene la información necesaria para que se programen los pedidos y los niveles del inventario necesarios para el *Kanban*. Basados en el Inventario "ABC", de los materiales que representan más costo para la empresa, que son el látex y los componentes electrónicos, no se debe de tener demasiado inventario de reserva, ya que esto representaría un costo más alto. Para evitar el inventario, pero siempre cumplir con su demanda, se deben hacer pedidos frecuentemente. El Ertalón también es parte de los materiales que representan alto costo para el sistema (clase A), pero ya que este es el material con el que trabaja el cuello de botella, según el TOC, se debe asumir el costo de tener un inventario extra de reserva, para que nunca se tengan retrasos ni se tenga que detener la producción. El resto de la materia (clasificación B y C. ver anexo I), de debe manejar con el mismo nivel de cuidado, pero se puede tener un mayor inventario de reserva ya que el costo de estos no es representativo.

c. Distribución. El producto terminado será almacenado en bodegas y estará disponible para ser llevados al centro de distribución. Ya que el único centro de distribución podría ser el hospital

Roosevelt, la distribución es simple y el producto se puede ir a traer directamente a las bodegas conforme necesiten abastecerse.

Tabla 39. MRP.

PRODUCCIÓN DE PRÓTESIS BIÓNICAS DE ANTEBRAZO Y MANO MRP

DEMANDA MENSUAL

323 Prótesis biónicas de antebrazo y mano

| | Por unidad | Cantidades |
|------------------------------|--|------------|
| Materias primas | ALUMINIO (gramos) | 161.3 |
| | PLEXIGLÁS (u) | 1 |
| | ERTALÓN (gramos) | 437.3 |
| | HDPE (kgramos) | 1 |
| | LATEX (gal) | 0.25 |
| | SILICONA (u) | 0.2 |
| | YESO (kg) | 5 |
| | FILM ALVEOLAR PARA PROTEGER (PLÁSTICO DE BURBUJAS de 1.22m)x (0.5m) | 1 |
| Materiales de Empaque | CAJA PARA EMPAQUES | 1 |
| | ETIQUETAS | 1 |
| Tercerización | COMPONENTES y ELECTRONICOS | 1 |

| | Mensual | Cantidades |
|------------------------------|--|------------|
| Materias primas | ALUMINIO (gramos) | 52085 |
| | PLEXIGLÁS | 323 |
| | ERTALÓN (gramos) | 141243.9 |
| | HDPE (kgramos) | 323 |
| | LATEX (gal) | 80.8 |
| | SILICONA | 64.6 |
| | YESO (kg) | 1615 |
| | FILM ALVEOLAR PARA PROTEGER (PLÁSTICO DE BURBUJAS de 1.22m)x (0.5m) | 323 |
| Materiales de Empaque | CAJA PARA EMPAQUES | 323 |
| | ETIQUETAS | 323 |
| Tercerización | COMPONENTES y ELECTRONICOS | 323 |

| costo unitario | | costo |
|----------------|--|-----------------|
| Q0.09 | ALUMINIO (gramos) | Q4,687.65 |
| Q10.00 | PLEXIGLÁS | Q3,230.00 |
| Q1.37 | ERTALÓN (gramos) | Q193,504.09 |
| Q1.23 | HDPE (gramos) | Q397.29 |
| Q1,800.00 | LATEX (gal) | Q145,350.00 |
| Q50.00 | SILICONA | Q3,230.00 |
| Q2.16 | YESO (kg) | Q3,488.40 |
| Q3.25 | FILM ALVEOLAR PARA PROTEGER (PLÁSTICO DE BURBUJAS de 1.22m)x (0.5m) | Q1,049.75 |
| Q17.50 | CAJA PARA EMPAQUES | Q5,652.50 |
| Q0.14 | ETIQUETAS | Q45.22 |
| Q981.25 | COMPONENTES y ELECTRONICOS | Q316,943.75 |
| | TOTAL | Q677,579 |

(Elaboración propia)

4. PRODUCCIÓN Las diferentes partes de la prótesis que será fabricada tienen que tener las siguientes dimensiones: Para la muñeca, ver *Tablas 40 y 41*. Para partes de antebrazo, ver *Tablas 19 y 20*. Ver *Imágenes (26 a 41)* para referencia de medidas. Las medidas fueron tomadas a partir del prototipo.

Tabla 40. Medidas de muñeca.

| MUÑECA | | | | | | |
|--------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | DIÁMETRO EXTERNO | DIÁMETRO INTERNO | ALTURA DIÁMETRO EXTERNO | ALTURA DIÁMETRO INTERNO | DIÁMETRO AGUJEROS LATERALES | DIÁMETRO AGUJEROS SUPERIORES |
| Tamaño en mm | 64.50 | 44.60 | 47.80 | 55.30 | 25.00 | 13.00 |

(Elaboración propia)

Tabla 41. Medidas de muñeca.

| MUÑECA | | | | | |
|--------------|------------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------------|---|
| | ALTURA HASTA CHUMACERA | DISTANCIA ENTRE CHUMACERAS | ANCHO DE CHUMACERAS | DIÁMETRO EXTERNO DE CHUMACERAS | DISTANCIA DE CHUMACERA A DIÁMETRO EXTERNO |
| Tamaño en mm | 80.50 | 30.70 | 8.00 | 25.00 | 24.00 |

(Elaboración propia)

Tabla 42. Medidas de discos de soporte de antebrazo.

| DISCOS DE SOPORTE DE ANTEBRAZO | | | |
|--------------------------------|------------------|------------------|--------|
| | DIÁMETRO EXTERNO | DIÁMETRO INTERNO | ALTURA |
| Tamaño en mm | 80.00 | 51.85 | 3.10 |

(Elaboración propia)

Tabla 43. Medidas de varillas de soporte de antebrazo.

| | VARILLAS SOPORTE ANTEBRAZO | | PLACA PORTA SERVOS | |
|--------------|----------------------------|-------|--------------------|-------|
| | DIÁMETRO EXTERNO | LARGO | ALTO | LARGO |
| Tamaño en mm | 6.50 | 97.20 | 78.00 | 97.50 |

(Elaboración propia)

Figura 137. Diámetro exterior.



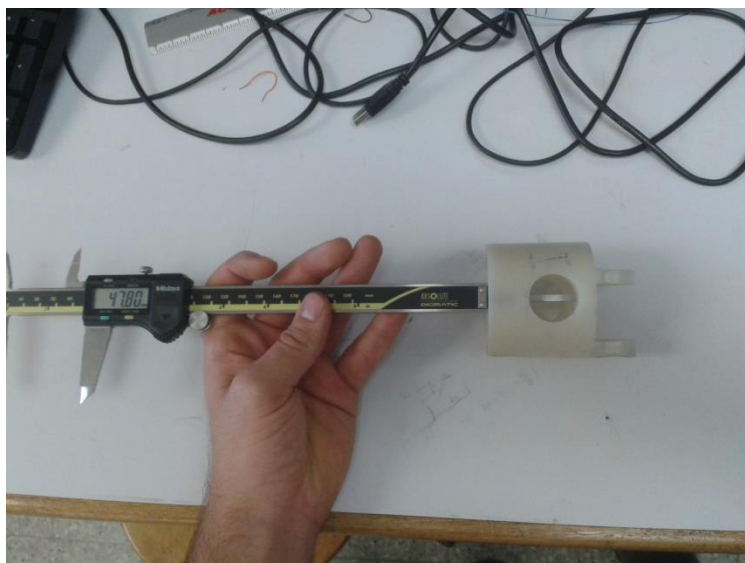
(Elaboración propia)

Figura 138. Diámetro interior.



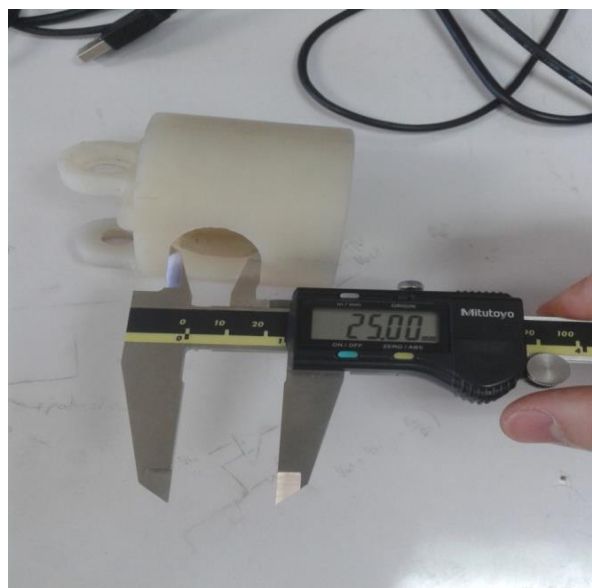
(Elaboración propia)

Figura 139. Profundidad interior



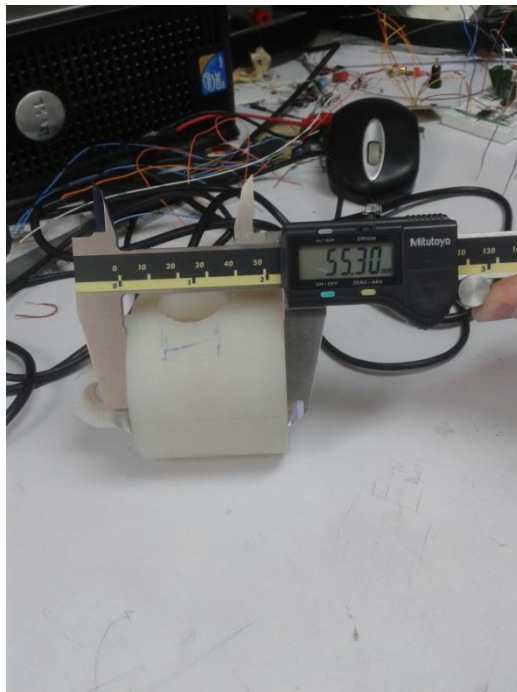
(Elaboración propia)

Figura 140. Diámetro agujero lateral.



(Elaboración propia)

Figura 141. Diámetro altura exterior



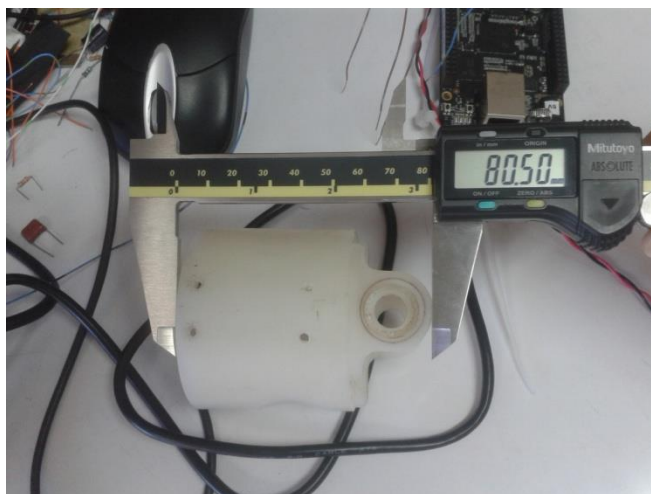
(Elaboración propia)

Figura 142. Diámetro agujero superior.



(Elaboración propia)

Figura 143. Altura a chumacera.



(Elaboración propia)

Figura 144. Distancia entre chumaceras.



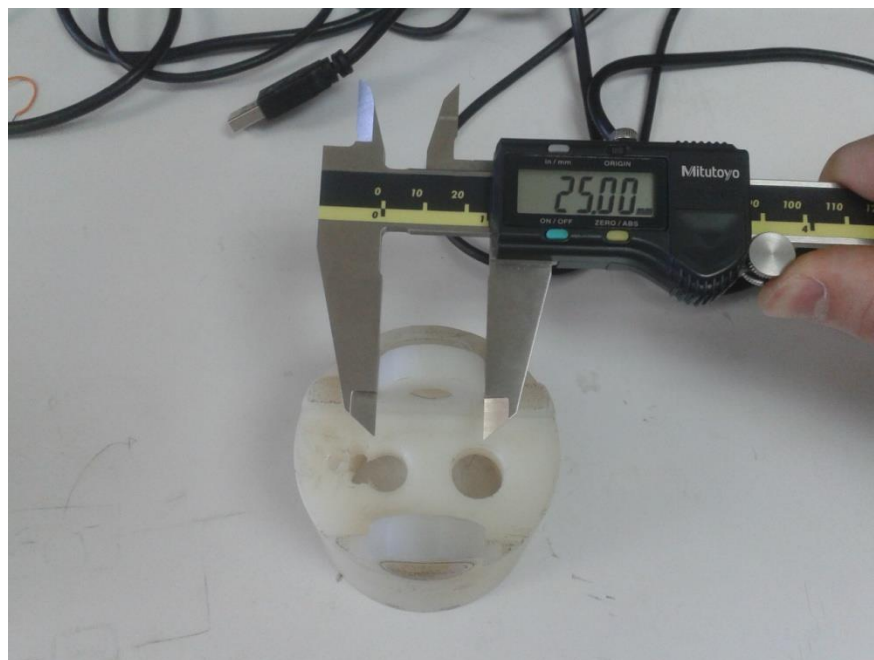
(Elaboración propia)

Figura 145. Ancho chumaceras.



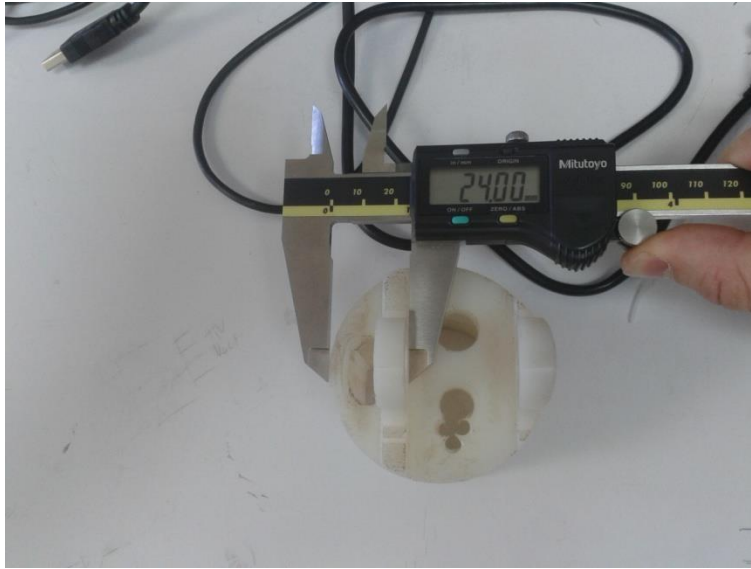
(Elaboración propia)

Figura 146. Diámetro exterior chumaceras.



(Elaboración propia)

Figura 147. Distancia de chumacera a diámetro exterior.



(Elaboración propia)

Figura 148. Diámetro exterior disco de soporte de antebrazo.



(Elaboración propia)

Figura 149. Ancho de disco de soporte de antebrazo.



(Elaboración propia)

Figura 150. Diámetro interior disco de soporte antebrazo.



(Elaboración propia)

Figura 151. Largo de varilla de soporte de antebrazo.



(Elaboración propia)

Figura 152. Diámetro de varilla de soporte de antebrazo



(Elaboración propia)

a. Listado de materiales. En la Tabla siguiente se presentan los materiales que se van a necesitar para producir una prótesis, tomado en cuenta las dimensiones mencionadas anteriormente.

Tabla 44. Materiales para fabricar prótesis.

| PARTE DE LA RPOTESIS | MATERIAL | COSTO | CANTIDAD | TOTAL | PROVEEDOR |
|------------------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|--------------------------|
| DISCOS SOPORTE ANTEBRAZO | ALUMINIO | Q 5.23 | 2 | Q 10.46 | Alumicentro de Guatemala |
| VARILLAS SOPORTE ANTEBRAZO | ALUMINIO | Q 1.10 | 3 | Q 3.30 | Alumicentro de Guatemala |
| PLACA PORTA SERVOS ANTEBRAZO | PLEXIGLÁS | Q 10.00 | 1 | Q 10.00 | Gravoplexi |
| MUÑECA | ERTALÓN | Q 598.77 | 1 | Q 598.77 | Quisertec S.A. |
| PALMA Y DEDOS DE MANO | HDPE | Q 1.23 | 1 | Q 1.23 | Shanghai Yipin Industry |
| PIEL | LATEX | Q 450.00 | 1 | Q 450.00 | Bodegas Marinas |
| YEMAS DE DEDOS | SILICONA | Q 2.00 | 5 | Q 10.00 | Henkel |
| PARA MOLDES | YESO | Q 10.80 | 1 | Q 10.80 | Agromsa |

(Elaboración propia)

Los materiales anteriores son los necesarios para la fabricación estructural de la prótesis. Para el resto de la prótesis se va a utilizar tercerización. Los costos de tercerización se presentaran a continuación. (Tabla 45)

Tabla 45. Materiales y partes no producidas.

| TERCERIZACIÓN | COSTO | CANTIDAD | TOTAL | PROVEEDOR |
|--|--------------|-----------------|--------------|---------------------|
| COMPONENTES Y PLACAS ELECTRÓNICAS | Q 981.25 | 1 | Q 981.25 | Varios |
| FILM ALVEOLAR PARA PROTEGER (PLÁSTICO DE BURBUJAS) | Q 3.25 | 1 | Q 3.25 | PlastiHogar |
| CAJA PARA EMPAQUES | Q 17.50 | 1 | Q 17.50 | PlastiHogar |
| ETIQUETAS | Q 0.14 | 1 | Q 0.14 | Grafser Impresiones |

(Elaboración propia)

b. Operaciones del proceso. El proceso de fabricación constará básicamente en la creación de la palma de la mano y los dedos por medio de inyección en molde, la fabricación de los soportes del antebrazo y la muñeca en maquinado CNC y la fabricación de la piel sintética y yemas de dedos con moldes de yeso. A continuación se presentará detalladamente cada operación del proceso.

1. Colocación y ajuste de bloques de aluminio en CNC para fabricación de los discos de soporte de antebrazo
2. Configuración para maquinado CNC
3. Moldeado CNC
4. Retiro de piezas
5. Lijado de asperezas
6. Revisión
7. Transporte a área de ensamble
8. Colocación de bloque de aluminio para fabricación de varilla de soporte de antebrazo
9. Configuración para Maquinado CNC
10. Moldeado CNC
11. Retiro de piezas
12. Lijado de asperezas
13. Revisión
14. Transporte a área de ensamble
15. Limpieza de maquinaria
16. Colocación de bloque de polímero en CNC para fabricación de muñeca
17. Configuración para Maquinado CNC
18. Moldeado CNC
19. Retiro de piezas
20. Lijado de asperezas

21. Revisión
22. Transporte a área de ensamble
23. Cierre de molde para inyectado
24. Configuración de maquinaria
25. Colocación de polímero para fabricación de mano en maquinaria para inyectado
26. Inyectado
27. Enfriado de piezas
28. Retiro de pieza
29. Lijado de asperezas
30. Revisión
31. Transporte a área de ensamble
32. Preparación de mezcla para moldes de yeso para piel sintética y yemas de dedos
33. Fabricación de moldes para brazos y yemas de dedos
34. Preparación de mezcla de látex para piel sintética
35. Preparación de mezcla de silicona para yemas de dedos
36. Aplicación de látex en moldes de brazo
37. Aplicación de silicona en moldes de yemas de dedos
38. Secado de piezas
39. Retiro de moldes
40. Limpieza de asperezas
41. Revisión
42. Transporte a área de ensamble
43. Ensamble de antebrazo
44. Ensamble de placa porta servos y componentes electrónicos en antebrazo

45. Ensamble de muñeca a antebrazo
46. Ensamble de palma y dedos de la mano
47. Ensamble de componentes electrónicos en palma, dedos y yemas de dedos
48. Ensamble de mano y antebrazo
49. Unión de componentes de mano y antebrazo
50. Recubrimiento de antebrazo y mano con piel sintética
51. Retoques y detallado de piel
52. Empacado de prótesis terminada, junto con accesorios
53. Almacenamiento de producto terminado

c. DOP. Tomando los datos de las operaciones anteriores, se planteó el Diagrama de operaciones del proceso (DOP), que servirá como una herramienta para obtener datos importantes acerca de la producción. Durante el desarrollo del análisis del sistema de producción se hará referencia al DOP realizado. Consultar Anexo K. Como se ve representado en el anexo, este DOP fue realizado con diferentes actividades en paralelo. Se utilizó esta configuración ya que el ponerlas en paralelo nos permite ahorrar tiempo, trabajando varias piezas al mismo tiempo, sin que la fabricación de una dependa de otras. Esto hace que el tiempo de ciclo se reduzca, ya que existen menos actividades dependientes en una sola línea.

d. Perfil de capacidades. La maquinaria a utilizar se describe en la siguiente Tabla. Ver Tabla 46.

Tabla 46. Maquinas a utilizar en la producción.

| TIPO DE MAQUINARIA | MÁQUINA | CANTIDAD | COSTO | PROVEEDOR | |
|------------------------|--------------|----------|-----------------------|----------------|---|
| Fresadora CNC | RaptorX SL | 1 | \$ 40,000 - \$ 50,000 | Fresadoras-CNC | http://www.fresadoras-cnc.com/tienda/fresadoras/ |
| Torno CNC | Syntec 900 T | 1 | \$ 50,000 | ETZNAB S.A | http://etznab.com.mx/en/maquinaria/principal/maquinaria |
| Inyectora de precisión | AronN SMD | 1 | \$ 40,000 - \$ 60,000 | JB Fiser S.A | http://www.jbfiser.com/InyectorasHorizontales/SerieAronNHibrida/250H55_ |

(Elaboración propia)

De las especificaciones de las diferentes máquinas, y utilizando como base diferentes videos de maquinaria y procesos similares, se estimó información de tiempos que se requería para realizar un análisis de capacidades. A continuación se presenta una Tabla con los tiempos estimados de fabricación, de cada máquina (*Tabla 47*) y los tiempos estimados promedio de cada operación del proceso. *Tabla 25*.

Tabla 47. Tiempos estimados por operación en maquinaria.

| TIPO DE MAQUINARIA | MÁQUINA | PIEZA | CANTIDAD | TIEMPO ESTIMADO | TIEMPO TOTAL |
|------------------------|--------------|----------------------------------|----------|-----------------|--------------|
| Fresadora CNC | RaptorX SL | Discos de soporte de antebrazo | 2 | 2.5 minutos | 5 minutos |
| Fresadora CNC | RaptorX SL | Muneca | 1 | 20 minutos | 20 minutos |
| Torno CNC | Syntec 900 T | Varillas de soporte de antebrazo | 3 | 1 minuto | 3 minutos |
| Inyectora de precisión | AronN SMD | | 1 | 7 segundos | 7 segundos |

(Elaboración propia)

Tabla 48. Tiempos estándar de operaciones

| PASO | DESCRIPCIÓN | SEGUNDOS |
|------|---|----------|
| 1 | Colocación y ajuste de bloques de aluminio en CNC para fabricación de los discos de soporte de antebrazo. | 10.00 |
| 2 | Configuración para maquinado CNC. | 4.00 |
| 3 | Moldeado CNC | 300.00 |
| 4 | Retiro de piezas. | 4.00 |

Continuación Tabla 48

| PASO | DSCRIPCIÓN | SEGUNDOS |
|-------------|---|-----------------|
| 5 | Lijado de asperezas. | 10.00 |
| 6 | Revisión. | 10.00 |
| 7 | Transporte a área de ensamble | 10.00 |
| 8 | Colocación de bloque de aluminio para fabricación de varilla de soporte de antebrazo. | 15.00 |
| 9 | Configuración para Maquinado CNC. | 6.00 |
| 10 | Moldeado CNC | 180.00 |
| 11 | Retiro de piezas. | 6.00 |
| 12 | Lijado de asperezas. | 15.00 |
| 13 | Revisión. | 15.00 |
| 14 | Transporte a área de ensamble | 10.00 |
| 15 | Limpieza de maquinaria. | 20.00 |
| 16 | Colocación de bloque de polímero en CNC para fabricación de muñeca. | 5.00 |

Continuación Tabla 48

| PASO | DSCRIPCIÓN | SEGUNDOS |
|-------------|---|-----------------|
| 17 | Configuración para Maquinado CNC. | 2.00 |
| 18 | Moldeado CNC | 1,200.00 |
| 19 | Retiro de piezas. | 2.00 |
| 20 | Lijado de asperezas. | 5.00 |
| 21 | Revisión. | 5.00 |
| 22 | Transporte a área de ensamble | 10.00 |
| 23 | Cierre de molde para inyectado. | 3.00 |
| 24 | Configuración de maquinaria | 2.00 |
| 25 | Colocación de polímero para fabricación de mano en maquinaria para inyectado. | 2.00 |
| 26 | Inyectado. | 7.00 |
| 27 | Enfriado de piezas | 5.00 |
| 28 | Retiro de pieza. | 2.00 |

Continuación Tabla 48

| PASO | DSCRIPCIÓN | SEGUNDOS |
|-------------|---|-----------------|
| 29 | Lijado de asperezas. | 5.00 |
| 30 | Revisión. | 5.00 |
| 31 | Transporte a área de ensamble | 10.00 |
| 32 | Preparación de mezcla para moldes de yeso para piel sintética y yemas de dedos. | 10.00 |
| 33 | Fabricación de moldes para brazos y yemas de dedos. | 20.00 |
| 34 | Preparación de mezcla de látex para piel sintética. | 10.00 |
| 35 | Preparación de mezcla de silicona para yemas de dedos. | 1.00 |
| 36 | Aplicación de látex en moldes de brazo. | 5.00 |
| 37 | Aplicación de silicona en moldes de yemas de dedos. | 5.00 |
| 38 | Secado de piezas | 60.00 |
| 39 | Retiro de moldes | 15.00 |
| 40 | Limpieza de asperezas. | 10.00 |

Continuación Tabla 48

| PASO | DESCRIPCIÓN | SEGUNDOS |
|-------------|---|-----------------|
| 41 | Revisión | 5.00 |
| 42 | Transporte a área de ensamble | 10.00 |
| 43 | Ensamble de antebrazo | 6.00 |
| 44 | Ensamble de placa porta servos y componentes electrónicos en antebrazo. | 20.00 |
| 45 | Ensamble de muñeca a antebrazo. | 5.00 |
| 46 | Ensamble de palma y dedos de la mano. | 20.00 |
| 47 | Ensamble de componentes electrónicos en palma, dedos y yemas de dedos. | 10.00 |
| 48 | Ensamble de mano y antebrazo. | 40.00 |
| 49 | Unión de componentes de mano y antebrazo. | 600.00 |
| 50 | Recubrimiento de antebrazo y mano con piel sintética. | 10.00 |
| 51 | Retoques y detallado de piel | 10.00 |
| 52 | Empacado de prótesis terminada, junto con accesorios. | 5.00 |

Continuación Tabla 48

| PASO | DSCRIPCIÓN | SEGUNDOS |
|------|---------------------------------------|----------|
| 53 | Almacenamiento de producto terminado. | 2.00 |
| | TOTAL (segundos) | 2,764.00 |
| | TOTAL (minutos) | 46.07 |

(Elaboración propia)

Ya que las partes de la prótesis se pueden producir por separado en máquinas diferentes, para luego ser ensambladas, se optó por tener una distribución por proceso o estaciones. Esto significa que en cada estación del sistema de producción se estará produciendo una pieza diferente. Se identificó seis estaciones diferentes. Se dividen en: Estación de fresadora CNC, en esta estación se producen los discos de soporte del antebrazo y la muñeca. Otra estación es la de torno CNC, en esta se producen las varillas de soporte del antebrazo. La siguiente es la estación de inyección, que es en donde se producirán los dedos y palma de la mano. Luego se tiene la estación de moldes, que es en donde se producirán los moldes del brazo y yemas de dedos, para luego fabricarlos en silicona y látex. De todas las estaciones anteriores se obtendrán las piezas que luego pasan a la estación de ensamblaje. Seguido del ensamblaje, pasan a la estación final que es el área de empaque y almacenamiento.

En la *Tabla 49*, se muestran los tiempos de las diferentes estaciones.

Tabla 49. Tiempos de operación en estaciones.

| ESTACIÓN | TIEMPO TOTAL (segundos) |
|---------------|-------------------------|
| FRESADORA CNC | 1,557.00 |
| TORNO CNC | 222.00 |
| INYECTORA | 31.00 |
| MOLDES | 141.00 |
| ENSAMBLE | 721.00 |
| EMPAQUE | 5.00 |

(Elaboración propia)

De acuerdo al DOP realizado (*Anexo k*) se sacó el tiempo de ciclo del sistema, sumando los tiempos de las operaciones del flujo principal. Se obtuvo un tiempo de ciclo de 32.62 minutos, es decir 00:32:37 entre la finalización de una unidad y la siguiente.

Con los datos anteriores se puede predecir cuántas prótesis al día se pueden producir (tomando en cuenta que se trabaja 8 horas diarias). Trabajando 22 días al mes, se obtiene que se puede producir: 323 unidades. (Ver Tabla 50).

Tabla 50. Unidades producidas al mes

| DÍAS DISPONIBLES | HORAS DISPONIBLES (8 horas diarias) | TOTAL DISPONIBLE (minutos) | MINUTOS POR PRÓTESIS | PRÓTESIS MENSUALES |
|-------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 22 | 176 | 10560 | 32.62 | 323 |

(Elaboración propia)

La capacidad del sistema será utilizada como demanda mensual ya que el proyecto no tiene una demanda fija y el sistema de producción que se plantea sólo busca una economía de escala aplicada a reducir el costo unitario con la mejor configuración de procesos posible.

e. TEORÍA DE RESTRICCIONES (TOC). Como primer paso para realizar el análisis de la teoría de restricciones, se identifica la restricción del sistema. En este caso se deben analizar los tiempos de las operaciones e identificar qué proceso, o máquina, es el más tardado. Como podemos ver en la *Tabla 49*. La más tardada es la estación de la maquina fresadora CNC, que toma 1,557 segundos. En esta máquina se procesan dos tipos de productos diferentes, los discos de soporte del antebrazo, y los la muñeca. Que esta máquina sea la más tardada la convierte en cuello de botella, lo que significa que la capacidad de esta máquina se encuentra por debajo de la demanda impuesta sobre ella. Debido a lo anterior, esta máquina es la que marca el ritmo del sistema, y a ella se debe acoplar toda la producción. Para ayudar a aumentar la capacidad de este proceso ese posible utilizar una segunda fresadora CNC. En una maquina se procesan discos de soporte de antebrazo, y en la nueva segunda fresadora la muñeca. El cambio en la capacidad, agregando una nueva máquina, se puede ver comparando los tiempos de ciclo en los dos diferentes escenarios. El primer escenario es utilizando una sola máquina *Tabla 51*, en este tiempo se incluyen los tiempos de la producción en línea de las dos partes producidas en la fresadora CNC. En el segundo escenario *Tabla 52*, el tiempo de ciclo es tomado trabajando con dos máquinas fresadoras CNC, trabajando en paralelo. Tomando en cuenta la comparación se decidió utilizar dos máquinas.

Tabla 51. Tiempo de ciclo con una sola fresadora CNC.

| | |
|-----------------|----------|
| Escenario 1 | segundos |
| TIEMPO DE CICLO | 2,605.00 |

(Elaboración propia)

Tabla 52. Tiempo de ciclo con dos fresadoras CNC.

| | |
|-----------------|----------|
| Escenario 2 | segundos |
| TIEMPO DE CICLO | 1,957.00 |

(Elaboración propia)

Al analizar el proceso en el DOP (Ver anexo k), podemos observar que la operación más tardada del proceso es el modelado de la muñeca en la fresadora CNC, que toma 20 minutos. Lo anterior convierte en el cuello de botella del sistema; eso significa que esta operación será la que marque el paso al que producirá el sistema. Sabiendo eso, se le debe dar especial importancia a esta operación, ya que el tiempo perdido en esta máquina será tiempo perdido en todo el sistema, y por ende dinero perdido. Como principales medidas de precaución en este cuello de botella se podría tener: un aumento de la capacidad de este recurso (comprar otra máquina si es rentable), aunque se podría crear otro cuello de botella. También se recomienda que cualquier pieza o material que entre al cuello de botella no sea defectuoso, ya que de lo contrario sería una pérdida de tiempo procesarla. Para evitar esto se tiene a un proveedor de materia prima de primera calidad, para tener seguro que solo se recibirá producto en perfectas condiciones. Otra medida será tener un buffer, o un inventario amortiguador justo frente a esta operación. Esto se realizaría si en dado caso se quedara sin material, para tener un inventario de emergencia y evitar tiempos muertos en esta máquina, ya que, como se mencionaba anteriormente, si se detiene esta máquina se detiene el sistema y es dinero perdido.

5. COSTEO DE SISTEMA DE PRODUCCIÓN. Para realizar el análisis del costo del sistema de producción, se utilizará una hoja de control. De ella se obtendrá el costo unitario de las prótesis. Para hacer el análisis es necesario conocer los costos directos e indirectos de fabricación y la mano de obra.

Dentro de los costos directos de fabricación se incluye la materia prima y la mano de obra directa, que es la mano de obra que se involucra directamente con el producto final. En los costos indirectos de fabricación está incluida la energía consumida, gastos administrativos, prestaciones laborales de empleados, mantenimientos, y en general todos los costos que no están directamente

relacionados con el producto final.

a. COSTOS DIRECTOS DE FABRICACIÓN

MATERIALES

Dentro de los costos directos de fabricación se encuentran todos los materiales que van a ser utilizados directamente para hacer el producto final. En el MRP se presentan los materiales y los costos mensuales de los mismos, estos datos serán utilizados en el cálculo de costos directos de fabricación.

MANO DE OBRA DIRECTA

Como parte de los costos directos de fabricación se encuentra también la mano de obra directa. Esto representa a todos los trabajadores que trabajan directamente con el producto final y representa un importante costo de mano de obra en la elaboración del producto. Para saber el dato de cuantos trabajadores se deben de tener en producción, primero se deben realizar cálculos.

En este caso existen cuatro máquinas que trabajan en producción. Gracias al análisis TOC realizado anteriormente, se pudo observar que la máquina fresadora CNC es un cuello de botella, así que se decidió utilizar un operador que trabaje específicamente solo en ella, para mantenerla andando intentando así no tener ningún percance, ya que el tiempo que el cuello de botella permanece inactivo es tiempo total de producción perdido. Tomando en cuenta lo anterior, se realizará un análisis para los trabajadores necesarios en las otras tres máquinas.

Se realizó un análisis de los tiempos de las máquinas estando activadas tomando como base al cuello de botella (que es el que marca el ritmo de la producción) (ver anexo J). En el anexo J se puede ver cómo se comportan las máquinas, utilizando un operario para el cuello de botella, y otro para las otras tres. Se puede observar que con únicamente dos operarios, si se puede llevar a cabo toda la producción. Complementando este análisis, se hizo una comparación en tiempos de activación.

Se tomó un día de producción como base. En un día se deben producir 14 prótesis. A partir de este dato, podemos deducir que el tiempo que estará activado el cuello de botella en total en el día será el tiempo que se necesita activar para realizar una prótesis, por 14 unidades necesarias. El mismo procedimiento se realizó con las otras tres máquinas. A partir de estos datos, se pudo obtener, en comparación con el cuello de botella, el tiempo promedio que permanecen no activadas. Al analizarlo se puede ver que en comparación al cuello de botella, el tiempo que el resto de las máquinas permanecen activadas, en promedio, es mucho menor. Ver *Tabla 53*.

Por esta razón se decidió que un operador basta para controlar a estas máquinas. (La información de tiempos se tomó a partir del DOP) Ver *anexo k*. Adicionalmente a estos, se tiene un

operario más en el área de moldes, uno en ensamble y otro más en el área de empaque, ya que se estima que el trabajo puede ser realizado en cada estación por un solo operario.

Se utilizará el concepto de mantenimientos autónomos. Este consiste en capacitar a los operarios para que ellos mismo puedan ser los que les den mantenimiento a la maquinaria. De esta forma se mantiene el control en la producción y se ahorran costos extra de mantenimiento. Para esto es necesario un programa de capacitación mensual.

Tabla 53. Tiempo (en minutos) de máquinas no activadas respecto a cuello de botella

| RECURSO | PRODUCCIÓN DE 14 UNIDADES DIARIAS | | | |
|--|-----------------------------------|--------|--------|--------|
| | CUELLO DE BOTELLA | M1 | M2 | M3 |
| TIEMPO ACTIVADA AL DIA (minutos) | 280.00 | 70.00 | 1.63 | 42.00 |
| TIEMPO NO ACTIVADA (respecto a cuello de botella) | | 210.00 | 278.37 | 238.00 |
| PROMEDIO DE TIEMPO NO ACTIVADAS (respecto a cuello de botella) | | 242.12 | | |
| % DE TIEMPO NO ACTIVADAS (respecto a cuello de botella) | | 86% | | |

(Elaboración propia)

b. COSTOS INDIRECTOS DE FABRICACIÓN. Ya que el costo de la energía consumida por las máquinas es parte de los costos indirectos de fabricación, es necesario hacer estimaciones de los mismos. Utilizando el texto "Escola Técnica Superior d'Enginyeries Industrial de Terrassa, de la Universidad de Cataluña", se tomaron datos aproximados de consumo energético de la maquinaria que se va a utilizar. El precio del Kwh en Guatemala se encuentra cerca de Q 1.6, menos la tarifa de aporte social del INDE, cuesta aproximadamente Q 0.5 Kwh. (datos obtenidos de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica). El costo total mensual del consumo la maquinaria, tomando en cuenta 8 horas al día y 22 días al mes, es de Q 10,560.

También como parte de los costos indirectos de fabricación, se va a contar con un único supervisor de producción. Se decidió esto ya que basado en el texto "Introducción a la Ingeniería industrial, R.C Vaughn", es suficiente con un solo supervisor, ya que el mismo puede ser capaz de tener y coordinar de 4 a 8 subordinados, eficientemente.

c. HOJA DE CONTROL DE ACUMULACIÓN. A continuación se presentará la hoja de control de acumulación del sistema de producción, la misma es utilizada para obtener el costo unitario de la prótesis de biónica de antebrazo y mano, tomando en cuenta los datos obtenidos anteriormente.

Tabla 54. Hoja de control de acumulación

| Hoja de control de acumulacion | | | |
|--------------------------------|---|--------------|--------------|
| | DIRECTOS | | |
| (+) | Materia Prima | Q 677,578.65 | |
| | Compras netas | | 677,578.65 |
| | | | 677,578.65 |
| = | Materia prima consumida | | 677,578.65 |
| (+) | Mano de obra directa | Q 11,401.70 | |
| = | Sumatoria de mano de obra directa (costos) | | 11,401.70 |
| | COSTO PRIMARIO (DIRECTOS) | | 688,980.35 |
| (+) | CIF | | |
| | Energia consumida | Q 10,560.00 | |
| | Gastos administrativos | Q 5,000.00 | |
| | Bonos | Q 1,250.00 | |
| | Capacitaciones | Q 6,000.00 | Q 22,810.00 |
| = | TOTAL CARGAS A LA PRODUCCIÓN | | Q 711,790.35 |
| = | COSTO DE PRODUCTO MANUFACTURADO | | Q 711,790.35 |
| | Unidades | 323 | Q/U 2,203.69 |

(Elaboración propia)

Según los datos obtenidos, el costo unitario de la prótesis biónica de antebrazo y mano es de Q2,203.69. Si se compara el costo de fabricarlo utilizando economías de escala, y el de fabricarlo por unidad, manualmente (Ver Tabla 54) se puede apreciar que por cada unidad fabricada individualmente se podrían fabricar casi 5 utilizando economías de escala. Esto es un gran avance para el proyecto ya que representa un costo muy bajo de una prótesis que podría beneficiar de gran manera a la población guatemalteca.

D. ANÁLISIS FINANCIERO

Ya que en este proyecto se espera más un beneficio social que monetario, se decidió realizar un análisis comparando únicamente los procesos de fabricación. En este análisis se medirá el beneficio de producir a economías de escala comparado con producción unitaria, intentando demostrar el impacto positivo que esta producción tendrá con la población que sufre de amputaciones de brazo transradiales.

Primero se analizará la inversión inicial necesaria para poner a andar el sistema de producción propuesto. Cabe mencionar que en el análisis que se realizará no serán tomados en cuenta gastos de inmuebles, mobiliario, equipo de oficina y ningún otro aspecto que no tenga relación directa con el proceso de producción. Esto debido a que el análisis se realiza con el objetivo de comparar únicamente los procesos de producción. En la Tabla 55 se puede ver el monto necesario de inversión para comprar la maquinaria utilizada en el sistema de producción, que es de Q1, 520,000. Los precios utilizados son los promedios presentados en las cotizaciones.

Después de realizar el análisis de la inversión inicial de maquinaria, se necesitan los costos operativos de la empresa. Estos costos operativos mensuales son de Q711, 790.35 ver Tabla 54.

Tabla 55. Inversión inicial necesaria para sistema de producción propuesto

| MAQUINARIA A UTILIZAR | COSTO |
|------------------------------------|----------------------|
| FRESADORA CNC 1 | Q 360,000.00 |
| FRESADORA CNC 2 | Q 360,000.00 |
| TORNO CNC | Q 400,000.00 |
| INYECTORA | Q 400,000.00 |
| INVERSION INICIAL NECESARIA | Q1,520,000.00 |

(Elaboración propia)

Se puede apreciar que el monto necesario como inversión inicial es de Q1,520,000 . Como la mayoría de proyectos de beneficio social, sin intención de generar lucro. Para adquirir esta suma de dinero es necesario valerse de financiamientos provenientes de asociaciones, instituciones gubernamentales, no gubernamentales, instituciones privadas, entre otros. El monto necesario, sin embargo, no se puede comparar con el beneficio que este proceso puede llegar a brindar.

Los datos calculados anteriormente serán utilizados para realizar un análisis de valor presente neto. En el mismo se tomará en cuenta la inversión inicial, los gastos operativos mensuales, y como "ingresos" mensuales se tomará el ahorro que se deriva de la comparación del costo de fabricación con el sistema propuesta, con el costo de fabricación individual. Esta diferencia hace hasta un monto de Q10, 008.15 por unidad.

Se utilizará una tasa mínima atractiva de retorno del 14%. Esta tasa fue calculada utilizando datos del porcentaje de inflación, tasa de interés líder y de riesgo en proyectos de tecnología.

Tabla 56. Análisis de Valor Presente Neto.

| mes | Inversion Inicial | Costos mensuales | Ahorro mensual | Flujo Neto |
|-----|-------------------|------------------|----------------|------------------|
| 0 | Q (1,520,000.00) | | | Q (1,520,000.00) |
| 1 | | Q (711,790.35) | Q 3,232,632.45 | Q 2,520,842.10 |
| 2 | | Q (711,790.35) | Q 3,232,632.45 | Q 2,520,842.10 |
| 3 | | Q (711,790.35) | Q 3,232,632.45 | Q 2,520,842.10 |
| 4 | | Q (711,790.35) | Q 3,232,632.45 | Q 2,520,842.10 |
| 5 | | Q (711,790.35) | Q 3,232,632.45 | Q 2,520,842.10 |
| 6 | | Q (711,790.35) | Q 3,232,632.45 | Q 2,520,842.10 |

VPN Q 8,282,716.79

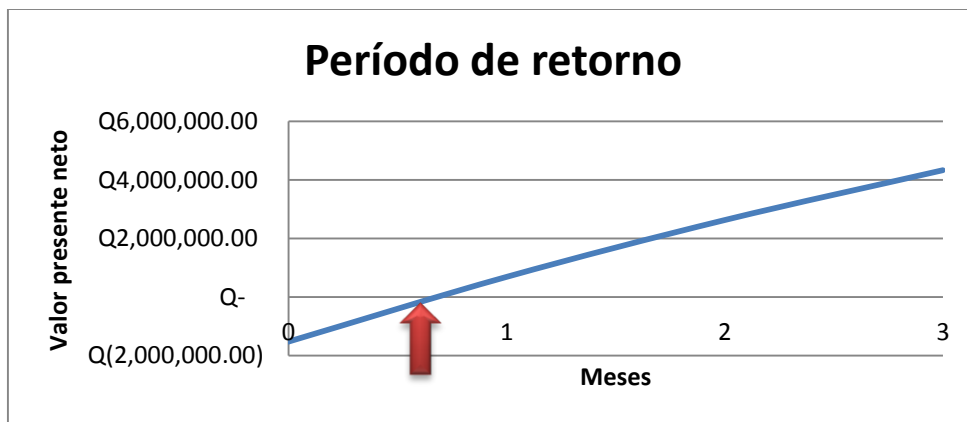
(Elaboración propia)

Tabla 57. Análisis del período de retorno.

| mes | Flujo Neto | Retorno |
|-----|------------------|---------------------|
| 0 | Q (1,520,000.00) | Q (1,520,000.00) |
| 1 | Q 2,520,842.10 | Q 691,265.00 |
| 2 | Q 2,520,842.10 | Q 2,630,971.14 |
| 3 | Q 2,520,842.10 | Q 4,332,467.75 |
| 4 | Q 2,520,842.10 | Q 5,825,008.64 |
| 5 | Q 2,520,842.10 | Q 7,134,255.04 |
| 6 | Q 2,520,842.10 | |

(Elaboración propia)

Figura 153. Análisis del período de retorno.



(Elaboración propia)

Utilizando los datos obtenidos a partir de la Figura 152, se puede calcular la función del valor presente neto respecto a los meses, esto para saber exactamente en cuanto tiempo se retorna la inversión.

$$\begin{aligned}
 & y=mx+b \\
 M= & (y_2-y_1)/(x_2-x_1) = 2,211,265.00 \\
 b= & y-mx = (1,520,000.00) \\
 y=0 & \quad \quad \quad 0.69 \text{ meses para recuperarse}
 \end{aligned}$$

En donde (y_2-y_1) representa la diferencia entre los VPN de los meses 0 y el 1, (x_2-x_1) representa la diferencia entre los meses 0 y 1, y m representa la relación entre estos dos. Cuando se iguala el valor presente neto a cero ($y=0$), significa que ya no se tiene un VPN negativo, es en este punto exacto en donde se recupera la inversión.

Como se puede ver en la Tabla 57, la inversión inicial se recupera en el primer mes de operación, (exactamente en el primer 70% transcurrido del mes) ver Figura 57. Dentro de este primer mes, se recupera la inversión inicial utilizada, lo que hace que este proyecto sea atractivo y rentable. Por otro lado, también, el valor presente neto, para los primeros 6 meses es de Q8, 282,716.79 (ver Tabla 33), y nos indica que el proyecto sí es rentable, y que es la mejor opción a utilizar para la fabricación de la prótesis. Esto se debe principalmente a que los costos de operación en este sistema son bajos comparados con los costos de fabricación individual. La manufactura individual de las diferentes partes, con diferentes proveedores, hacen que cada pieza sea muy costosa, agregando también que muchos de los materiales son importados, así como algunos maquinados que son realizados fuera del país.

El sistema de fabricación propuesto representa una forma más económica de producir prótesis a gran escala. Esto no solo supone un beneficio de ahorro, sino que también representa un gran beneficio para la sociedad. El bajo costo de fabricación de esta prótesis de antebrazo y mano permitiría que personas de bajos recursos tengan acceso a la misma, logrando un importante impacto positivo en la sociedad guatemalteca. Este sistema de producción, sin fines de lucro, brinda a la población guatemalteca la oportunidad de poder contar con una prótesis accesible y de alta tecnología, que les ofrezca confianza y la oportunidad de superación personal. Es por ello que el sistema de producción propuesto representa la forma más viable para la fabricación de la prótesis.

XI. CONCLUSIONES

1. Los electrodos de superficie elegidos fueron los de plata cloruro de plata por presentar los mejores resultados y se colocaron en el antebrazo justo sobre el nervio radial a una distancia de 5.5cm medidos desde el codo hasta donde se colocaron los electrodos.
2. Calcular la energía de la señal electromiográfica fue uno de los criterios más importantes que contribuyó para determinar qué movimiento se estaba produciendo.
3. El nervio radial contrae el grupo de músculos que controla los movimientos de agarre de la mano y la apertura. Por esta razón se decidió colocar los electrodos en ese punto. En otros lugares del antebrazo se podían medir algunos movimientos, pero en la ubicación seleccionada se pudo detectar tres movimientos distintos con la mayor amplitud posible.
4. Se debe utilizar una etapa de pre filtrado de la señal electromiográfica para ajustar la señal a los parámetros requeridos por el ADC en este caso se ajustó la señal de 0 a 1.8 voltios. El filtro utilizado para obtener estos resultados fue un pasa altas que tiene una frecuencia de corte de 20 Hz.
5. El segundo filtro fue digital y se encuentra a 200Hz. Se eligió esta frecuencia, porque se encuentra la mayor cantidad de energía y contenido espectral de la señal.
6. El prototipo funciona adecuadamente sin importar la cantidad de fuerza que realice la persona, debido a que la etapa de preamplificación normaliza la señal evitando la sobre elevación en el nivel de voltaje.
7. La detección de un movimiento en particular se produce por la superposición de varias ondas producidas por la contracción muscular. Esto se debe a que se estudió un grupo de músculos y no una fibra muscular.
8. En todos los movimientos que se estudiaron se producen todas las frecuencias desde 0Hz hasta 4kHz, por lo que no se puede filtrar solo una frecuencia para detectar un movimiento en particular.
9. En el BeagleBone Black se realizó todo el procesamiento de la señal que consistió en filtrar la señal con una frecuencia de muestreo de 760Hz. Contar los cruces por cero de la señal, cambios de pendiente y medir la cantidad de energía. Estas técnicas se detallaron en los resultados.

10. La técnica utilizada para el análisis del espectro de la señal electromiográfica fue la transformada rápida de Fourier, debido a que se puede analizar por ventanas o intervalos de tiempo. Para este módulo se usaron intervalos de 250uS. Y esto ayudó a encontrar las frecuencias de corte para los filtros.
11. La mejor opción es utilizar un análisis en frecuencia y tiempo para tener una conclusión más certera del movimiento que se está produciendo.
12. El dispositivo Arduino Uno no provee la cantidad de entradas o salidas para lograr cumplir con los requerimientos previstos de velocidad, pines de muestreo y pines de uso que permitieran expansión.
13. El Raspberry Pi, aunque provee un poder de procesamiento superior a un microcontrolador, no puede muestrear señales y posee una limitada cantidad de formas de comunicación que además restringen su uso para futuras expansiones que se deseen utilizar.
14. El sistema de control, al tener únicamente una constante de proporcionalidad igual a uno, prueba que un sistema PID no es necesario.
15. A pesar que por su cuenta el BBB y el PIC no pueden proporcionar el procesamiento necesario, la combinación entre ambos permite una disponibilidad de recursos mucho mayor.
16. Al agregar al sistema una retroalimentación de presión, esta bastó para estabilizar al sistema.
17. Al no tomar en cuenta métodos de selección de las constantes de integración, diferenciación y proporcionalidad, los valores seleccionados para estas constantes no son las óptimas.
18. El eje adicional, colocado en un segundo servo que corrige la tensión de los tendones, provee una solución temporal de compensación al movimiento de muñeca, ya que el material utilizado se degrada con facilidad.
19. La placa manufacturada provee los requerimientos necesarios de espacio y funcionalidad deseados.
20. El HYPERION DS11-AMB reemplazó al FUTABA S3102, mejorando el torque de 3.67 a 4.2 kilogramos por centímetro y disminuyendo el peso de 21 a 10.5 gramos.
21. El HYPERION DS20-UMD reemplazó al HITEC HS-7955TG, mejorando el torque de 18 a 20.9 kilogramos por centímetro y disminuyendo el peso de 65 a 53 gramos.
22. Se consiguieron dos motores HYPERION DS11-AMB para añadir en el antebrazo y

así mantener la posición de los dedos cuando se mueva el servomotor de la muñeca.

23. Se añadió el servomotor BLUE BIRD BMS-303DD para poder extender el dedo pulgar completamente, sin embargo hay que realizar modificaciones mecánicas para obtener resultados notables.
24. El peso de la mano y la muñeca disminuyó de 149 gramos a 98.7.
25. La corriente máxima que consume el circuito de potencia es de 5,305 miliamperios.
26. La corriente máxima que consume la prótesis medida con es de 1,783 miliamperios.
27. Se utilizaron 2 disipadores de calor para el circuito de potencia.
28. Se tiene la opción de utilizar un ventilador de 12 voltios o de 5 voltios para disipar la potencia del circuito de potencia. Actualmente se está utilizando el de 5 voltios.
29. La temperatura máxima de los transistores de potencia no excede el máximo de 150 grados Celsius recomendado por el fabricante. Las temperaturas máximas de los transistores son 99.13, 112.59 y 136.38 grados Celsius.
30. La temperatura máxima temperatura del regulador de 5 voltios no excede el máximo de 125 grados Celsius recomendado por el fabricante. La temperatura máxima que alcanza es de 117.44 grados Celsius.
31. La temperatura máxima temperatura del regulador de 7 voltios no excede el máximo de 150 grados Celsius recomendado por el fabricante. La temperatura máxima que alcanza es de 66.88 grados Celsius.
32. La luz indicadora de energía baja de la batería del circuito de potencia se enciende cuando la batería tiene un voltaje menor a 9.5 voltios.
33. El cambio de 4.8 a 6 voltios no se logró realizar, porque no se obtuvo el componente adecuado para aislar los circuitos en la comunicación I2C.
34. Una batería de polímero de litio es mejor que una de níquel metal para alimentar el circuito de la prótesis, porque es más liviana y ofrece mejor portabilidad.
35. Se necesitan dos baterías para el funcionamiento de la prótesis para aislar completamente el sistema de control del sistema de potencia.
36. La batería que se consideró para el circuito de control es de polímero de litio. Tiene un voltaje nominal de 11.1 voltios y una capacidad de 2,200 miliamperehora.

37. La batería que se consideró para el circuito de potencia es de polímero de litio. Tiene un voltaje nominal de 11.1 voltios y una capacidad de 5,000 miliamperehora.
38. El largo del antebrazo fue reducido 9.5 centímetros.
39. El codo de la prótesis ya no se implementó en el proyecto, porque la estructura era demasiado grande en comparación con el resto de la prótesis.
40. Se logró diseñar un sistema de producción para la prótesis biónica de antebrazo y mano que redujo su costo de producción hasta casi un quinto de su costo por fabricación individual.
41. Para lograr un mejor control de actividades, es necesario que cada integrante del equipo se familiarice lo más posible con las tareas que debe realizar, para así saber con más certeza los recursos que necesitará.
42. El sistema de producción propuesto si es una opción viable para la fabricación de la prótesis, ya que comparado con la producción individual brinda un mayor beneficio y tiene un costo de fabricación más bajo.
43. La fabricación de la prótesis con el sistema de producción propuesto no solo brinda un mayor beneficio en cuanto a ahorro, comparado con la producción individual, sino que también es un gran beneficio para la población guatemalteca.
44. El manual de usuario fue diseñado para ser comprendido fácilmente, y como una herramienta que brinda la información más importante para que el usuario pueda utilizar la prótesis correctamente.
45. Los gastos incurridos en esta etapa del Megaproyecto fueron más bajos que en las etapas anteriores, ya que utilizamos piezas que ya habían sido compradas en etapas anteriores. El informe realizado será de gran ayuda para otros grupos que quieran darle continuidad a este proyecto.
46. Guatemala es un país en desarrollo, y es muy importante que nosotros seamos parte de él. Como estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala, aportar al progreso del país es un deber, y si conjuntamente ayudamos a la sociedad, estamos contribuyendo con la superación del país entero.

XII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda para etapas futuras, seguir investigando ubicaciones para los electrodos de superficie con el apoyo de un médico especialista en el área de interés. Eso ayudará a ubicar los músculos con más rapidez.
2. En varios lugares de la bibliografía se recomienda utilizar redes neuronales como técnica para la detección de los patrones en los movimientos. Dentro de los objetivos de esta etapa no se encontraba usar redes neuronales, pero se recomienda implementarlas después de realizar el análisis en tiempo y en frecuencia que se realizó esta etapa.
3. Se recomienda restar la señal del músculo relajado con la señal de cualquier movimiento, para observar las características de la señal con más detalle.
4. Se recomienda realizar más pruebas con diferentes personas y diferentes técnicas de detección de patrones para obtener resultados más exactos.
5. El trabajo con el BBB, permitió desarrollar efectivamente un sistema funcional que permite la expansión. Se recomienda explotar el potencial tanto de hardware como de software que ofrece el BBB para hacer más eficiente el código de control.
6. El eje que compensa el movimiento de muñeca, al estar hecho de plástico de una impresora 3D, ofrece una solución temporal únicamente. Se recomienda cambiar el material con el que este es manufacturado a uno que ofrezca mayor durabilidad.
7. Se recomienda hacer una investigación sobre diseños mecánicos que aumenten la eficiencia de la compensación de tensión de los tendones en relación al movimiento de la prótesis de muñeca.
8. Se recomienda realizar un diseño de control más exhaustivo que abarque modelos de diseño analíticos
9. Se recomienda un diseño de placas genérico en el que se contemple aplicar una expansión futura.
10. Implementar un diseño de codo que sea efectivo y proporcional al resto de la prótesis.
11. Realizar un estudio de flujo del aire para poder seleccionar un ventilador más compacto.

12. Utilizar un sensor de temperatura y un circuito para controlar el encendido y apagado del ventilador.
13. Analizar otras opciones de motores y mecanismos para reducir el tamaño de la prótesis y sus circuitos, por ejemplo motores de corriente directa brushles.
14. Utilizar la pasta térmica de AAVID THERMALLOY con resistencia térmica por unidad de área de $0.03 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{in}^2/\text{W}$.
15. Modificar la adquisición de datos de los sensores de presión, para poder cambiar el regulador de 7 voltios por uno de 5 y así disminuir el voltaje necesario por el circuito de control.
16. Hacer mediciones de temperatura de los disipadores de calor durante el funcionamiento de la prótesis para determinar si el componente se mantiene a una temperatura que no lo dañe. Se recomienda que sea la mitad del máximo recomendado por el fabricante. Si no es el caso, cambiar los disipadores de calor o los ventiladores.
17. Realizar un diseño mecánico, para poder colocar el ventilador junto a los disipadores de calor.
18. Utilizar un circuito aislador para comunicación I2C para poder realizar el cambio de voltaje de 4.8 a 6 voltios, como los que se muestran en el paper de NXP Semiconductors (referencia bibliográfica 47).
19. Implementar el uso de optoacopladores para poder tener una retroalimentación de la posición de los servomotores y así mejorar el sistema de control interno.
20. Se debe dedicar tiempo suficiente al estudio específico de las actividades que se deban de realizar durante el desarrollo del proyecto, para poder plantear un solo Gantt, y no incurrir a modificaciones durante el proceso.
21. Para realizar costos proyectados al inicio del proyecto, y que estos no varíen tanto de los reales, es necesario que cada miembro del grupo estudie a detalle los procedimientos que va a tener que llevar a cabo, así como los materiales y herramientas que va a necesitar.
22. Es recomendable utilizar la tecnología de carpetas compartidas en grupo por internet, ya que esto ayuda de gran manera a la comunicación y a que todos los miembros del grupo puedan tener acceso a la información que necesiten.
23. Se recomienda llevar un control de presupuesto detalla y ordenadamente, ya que esos datos van servir a grupos que trabajen en etapas posteriores.

24. Para poder realizar un análisis más certero, es necesario tener un mejor control de estudios estadísticos en Guatemala.
25. Para bajar aún más los costos, sería recomendable hacer un estudio de materiales. Esto para investigar de materiales que cumplan, o sean muy parecidas, a las características deseables, pero que tengan un menor costo.
26. Se recomienda para etapas posteriores del proyecto, que se realice un estudio de mercado para determinar la demanda real para prótesis biónicas de antebrazo y mano.

12. All-Battery. *Tenergy 11.1V 5000mAh 25C LIPO Battery Pack for RC Cars w/ choices of Dean or Traxxas Connector*. <http://www.all-battery.com/111volt-5000mah25cli-polylipobatterypack.aspx> [20/09/2014]
13. Analog Devices. (2003). Obtenido de AD620, Data Sheet: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD620.pdf
14. Analog Devices. (2004). Obtenido de AD706, Data Sheet: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD706.pdf
15. Arduino, "Arduino," Arduino S.A., 2014. [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. [Accessed 20 Enero 2014].
16. Área tecnológica. (2003). *Técnicas Analógicas con Amplificadores Operacionales*. Recuperado el 4 de marzo de 2014. <http://www.areatecnologia.com/amplificadores-operacionales/amplificador-operacional-introduccion.htm>
17. AriesRC. *HXT 9320MG-180 20.2g / 3.8kg / .15sec 180Degree*. <http://www.ariesrc.gr/7865-hxt-9320mg-180-202g-38kg-15sec-180degree.html> [18/09/2014]
18. Arydol. (2008). *Anatomía plexo braquial*. Recuperado el 26 de marzo de 2014. http://www.arydol.es/anatomia-plexo-braquial.php#oogletto:http://www.arydol.es/images/anatomia/plexo_braquial/16.jpg
19. Barr, "Embedded," UBM Tech, 31 Agosto 2001. [Online]. Available: <http://www.embedded.com/electronics-blogs/beginner-s-corner/4023833/Introduction-to-Pulse-Width-Modulation>. [Accessed 3 Mayo 2014].
20. Basmajian, J. V, DE Luca C. J. (1985). *Muscles alive. Their function revealed by electromyography*. Williams & Wilkens, Baltimore.
21. Baterías, La mejor página sobre baterías para uso automodelero del mundo mundial. <http://automodelismo.com/nicd.htm> [31/08/2014]
22. BeagleBoard, "Beagleboard.org," Beagleboard.org, 2014. [Online]. Available: <http://beagleboard.org/black>. [Accessed 1 Septiembre 2014].
23. Beagleboard. (2014). *Descripción y características del Beagleboard*. Recuperado el 4 de julio de 2014. <http://beagleboard.org/>

24. Blue Bird Model. *BMS-385DMAX 17g Digital Micro Servo*. <http://www.blue-bird-model.com/en/servos/bms-385dmax.html> [18/09/2014]
25. Buchón G. (2007). *Estimación del riesgo y evaluación simple la manipulación repetitiva a alta frecuencia relacionada*. Recuperado el 10 de agosto de 2014. <http://www.ergocv.com/ergonomia/metodo-de-la-norma-une-en-1005-5-ocra>
26. Calculatoredge. *Air Flow Conversion Calculator*. <http://www.calculatoredge.com/optical%20engg/air%20flow.htm> [22/09/2014]
27. Caner, "Active State Code," 19 Mayo 2010. [Online]. Available: <http://code.activestate.com/recipes/577231-discrete-pid-controller/>. [Accessed 3 Abril 2014].
28. Cengel, Yunus A. 2007. *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA, Un enfoque práctico*. 3ª ed. México: Libros McGraw-Hill de México. 930 págs.
29. Chain, N. 2007. *Proyectos de inversión: formulación y evaluación*. Pearson. Prentice Hall. México. P 97-256
30. Chase, R; R. Jacobs y N. Aquilano. 2009. *Administración de operaciones: producción y cadena de suministros*. Duodécima edición. McGraw-Hill. México 800 p.
31. Chiavenato Idalberto, *Introducción a la teoría general de la administración*, 7a. ed., McGraw-Hill Interamericana, 2004, p. 310.
32. Chriskner, "Cannot run a python script on startup," Google, 13 Mayo 2014. [Online]. Available: <https://groups.google.com/forum/embed/?place=forum/beagleboard&showsearch=true&showpopout=true&showtabs=true&hideforumtitle=true&parenturl=http%3A%2F%2Fbeagleboard.org%2FCommunity%2FForums#!category-topic/beagleboard/newbies/ND37r6w1y-4>. [Accessed 28 Julio 2014].
33. Cifuentes Irving. (2010). *Diseño y construcción de un sistema para la detección de señales electromiográficas*. Recuperado el 20 de marzo de 2014 <ftp://ftp.uady.mx/pub/tmp/smagana/TESIS%20FINALIZADA.pdf>
34. Coley, "BeagleBone Black System Reference Manual," beaglebone, beagleboard.org, 2013.
35. Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

- <http://www.cnee.gob.gt/Calculadora/Index.php> [29, septiembre de 2014]
36. Consumo maquinaria
37. Cooper, "Setting up IO Python Library on BeagleBone Black," Adafruit, 13 Junio 2013. [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/setting-up-io-python-library-on-beaglebone-black>. [Accessed 14 Julio 2014].
38. Coulter, M. *Administración*. Décima edición. Prentice-Hall. Estados Unidos. 425p.
39. D. Jepson and D. J. Fleet, "Computer Science University of Toronto," 2005. [Online]. Available: <http://www.cs.toronto.edu/~jepson/csc320/notes/slidesSampling.pdf>. [Accessed 5 Febrero 2014].
40. Diaz, O. *Administración de Empresas*. Mc graw-hill. 3ra. Ed. España, 2008, p. 425.
41. Digital Nemesis. *How R.C. Motors Work*. <http://www.digitalnemesis.com/info/docs/rcservo/> [29/08/2014]
42. Durda, "Serial and UART Tutorial," 29 Abril 2014. [Online]. Available: <https://www.freebsd.org/doc/en/articles/serial-uart/>. [Accessed 17 Agosto 2014].
43. Strangio, "The RS232 Standard," CAMI Research Inc., 2012. [Online]. Available: http://www.camiresearch.com/Data_Com_Basics/RS232_standard.html#anchor1155404. [Accessed 3 Mayo 2014].
44. Electro-control Team. *MENGAKSES MOTOR SERVO*. <https://electrocontrol.wordpress.com/tag/servo-motor/> [31/08/2014]
45. Electronic Components, http://www.tme.eu/es/katalog/perillas-para-potenciometros-de-eje_100026/?id_producer=139 [35, septiembre de 2014] perillas
46. Electronics Co. *CPU Cooler (D60188-001)* <http://tinajing90.en.made-in-china.com/product/RoHEVJPCaDkl/China-CPU-Cooler-D60188-001-.html> [22/09/2014]
47. eLinux.org, "Beagleboard: Updating The Software," eLinux.org, 5 Noviembre 2013. [Online]. Available: http://elinux.org/Beagleboard:Updating_The_Software#Flashing_the_e

MMC. [Accessed 28 Julio 2014].

48. *Estudio de Implantación de una Industria de motores Ubicada en Catalunya.*
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/13767/2/ANEXO%20I%20-%20Picarolia%20-%20Fichas%20de%20m%C3%A1quinas.pdf> [8, septiembre de 2014]
49. Fairchild Semiconductor. *4N25M, 4N26M, 4N27M, 4N28M, 4N35M, 4N36M, 4N37M, H11A1M, H11A2M, H11A3M, H11A4M, H11A5M General Purpose 6-Pin Phototransistor Optocouplers.*
<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/4N/4N25M.pdf> [21/09/2014]
50. Fairchild. *KA78XX/KA78XXA 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator.*
http://pdf.datasheetcatalog.net/datasheets/228/390068_DS.pdf
 [21/09/2014]
51. Fernando. (2009). *Músculos del antebrazo.* Recuperado el 16 de septiembre de 2014. http://lh3.ggpht.com/_8ISIK2q5fVw/STp65z0d1kl/AAAAAAAAA5jQ/XOVgBggEwBM/s800/Musculos%20Antebrazo01.png
52. Foxit Software. (2010). *Neuronas y potencial de acción.* Recuperado el 16 de septiembre de 2014.
<http://www.braincampaign.org/common/docs/files/2786/spchap2.pdf>
53. FUTABA. *Digital FET Servos.* <http://www.futaba-rc.com/servos/digitalservos.pdf>
 [31/08/2014]
54. Futaba. *Futaba S3102 Aircraft Micro Metal Gear Servo.*
<http://www.gpdealera.com/cgi-bin/wgainf100p.pgm?l=FUTM0034>
 [18/09/2014]
55. FUTURHOBBY. *Servo – High End 4213 MG de Jamara.*
http://www.futurhobby.com/rc/electronica-y-servos/servo-high-end-4213-mg-de-jamara_692.html [18/09/2014]
56. GoHaun, *"Bleeping Computer,"* Bleeping Computer LLC, 26 Agosto 2011. [Online]. Available: <http://www.bleepingcomputer.com/forums/t/219693/unable-to-format-usb-stick-to-full-capacity/>. [Accessed 29 Julio 2014].
57. Grand Wing Servo-Tech. *Digital Series.*
<http://www.gwsus.com/english/product/servo/digital.htm> [18/09/2014]
58. GRobotronics Learning, *"GRobotronics Learning,"* Julio 2013. [Online]. Available: http://learning.grobotronics.com/wp-content/uploads/2013/07/ac_shcematic.jpg.

[Accessed 20 de agosto de 2014 Agosto 2014].

59. Hitec. *ANNOUNCED SPECIFICATION OF HS-225BB MIGHT MINI SERVO.*
<http://www.robotshop.com/media/files/pdf/hs225bb.pdf> [18/09/2014]
60. HITEC. *General Servo Information.*
<https://physics.ucsd.edu/neurophysics/Manuals/Hitec/Servomanual.pdf>
 [31/08/2014]
61. Hitec. *GENERAL SPECIFICATION OF HS-5955TG CORELESS DIGITAL SERVO.*
<http://www.abcelectronique.com/forum/attachment.php?attachmentid=17303> [18/09/2014]
62. Hitec. *GENERAL SPECIFICATION OF HS-7955TG CORELESS DIGITAL SERVO.* <http://www.letmodel.cz/technical-data/serva/hs7955tg.pdf>
 [18/09/2014]
63. HobbyKing. *BMS-303-JST Ultra Micro Servo 0.7kg / .11sec / 3.4g.*
https://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__8749__BMS_303_JST_Ultra_Micro_Servo_0_7kg_11sec_3_4g.html [18/09/2014]
64. HobbyKing. *Turnigy 380MAX Micro Servo (Metal Gear) 4.1kg / .16sec / 17.4g.*
https://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__8760__Turnigy_380MAX_Micro_Servo_Metal_Gear_4_1kg_16sec_17_4g.html [18/09/2014]
65. Horgren, Charles; G, Sundem; J, Elliot. 2000. *Introducción a la contabilidad financiera.* Séptima edición. Prentice Hall. Pearson. México. P 538
66. Horngren, C; S, Datar y G, Foster. 2007. *Contabilidad de costos, un enfoque gerencial.* Pearson. Prentice Hall. México. P. 27.
67. HotSlots. *Differences in R/C Batteries – Charges.*
<http://www.hotslots132.com/differences-rc-batteries-chargers-a-268.html>
 [01/09/2014]
68. Hyperion, *"Hyperion Atlas Programmable Digital Servos - Wiring, Installation, Cautions,"* Hyperion, Mesa, Arizona, 2014.
69. Hyperion. *HYPERION ATLAS – PROGRAMMABLE DIGITAL SERVOS.*
<http://www.hyperion-eu.com/downloads/atlas/manuals/ATLAS-SPEC-01.pdf> [18/09/2014]
70. Hyperion. *HYPERION ATLAS – PROGRAMMABLE DIGITAL SERVOS.*
<http://www.hyperion-eu.com/downloads/atlas/manuals/ATLAS-SPEC->

02.pdf [18/09/2014]

71. Hyperion. *Hyperion Atlas DS11-AMB Servo – 11mm / 10g.* <http://www.hyperion-world.com/products/product/HP-DS11-AMB> [18/09/2014]
72. Hyperion. *Hyperion Atlas DS11-AMB Servo – 11mm / 10g.* <http://www.hyperion-eu.com/products/product/HP-DS11-AMB> [18/09/2014]
73. lcafe, "Code Project," 14 Mayo 2009. [Online]. Available: <http://www.codeproject.com/Articles/36459/PID-process-control-a-Cruise-Control-example>. [Accessed 3 Abril 2014].
74. Institute of Neurology. (2002). *Surface EMG for non-invasive assessment of muscles (SENIAM)*. Recuperado el 25 de marzo de 2014 <http://www.med.uni-jena.de/motorik/pdf/stegeman.pdf>
75. Intef. (2011). *EducaLab*. Recuperado el 16 de septiembre de 2014. <http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/1bachillerato/animal/imagenes/nervio/potenciacion.gif>
76. Intersil. (2008). Obtenido de X 9313 , Data Sheet: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/x931/x9313.pdf>
77. IPC, "Generic Standard on Printed Board Design," IPC, Northbrook, Illinois, 1998.
78. J. Carletti, Eduardo. *Servos, Características básicas.* http://robots-argentina.com.ar/MotorServo_basico.htm [29/08/2014]
79. Janssen, "techopedia," Janalta Interactive Inc. , 2104. [Online]. Available: <http://www.techopedia.com/definition/17929/binary-data>. [Accessed 14 Junio 2014].
80. Johnny-5, "Trossen Robotics Community," vBulleting, 29 Julio 2009. [Online]. Available: <http://forums.trossenrobotics.com/tutorials/how-to-diy-128/get-position-feedback-from-a-standard-hobby-servo-3279/>. [Accessed 4 Marzo 2014].
81. Keller, "Military & Aerospace Electronics," PennWell Corporation, 27 Junio 2012. [Online]. Available: <http://www.militaryaerospace.com/articles/2012/06/navy-board-solicitation.html>. [Accessed 10 Septiembre 2014].
82. KEMET. *Commercial Off-the-Shelf (COTS) for Higher Reliability Applications, X7R Dielectric, 6.3 – 250 VDC.* <http://www.kemet.com/docfinder?Partnumber=C0402T104K4RALTU>

[21/09/2014]

83. KOA. *RN73 ultra precisión 0.05%, 0.1%, 1% tolerance thin film chip resistor*.
<http://www.koaspeer.com/catimages/Products/RN73/RN73.pdf>
 [21/09/2014]
84. Laird Technologies. *Tgrease 2500 Series Thermal Grease*.
<http://www.digikey.com/product-detail/en/A14399-02/926-1002-ND/2268500> [22/09/2014]
85. Lee, S. *HOW TO SELECT A HEAT SINK*. Avid Thermal Technologies, Inc.
<https://www.aavid.com/sites/default/files/technical/papers/how-to-select-heatsink.pdf> [09/09/2014]
86. LITE-ON. *Photocoupler Product Data Sheet 4N25/4N26 (M, S, S-TA1)*.
[http://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS-70-99-0010/S_110_4N25\(26\).pdf](http://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS-70-99-0010/S_110_4N25(26).pdf) [21/09/2014]
87. López, Magda, et al. 2013. *Prótesis abierta para amputaciones transradiales*. Tesis Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala. 651 págs.
 Demanda
88. M. Fauske, "TEXample.net," TEXample.net, 23 Noviembre 2006. [Online].
 Available: <http://www.texample.net/tikz/examples/control-system-principles/>.
 [Accessed 5 Julio 2014].
89. M.Parada, F.Simón. (2004). *Amplificadores operacionales*. Recuperado el 3 de marzo de 2014.
http://www.dte.us.es/ing_inf/ins_elec/temario/Tema%201.%20Amplificadores%20Operacionales.pdf
90. Martínez, Daniel; A, Milla. 2005. *La elaboración del plan estratégico y su implementación a través del cuadro de mando integral*. Ediciones Díaz de Santos. España. P. 199
91. Mauney, C. *Thermal Considerations for Surface Mount Layouts*. Texas Instruments.
<http://focus.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%2010%20-%20Thermal%20Design%20Consideration%20for%20Surface%20Mount%20Layouts%20.pdf> [09/09/2014]
92. MaxiFLOW. *ATS PART # ATS-1181-C1-R0*. <http://www.digikey.com/product-detail/en/ATS-1181-C1-R0/ATS1491-ND/4146474> [22/09/2014]
93. Mazariegos, Pablo. 2012. *Diseño e implementación de un nuevo modelo de la mano de la Prótesis Biónica Transhumeral*. Tesis Universidad del Valle de

Guatemala. Guatemala. 185 págs

94. Medical cell biology. (2007). *Generación y conducción de potencial de acción*. Recuperado el 16 de septiembre de 2014. <http://163.178.103.176/Tema1G/Grupos1/BerneT1/aCap3Berne/Berne30a.jpg>
95. Microchip, "MCP4017/18/19," Microchip, 2009.
96. Microchip, "PIC16F882/883/884/886/887," Microchip Technology Inc., 2009.
97. Microchip. *MCP4017/18/19 7-Bit Single I2CTM Digital POT with Volatile Memory in SC70*. <http://www.mouser.com/ds/2/268/22147a-54123.pdf> [21/09/2014]
98. Money Harris, D. y Weste, N. 2011. *CMOS VLSI DESIGN, A Circuits and Systems Perspective*. 4ta ed. Estados Unidos de América: Pearson Education, Inc. 867 págs.
99. Neperud Julia. (2011). *Radanatomy*. Recuperado el 16 de septiembre de 2014. <http://classes.kumc.edu/sah/resources/handkines/images/eeextdigcom m.gif>
100. Niebel, Benjamín; A, Freivalds. 2009. *Ingeniería industrial: métodos, estándares y diseño de trabajo*. Duodécima edición. Mc Graw Hill. México. P. 19-20.
101. NXP, "NXP Semiconductors," Abril 2014. [Online]. Available: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf. [Accessed Septiembre 2014].
102. Nyquist, "Laboratorio de Procesado de Imagen," Abril 2005. [Online]. Available: <http://www.lpi.tel.uva.es/~santi/slweb/muestreo.pdf>. [Accessed 3 Abril 2014].
103. ON Semiconductor. *MJD44E3, NJVMJD44E3T4G Darlington Power Transistor DPAK For Surface Mount Applications*. <http://www.mouser.com/ds/2/308/MJD44E3-D-110775.pdf> [21/09/2014]
104. O'Reilly, "ss64," SS64.com, 1999-2014. [Online]. Available: <http://ss64.com/bash/>. [Accessed 30 Julio 2014].
105. Panasonic. *Metal Film (Thin Film) Chip Resistors, High Reliability Type 0402, 0603, 0805, 1206*. <http://www.mouser.com/ds/2/315/AOA0000CE26-197354.pdf> [21/09/2014]

106. Pascual, Ramón; J, Fonollosa. 1999. *Nuevas técnicas de gestión de stocks: MRP y JIT*. Alfaomega grupo editor. Productica. México
107. R. Groeneveld, "Logic Supply," Logic Supply Blog, 8 Julio 2013. [Online]. Available: <http://www.logicsupply.com/blog/2013/07/18/disabling-the-beaglebone-black-hdmi-cape/>. [Accessed 30 Julio 2014].
108. rcMart. <http://www.rcmart.com/rc-servo-micro-blue-bird-ultra-bms303jst-p-25020.html> [18/09/2014]
109. RC-Network Modellsport. *Graupner DS 292 MG*. http://wiki.rc-network.de/index.php/Graupner_DS_292_MG [18/09/2014]
110. RC-Network. *Jamara High End 4213 MG*. http://wiki.rc-network.de/Jamara_High_End_4213_MG [18/09/2014]
111. Reed, "Jameco Electronics," Jameco , 2014. [Online]. Available: <http://www.jameco.com/jameco/workshop/howitworks/how-servo-motors-work.html>. [Accessed 20 Mayo 2014].
112. RobotShop. *Basics: How Do I Choose a Battery*. <http://www.robotshop.com/blog/en/how-do-i-choose-a-battery-8-3585> [31/08/2014]
113. ROHM Semiconductor. *1A Output 78 series Regulators 500mA Output 78 series Regulators*. http://www.mouser.com/ds/2/348/ba78_series-e-316035.pdf [21/09/2014]
114. S. Korkmaz, "Samil's Corner," Blogspot.com, 15 Septiembre 2004. [Online]. Available: <http://samilkorkmaz.blogspot.com/>. [Accessed 3 Abril 2014].
115. SciPy. (2014). *Diseño de filtro utilizando librerías de python*. Recuperado el 22 de julio de 2014. http://students.mimuw.edu.pl/~pbechler/scipy_doc/generated/scipy.signal.butter.html
116. SciPy. (2014). *Instalación de SciPy*. Recuperado el 20 de julio de 2014. <http://www.scipy.org/install.html>
117. SENA, *Análisis de Circuitos: CORRIENTE DE MALLAS*. <http:// analisisdecircuitos sena.blogspot.com/> [09/09/2014]
118. SENIAM. (2006.) *Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles*. Recuperado el 22 de marzo de 2014. <http://www.seniam.org/>

119. Servocity. S3102 Micro MG.
http://www.servocity.com/html/s3102_micro_mg.html [18/09/2014]
120. Servodatabase. Hitec HS-5955TG – Ultra Torque Servo.
<http://www.servodatabase.com/servo/hitec/hs-5955tg> [18/09/2014]
121. Servodatabase. Search Matches (1).
<http://www.servodatabase.com/servos?weight=lt-61.8&torque48=gt-249&speed48=lt-0.20&width=lt-0.8&length=lt-1.59&height=lt-1.47> [18/09/2014]
122. Servodatabase. Search Matches (18).
<http://www.servodatabase.com/servos?weight=lt-30&torque48=gt-50&speed48=lt-0.26&width=lt-0.52&length=lt-1.11&height=lt-1.19> [18/09/2014]
123. Servodatabase. Search Matches (6).
<http://www.servodatabase.com/servos?weight=lt-4&torque48=gt-7&width=lt-0.43&length=lt-0.85&height=lt-0.83> [18/09/2014]
124. Servodatabase. Search Matches (6).
<http://www.servodatabase.com/servos?weight=lt-61.8&torque48=gt-249> [18/09/2014]
125. Society of Robots, "Society of Robots," Robotbits.co.uk, 2014. [Online]. Available: http://www.societyofrobots.com/microcontroller_uart.shtml. [Accessed 4 Junio 2014].
126. Society Of Robots. ATUATORS – SERVOS.
http://www.societyofrobots.com/actuators_servos.shtml [29/08/2014]
127. Society Of Robots. ROBOT BATTERIES.
<http://www.societyofrobots.com/batteries.shtml> [01/09/2014]
128. Society Of Robots. SCHEMATICS – ROBOT POWR REGULATION
http://www.societyofrobots.com/schematics_powerregulation.shtml [01/09/2014]
129. Solares. M (2014). Autoría propia
130. ST, "Digikey.com," 2007. [Online]. Available: <http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/ST%20Microelectronics%20PDFS/STEVAL-ILL004V1%20AN2263%20AppNote%20.pdf>. [Accessed Agosto 2014].
131. T. Jakaveri, "Flashing BeagleBone Black (rev B, 2GB eMMC) with Ubuntu 14.04," Blogger, 14 Mayo 2014. [Online]. Available: <http://blog.asiantuntijakaveri.fi/2014/05/flashing-beaglebone-black-rev-b-2gb.html>. [Accessed 18 Mayo 2014].

132. TDK. C1608X7R1H334K080AC.
<http://www.mouser.com/ds/2/400/C1608X7R1H334K080AC-264671.pdf> [21/09/2014]
133. TDK. *CAPACITOR COMMERCIAL GRADE AUTOMOTIVE GRADE HIGH RELIABILITY APPLICATIONS.*
http://www.tdk.com/pdf/mlcc_prod_guide/MLCC%20Product%20Guide%20A14.pdf
[21/09/2014]
134. Texas Instrument. *LM2662/LM2663 Switched Capacitor Voltage Converter.*
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2662.pdf> [21/09/2014]
135. Texas Instruments, *"KeyStone Architecture Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART) User Guide,"* Texas Instruments Incorporated, Dallas, 2010.
136. Texas Instruments. (1999). Obtenido de LM7905, Data Sheet:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7905.pdf>
137. Texas Instruments. (2013). Obtenido de LF353, Data Sheet:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf353-n.pdf>
138. Texas Instruments. *LM2662/LM2663 Switched Capacitor Voltage Converter.*
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2662.pdf> [21/09/2014]
139. Texas Instruments. *Quadruple Operational Amplifiers.*
<http://www.ti.com/lit/ds/slos066v/slos066v.pdf> [21/09/2014]
140. Tutorials Point, *"Python Multithreaded Programming,"* Tutorials Point, 2006.
[Online]. Available: http://www.tutorialspoint.com/python/python_multithreading.htm.
[Accessed 16 Julio 2014].
141. Universidad de Córdoba. (2013). *Sumador no inversor con amplificador operacional.* Recuperado el 10 de marzo de 2014.
<http://www.uco.es/~el1lirem/wap/teoria/EAnalogica/Tema4/sum.inv/fig.4.2.gif>
142. Vaughn, R.C. 1988. <<*Actividades Industriales, capacidad de dirección*>>
Introducción a la Ingeniería Industrial. España: Libros de Editorial Reverté España.
Págs. 1-30.
143. Vishay. *High Stability Thin Film Flat Chip Resistors.*
http://www.mouser.com/ds/2/427/tnpw_e3-64594.pdf [21/09/2014]
144. Wakefield Thermovations. *SIMPLIFIED METHOD FOR ESTIMATING HEAT SINK THERMAL RESISTANCE – GSA FORCED CONVECTION APPLICATIONS.*

https://www.digikey.cn/Web%20Export/Supplier%20Content/Wakefield%20_345/PDF/wakefield-pi-estimating-heatsink-resistance.pdf?redirected=1 [09/09/2014]

145. Z. Thorson, "*can not disable HDMI in uEnv.txt*," Google, 25 Noviembre 2013. [Online]. Available: https://groups.google.com/forum/#!msg/beagleboard/aU__9RGq3xU/-BYEWEqtmxYJ. [Accessed 30 Julio 2014].
146. Zeeshan O Khokhar, Zhen G Xiao, y Carlo Menon. (2010). *Surface EMG pattern recognition for real-time control of a wrist exoskeleton*. Recuperado el 15 de febrero de 2014. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2936372/>

XIV. GLOSARIO

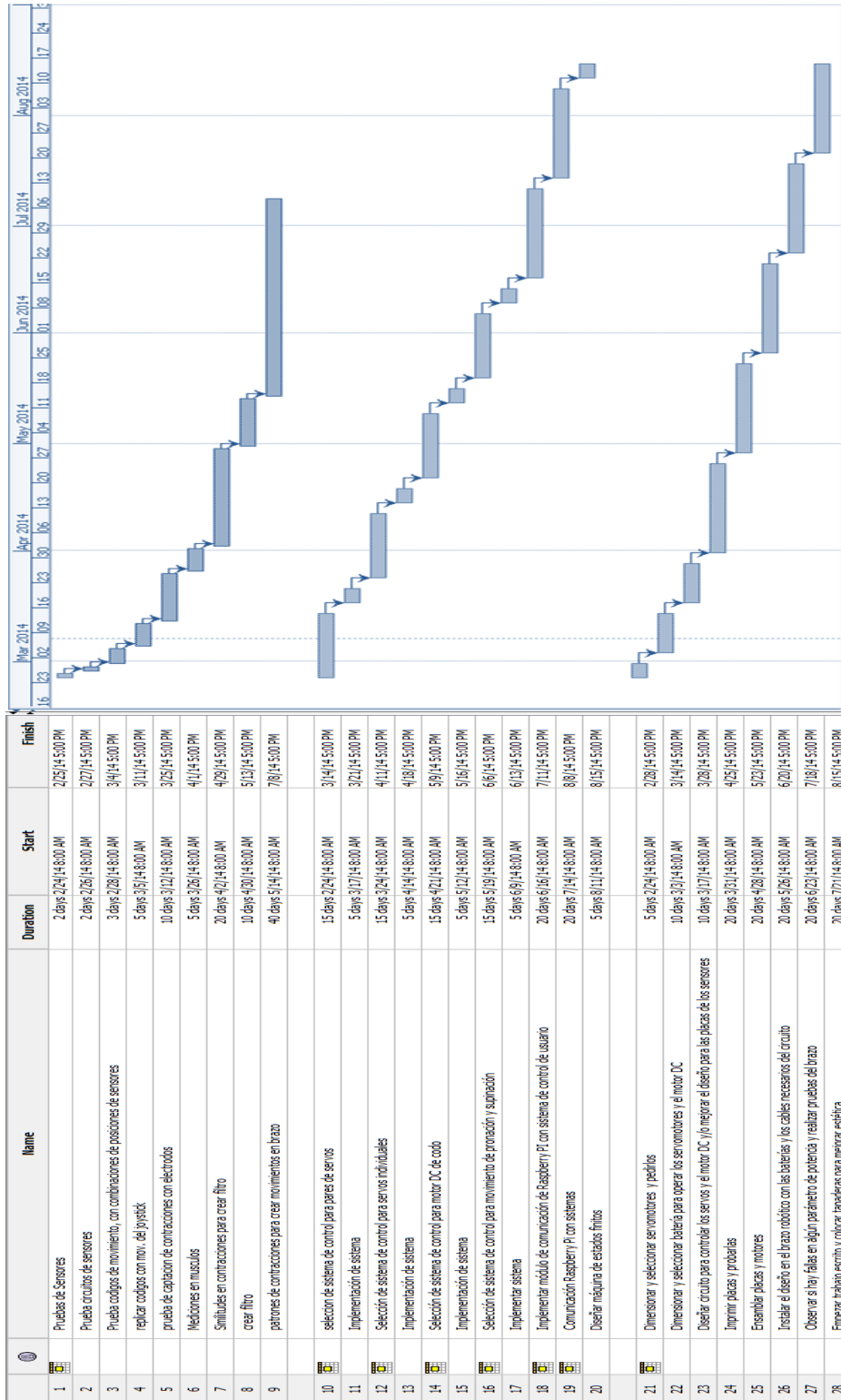
1. **Amplificador operacional:** integrado electrónico que puede utilizarse para varias funciones como sumador de voltaje, seguidor de voltaje, comparador de voltaje, entre otros.
2. **Analógico:** Adjetivo utilizado para describir señales que varían de forma continua en el tiempo y pueden tomar valores infinitos.
3. **Automatización:** Se refiere a la adaptación de un sistema a su entorno, sin necesidad de la intervención del ser humano.
4. **Batería:** dispositivo que convierte energía química en eléctrica.
5. **Bit:** Unidad de información binaria.
6. **Botón:** Interruptor o switch que permite o no el flujo de corriente.
7. **Byte:** Conjunto de ocho bits.
8. **Capacitor:** dispositivo electrónico que tiene la capacidad de almacenar energía eléctrica.
9. **Circuito eléctrico:** red eléctrica con una trayectoria cerrada como mínimo para permitir el flujo de corriente.
10. **Circuito integrado:** conjunto de componentes electrónicos básicos como resistencias, transistores y diodos, conectados en una lámina de material semiconductor y empaquetados en una caja de plástico.
11. **Comparador de voltaje:** arreglo electrónico que permite comparar dos voltajes.
12. **Corriente:** flujo de electrones en el tiempo.
13. **Datos binarios:** Información que puede tomar uno de dos valores, cero o uno.
14. **Digital:** Adjetivo utilizado para describir señales que varían de forma discreta y toman valores perfectamente definidos.
15. **Diodo emisor de luz:** diodo que con transforma la energía eléctrica a energía lumínica.
16. **Diodo:** componente electrónico que permite el flujo de corriente a través de él en un solo sentido.
17. **Divisor de voltaje:** arreglo de resistencias en serie para obtener un voltaje específico.

18. **Eje:** es un centro de rotación.
19. **Electromiografía:** es un examen que verifica la salud de los músculos y los nervios que controlan los músculos.
20. **Engranaje:** Conjunto de ruedas con dientes que cambian movimientos y torques.
21. **Esquemático:** esquema o diagrama de un circuito eléctrico.
22. **Frecuencia:** es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.
23. **Fuente de voltaje:** componente eléctrico que tiene un potencial diferencial en sus terminales y permite el flujo de corriente cuando son conectadas en un circuito eléctrico.
24. **Header:** componente que se coloca en una placa para poder hacer conexiones entre placas por medio de cables.
25. **Impedancia:** es la medida de oposición que presenta un circuito a una corriente cuando se aplica un voltaje.
26. **Ion:** es una partícula cargada eléctricamente.
27. **Memoria:** Dispositivo de almacenamiento de datos.
28. **Motor eléctrico:** dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de campos magnéticos.
29. **Optoacoplador:** dispositivo electrónico que sirve para aislar una parte de un circuito de otra. Está compuesto por un diodo y un transistor.
30. **Periodo:** tiempo en que tarda en repetirse una función.
31. **Potencial de acción:** también llamado impulso eléctrico, es una onda de descarga eléctrica que viaja a lo largo de la membrana celular modificando su distribución de carga eléctrica.
32. **Potencial de membrana en reposo:** es la diferencia de potencial que existe entre el interior y el exterior de una célula.
33. **Potenciómetro digital:** dispositivo que puede variar su valor resistivo por medio de un comando digital.
34. **Potenciómetro:** dispositivo que puede variar su valor resistivo.
35. **Procesador:** Dispositivo que ejecuta instrucciones, recibe datos y devuelve resultados.
36. **Prótesis:** Sustituto artificial de una extremidad u órgano del humano.

37. **Protoboard:** tablero con orificios para implementar circuitos físicamente sin necesidad de realizar alguna soldadura. También es conocido como una placa de prueba.
38. **Protocolo:** Conjunto de normas y procedimientos para la transmisión, reconocimiento y obtención de datos.
39. **Pulso:** onda cuadrada diferente de 0 voltios por un tiempo finito.
40. **Resistencia:** dispositivo eléctrico que se opone al flujo de electrones.
41. **Seguidor de voltaje:** arreglo electrónico para realizar una conexión en un circuito sin que se pierda el voltaje.
42. **Señal DC:** es aquella cuyas cargas eléctricas o electrones fluyen siempre en el mismo sentido
43. **Sistema de control:** Interconexión de dispositivos o código que permite la automatización de un proceso.
44. **Sumador de voltaje:** arreglo electrónico que permite sumar dos voltajes o más voltajes.
45. **Superposición:** es la suma de dos o más señales en un mismo canal.
46. **Tierra:** parte de un circuito con diferencia de potencial de 0 voltios.
47. **Transcubital:** Partes del cuerpo humano consistiendo desde la punta de los dedos hasta el antebrazo.
48. **Transhumeral:** Partes del cuerpo humano consistiendo desde la punta de los dedos hasta el codo.
49. **Voltaje:** diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

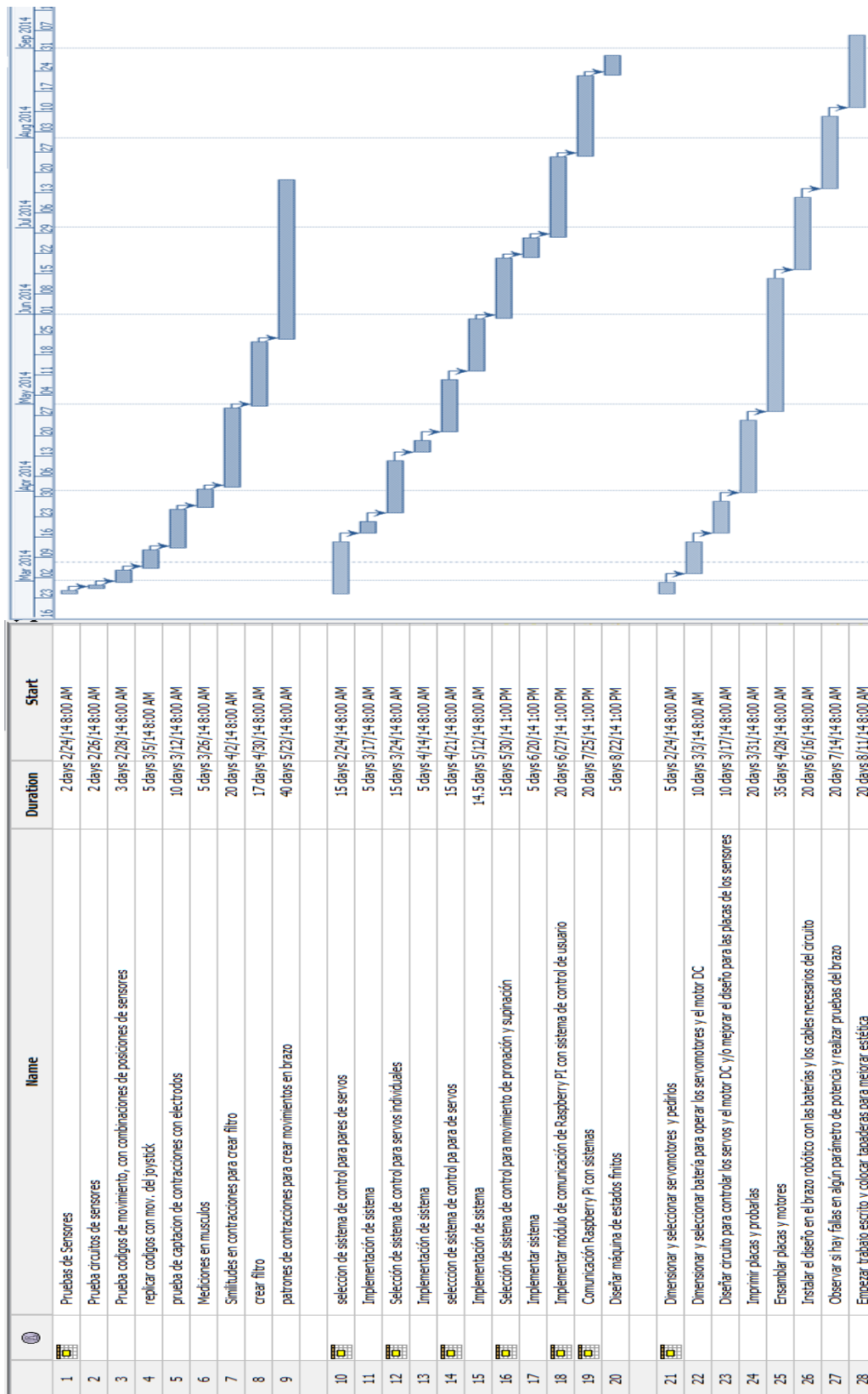
XV. ANEXOS

A. Primer Gantt del proyecto.



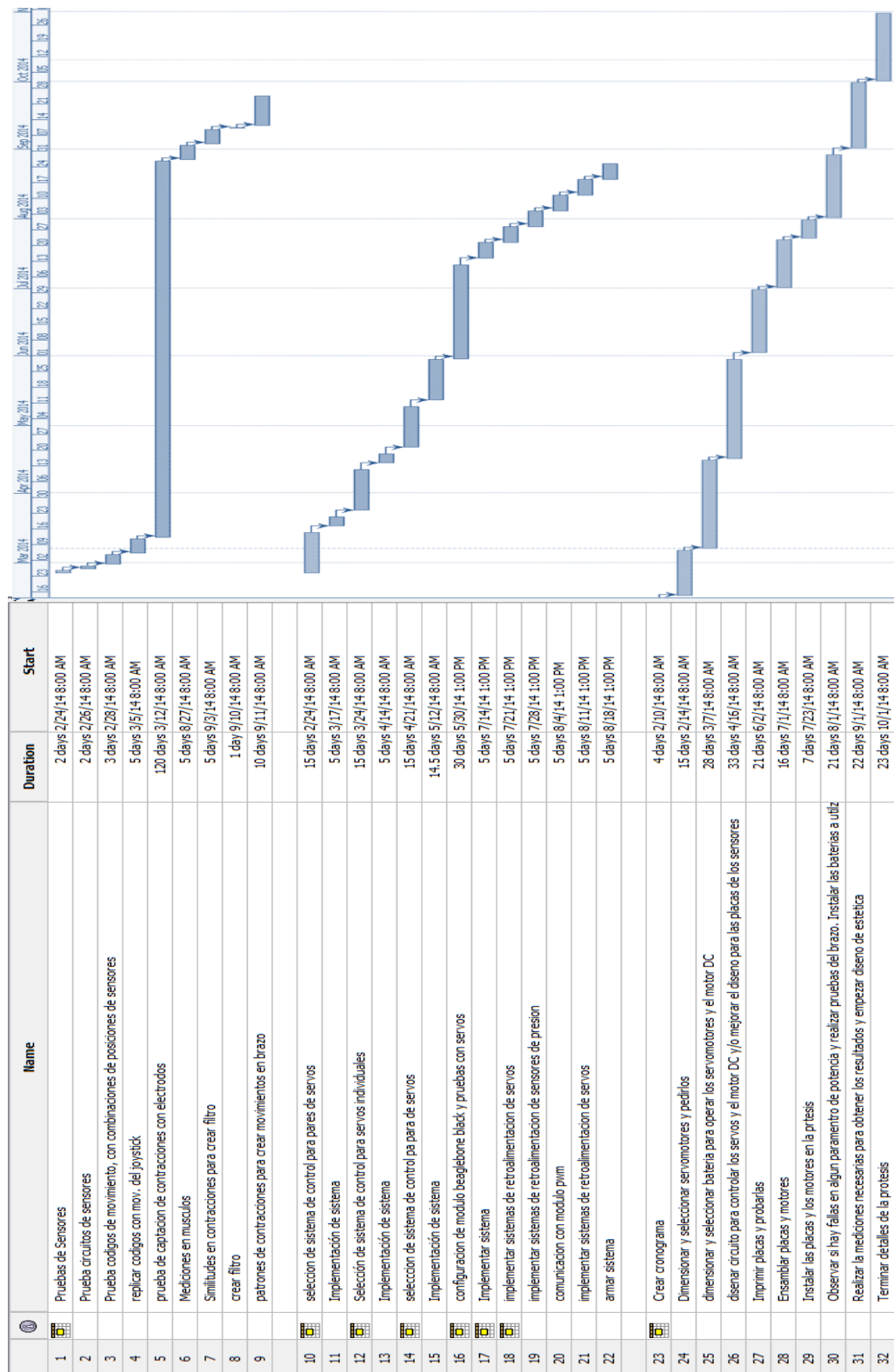
(Elaboración propia)

B. Segundo Gantt del proyecto, con cambios del primero.



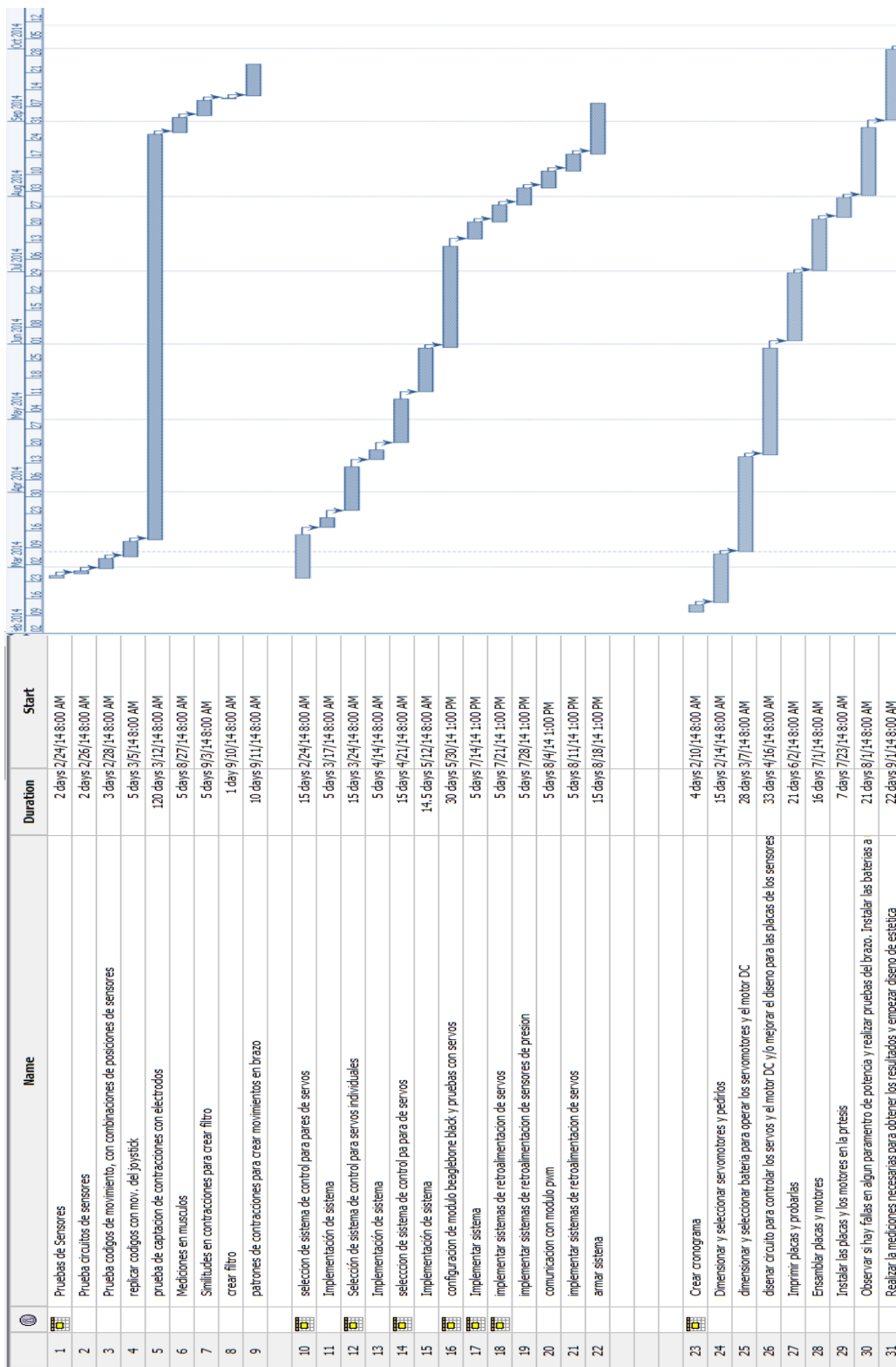
(Elaboración propia)

C. Tercer Gantt del proyecto, con cambios del Segundo.



(Elaboración propia)

D. Gantt Final del proyecto, con cambios del tercero.



(Elaboración propia)

E. Primer balanced scorecard, del proyecto, realizado.

| Integrante | Actividades por realizar | Actividades realizadas | Progreso | | Restante |
|------------------------------|--|------------------------|----------------------------------|-----|------------|
| | | | Numero de actividades realizadas | | |
| CAROL | 1 Pruebas de Sensores | | | | |
| | 2 Prueba circuitos de sensores | | | | |
| | 3 Prueba codigos de movimiento, con combinaciones de posiciones de sensores | | | | |
| | 4 replicar codigos con mov. del joystick | | | | |
| | 5 prueba de captacion de contracciones con electrodos | | 4 | 44% | 56% |
| | 6 Mediciones en musculos | | | | |
| | 7 Similitudes en contracciones para crear filtro | | | | |
| | 8 crear filtro | | | | |
| | 9 patrones de contracciones para crear movimientos en brazo | | | | |
| JOSE MIGUEL | 1 seleccion de sistema de control para pares de servos | | | | |
| | 2 Implementación de sistema | | | | |
| | 3 Selección de sistema de control para servos individuales | | | | |
| | 4 Implementación de sistema | | | | |
| | 5 Selección de sistema de control para motor DC de codo | | | | |
| | 6 Implementación de sistema | | 2 | 18% | 82% |
| | 7 Selección de sistema de control para movimiento de pronación y supinación | | | | |
| | 8 Implementar sistema | | | | |
| | 9 Implementar módulo de comunicación de Raspberry Pi con sistema de control de usuario | | | | |
| | 10 Comunicación Raspberry Pi con sistemas | | | | |
| | 11 Diseñar máquina de estados finitos | | | | |
| DEREK | 1 Dimensionar y seleccionar servomotores y pedifios | | | | |
| | 2 Dimensionar y seleccionar batería para operar los servomotores y el motor DC | | | | |
| | 3 Diseñar circuito para controlar los servos y el motor DC y/o mejorar el diseño para las placas de los sensores | | | | |
| | 4 Imprimir placas y probarlas | | 1 | 13% | 88% |
| | 5 Ensamblar placas y motores | | | | |
| | 6 Instalar e diseño en el brazo robótico con las baterías y los cables necesarios del circuito | | | | |
| | 7 Observar si hay fallas en algún parámetro de potencia y realizar pruebas del brazo | | | | |
| | 8 Empezar trabajo escrito y colocar tapaderas para mejorar estética | | | | |
| PROGRESO DEL PROYECTO | | | | | 25% |

(Elaboración propia)

F. Segundo balanced scorecard, del proyecto, modificado.

| Integrante | Actividades por realizar | Actividades realizadas | Progreso | | Restante |
|------------------------------|--|------------------------|----------------------------------|-----|----------|
| | | | Numero de actividades realizadas | | |
| CAROL | 1 Pruebas de Sensores | | | | |
| | 2 Prueba circuitos de sensores | | | | |
| | 3 Prueba codigos de movimiento, con combinaciones de posiciones de sensores | | | | |
| | 4 replicar codigos con mov. del joystick | | | | |
| | 5 prueba de captacion de contracciones con electrodos | | 4 | 44% | 56% |
| | 6 Mediciones en miusculos | | | | |
| | 7 Similitudes en contracciones para crear filtro | | | | |
| | 8 crear filtro | | | | |
| | 9 patrones de contracciones para crear movimientos en brazo | | | | |
| JOSE MIGUEL | 1 seleccion de sistema de control para pares de servos | | | | |
| | 2 Implementación de sistema | | | | |
| | 3 Selección de sistema de control para servos individuales | | | | |
| | 4 Implementación de sistema | | | | |
| | 5 Selección de sistema de control para motor DC de codo | | | | |
| | 6 Implementación de sistema | | 2 | 18% | 82% |
| | 7 Selección de sistema de control para movimiento de pronación y supinación | | | | |
| | 8 Implementar sistema | | | | |
| | 9 Implementar módulo de comunicación de Raspberry Pi con sistema de control de usuario | | | | |
| | 10 Comunicación Raspberry Pi con sistemas | | | | |
| | 11 Diseñar máquina de estados finitos | | | | |
| DEREK | 1 Dimensionar y seleccionar servomotores y pedirlos | | | | |
| | 2 Dimensionar y seleccionar batería para operar los servomotores y el motor DC | | | | |
| | 3 Diseñar circuito para controlar los servos y el motor DC y/o mejorar el diseño para las placas de los sensores | | | | |
| | 4 Imprimir placas y probarlas | | | | |
| | 5 Ensamblar placas y motores | | 1 | 13% | 88% |
| | 6 Instalar el diseño en el brazo robótico con las baterías y los cables necesarios del circuito | | | | |
| | 7 Observar si hay fallas en algún parámetro de potencia y realizar pruebas del brazo | | | | |
| | 8 Empezar trabajo escrito y colocar tapaderas para mejorar estética | | | | |
| PROGRESO DEL PROYECTO | | | | | 25% |

(Elaboración propia)

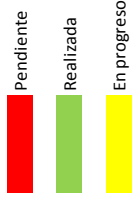
G. Tercer balanced scorecard, del proyecto, modificado y con retroalimentación del mes de mayo.

| Integrante | Actividades por realizar | Progreso | | Restante |
|------------------------------|--|----------------------------------|------------|------------|
| | | Numero de actividades realizadas | Porcentaje | |
| CAROL | 1 Pruebas de Sensores | 4 | 44% | 56% |
| | 2 Prueba circuitos de sensores | | | |
| | 3 Prueba codigos de movimiento, con combinaciones de posiciones de sensores | | | |
| | 4 replicar codigos con mov. de joystick | | | |
| | 5 prueba de captacion de contracciones con electrodos | | | |
| | 6 Mediciones en musculos | | | |
| | 7 Similitudes en contracciones para crear filtro | | | |
| | 8 crear filtro | | | |
| | 9 patrones de contracciones para crear movimientos en brazo | | | |
| JOSE MIGUEL | 1 selección de sistema de control para pares de servos | | | |
| | 2 Implementación de sistema | | | |
| | 3 Selección de sistema de control para servos individuales | | | |
| | 4 Implementación de sistema | | | |
| | 5 Selección de sistema de control para motor DC de codo | | | |
| | 6 Implementación de sistema | 2 | 18% | 82% |
| | 7 Selección de sistema de control para movimiento de pronación y supinación | | | |
| | 8 Implementar sistema | | | |
| | 9 Implementar módulo de comunicación de Raspberry Pi con sistema de control de usuario | | | |
| | 10 Comunicación Raspberry Pi con sistemas | | | |
| | 11 Diseñar máquina de estados finitos | | | |
| DEREK | 1 Dimensionar y seleccionar servomotores y pedirlos | | | |
| | 2 Dimensionar y seleccionar batería para operar los servomotores y el motor DC | | | |
| | 3 Diseñar circuito para controlar los servos y el motor DC y/o mejorar el diseño para las placas de los sensores | | | |
| | 4 Imprimir placas y probarlas | | | |
| | 5 Ensambalar placas y motores | 3 | 38% | 63% |
| | 6 Instalar el diseño en el brazo robótico con las baterías y los cables necesarios del circuito | | | |
| | 7 Observar si hay fallas en algún parámetro de potencia y realizar pruebas del brazo | | | |
| | 8 Empezar trabajo escrito y colocar tapaderas para mejorar estética | | | |
| PROGRESO DEL PROYECTO | | | | 33% |

(Elaboración propia)

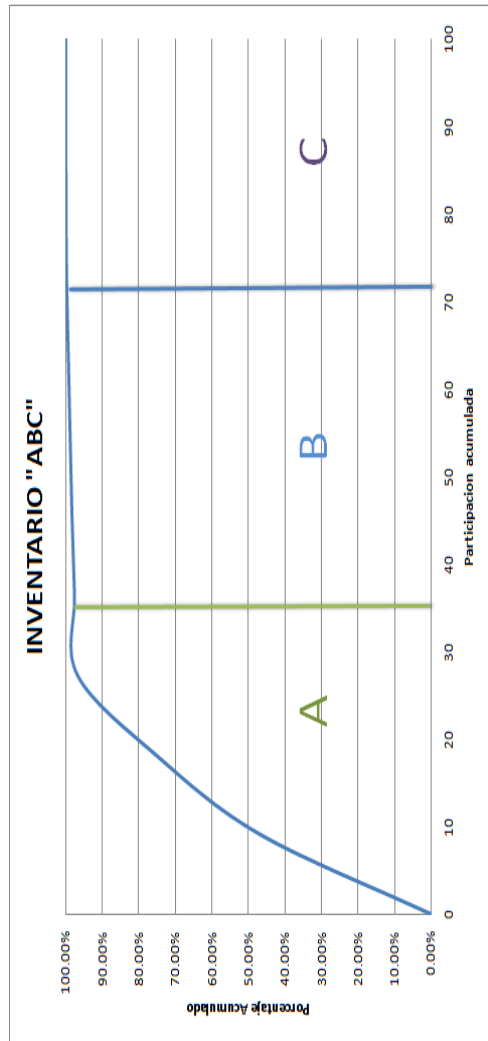
H. Cuarto balanced scorecard, del proyecto, modificado y con retroalimentación del mes de agosto.

| Integrante | Actividades por realizar | | Actividades realizadas | Numero de actividades realizadas | Progreso | Restante |
|------------------------------|--------------------------|--|------------------------|----------------------------------|------------|----------|
| | | | | | | |
| CAROL | 1 | Pruebas de Sensores | | | | |
| | 2 | Prueba circuitos de sensores | | | | |
| | 3 | Prueba codigos de movimiento, con combinaciones de posiciones de sensores | | | | |
| | 4 | prueba de captación de contracciones con electrodos | | 4 | 50% | 50% |
| | 5 | Mediciones en musculos | | | | |
| | 6 | Similitudes en contracciones para crear filtro | | | | |
| | 7 | crear filtro | | | | |
| | 8 | patrones de contracciones para crear movimientos en brazo | | | | |
| JOSE MIGUEL | 1 | selección de sistema de control para pares de servos | | | | |
| | 2 | Implementación de sistema | | | | |
| | 3 | Selección de sistema de control para servos individuales | | | | |
| | 4 | Implementación de sistema | | | | |
| | 5 | selección de sistema de control pa para de servos | | | | |
| | 6 | Implementación de sistema | | 8 | 62% | 38% |
| | 7 | configuración de modulo beaglebone black y pruebas con servos | | | | |
| | 8 | Implementar sistema | | | | |
| | 9 | implementar sistemas de retroalimentación de servos | | | | |
| | 10 | implementar sistemas de retroalimentación de sensores de presión | | | | |
| | 11 | comunicación con modulo pwm | | | | |
| | 12 | implementar sistemas de retroalimentación de servos | | | | |
| | 13 | armar sistema | | | | |
| DEREK | 1 | Crear cronograma | | | | |
| | 2 | Dimensionar y seleccionar servomotores y pedirlos | | | | |
| | 3 | dimensionar y seleccionar batería para operar los servomotores y el motor DC | | | | |
| | 4 | diseñar circuito para controlar los servos y el motor DC y/o mejorar el diseño para las placas de los sensores | | | | |
| | 5 | Imprimir placas y probarlas | | 7 | 70% | 30% |
| | 6 | Ensamblar placas y motores | | | | |
| | 7 | Instalar las placas y los motores en la prótesis | | | | |
| | 8 | Observar si hay fallas en algún parámetro de potencia y realizar pruebas del brazo. Instalar las baterías a utilizar | | | | |
| | 9 | Realizar la mediciones necesarias para obtener los resultados y empezar diseño de estética | | | | |
| | 10 | Terminar detalles de la prótesis | | | | |
| PROGRESO DEL PROYECTO | | | | | 61% | |



(Elaboración propia)

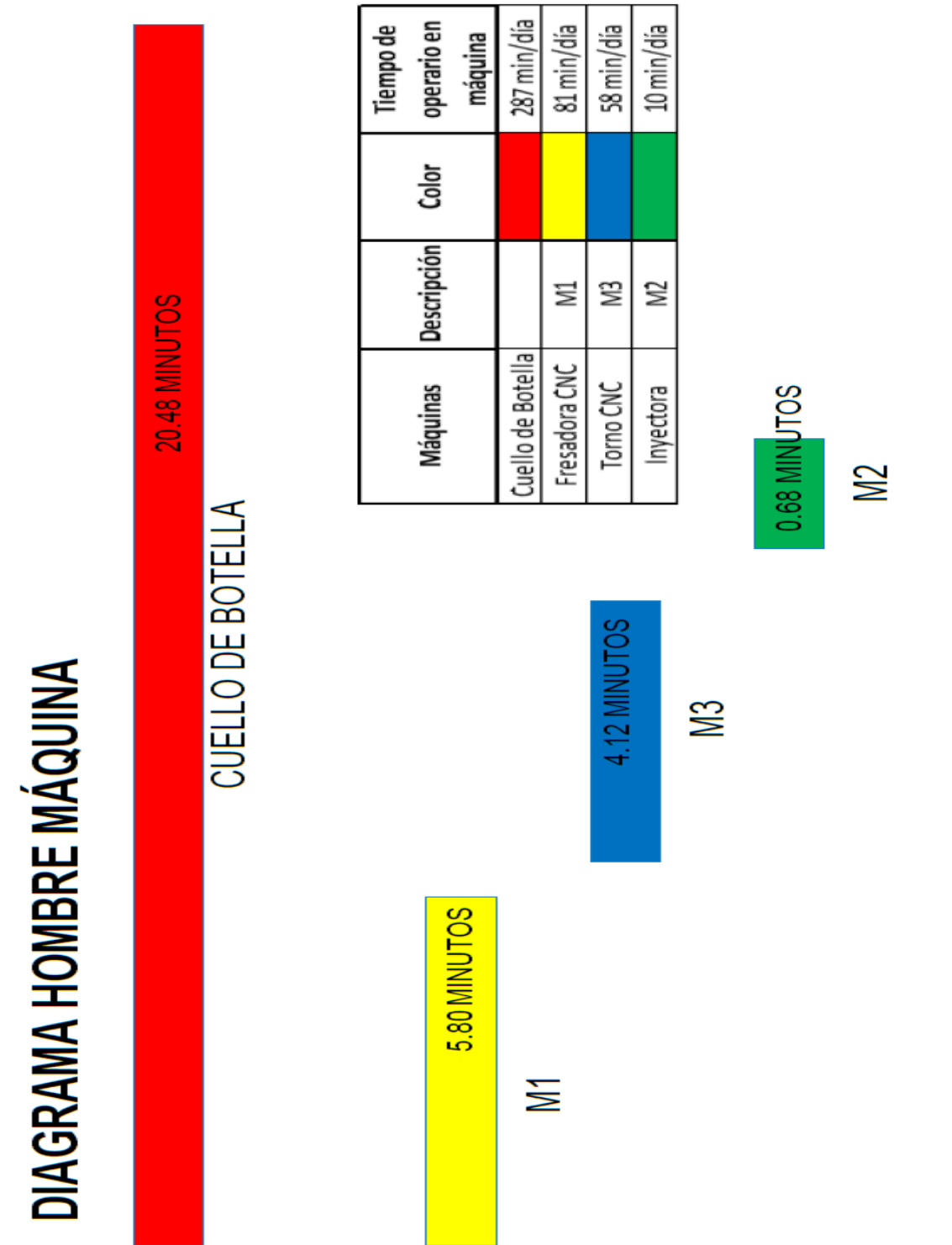
I. Inventario "ABC".



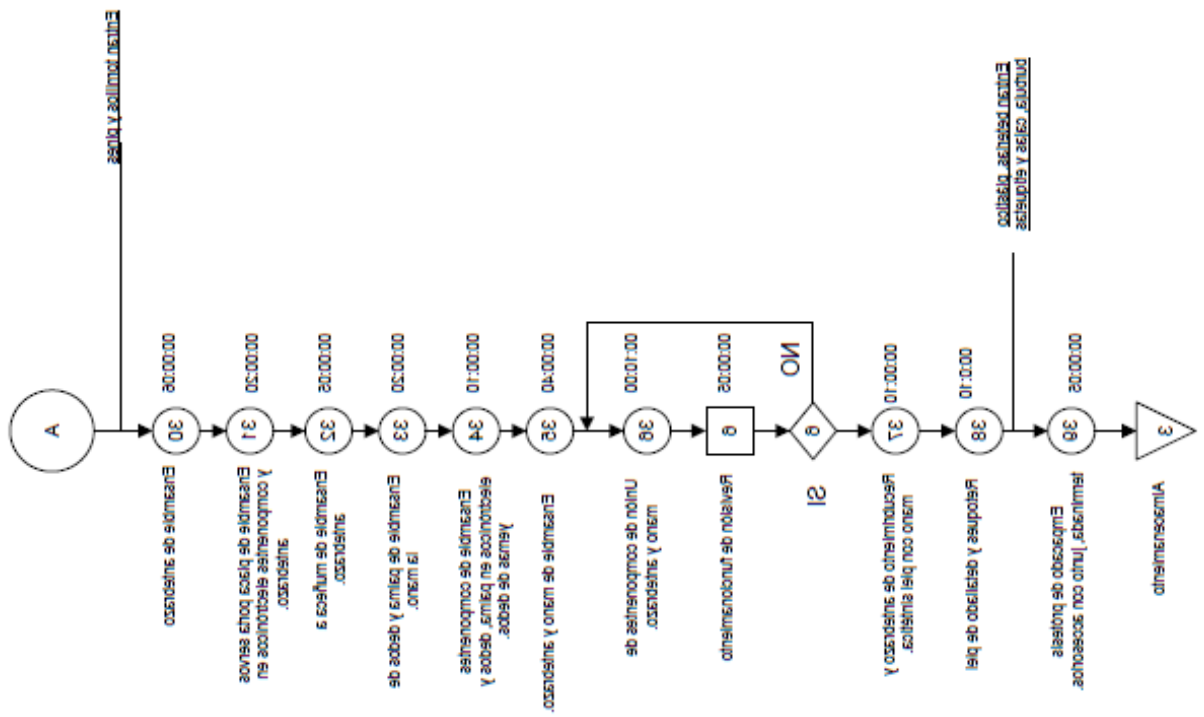
| Material | Descripción | Costo | Unidades | Costo total | Participación acumulada | Peso | Acumulado |
|----------------|---|-----------|-----------|--------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| 11 | COMPONENTES y ELECTRONICOS | Q981.25 | 323 | Q316,943.75 | 9.09 | 46.776% | 46.776% |
| 3 | ERTALÓN (gramos) | Q1.37 | 141243.86 | Q193,504.09 | 18.18 | 28.558% | 75.334% |
| 5 | LATEX (gal) | Q1,800.00 | 80.75 | Q145,350.00 | 27.27 | 21.451% | 96.785% |
| 9 | CAJA PARA EMPAQUES | Q17.50 | 323 | Q5,652.50 | 36.36 | 0.834% | 97.620% |
| 1 | ALUMINIO (gramos) | Q0.09 | 52084.995 | Q4,687.65 | 45.45 | 0.692% | 98.312% |
| 7 | YESO (kg) | Q2.16 | 1615 | Q3,488.40 | 54.55 | 0.515% | 98.826% |
| 6 | SILICONA (u) | Q50.00 | 64.6 | Q3,230.00 | 63.64 | 0.477% | 99.303% |
| 2 | PLEXIGLÁS (u) | Q10.00 | 323 | Q3,230.00 | 72.73 | 0.477% | 99.780% |
| 8 | FILM ALVEOLAR PARA PROTEGER (PLÁSTICO DE BURBUJAS de 1.22m)x (0.5m) | Q3.25 | 323 | Q1,049.75 | 81.82 | 0.155% | 99.935% |
| 4 | HDPE (kgramos) | Q1.23 | 323 | Q397.29 | 90.91 | 0.059% | 99.993% |
| 10 | ETIQUETAS | Q0.14 | 323 | Q45.22 | 100.00 | 0.007% | 100.000% |
| TOTALES | | | | Q677,578.65 | 100 | 100% | 100% |

(Elaboración propia)

J. Diagrama hombre Máquina, utilizando dos operarios para controlar la producción.



(Elaboración propia).



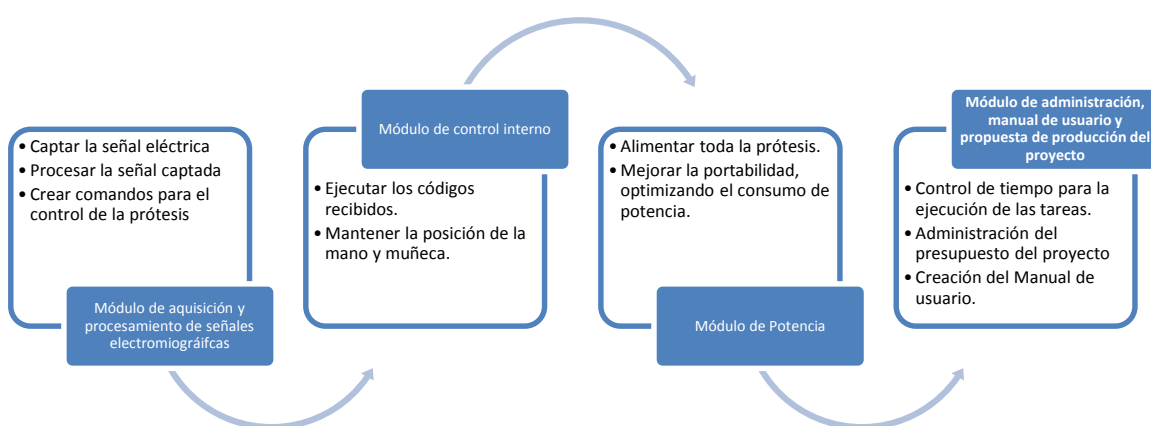
(Elaboración propia)

L. *Perfil de usuario.*

| PERFIL NECESARIO PARA USUARIOS DE PRÓTESIS | |
|---|---|
| NIVEL DE AMPUTACIÓN | Transradial |
| NIVEL DE IMPACTO | Bajo (actividades diarias limitadas que aporten un bajo nivel de carga a la protesis) |
| PESO MÁXIMO DEL USUARIO | No Aplica |
| EDAD | de 21 a 65 años |
| ALTURA PROMEDIO | 1.60 metros |
| CONDICIÓN FÍSICA | Buena (para una mejor captación de las señales emitidas por los músculos) |
| SITUACIÓN PSICOLÓGICA | Estable |
| PREDISPOSICIÓN AL APRENDIZAJE | Necesario |

(Sujeto a cambios, pendiente de especificaciones técnicas)

M. Diagrama de bloques de los sub-módulos del Megaproyecto Diseño e implementación de los sistemas de control y potencia para una prótesis biónica de antebrazo y mano.



N. Código utilizado para el diseño de los filtros pasabandas y el procesamiento de la señal electromiográfica.

```
#Version funcionando con f de corte de 50 a 75Hz
#Importando librerias necesarias
from threading import Thread
from scipy.signal import butter, lfilter
from scipy.fftpack import fft
import numpy as np
import Adafruit_BBIO.ADC as ADC
import Adafruit_BBIO.GPIO as GPIO
```

```
#Configuracion pines
GPIO.setup("P8_12", GPIO.OUT) #P8_3 CS
GPIO.setup("P8_13", GPIO.OUT) #P8_5 INC
GPIO.setup("P8_14", GPIO.OUT) #P8_4 U/D
GPIO.setup("P8_15", GPIO.OUT)
ADC.setup()
```

```
#Inicializacion de variables
fs = 300.0
lowcut = 50.0
highcut = 75.0
```

```
i=0
i2=0
ix=0
i3=0
ix1=0
cali=0
nsamples=250
nmuestras=nsamples
x=np.arange(0.0,(nsamples-1),1.0)
rv=np.arange(0.0,10.0,1.0)
```

```
#Main del procesamiento de senales
```

```
class AYPD(Thread):
    def __init__(self):
        Thread.__init__(self)
    def run(self):
```

```
        global fs
        global lowcut
        global highcut
```

```
#Variables
```

```
    global i
    global i2
    global ix
    global i3
    global ix1
    global cali
    global nsamples
```

```

global nmuestras
global x
global rv
global y

#Funciones

def butter_bandpass(lowcut, highcut, fs, order=10):
    fmax = 0.5 * fs
    low = lowcut / fmax
    high = highcut / fmax
    b, a = butter(order, [low, high], btype='band')
    return b, a

def butter_bandpass_filter(data, lowcut, highcut, fs, order=10):
    b, a = butter_bandpass(lowcut, highcut, fs, order=order)
    y = lfilter(b, a, data)
    return y

while (ix<3000):
    GPIO.output("P8_13",GPIO.HIGH)
    GPIO.output("P8_12",GPIO.LOW)
    GPIO.output("P8_14",GPIO.LOW)
    GPIO.output("P8_13",GPIO.LOW)
    ix=ix+1

while (ix1<7):
    GPIO.output("P8_13",GPIO.HIGH)
    GPIO.output("P8_12",GPIO.LOW)
    GPIO.output("P8_14",GPIO.HIGH)
    GPIO.output("P8_13",GPIO.LOW)
    ix1=ix1+1

#Toma muestras y filtra la senal
while(i2<10):
#Senal de entrada
    while (i<(nsamples-1)):
        v1=ADC.read("P9_40")
        x[i]=v1*1.8
        i=i+1
    i=0

# Filter a noisy signal.
y = butter_bandpass_filter(x, lowcut, highcut, fs, order=6)
i2=i2+1

ix=0
f1=0
while(ix<(nmuestras-1)):
    if(y[ix]>0.02):
        y[ix]=0.1
        f1=f1+1
    else:
        y[ix]=0.0
    ix=ix+1

```

```

iy=0
b=0

while(ix<(nmuestras-1)):
    if(y[ix]>0.02):
        y[ix]=0.1
        f1=f1+1
    else:
        y[ix]=0.0
        ix=ix+1

iy=0
b=0
while(iy<(nmuestras-1)):
    if(b==0):
        if(f1>-1):
            if(f1<50):
                b=1
            if(f1>50):
                if(f1<87):
                    b=0
            if(f1>87):
                if(f1<120):
                    b=2
        iy=iy+1

if(b==0):
    print("Pinza")
if(b==1):
    print("Mano relajada")
if(b==2):
    print("Mano levantada")

```

```

#Ejecucion del thread de adquisicion y procesamiento de datos
proceso=AYPD()
proceso.start()

```

O. Código de sistema de control (Python)

```
# -*- coding: utf-8 -*-

from threading import Thread

import Adafruit_BBIO.UART as UART

import Adafruit_BBIO.GPIO as GPIO

from Adafruit_I2C import Adafruit_I2C

from serial import *

from Control import PIDControl

import time

import sys

#Inicialización de variables

DATA_IN = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]

NData = [0,0,0,0]

NPOS = [0,0,0,0]

CurPOS = [0,0,0,0,0,0,0]

DATATEST = 0

Inst = [1,0,255,0,255,0,255,0,255]

GoBoolean = [True,True,True,True]

end = False

flag1 = False

flag2 = False

V4_8 = 0x62
```

```

V6_0 = 0x40

#Configuración de I2, pines y modulos de control

i2c = Adafruit_I2C(0x2F)

GPIO.setup("P8_27",GPIO.IN)

Pulg = PIDControl(1,0,0)

Ind = PIDControl(1,0,0)

Med = PIDControl(1,0,0)

Rest = PIDControl(1,0,0)

#Definición de Threads

"""
-----

Thread que maneja la lectura de UART e ingreso al arreglo

-----

"""

class LeerUART(Thread):

    def __init__(self,serialPort):

        Thread.__init__(self)

        self.serialPort = serialPort

    def run(self):

        global DATA_IN

        global end

```

```

global flag1

global CurPOS

contador1 = 0

while True:

    DATATEST = serialPort.read(1) #Obtiene el byte recibido por serial

    DATATEST = ord(DATATEST)    #Convierte el caracter a decimal

    DATA_IN[contador1] = DATATEST #Ingresa el decimal al arreglo

#Algoritmo de sincronización

    if(DATATEST ==255):

        flag1 = True

    if((DATATEST ==0)and flag1):

        contador1 = 0

        flag1 = False

        for v in range (0,len(CurPOS)):

            CurPOS[v] = DATA_IN[v+6]

#Cambio de posición de arreglo

    contador1 = contador1+1

    if(contador1>14):

        contador1 = 0

        flag2 = True

    print "Data IN: ", DATA_IN

    if(end):

        break

```

```
"""
```

```
-----
Thread que maneja el envío de datos por serial
-----
```

```
"""
```

```
class EnviarUART(Thread):
```

```
    def __init__(self,serialPort):
```

```
        Thread.__init__(self)
```

```
        self.serialPort = serialPort
```

```
    def run(self):
```

```
        global Inst
```

```
        global end
```

```
        while True:
```

```
            #Envia por serial lo escrito en arreglo de comando
```

```
            for k in range (0,9):
```

```
                self.serialPort.write(chr(Inst[k]))
```

```
            k = 0
```

```
            print "Comando: ",Inst
```

```
            if(end):
```

```
                break
```

```
"""
```

```
-----
Thread que maneja controlador PID
```

```
-----  
"""  
  
class ControlPID(Thread):  
  
    def __init__(self,CTRL1,CTRL2,CTRL3,CTRL4):  
  
        Thread.__init__(self)  
  
        self.control1 = CTRL1  
  
        self.control2 = CTRL2  
  
        self.control3 = CTRL3  
  
        self.control4 = CTRL4  
  
  
    def run(self):  
  
        global DATA_IN  
  
        global NData  
  
        global NPOS  
  
        global CurPOS  
  
        global end  
  
        prevTarget = 0  
  
        while True:  
  
            if(flag2 and (prevTarget!=DATA_IN[1])):  
  
                self.control1.setTarget(DATA_IN[1])  
  
                self.control2.setTarget(DATA_IN[1])  
  
                self.control3.setTarget(DATA_IN[1])  
  
                self.control4.setTarget(DATA_IN[1])  
  
                NData[0] = self.control1.step(DATA_IN[2])
```

```
NData[1] = self.control2.step(DATA_IN[3])

NData[2] = self.control3.step(DATA_IN[4])

NData[3] = self.control4.step(DATA_IN[5])

for i in range (0,len(NData)):

    NData[i] = NData[i] - 128  #Corrección de posición

NPOS = NData

for p in range (0,len(NPOS)):

    NPOS[p] = CurPOS[p]+NPOS[p]

    if(NPOS[p]>255):

        NPOS[p] = 255

    elif(NPOS[p]<0):

        NPOS[p] = 0

    elif(NPOS[p]==1):

        NPOS[p] = 2

if (GoBoolean[0]):

    Inst[1] = NPOS[0]

    Inst[8] = 0

else:

    Inst[1] = 0

    Inst[8] = 255

if (GoBoolean[1]):

    Inst[2] = NPOS[1]
```

```
else:
    Inst[2] = 0
if (GoBoolean[2]):
    Inst[3] = 255 - NPOS[2]
else:
    Inst[3] = 255
if (GoBoolean[3]):
    Inst[4] = NPOS[3]
else:
    Inst[4] = 0
print "Instruccion: ",Inst
if(end):
    break
```

```
"""
```

```
-----
                        COMPENSACION DE MUñECA
-----
```

```
"""
```

```
class CompWr(Thread):
    def __init__(self):
        Thread.__init__(self)

    def run(self):
```

```
global Inst

global DATA_IN

target = 0

while True:

    if(flag2):

        target = DATA_IN[10]

        Inst[6] = target

        Inst[7] = target

"""
-----

                CAMBIO DE VOLTAJE

-----

"""

class VoltCntrl(Thread):

    def __init__(self):

        Thread.__init__(self)

    def run(self):

        global i2c

        global V4_8

        global V6_0

        global end

        i2c.write8(V4_8,V4_8)

        print("4.8V")

        while True:
```

```
GPIO.wait_for_edge("P8_27",GPIO.RISING)

i2c.write8(V6_0,V6_0)

print "6.0V"

time.sleep(1)

GPIO.wait_for_edge("P8_27",GPIO.RISING)

i2c.write8(V4_8,V4_8)

print "4.8V"

time.sleep(1)

if(end):

    break

"""

-----

                MAIN

-----

"""

#Inicialización de puerto UART (serial)

UART.setup("UART1")

serialPort = Serial(port = "/dev/ttyO1",baudrate=9600)

#Crear Threads

send = EnviarUART(serialPort)

recieve = LeerUART(serialPort)

Vcntrl = VoltCntrl()

ControlID = ControlPID(Pulg,Ind,Med,Rest)
```

#ejecución de Threads

Vcntrl.start()

send.start()

recieve.start()

ControlID.start()

time.sleep(10)

end = True

A. Código de PIC 16F887 (C ++)

```
unsigned short preci[11],ciclo[9],i,j,DATAS,res,PADC,CHNL;
```

```
void Interrupcion() iv 0x0004 ics ICS_AUTO {
```

```
    if(UART1_Data_Ready()){
```

```
        ciclo[j] = UART1_Read();
```

```
        j ++;
```

```
        if(ciclo[0]!=0x01){
```

```
            j = 0;
```

```
        }
```

```
        if (j>=11){
```

```
            j = 0;
```

```
        }
```

```
}  
  
if(PIR1.ADIF){  
  
    DATAS= ADRESH;  
  
    if(PADC==14){  
  
        DATAS = 0xFF;  
  
    }  
  
    if(PADC == 15){  
  
        DATAS = 0x00;  
  
    }  
  
    UART1_Write(DATAS);  
  
    PADC ++;  
  
    if(PADC == 3){  
  
        PADC = 4;  
  
    }  
  
    if(PADC == 16){  
  
        PADC = 0;  
  
    }  
  
    if(PADC<14){  
  
        CHNL = PADC<<2;  
  
    }  
  
    ADCON0 = (ADCON0 & 0b00000011)|CHNL;//Coloca el canal a revisar  
  
    PIR1.ADIF = 0;  
  
}
```

```
        if(INTCON.T0IF){  
            TMR0 = 247;  
            INTCON.T0IF = 0; //clear flag  
            ADCON0.GO = 1;  
        }  
    }  
  
void main() {  
    OSCCON = 0x71;           // oscilador interno 8MHz  
    PORTB = 0;              // set PORTB to 0  
    PORTC = 0;  
    PORTD = 0;              // Set Port D to 0  
  
    ANSEL = 0xFF;          // Activa todas las entradas analógicas  
    ANSELH = 0x3F;         //  
    TRISA = 0xFF;          // Port D as inputs  
    TRISB = 0x3F;          // designate PORTB pins as output  
    TRISC = 0b01000000;  
    TRISD = 0;             // Port D as outputs  
    TRISE = 0x0F;         // 3 pines de puerto E como entradas  
  
    //Inicializar ADC  
    ADC_Init();            //Inicializacion del modulo de ADC
```

```
ADCON0 = ADCON0 & 0b00000011 ;

ADCON1.ADFM = 0;

ADCON1.VCFG0 = 1;          //Referencia V+ ADC es pin RA3

PIE1.ADIE = 1;           //Habilita Interrupcion de ADC

j = 0;                    // Valores iniciales

PADC = 0;                 //Puerto de ADC (variable)

CHNL = 0;                 //Canal de ADC (a colocar en ADCON0)

ciclo[0] = 0xFF;

ciclo[1] = 0xFF;

ciclo[2] = 0xFF;

ciclo[3] = 0xFF;

ciclo[4] = 0xFF;

ciclo[5] = 0xFF;

ciclo[6] = 0xFF;

ciclo[7] = 0xFF;

ciclo[8] = 0xFF;

ciclo[9] = 0xFF;

ciclo[10]= 0xFF;

preci[0] = 0x00;

preci[1] = 0x00;

preci[2] = 0x00;

preci[3] = 0x00;

preci[4] = 0x00;
```

```
preci[5] = 0x00;

preci[6] = 0x00;

preci[7] = 0x00;

preci[8] = 0x00;

preci[9] = 0x00;

preci[10] = 0x00;

res = 0x01;

//Inicializar modulo UART

UART1_Init(9600);

Delay_ms(100);           //tiempo de espera para que inicialize correctamente

PIE1.RCIE = 1;          // Habilitar interrupciones de recepcion, perifericos y global

//Inicializar modulo de TMR0

OPTION_REG = 0xC7;      // RBPV = 1, INTEDGE = 1, T0CS =0, T0SE = 0, PSA = 0, PS =
0b111

TMR0= 247;

//Inicializar interrupciones

INTCON = 0xE0;          //GIE = 1, PEIE = 1, T0IE = 1

while(1){

//PRIMER PWM
```

```

//comienza el ciclo de PWM

PORTD.RD0 = 1;

//Retardo de 900us [POSICION CERO](inexacto en codigo dado que hay retardos
intermedios)

Delay_us(255);

Delay_us(255);

Delay_us(100);

Delay_us(135);

//Agrega lo necesario para cumplir con el periodo de PWM

for(i=0;i<ciclo[1];i++){

    Delay_us(2); //Cada aumento es un retardo de 6us en el total

    asm{

        NOP

    }

}

PORTD.RD0 = 0;

for(i=255;i>ciclo[1];i--){

    Delay_us(2);

    asm{

        NOP

    }

}

//SEGUNDO PWM

PORTD.RD1 = 1;

```

```
Delay_us(255);

Delay_us(255);

Delay_us(135);

for(i=0;i<ciclo[2];i++){

    Delay_us(2);

    asm{

        NOP

    }

}

PORTD.RD1 = 0;

for(i=255;i>ciclo[2];i--){

    Delay_us(2);

    asm{

        NOP

    }

}

//TERCER PWM

PORTD.RD2 = 1;

Delay_us(255);

Delay_us(255);

Delay_us(135);

for(i=0;i<ciclo[3];i++){

    Delay_us(2);

    asm{
```

```
        NOP
    }
}

PORTD.RD2 = 0;

for(i=255;i>ciclo[3];i--){

    Delay_us(2);

    asm{

        NOP

    }

}

//CUARTO PWM

PORTD.RD3 = 1;

Delay_us(255);

Delay_us(255);

Delay_us(135);

for(i=0;i<ciclo[4];i++){

    Delay_us(2);

    asm{

        NOP

    }

}

PORTD.RD3 = 0;

for(i=255;i>ciclo[4];i--){

    Delay_us(2);
```

```
        asm{
            NOP
        }
    }

//QUINTO PWM

    PORTD.RD4 = 1;

    Delay_us(255);

    Delay_us(255);

    Delay_us(135);

    for(i=0;i<ciclo[5];i++){

        Delay_us(2);

        asm{

            NOP

        }

    }

    PORTD.RD4 = 0;

    for(i=255;i>ciclo[5];i--){

        Delay_us(2);

        asm{

            NOP

        }

    }

//SEXTO PWM

    PORTD.RD5 = 1;
```

```
Delay_us(255);

Delay_us(255);

Delay_us(135);

for(i=0;i<ciclo[6];i++){

    Delay_us(2);

    asm{

        NOP

    }

}

PORTD.RD5 = 0;

for(i=255;i>ciclo[6];i--){

    Delay_us(2);

    asm{

        NOP

    }

}

//SEPTIMO PWM

PORTD.RD6 = 1;

Delay_us(255);

Delay_us(255);

Delay_us(135);

for(i=0;i<ciclo[7];i++){

    Delay_us(2);

    asm{
```

```
        NOP
    }
}

PORTD.RD6 = 0;
for(i=255;i>ciclo[7];i--){
    Delay_us(2);
    asm{
        NOP
    }
}

//OCTAVO PWM

PORTD.RD7 = 1;

Delay_us(255);

Delay_us(255);

Delay_us(135);

for(i=0;i<ciclo[8];i++){
    Delay_us(2);
    asm{
        NOP
    }
}

PORTD.RD7 = 0;

for(i=255;i>ciclo[8];i--){
```

```
        Delay_us(2);  
        asm{  
            NOP  
        }  
    }  
  
    Delay_ms(1);  
    Delay_us(255);  
    Delay_us(200);  
}
```