

**DESARROLLO DE DISPOSITIVO DE ASISTENCIA PARA AMPUTACIÓN
TRANSHUMERAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D**

Sebastián Barbudo González

Práctica profesional

Tutor

PhD Luis Eduardo Rodríguez Cheu



**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PROGRAMA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA
BOGOTÁ D.C
2021**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Marco teórico	9
1.1.1. Amputaciones de miembro superior	9
1.1.2. Prótesis biomecánicas	10
1.1.3. Prótesis biónicas y electromecánicas	13
1.1.4. Socket	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo general	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. METODOLOGÍA	17
3.1. Problema a solucionar	17
3.2. Fases del proyecto	17
3.2.1. Identificación del problema	17
3.2.2. Diseño CAD	18
3.2.3. Sistema electromecánico	21
3.2.3.1. Desarrollo de la aplicación para el control del dispositivo	23
3.2.3.2. Diseño del sistema electrónico	21
3.2.4. Impresión de piezas	25
3.2.5. Ensamblaje de prótesis	29
3.3. Cronograma de actividades	32
4. RESULTADOS	33
5. DISCUSIÓN	41
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	42
7. CONCLUSIONES	43
Referencias	44
ANEXOS	46

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Componentes electrónicos y especificaciones.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2. Plan de trabajo para el diseño de prótesis Emmanuel Bornachera Jiménez</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3. Trazabilidad prótesis transhumeral Emmanuel.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4. Configuraciones predeterminadas VisionArm</i>	<i>36</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Amputaciones de miembro superior.....	10
Figura 2. Knick´s Prosthetic Finger.....	11
Figura 3. Phoenix Hand.....	11
Figura 4. Kinetic Hand.....	11
Figura 5. ArmPO v3.....	12
Figura 6. The UnLimbited Arm v2.1.....	12
Figura 7. Trésdesis.....	13
Figura 8. El Medallo V1.....	13
Figura 9. Robotic Arm.....	14
Figura 10. Distribución de las fuerzas sobre un sistema de enmallado.....	15
Figura 11. Socket con integración de enmallado.....	15
Figura 12. Enmallado con carga aplicada.....	15
Figura 13. Emmanuel Bornachera Jiménez.....	18
Figura 14. Diseño HACKberry.....	18
Figura 15. Molde negativo de Emmanuel.....	19
Figura 16. Escaneo del molde negativo.....	19
Figura 17. Molde enmallado.....	19
Figura 18. Diseño socket.....	19
Figura 19. Diseño encaje enmallado.....	20
Figura 20. Diseño antebrazo.....	20
Figura 21. Protocolo de comunicación.....	24
Figura 22. Dedos (falanges distales).....	25
Figura 23. Falange proximal índice.....	25
Figura 24. Falange proximal pulgar.....	26
Figura 25. Falange proximal otros dedos.....	26
Figura 26. Palma.....	26
Figura 27. Dorso de la mano.....	27
Figura 28. Piezas de ensamble.....	27
Figura 29. Muñeca.....	27
Figura 30. Antebrazo.....	28
Figura 31. Tapa antebrazo.....	28
Figura 32. Acople socket.....	28
Figura 33. Socket.....	29
Figura 34. Piezas limpias.....	29
Figura 35. Conexión de los servomotores al sistema mecánico.....	30
Figura 36. Mano ensamblada.....	30
Figura 37. Mano y antebrazo ensamblados.....	31
Figura 38. Prótesis electromecánica completamente ensamblada.....	31
Figura 39. Esquemático conexiones de los componentes electrónicos.....	34
Figura 40. Esquemático para PCB.....	34
Figura 41. Circuito sobre protoboard conectado al dispositivo.....	35
Figura 42. Interfaz inicio de sesión.....	35
Figura 43. Interfaz de control del VisionArm.....	36
Figura 44. Agarre de fuerza.....	37
Figura 45. Agarre de precisión.....	37
Figura 46. Teclado o señalar.....	37
Figura 47. Pulgar arriba.....	38
Figura 48. Mano cerrada o puño.....	38

<i>Figura 49. Home</i>	38
<i>Figura 50. Prueba de agarre de precisión sobre un objeto pequeño rugoso</i>	39
<i>Figura 51. Prueba de agarre de precisión sobre un objeto pequeño liso</i>	39
<i>Figura 52. Prueba de agarre de Fuerza sobre un objeto grande macizo</i>	40

LISTA DE ANEXOS.

Anexo 1. Consentimiento informado Emmanuel.....46
Anexo 2. Información y medidas de Emmanuel.....47
Anexo 3. Presupuesto prótesis transhumeral Emmanuel..50

RESUMEN

Este trabajo busca exponer los avances actuales con respecto a la tecnología y dispositivos de asistencia de bajo costo orientado en amputaciones de miembro superior, también explicar detalladamente los casos de amputaciones más comunes y mostrar algunas de las soluciones existentes por medio de la impresión 3D como las prótesis de bioinspiración biomecánicas y biónicas. Como una corporación sin ánimo de lucro, e-NABLE Medellín en poco tiempo de haber sido fundada, ha logrado crear un enorme impacto social por su gran apoyo a aquellas personas que han perdido una extremidad superior, que son de bajos recursos y que no pueden conseguir un dispositivo de asistencia o prótesis por su cuenta, mejorando la calidad de vida de estos beneficiarios.

El principal objetivo de este proyecto es el desarrollo de una prótesis electromecánica funcional de miembro superior controlada a partir de una aplicación móvil web capaz de replicar varios grados de libertad de la mano humana, cuyas partes fueron diseñadas, impresas en 3D y posteriormente ensambladas.

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en 5 etapas, entre las cuales mencionamos: 1. Identificación del problema, 2. Diseño CAD, 3. Sistema electromecánico, 4. Impresión de piezas, 5. Ensamblaje de prótesis. Durante la primer etapa se realizó la investigación pertinente para identificar que tipos de problemas existen alrededor de las amputaciones de miembro superior y cuales tecnologías han sido implementadas, de esa manera completar el estado del arte que abarca este tema. En la segunda etapa se estudiaron y analizaron las posibles soluciones para comenzar a desarrollar los diferentes borradores y diseños de las piezas por medio de diversos softwares de diseño asistidos por computadora (CAD). La tercer etapa se caracterizó por establecer los componentes eléctricos y electrónicos para el desarrollo de la aplicación web y su integración con la prótesis. La cuarta etapa consiste en la materialización de los diseños siendo estos impresos en varias impresoras 3D de la empresa con un seguimiento en el material implementado, configuración y ajustes de las impresoras para llevar a cabo una impresión exitosa. Finalmente, en la quinta etapa se procede a incorporar la parte mecánica con la electrónica y ensamblar pieza por pieza para dar fin a la prótesis y poder realizar sus evaluaciones y pruebas.

Con relación a los resultados de este trabajo, en este documento se presentan los diferentes diseños realizados durante el proyecto y los archivos de impresión 3D utilizados, también se ilustrarán los diagramas de los circuitos utilizados para la implementación electrónica y sus componentes a sistemas biomecánicos. Este proyecto fue evaluado a través de la reproducción de diferentes tipos de movimientos de la mano humana y sometida a diferentes pruebas físicas de agarre y precisión sobre objetos y acciones determinadas.

Este proyecto permitió acoplar diferentes mecanismos existentes en un solo dispositivo, de manera que la solución final permitió integrar de una forma innovadora usando tecnología de impresión en 3D, con el fin de promover el desarrollo de dispositivos

de asistencia de bajo costo y de esa manera poder beneficiar a muchas personas de forma desinteresada y así generar un gran impacto social en Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

La población con discapacidad en Colombia ha aumentado considerablemente durante los últimos tres años. Para finales de 2019 había en total 1.298.738 personas con discapacidad, siendo esta cifra equivalente al 2,3% de la población total nacional del cual 47,1% representa la discapacidad del movimiento del cuerpo, manos, brazos y piernas según lo reporta el registro oficial del Ministerio de Salud y Protección social [1].

Por otro lado, las estadísticas del DANE para finales de 2020 señalan que el número de discapacitados se ha elevado a 3.131.037 personas con dificultades que involucran realizar actividades básicas diarias, triplicando el valor porcentual a 7,1% con respecto al año anterior [2]. De las cifras mencionadas anteriormente entre el 5 y 10% son casos por amputación derivadas de diferentes causas como conflicto armado, enfermedades, problemas congénitos y accidentes laborales. Es por esto por lo que diversas organizaciones han empezado a contribuir en mejorar la calidad de vida de estas personas.

Fundada en mayo de 2017, e-NABLE Medellín, pronto Humanos3D es una corporación sin ánimo de lucro solidarizada con aquellas personas de bajos recursos que infortunadamente han perdido sus extremidades superiores o que han nacido sin ellas, cuyo aporte a estas comunidades es la implementación de la tecnología de impresión 3D para producir dispositivos de asistencia y donarlas. En poco tiempo de haber sido creada, ha logrado generar un enorme impacto social mejorando la calidad de vida de las personas discapacitadas en toda Colombia, especialmente en Medellín en donde se encuentra establecida. También ha generado espacios de trabajo y práctica para los estudiantes de la Universidad de Antioquia y el Instituto Tecnológico de Metropolitano, asimismo vinculándose con otras instituciones educativas en el país.

Debido a que es una organización que no busca el beneficio económico mediante la venta de sus dispositivos, se ha relacionado con diversos patrocinadores y socios como la Fundación Viva Air y la embajada australiana, de ese modo ha podido generar los ingresos que permiten potencializar sus logros. Por otro lado, gracias a los diversos contactos generados a través de los años ha podido crear un programa de voluntariado en donde se han realizado conexiones con estudiantes o profesionales extranjeros que vienen a Colombia a contribuir en la causa social y aportar aquellos conocimientos en pro del bienestar de los beneficiarios [3] [4].

Humanos3D cuenta con una labor social más allá de la donación de los dispositivos y junto con los practicantes y más de 200 alcaldías y gobernaciones se ha desarrollado un programa de clínicas móviles para distribuir las a diferentes municipios de Colombia principalmente en Antioquia, sin embargo, con el crecimiento constante de la empresa ha logrado extenderse a Bolívar y pronto a otras regiones. Algunas de las alcaldías en Antioquia son Zaragoza, Briceño y San Luis y en Bolívar Mahates, Mompox y María la Baja.

Aparte del voluntariado, el programa de prácticas empresariales dentro de la corporación ofrece la posibilidad de que sus practicantes dispongan entera y libremente de sus instalaciones, equipos y materiales, de ese modo ejercer las tareas que la empresa distribuye al equipo conformado principalmente por ingenieros biomédicos, bioingenieros, diseñadores industriales y mecánicos lo cual lo hace un ambiente interdisciplinario. Dentro de los deberes y funciones básicas que cumplen los practicantes, algunas de ellas son diseño 3D, impresión de piezas, manipulación de impresoras, cambio de material (filamento), ensamblaje y otras las cuales se describirán más adelante.

Las instalaciones de la organización se dividen en 3 sectores: El primer sector es donde los practicantes y voluntarios realizan sus correspondientes tareas y ensayos, el segundo sector es el cuarto de impresión que cuenta con diferentes modelos de impresoras y su propio almacén de filamentos, el tercer sector está compuesto por un taller con diferentes herramientas como equipos de calor para el termoformado de las piezas plásticas para ensamblar y personalizar según el beneficiario.

En este documento se llevará a cabo el desarrollo de una prótesis electromecánica en donde todo el equipo de practicantes unió sus casos para generar un único dispositivo que se logre adaptar a las medidas de cada beneficiario.

1.1. Marco teórico

1.1.1. Amputaciones de miembro superior

Una amputación está definida como un procedimiento de remoción, extirpación o resección de una parte o totalidad de una extremidad que atraviesa una estructura ósea. Pueden ser de tipo traumático o programada quirúrgicamente [5].

Debido a que el cuerpo humano está dividido y conectado en diferentes articulaciones, para un contexto de rehabilitación orientado a dispositivos de asistencia como prótesis, es necesario conocer los términos correspondientes cuando existe una amputación en alguna de estas zonas ya que es fundamental para los procedimientos métricos del paciente y los diseños correspondientes para una impresión a escala real.

Específicamente en áreas de los miembros superiores se reúnen aquellas partes del cuerpo que incluyen los dedos, manos, brazos e incluso el hombro. La Figura 1 nos permite identificar los diferentes niveles de amputación de acuerdo con el lugar en donde se presenta siendo los casos más comunes los siguientes: amputación parcial de mano, desarticulación de la muñeca, amputación transradial, desarticulación de codo, amputación transhumeral y desarticulación del hombro [6].

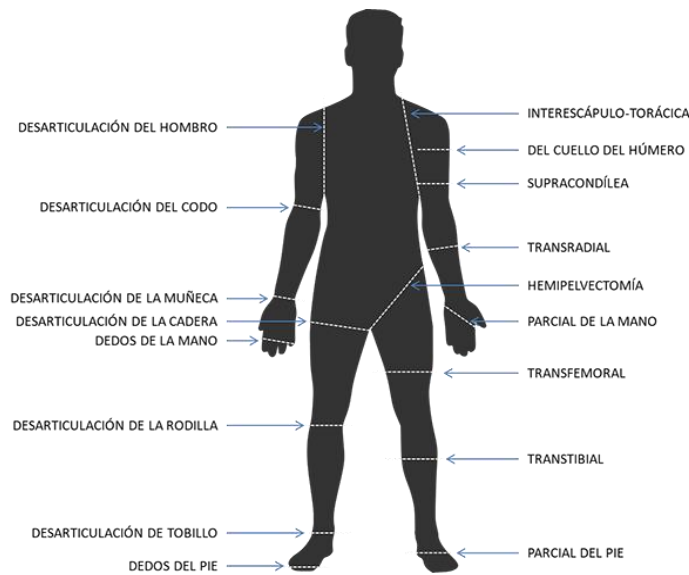


Figura 1. Amputaciones de miembro superior.

1.1.2. Prótesis biomecánicas

Las prótesis biomecánicas o también conocidas como prótesis de control corporal tienden a ser las más utilizadas debido a su fácil construcción, bajo costo y un menor mantenimiento [7]. El sistema básicamente funciona utilizando hilos que se conectan a un arnés amarrado al miembro residual con el objetivo de generar un efecto de gancho y mediante la flexo extensión de la articulación realizar el cierre de la prótesis.

Actualmente Humanos3D dona este tipo de dispositivos ya que son de bajo costo y fácil de ensamblar pieza por pieza por lo cual es un gran beneficio si se busca generar donaciones. Estos se implementan teniendo en cuenta el tipo de amputación presentada comúnmente las de tipo transradial, transhumeral, parcial de mano y dedo.

Los siguientes modelos fueron obtenidos de repositorios provenientes de GitHub y Thingiverse, plataformas de libre acceso y código abierto que utiliza la empresa para desarrollar sus dispositivos:

- **Knick's Prosthetic Finger:** usado en amputación de dedo mediante mecanismo de hilos con brazaletes que permite la flexión de la pieza producto del movimiento de la muñeca como se ve en la Figura 2 [8].



Figura 2. Knick's Prosthetic Finger.

- **Phoenix Hand:** principalmente utilizada en amputaciones parcial de mano, este modelo facilita el agarre de objetos tensionando hilos gracias a la flexión de muñeca ejercida por el usuario como se ve en la Figura 3 [9].

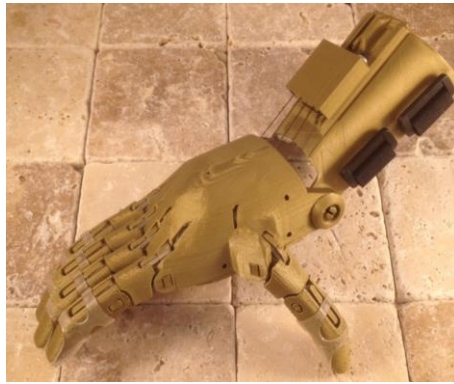


Figura 3. Phoenix Hand.

- **Kinetic Hand:** es equivalente a la Phoenix Hand, la diferencia es que tiene un diseño más estético, compacto, aunque un poco más grande en general, su mecanismo son hilos como se ve en la Figura 3 [10].



Figura 4. Kinetic Hand.

- **ArmPO v3:** este dispositivo está orientado a las amputaciones transradiales, es decir, que perdieron la rotación de muñeca, pero aún mantienen la articulación del codo y por medio de hilos pueden generar tensión sobre las piezas y ejercer el cierre de la prótesis y es estándar para cualquier joven o adulto [11].



Figura 5. ArmPO v3.

- **The UnLimbited Arm v2.1:** UnLimbited Arm, tiene un diseño el cual puede ser adaptado a diferentes medidas de usuarios, haciendo de este dispositivo uno muy completo y sencillo de ensamblar, cuenta con un sistema de hilos que facilita el agarre de objetos a personas con amputación transradial [12].



Figura 6. The UnLimbited Arm v2.1.

- **Trésdesis:** siendo una prótesis aún en estudio por la empresa debido a que es para amputaciones transhumerales, la Trésdesis es particular por su combinación entre la UnLimbited Arm y un diseño externo como encaje para el bíceps que permita el cierre y agarre de objetos por un sistema de hilos generado desde el hombro del usuario [13].

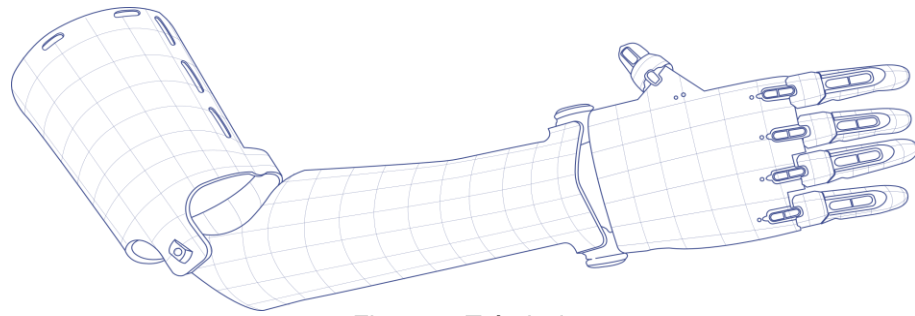


Figura 7. Trésdesis.

1.1.3. Prótesis biónicas y electromecánicas

Las prótesis biónicas son sistemas más complejos que las biomecánicas y es que estas consisten en un desarrollo más detallado y multidisciplinario debido a que involucra elementos mecánicos como eléctricos y sensores para captar señales biológicas provenientes del usuario como aquellas que comunican los grupos musculares [13].

El hecho de producir una prótesis de este tipo genera un aumento grande en el costo por sus componentes electrónicos de difícil acceso, sin embargo, esto no ha impedido que el grupo de investigación de Humanos3D no haya buscado forma de reducir costos y encontrar maneras de reproducir prótesis biónicas.

A la fecha, se han logrado desarrollar 3 dispositivos de asistencia biónicos, que, aunque no se hayan donado todavía, si se han realizado pruebas de funcionalidad que han resultado bastante satisfactorias. Estos modelos son los siguientes:

- **El Medallo V1:** es la prótesis biónica de código abierto más barata del mundo, posee 2 diferentes tipos de agarre, pinza y de fuerza, cada una activada por señales de un sensor de electromiografía (EMG) provenientes de 2 contracciones de los músculos [14].



Figura 8. El Medallo V1.

- **Robotic Arm:** viene en dos versiones v2 y v3 siendo 2 actualizaciones de El Medallo en donde se incorporan servo motores para mejorar el agarre y un sistema inalámbrico para una mejor adaptación [15].



Figura 9. Robotic Arm.

Por otro lado, se encuentran las prótesis electromecánicas, consisten en sistemas electrónicos que se adaptan a sistemas mecánicos para generar movimiento a partir de energía eléctrica. Pueden ser de bajo costo, aunque también existen de gama alta dependiendo de que materiales se usen. Actualmente la empresa posee un dispositivo de este tipo llamado **el céfiro** donado a un niño con una malformación congénita que reduce su mano a un solo grado de libertad accionando una pinza con un botón [16].

1.1.4. Socket

Anteriormente se hablaron de las prótesis que pueden ser fabricadas con diferentes elementos y diferentes características y fines, sin embargo, un tema importante es el encaje que se diseña para adaptarse al miembro residual, en el lenguaje de rehabilitación esta pieza es llamada Socket y es fundamental para mejorar el agarre y fuerza del dispositivo y obtener una mejor comodidad por parte del usuario y desempeño en sus funciones [17].

A pesar de que existen muchos tipos de encajes o socket, en este documento se hará énfasis en uno en especial. Un modelo realizado en Monterrey, México pretendía crear un nuevo sistema de suspensión capaz de ajustarse a diversos tipos de anatomías y soportar diferentes cargas de tensión aplicadas al órgano protésico para así aumentar la comodidad del paciente al tener puesta la prótesis [18].

En la Figura 10 se muestra cómo se aplican las fuerzas sobre el enmallado. La fuerza que sale del sistema corresponde a la fuerza de tensión ejercida en el enmallado cuya magnitud será la masa colgante multiplicada por la gravedad en otras palabras corresponde al peso del objeto suspendido. Las demás fuerzas serán efecto de una compresión en el brazo del usuario derivado de la tensión existente. La función principal del enmallado es servir de soporte y permitir el encaje entre el sistema de suspensión y el muñón del paciente, finalmente esta pieza se une a un recipiente cilíndrico imitando una extremidad.

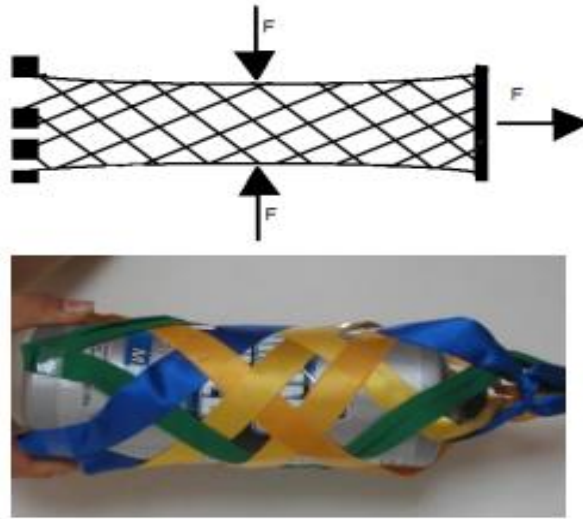


Figura 10. Distribución de las fuerzas sobre un sistema de enmallado.

Ejemplos de conexión al paciente del enmallado y del socket se puede apreciar en las Figuras 11 y 12, las cuales muestran la adaptación final del sistema de enmallado con el socket y el enmallado acoplado al miembro residual con carga [19].



Figura 11. Socket con integración de enmallado.



Figura 12. Enmallado con carga aplicada.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Desarrollar una prótesis electromecánica funcional de miembro superior controlada a partir de una aplicación móvil web de bajo costo mediante impresión 3D dirigida a un usuario con amputación transhumeral para mejorar la calidad de vida del beneficiario.

2.2. Objetivos específicos

1. Diseñar, modificar y escalar las piezas correspondientes del dispositivo en un programa de diseño asistido por computadora (CAD) de acuerdo con las medidas del beneficiario para un acople preciso.
2. Construir un sistema electrónico que permita controlar los componentes mecánicos del dispositivo.
3. Realizar una aplicación web que permita la comunicación entre el usuario y el dispositivo por medio de una interfaz gráfica que facilite el control del sistema.
4. Evaluar y llevar a cabo una prueba de concepto para verificar la funcionalidad del dispositivo por medio de pruebas físicas sobre objetos pequeños.

3. METODOLOGÍA

3.1. Problema a solucionar

En el área de practicantes, la empresa propone diferentes proyectos de beneficiarios que han enviado sus casos para ser evaluados debido a que son particulares ya que no son sencillos de solucionar con las prótesis convencionales que produce la empresa, es por esto por lo que el practicante deberá escoger uno de estos casos para plantear una solución.

Los casos propuestos fueron todos sobre amputación transhumeral (TH-S) y desarticulación de codo que presentan una dificultad superior sobre los demás tipos de amputación por su complejo y limitado movimiento siendo un reto para el diseñador. Por tal motivo, se decide realizar una prótesis electromecánica basada en diferentes sistemas actuales como un socket con mecanismo de enmallado, la prótesis biónica HACKberry de código abierto y libre uso diseñada en Japón.

3.2. Fases del proyecto

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en 5 etapas: 1. Identificación del problema, 2. Diseño CAD, 3. Sistema electromecánico, 4. Impresión de piezas, 5. Ensamblaje de prótesis.

3.2.1. Identificación del problema

Las prótesis de tipo TH-S o situaciones transhumerales, generan un mayor esfuerzo sobre el miembro residual por el peso de los dispositivos, por tal motivo un sistema biomecánico con hilos puede ser desgastador causando lesiones y fatiga muscular en el hombro con el paso del tiempo y promoviendo la aparición de cambios posturales o escoliosis [20].

Este proyecto se enfocará en el caso especial de Emmanuel Bornachera Jiménez, un niño de 9 años proveniente de Valledupar, Cesar que nació con malformaciones congénitas transhumeral en sus dos extremidades superior (Figura 5). Su brazo derecho presenta un Rango de Movilidad Limitado (ROM) en su codo, por tal motivo se desarrollará una prótesis electromecánica de tipo transhumeral la cual pueda acoplarse correctamente a su caso en particular y será personalizada a preferencia del beneficiario al personaje de cómics Capitán América. El Anexo 1 presenta el consentimiento informado por parte de los padres del menor en donde autorizan el uso de imágenes, datos y medidas del beneficiario.



Figura 13. Emanuel Bornachera Jiménez.

3.2.2. Diseño CAD

Para el desarrollo CAD se utilizaron como base las piezas de la mano de libre acceso HACKberry creada en Japón como el sistema de agarre de la prótesis [21]. La Figura 14 nos permite ver el diseño original de este modelo. La HACKberry cuenta con diferentes componentes en su estructura entre ellos se encuentran las piezas que conforman los dedos (Falanges distales y proximales por cada dedo), también cuenta con la parte dorsal de la mano y la palma que contienen los motores conectados a través de un sistema mecánico y de engranajes que será explicado más adelante. Adicionalmente, por medio de tornillos de 2mm de diámetro y 6mm de largo se conecta la muñeca de la mano que permite realizar una rotación de forma manual por parte del usuario para acomodarla como este lo desee.

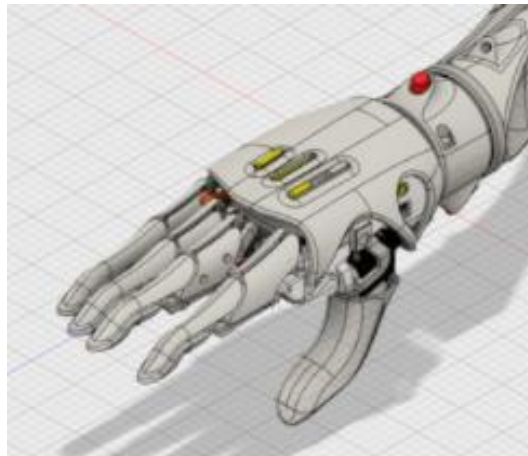


Figura 14. Diseño HACKberry.

Adicionalmente, se realizó un molde negativo con yeso a Emanuel y un escáner del molde para transportarlo al ambiente de diseño (Figuras 15 y 16). La Figura 17 muestra el molde enmallado con elástico siliconado, de tal manera que se ajustara a la medida exacta del beneficiario. Las medidas reales del yeso fueron 190mm de largo con una circunferencia en la base de 200mm.



Figura 15. Molde negativo de Emmanuel.

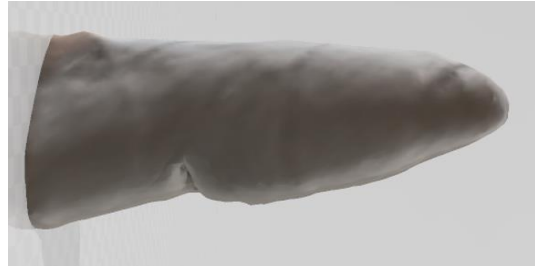


Figura 16. Escaneo del molde negativo.



Figura 17. Molde enmallado.

Teniendo como referencia el prototipo mencionado anteriormente y el molde realizado, se realizaron 3 diseños que consisten en un socket, un acople para el enmallado y un antebrazo en el software de diseño asistido por computadora **FUSION 360** teniendo en cuenta las características métricas de Emmanuel encontradas en el Anexo 2. Las Figuras 10-12 nos presentan las diferentes perspectivas de los diseños realizados por cada pieza.

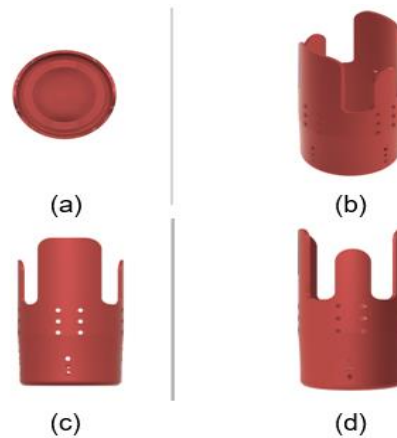


Figura 18. Diseño socket. a) Vista superior. b) Vista ortográfica. c) Vista frontal. d) Vista derecha.

La Figura 18 muestra el diseño del socket que contendrá el miembro residual del usuario. Esta pieza es clave para garantizar una buena sujeción de la prótesis al brazo, posee en su interior un sistema de encaje giratorio que permite enganchar el encaje del enmallado y a sus laterales tiene orificios de 3mm de diámetro para unirse con las bisagras que lo conectan con el antebrazo por medio de tornillos de 3mm de diámetro y 6mm de largo.

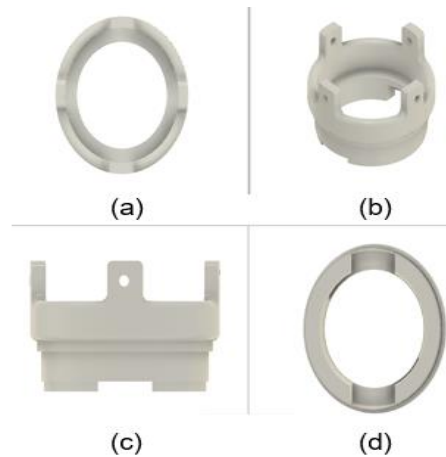


Figura 19. Diseño encaje enmallado. a) Vista superior. b) Vista ortográfica. c) Vista frontal. d) Vista inferior.

En la Figura 19 se puede ver el diseño de la pieza de encaje entre el socket y el enmallado de silicona. En la parte inferior cuenta con una adaptación que permite conectarse con el socket y por medio de una leve rotación queda fija al resto de la prótesis. La parte superior cuenta con 4 torres cada una con un orificio de 3 mm de diámetro que permite atornillar la tela de la malla a la pieza plástica.

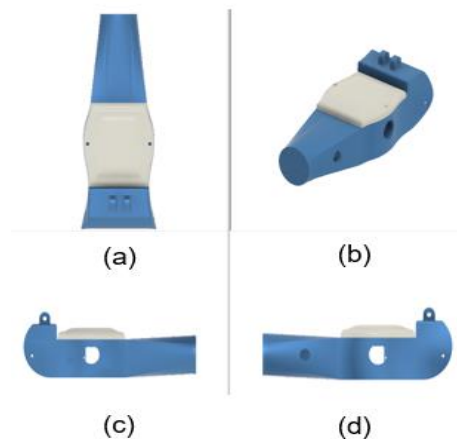


Figura 20. Diseño antebrazo. a) Vista superior. b) Vista ortográfica. c) Vista izquierda. d) Vista derecha.

Por último, se diseñó el antebrazo (Figura 20), pieza fundamental debido a que sirve como puente entre la mano y el socket, además, cuenta con un espacio interno especialmente para incorporar la PCB y los componentes electrónicos. A sus dos costados tiene orificios especiales para insertar el botón de prendido/apagado y un indicador de batería junto con el espacio para cargar las pilas.

3.2.3. Sistema electromecánico

3.2.3.1. Diseño del sistema electrónico

Para acondicionar el microcontrolador y los diferentes actuadores se tuvo en cuenta la siguiente secuencia:

- **Definición de componentes electrónicos:** teniendo claras las consideraciones del sistema, en la Tabla I se determinaron los componentes que se ajustaran a los requerimientos necesarios para que el dispositivo funcione.
- **Desarrollo del esquemático y PCB:** en esta etapa se realiza la distribución del circuito y la ubicación de los componentes en el acondicionamiento del sistema con ayuda del software easyEDA, además de la posible distribución de los componentes en una PCB.
- **Montaje en protoboard:** basados en el esquemático desarrollado se realiza un montaje de los componentes para observar su funcionamiento y comprobar los valores de corriente y voltaje requeridos en el sistema.
- **Montaje de PCB:** teniendo un funcionamiento adecuado de los componentes previamente probados en la protoboard se procede a soldarlos en una tarjeta electrónica con sus respectivas consideraciones.
- **Prueba preliminar:** teniendo un montaje funcional se realizan las pruebas de calibración para el brazo robótico y se evidencia su respectiva funcionalidad.
- **Consideraciones del sistema:** para el desarrollo del circuito electrónico se tuvieron presentes las siguientes consideraciones que se pueden determinar en la tabla a continuación:

Tabla I
COMPONENTES ELECTRÓNICOS Y ESPECIFICACIONES

Componente	Especificaciones
ESP32 DEVKIT V1	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de Alimentación (USB): 5V DC • Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC • Placa: ESP32 DEVKIT V1 (Espressif) • SoM: ESP-WROOM-32 (Espressif) • SoC: ESP32 (ESP32-D0WDQ6) • CPU: Dual core Tensilica Xtensa LX6 (32 bit) • Frecuencia de Reloj: hasta 240Mhz • Wifi: 802.11 b/g/n/e/i (802.11n @ 2.4 GHz hasta 150 Mbit/s) • Bluetooth: v4.2 BR/EDR and Bluetooth Low Energy (BLE) • Pines Digitales GPIO: 24 (Algunos pines solo como entrada) • Pines PWM: 16 • Pines Analógicos ADC: 18 (3.3V) • Conversor Digital a Analógico DAC: 2 (8bit) • Chip USB-Serial: CP2102
Baterías de litio NCR18650	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje: 3,6V • Capacidad nominal: 3300-3400mAh • Peso: 48,5g • Voltaje de corte de carga: 4,2V • Voltaje de corte de descarga: 2,5V
TP4056	<ul style="list-style-type: none"> • Protección de baterías LiPo o Li-ion • Corriente de 1A ajustable • Vin: 4,5V-5.5V • Micro USB • Protección de carga, descarga y sobrecarga
StepDown XL4015	<ul style="list-style-type: none"> • Módulo DC-DC variable en voltaje • Corriente de salida: 5A • Voltaje de alimentación: 6-38 V • Voltaje de salida: 1.25-36V ajustable • Potencia de salida: 75W • Eficiencia: 96%
Servomotor Mg90s	<ul style="list-style-type: none"> • Peso: 13.4 g • Torque: 1.8 kgf*cm (4.8V) – 2.2 kgf*cm (6 V) • Velocidad de operación: 0.1 s/60° (4.8V) – 0.08 s/60° (6V) • Vop: 4.8V – 6.0V • Iop: 2.7mA (Inactiva) – 400mA (Carga) – 70mA (Sin carga) → 5V

3.2.3.2. Desarrollo de la aplicación para el control del dispositivo

Esta etapa se centra en establecer el vínculo entre el dispositivo y el usuario. El microcontrolador encargado de procesar las señales de entrada y salida que controlarían el mecanismo de activación del brazo robótico es el ESP32 DEVKIT V1 que contiene el SoC (System on a Chip) ESP32 como núcleo central para el procesamiento de tareas en el sistema, dado que cumple con los siguientes requerimientos basados en la solución escogida:

- Liviano (portabilidad) y de bajo costo comparado a tarjetas como Arduino o Raspberry Pi
- Voltaje de alimentación (5V)
- Protocolo de comunicación inalámbrica: Wifi
- Pines de entrada y salida para implementación de servomotores
- Lenguaje de programación: basado en C/C++ (análogo al lenguaje de Arduino)
- Posibilidad de alimentación con baterías de litio

Con el microcontrolador seleccionado, se procedió al desarrollo del aplicativo necesario para accionar tres servomotores. En este se tuvo presente la facilidad del ESP32 para funcionar como servidor y así poder construir una página web que permita el control del brazo robótico de manera remota y desde cualquier dispositivo con acceso a red Wifi. Para esto, se implementaron los lenguajes para desarrollo web HTML5, CSS, JS y C/C++.

A continuación, se enuncian los diferentes segmentos que componen en su totalidad el aplicativo web desarrollado.

- **Protocolo de comunicación:** para construir el servidor web con el ESP32 se usó el protocolo **WebSocket** que permite una conexión persistente entre un cliente y el servidor, el cual permite una comunicación bidireccional entre ambas partes usando conexión TCP (Transmission Control Protocol). Lo anterior indica que se pueden enviar datos desde el cliente al servidor y desde el servidor al cliente en cualquier momento, tal y como se observa en la Figura 21 [22].

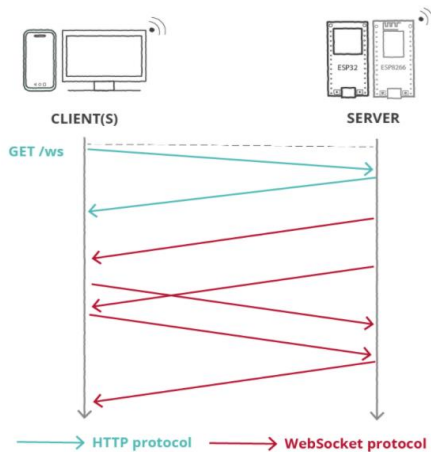


Figura 21. Protocolo de comunicación.

- **Sistema de archivos:** el ESP32 contiene una interfaz periférica serial para el sistema de archivos en la memoria flash (SPIFFS – Serial Peripheral Interface Flash File System) que permite fácilmente subir archivos al ESP32 usando un complemento de Arduino IDE. Esta herramienta permitió guardar los archivos de HTML, CSS y JS desarrollados para construir el servidor web.
- **Código HTML:** con el lenguaje de marcado de hipertexto se estructuró el contenido de la página web que se desarrolló, siendo esta compuesta por dos pestañas; la primera de ellas contiene un inicio de sesión por parte del usuario y la segunda los diferentes botones y controles deslizantes que permiten interactuar de manera remota con el brazo robótico.
- **Código JS:** este lenguaje de programación permitió desarrollar los algoritmos para la comunicación WebSocket y las diferentes funciones que están ligadas a cada componente de la página web, en adición a esto, permitió el envío y recepción de datos desde el aplicativo web al ESP32.
- **Código CSS:** las estructuras desarrolladas con este lenguaje de estilos permitieron estructurar la presentación de la página web; de esta manera se pudo definir los diferentes colores, alineaciones de texto, fuentes, tamaños, espaciados, capas, bordes, entre otros, que dieron estilo a la página web.
- **Código C/C++ - Arduino:** este último segmento desarrollado para la página web contiene el algoritmo que permite la comunicación WebSocket, la habilitación del servidor y la activación de los diferentes actuadores del sistema. A parte de que permite enviar datos al aplicativo web y recibirlos para el ESP32, facilita la interacción del microcontrolador con los servomotores por medio de estructuras lógicas e instrucciones específicas.

3.2.4. Impresión de piezas

La impresión de las piezas se llevó a cabo en dos partes. En la primer parte se utilizaron 3 softwares de corte más conocidos como slicers 3D o laminadores que permiten dividir en capas las piezas contenidas en un archivo tipo STL (Standard Triangle Language) que define la geometría con triángulos de los objetos en 3D y permite el procesamiento de las piezas por medio de bases, soportes, relleno y calidad para preparar sus respectivas impresiones en un archivo G-code [23]. Los 3 softwares son: PrusaSlicer, Ultimaker Cura 4.9.1, y FlashPrint 5 y corresponden a tres diferentes impresoras las cuales son: Original Prusa i3 MK3S+, Ultimaker 2+ connect y Flashforge Guider IIs. La segunda parte consistió en la preparación de las impresoras y debido a que cada conjunto de piezas se imprimió en diferentes colores se tenía que realizar el cambio de filamento seguido de un ajuste de cama de la impresora y supervisión de la impresión.

A continuación, se muestran las imágenes de los conjuntos de las piezas laminadas en el respectivo software con el producto final de la impresión. Cada conjunto de piezas fue laminado con un 40% de relleno con soportes y con una base de adhesión llamada brim. Todas las piezas fueron impresas en PLA, un polímero o bioplástico.

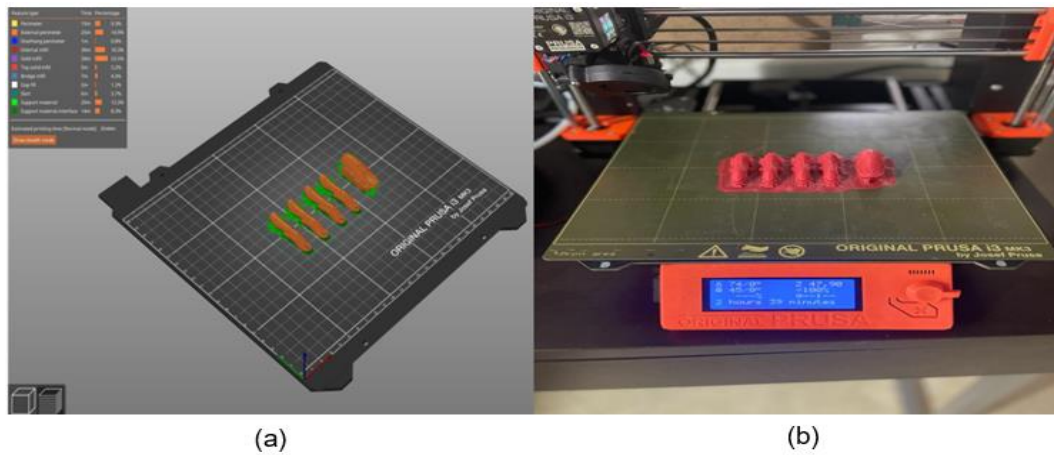


Figura 22. Dedos (falanges distales). a) Software PrusaSlicer b) Resultado impresión.

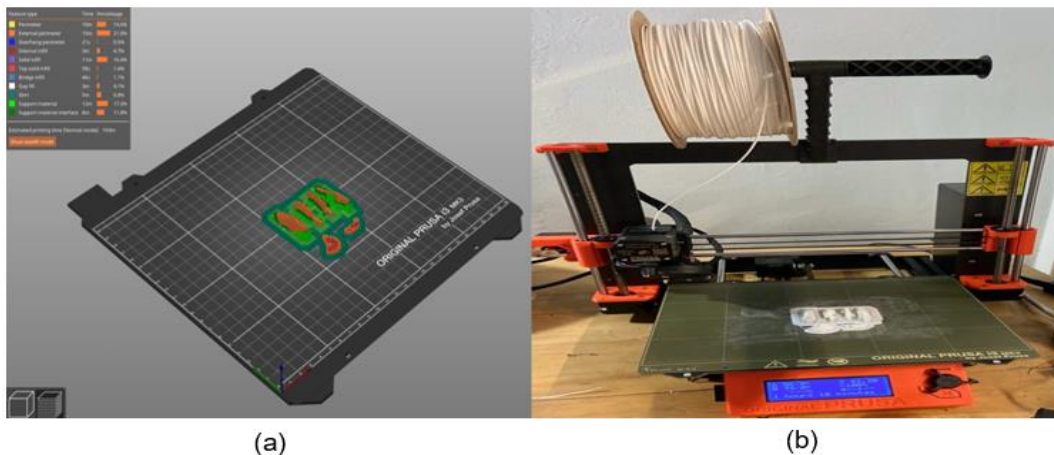


Figura 23. Falange proximal índice. a) Software PrusaSlicer. b) Resultado impresión.

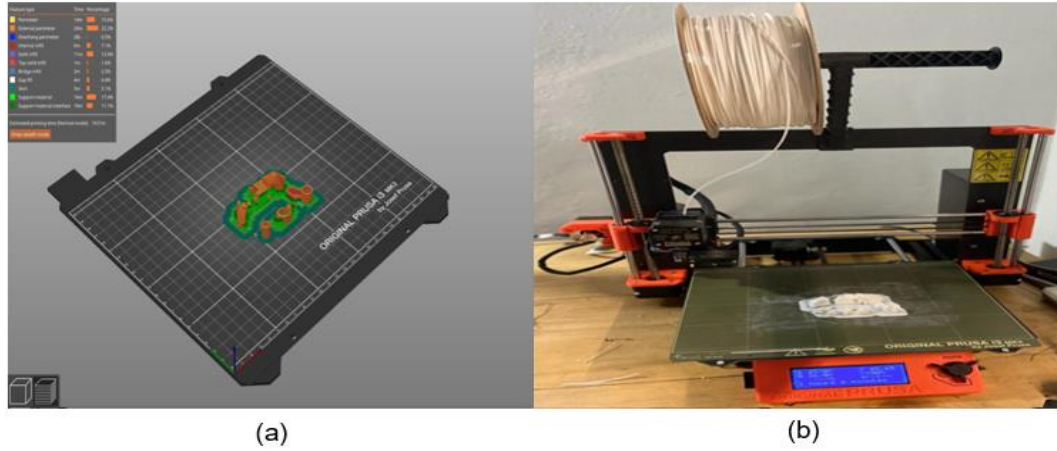


Figura 24. Falange proximal pulgar. a) Software PrusaSlicer. b) Resultado impresión.

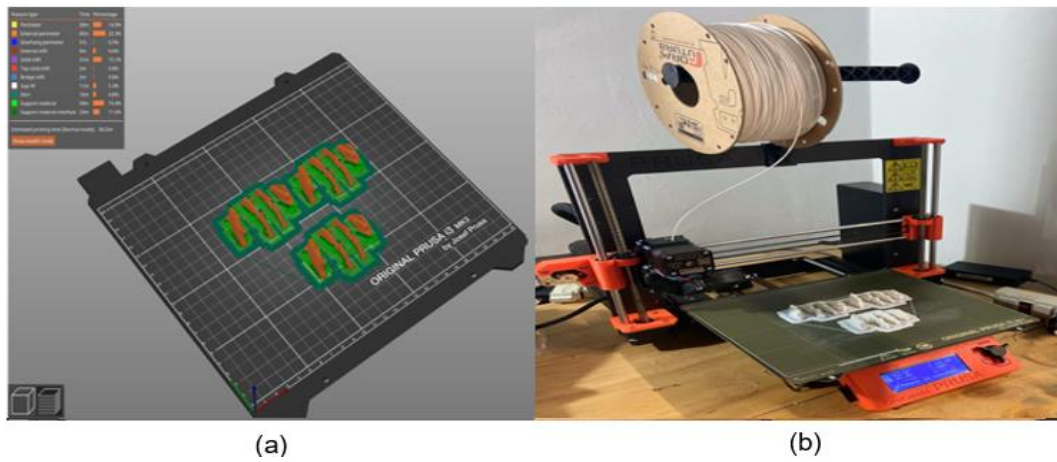


Figura 25. Falange proximal otros dedos. a) Software PrusaSlicer. b) Resultado impresión.

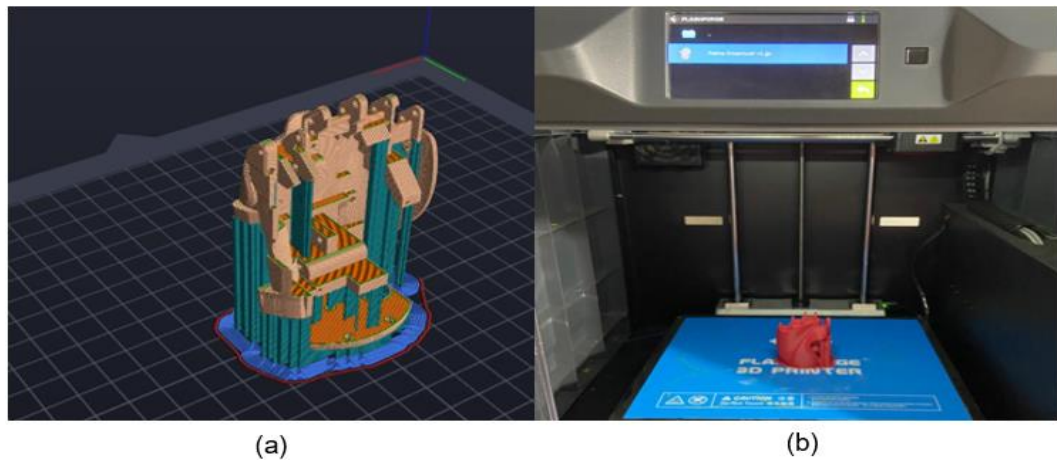


Figura 26. Palma. a) Software FlashPrint 5. b) Resultado impresión.

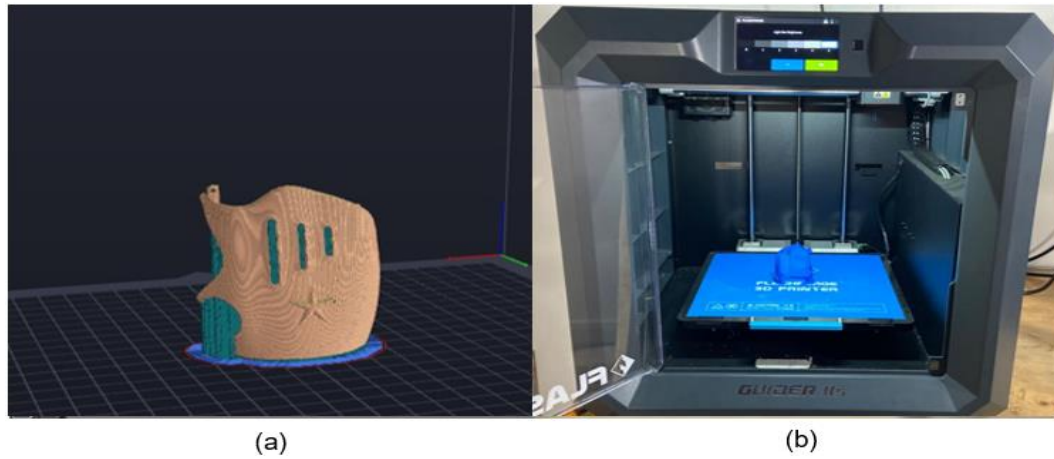


Figura 27. Dorso de la mano. a) Software FlashPrint 5. b) Resultado impresión.

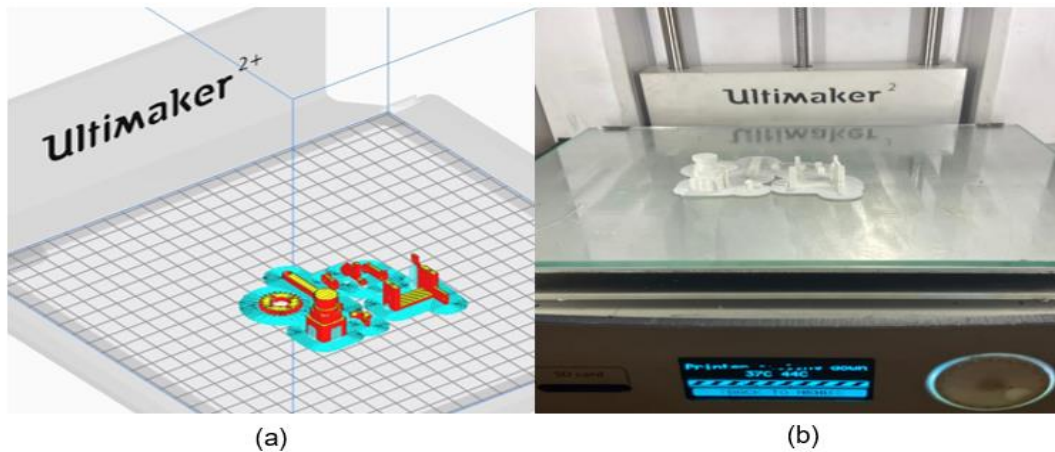


Figura 28. Piezas de ensamble. a) Software Ultimaker Cura 4.9.1. b) Resultado impresión.

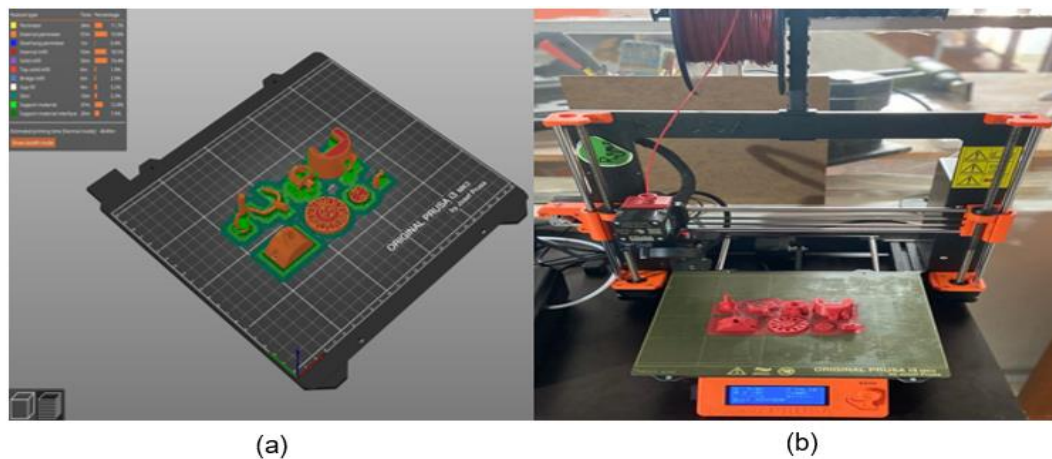
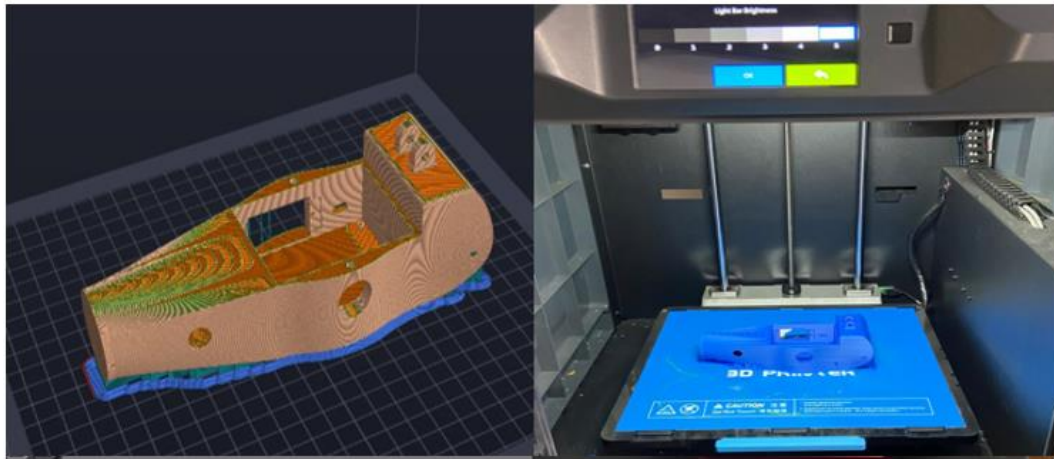


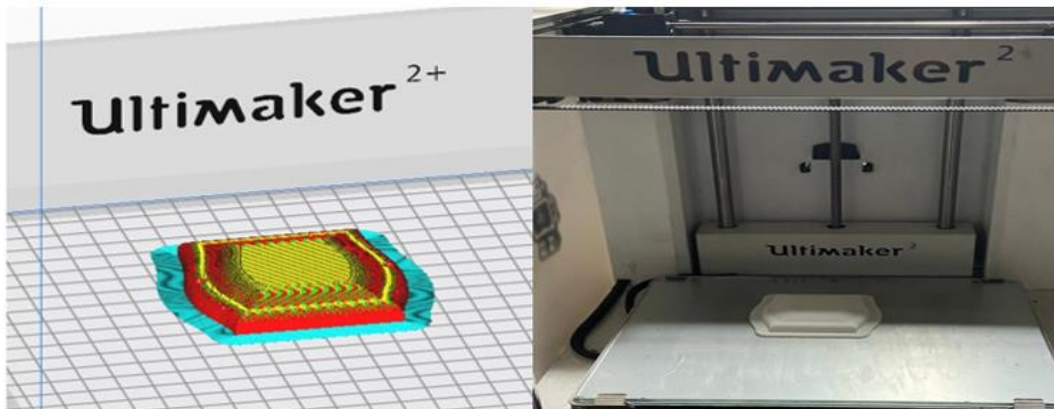
Figura 29. Muñeca. a) Software PrusaSlicer. b) Resultado impresión.



(a)

(b)

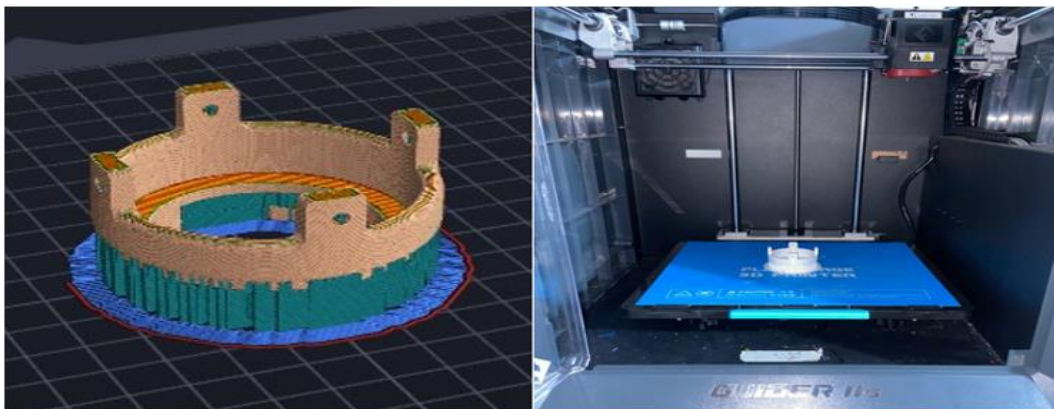
Figura 30. Antebrazo. a) Software FlashPrint 5. b) Resultado impresión.



(a)

(b)

Figura 31. Tapa antebrazo. a) Software Ultimaker Cura 4.9.1. b) Resultado impresión.



(a)

(b)

Figura 32. Acople socket. a) Software FlashPrint 5. b) Resultado impresión.

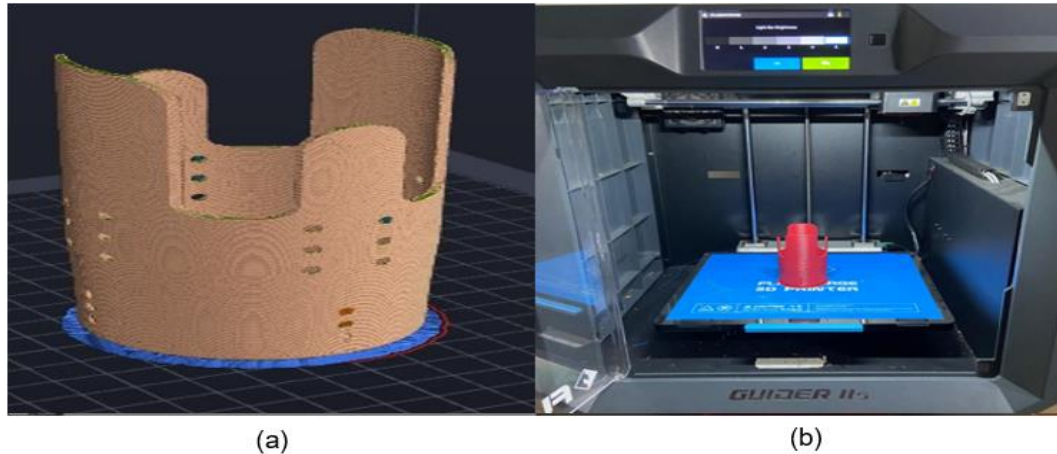


Figura 33. Socket. a) Software FlashPrint 5. b) Resultado impresión.

3.2.5. Ensamblaje de prótesis

Una vez las piezas fueron impresas se pulieron antes de ser ensambladas debido a que se debe retirar exceso de filamento y los soportes generados durante la impresión con el fin de mejorar la calidad de las piezas y también la estética de estas. La Figura 26 nos muestra el resultado final de las piezas una vez fueron procesadas.

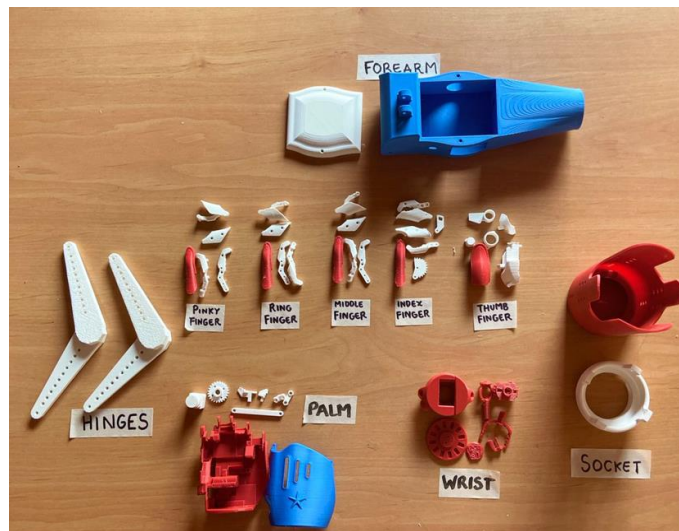


Figura 34. Piezas limpias.

Primero, se unieron los dedos con los falanges por medio de tornillos y ejes metálicos, posteriormente se ensambló la primera mitad de la mano (Figura 27) compuesta por los dedos, la palma, la muñeca y las piezas pequeñas de ensamble con el fin de encajar y atornillar los 3 servomotores que irán instalados en la mano cuya finalidad será controlar los movimientos de los dedos.

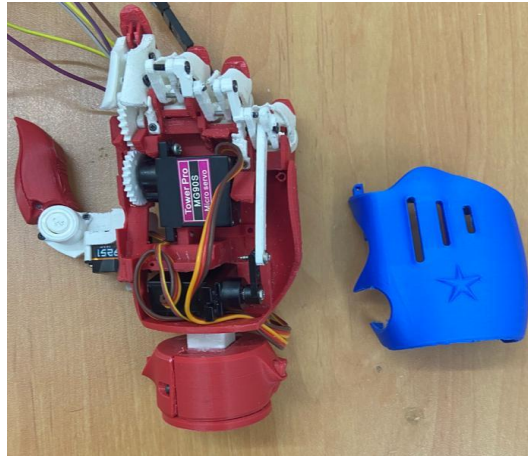


Figura 35. Instalación de servomotores.

Después de acomodar los motores estratégicamente, se hace el cierre de la mano como se puede ver en la Figura 28.

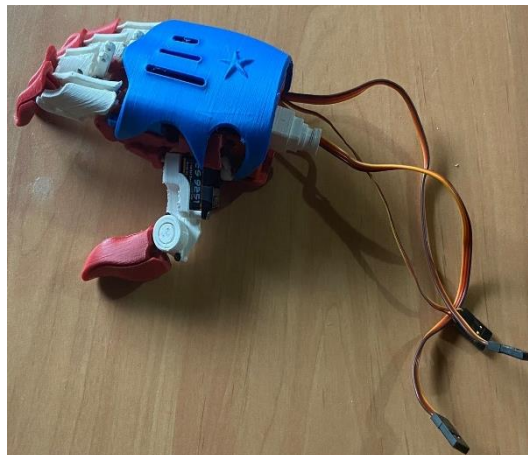


Figura 36. Mano ensamblada.

Luego de tener la mano completamente ensamblada se procede a unir al antebrazo conectándolo por la muñeca con tornillos (Figura 29). El antebrazo cuenta con una tapa que se sella después de haber instalado la electrónica dentro de este con 3 orificios en sus paredes externas que permiten direccionar los cables de los motores desde afuera hacia adentro, otro en donde se muestra un estado de la batería del brazo y en el tercero un botón de encendido y apagado del dispositivo.



Figura 37. Mano y antebrazo ensamblados.

Finalmente, se introduce el acople del enmallado dentro del socket y por medio de dos bisagras se unen con el resto del brazo usando tornillos de 3mm de diámetro (Figura 30). El Anexo 3 muestra el presupuesto total para el proyecto teniendo en cuenta sus componentes electrónicos y materiales plásticos de impresión.

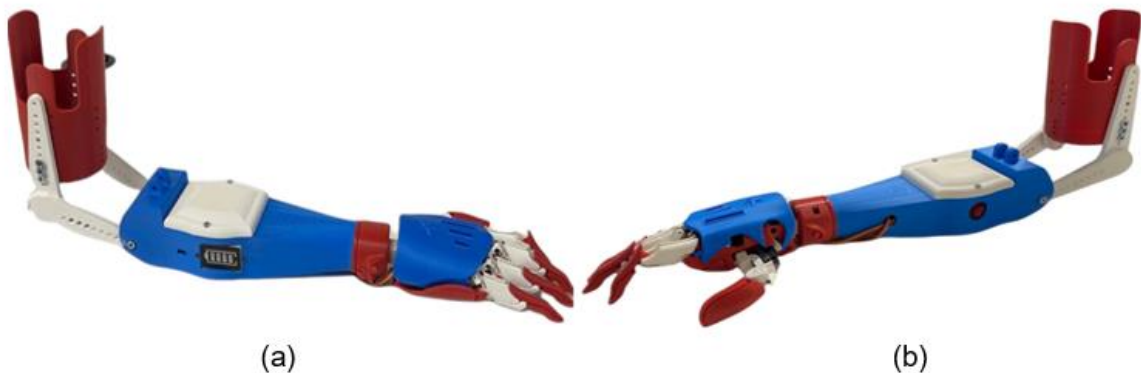


Figura 38. Prótesis electromecánica completamente ensamblada. a) Vista izquierda. b) Vista derecha.

3.3. Cronograma de actividades

En la Tabla 2 se presentan por medio de un diagrama de Gantt las actividades realizadas dentro de los meses de desarrollo del dispositivo de asistencia enfocado a Emmanuel.


Tabla II
PLAN DE TRABAJO PARA EL DISEÑO DE PRÓTESIS EMANNUEL BORNACHERA JIMÉNEZ

Mes	Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre			
Actividad / Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Analizar caso, tecnologías y soluciones	■	■	■																									
Realizar estado del arte acerca de tecnologías para amputaciones TH-S					■	■	■	■																				
Lluvia de ideas para evaluar diseños							■	■																				
Primera pieza y fecha de primer entregable									■	■	■	■	■	■	■	■												
Inicio de documento caso clínico (Resumen, introducción y caso clínico)										■	■	■	■	■	■	■												
Segunda pieza y fecha de segundo entregable																■	■	■	■	■								
Avances del documento (metodología)																	■	■	■	■								
Tercera pieza y fecha del tercer entregable																				■	■	■	■	■				
Impresión y ensamblaje de piezas																							■	■				
Cierre del documento (Resultados, Análisis, Conclusiones, Futuras mejoras)																									■	■	■	■
Presentación final proyecto																											■	■

4. RESULTADOS

Se realizó un registro de la cantidad de material usado, el tiempo total de impresión y el número total de piezas impresas para la elaboración de la prótesis transhumeral dirigida a Emmanuel. De igual manera, se identificaron las impresoras utilizadas y se separaron por colores los filamentos de PLA aplicados a cada conjunto de piezas y al dispositivo se le nombró "VisionArm". En total se gastaron 290,5 gramos de filamento equivalente a 91,95 metros con un tiempo total de impresión de 38 horas y 54 minutos para 51 piezas necesarias. Esta información se puede encontrar en la Tabla III.

Tabla III
TRAZABILIDAD PRÓTESIS TRANSHUMERAL EMANNUEL

				REGISTRO DE TRAZABILIDAD PRÓTESIS TRANSHUMERAL			Tipo de prótesis: VisionArm		
				Usuario		Emmanuel Bornachera		Estilo: Capitán América	
				Responsable		Sebastián Barbudo González		Transhumeral	
NÚMERO DE PIEZA	NOMBRE DE LA PIEZA	PARAMETROS SOFTWARE		IMPRESORA	TIEMPO SOFTWARE		FILAMENTO	ESTADO	NÚMERO DE PIEZAS
		Cantidad [g]	[m]		Horas	Minutos			
1	Dedos (Falanges distales)	15,84	5,31	Prusa	2	44	PLA - Rojo	Listo	5
2	Falange proximal indice	5,29	1,77	Prusa	1	9	PLA - Blanco	Listo	6
3	Falange proximal pulgar	7,55	2,54	Prusa	1	31	PLA - Blanco	Listo	5
4	Falanges proximales otros dedos	14,46	4,85	Prusa	3	23	PLA - Blanco	Listo	12
5	Palma de la mano	25,64	8,6	Flashforge	3	31	PLA - Rojo	Listo	1
6	Dorso de la mano	18,09	6,07	Flashforge	2	46	PLA - Azul	Listo	1
7	Piezas de ensamble	6	0,76	Ultimaker	0	55	PLA - Blanco	Listo	8
8	Muñeca	27,23	9,14	Prusa	4	49	PLA - Rojo	Listo	9
9	Antebrazo	93,29	31,28	Flashforge	8	19	PLA- Azul	Listo	1
10	Tapa antebrazo	20	2,48	Flashforge	2	33	PLA - Blanco	Listo	1
11	Acople socket	17,75	5,95	Flashforge	1	59	PLA - Blanco	Listo	1
12	Socket	39,36	13,2	Flashforge	5	15	PLA- Rojo	Listo	1
TOTAL		290,50	91,95		32	414			51

Con respecto al sistema electrónico, a continuación en la Figura 31, se puede observar el esquemático del circuito implementado el cual contiene dentro de sus componentes dos módulos de cargador de batería TP4056, un StepDown XL4015 3 servo motores y un microcontrolador ESP32 DEVKIT V1.

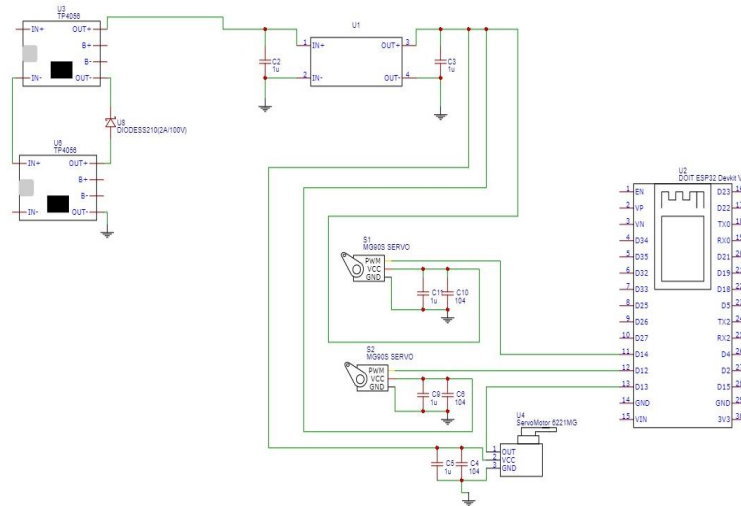


Figura 39. Esquemático conexiones de los componentes electrónicos.

También se realizó la versión del esquemático en un modelo de PCB para compactar más el circuito y fijarlo mejor (Figura 32).

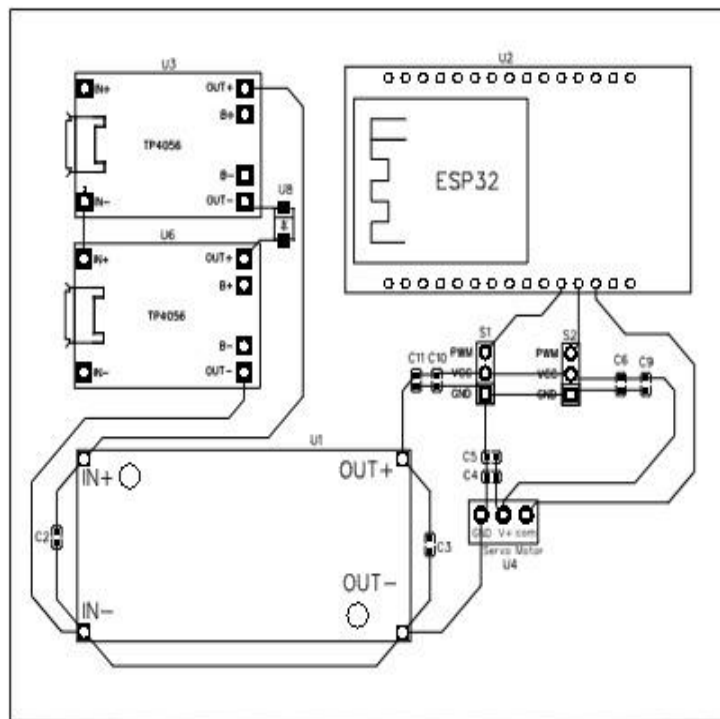


Figura 40. Esquemático para PCB.

Debido a que las dimensiones del brazo diseñado para Emmanuel eran muy pequeñas, reducir el circuito a tal punto fue complicado, es por esto por lo que se realizaron las pruebas de concepto conectando el brazo a una protoboard como se ve en la Figura 33.

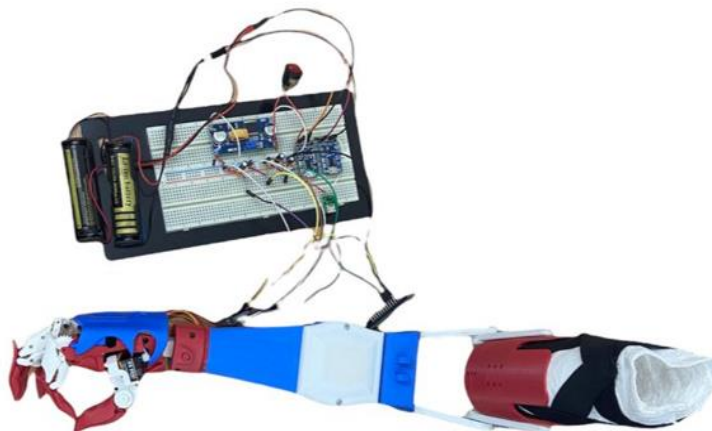


Figura 41. Circuito sobre protoboard conectado al dispositivo.

En la Figura 34 podemos observar la página de inicio de sesión a la interfaz diseñada para que el usuario pueda acceder de manera segura a las funciones de su prótesis. Esta se conforma de Usuario y contraseña que se le entrega al beneficiario junto con el dispositivo.

VisionArm HUMAN 3D

Ingrese su nombre

Emmanuel ✓

Ingrese su clave

..... ✓

Ingresar

Figura 42. Interfaz inicio de sesión.

Una vez el usuario inicia sesión se encontrará con la interfaz mostrada en la Figura 35, en donde podrá hacer uso de diferentes acciones como el ajuste manual de la posición de los ángulos de los motores de los dedos o elegir una configuración en especial que vienen por defecto con diferentes movimientos de la mano.



Figura 43. Interfaz de control del VisionArm.

Las pruebas de concepto se realizaron haciendo que la mano lograra imitar los 6 diferentes tipos de configuraciones propuestos los cuales son: agarre de fuerza, agarre de precisión, Uso de teclado o señalar, Pulgar arriba o bien, Puño o saludo, y por último home o reestablecer que deja la mano en su posición inicial completamente abierta. La Tabla IV nos muestra los ángulos que deben cumplir los dedos de la mano para llevar a cabo dichos movimientos.

Tabla IV
CONFIGURACIONES PREDETERMINADAS VISIONARM

Tipo de movimiento	Dedo	Ángulo servo (°)
Agarre fuerza	índice	60
	Pulgar	80
	Otros	75
Agarre de precisión	índice	80
	Pulgar	80
	Otros	30
Manejar teclado computador	índice	20
	Pulgar	145
	Otros	100
Pulgar arriba	índice	120
	Pulgar	160
	Otros	100
Puño	índice	120
	Pulgar	60
	Otros	100
Home	índice	20
	Pulgar	160
	Otros	30

De la Figura 36 a la Figura 41 se puede ver la mano realizando los diferentes movimientos predeterminados al presionar sobre el ícono que representa tal configuración.



(a)



(b)

Figura 44. Agarre de fuerza. a) Interfaz. b) movimiento ejecutado.

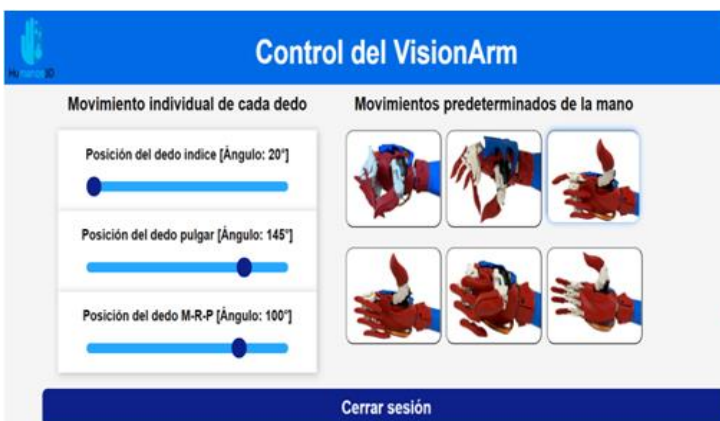


(a)



(b)

Figura 45. Agarre de precisión. a) Interfaz. b) movimiento ejecutado.



(a)



(b)

Figura 46. Teclado o señalar. a) Interfaz. b) movimiento ejecutado.



(a)



(b)

Figura 47. Pulgar arriba. a) Interfaz. b) movimiento ejecutado.



(a)



(b)

Figura 48. Mano cerrada o puño. a) Interfaz. b) movimiento ejecutado.



(a)



(b)

Figura 49. Home. a) Interfaz. b) movimiento ejecutado.



Figura 50. Prueba de agarre de precisión sobre un objeto pequeño rugoso.



Figura 51. Prueba de agarre de precisión sobre un objeto pequeño liso.



Figura 52. Prueba de agarre de fuerza sobre un objeto grande macizo.

5. DISCUSIÓN

Los diseños realizados en CAD mostraron ser estéticos y funcionales, se adaptaron y se lograron ensamblar fácilmente con las otras piezas, la impresión fue exitosa y poco material fue malgastado durante el proceso, a esto también se le puede retribuir la calidad que tienen los softwares de corte 3D para garantizar la mejor calidad de las piezas. Con respecto a la trazabilidad de la prótesis, se logró establecer un aproximado del material gastado como el filamento y por otra parte el tiempo requerido para reproducir un dispositivo que tenga características similares a las de Emmanuel y así a futuro poder estandarizar los dispositivos que se entreguen.

La unión entre el modelo HACKberry, el enmallado y el diseño propuesto puede ser una muy buena opción para casos transhumerales, ya que proporciona una excelente fijación en el órgano residual por medio de una malla y socket y a su vez un buen control de agarre por parte de los dedos y sus configuraciones predeterminadas.

A pesar de no que no se pudo realizar pruebas con el paciente, el socket diseñado logró conectar perfectamente con el molde de yeso y el enmallado, lo cual nos da un indicio de cómo le quedaría el dispositivo a Emmanuel, garantizando de esta manera una buena ergonomía y comodidad al usuario. Adicionalmente, se cumple el concepto de una prótesis de tipo transhumeral.

La comunicación establecida entre el servidor y el cliente a través de la aplicación web promete ser efectiva por su forma de ingreso brindando mayor seguridad y se espera un buen desempeño por ser interactiva, fácil de entender y utilizar. Además de que es un beneficio que los sistemas puedan comunicarse entre diferentes lenguajes de programación permitiendo al diseñador web mayor comodidad con el entorno.

Con respecto a la electrónica, aunque permitió controlar los motores instalados correctamente y llevar al dispositivo a realizar los diferentes movimientos preseleccionados, sigue ocupando mucho espacio, de ese modo generando mayor peso sobre el brazo, dificultad de acople con el resto del sistema y problemas al encajar dentro del antebrazo. Debido a este gran tamaño, tiene muchos componentes lo cual sin duda eleva el costo sobre el producto y se debe tener en cuenta que se buscan prótesis de bajo costo.

Es importante reconocer que los avances en este tipo de tecnologías generan un gran impacto en la salud de las personas y promueve la innovación en desarrollos que impliquen mejorar la calidad de vida y ayudar a personas de bajos recursos. Por medio de este proyecto se cambia completamente la forma de ver la vida de un niño de 9 años, se le entrega un resultado personalizado al gusto de el lo cual además de ser un dispositivo de asistencia se convierte en un apoyo psicológico para el y su familia que normalmente no podrían acceder a esta tecnología.

6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los dispositivos de asistencia tienen una infinidad de posibilidades y cada uno tiene su forma de interactuar con el paciente. En el caso de las prótesis de miembro superior se busca el reemplazo de la articulación de tal manera que pueda ejercer ciertos grados de libertad. En este caso en particular no se implementó movimiento de codo solo de dedos para ejercer agarre, es por esto por lo que a futuro se puede explorar la forma de generar la flexo extensión en esa zona en particular por medio de señales eléctricas y sistemas mecánicos. Una posible solución era el uso de un actuador lineal que simulara esta acción.

El uso de una aplicación web es algo interactivo, sin embargo, se reconoce que puede llegar a ser reemplazado por sistemas mejores como control por voz o incluso evolucionar a una prótesis biónica e implementar señales fisiológicas a través de EMG para generar el movimiento de los dedos y los diferentes tipos de agarre.

Un detalle que hay que modificar sin duda es el tamaño de los componentes electrónicos, esto mejoraría el acople del circuito dentro del brazo y podría optimizar espacios y estética.

7. CONCLUSIONES

El desarrollo de prótesis electromecánicas de bajo costo es posible con el uso de la impresión 3D. Este proyecto permitió unir diferentes sistemas en uno solo para comprobar que con simples soluciones se puede cambiar la vida de una persona con un sencillo dispositivo que le facilite sus tareas diarias.

La impresión 3D ha permitido materializar las ideas de una manera inimaginable, hoy en día se puede utilizar este tipo de tecnologías para cualquier fin, sin embargo, en un ambiente clínico es perfecto para desarrollar cualquier dispositivo que aporte algo en alguien que necesite un poco de ayuda con las necesidades básicas.

La prótesis diseñada mostró buena resistencia mecánica y fácil de acoplarse entre sí, una ventaja del uso de este dispositivo es que el beneficiario estará interactuando con ella seguido y es fácil de usar, sin embargo, con el paso del tiempo el uso de la aplicación puede llevar al desgaste físico. De igual manera permite dar al portador una mejor estética y apoyo en funciones cotidianas.


Referencias

- [1] "Personas con Discapacidad -PCD1 Oficina de Promoción Social." [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/PS/boletin-poblacionales-personas-discapacidad-010720.pdf>. [Accessed: 20-Nov-2021].
- [2] "Enfoque Discapacidad - Dane." [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/enfoque-diferencial-e-interseccional/enfoque-discapacidad>. [Accessed: 20-Nov-2021].
- [3] "Patrocinadores y Socios," *Humanos3D*, 31-Aug-2021. [Online]. Available: <https://humanos3d.org/es/patrocinadores-y-socios/>. [Accessed: 20-Nov-2021].
- [4] "Sobre nosotros," *Humanos3D*, 11-May-2020. [Online]. Available: <https://humanos3d.org/es/sobre-nosotros/#>. [Accessed: 14-Nov-2021].
- [5] "Academia.utp.edu.co." [Online]. Available: <https://academia.utp.edu.co/programas-de-salud-3/files/2014/02/GUIA-AMPUTADOS.pdf>. [Accessed: 23-Nov-2021].
- [6] N. *, "Todo lo que debes saber sobre amputaciones," *MBA blog*, 22-Mar-2021. [Online]. Available: <https://www.mba.eu/blog/todo-lo-que-debes-saber-sobre-amputaciones/>. [Accessed: 10-Dec-2021].
- [7] J. J. Stokosa, "Opciones para Las prótesis de los Miembros - Temas Especiales," *Manual MSD versión para profesionales*, 16-Nov-2021. [Online]. Available: <https://www.msmanuals.com/es-co/professional/temas-especiales/miembro-prot%C3%A9sico/opciones-para-las-pr%C3%B3tesis-de-los-miembros>. [Accessed: 23-Nov-2021].
- [8] Thingiverse.com, "Knick's prosthetic finger V3.5.5 by Knick," *Thingiverse*. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:1340624>. [Accessed: 23-Nov-2021].
- [9] Thingiverse.com, "E-NABLE phoenix hand V2 by Enablecommunityfoundation," *Thingiverse*. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:1453190>. [Accessed: 23-Nov-2021].
- [10] Thingiverse.com, "Kinetic hand by MatBowtell," *Thingiverse*. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:4618922/files>. [Accessed: 23-Nov-2021].
- [11] Thingiverse.com, "Armpo v3 by PoParaguay," *Thingiverse*. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2803120>. [Accessed: 10-Dec-2021].
- [12] Thingiverse.com, "The UnLimbited arm v2.1 - Alfie Edition by team_unlimbited," *Thingiverse*. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:1672381>. [Accessed: 10-Dec-2021].

- [13] “Trésdesis,” *Ayúdame3D*, 23-Jul-2021. [Online]. Available: <https://ayudame3d.org/tresdesis-2/>. [Accessed: 24-Nov-2021].
- [14] “HUMANOS3D,” *GitHub*. [Online]. Available: <https://github.com/Humanos3D> [Accessed: 24-Nov-2021].
- [15] Humanos3D, “HUMANOS3D/roboticarmv2: Here you can find documentation on second version of the world's first truly open-source low-cost bionic arm by e-NABLE Medellín, now called humanos3d,” *GitHub*. [Online]. Available: <https://github.com/Humanos3D/RoboticArmV2>. [Accessed: 10-Dec-2021].
- [16] Humanos3D, “Home · humanos3d/EI-Céfiro Wiki,” *GitHub*. [Online]. Available: <https://github.com/Humanos3D/EI-Cefiro/wiki>. [Accessed: 24-Nov-2021].
- [17] I. Sánchez Navarro, “Prótesis biónicas, Biología y tecnología.” [Online]. Available: https://gruposdetrabajo.sefh.es/gps/images/stories/publicaciones/pam_2018_42%20411_256-259.pdf. [Accessed: 24-Nov-2021].
- [18] “Socket ajustable para prótesis de Miembro Superior - UNAM.” [Online]. Available: https://vinculacion.unam.mx/images/trans_fichas/medicina/Socket_superior.pdf. [Accessed: 24-Nov-2021].
- [19] J. M. Dorador-González, “Diseño de un socket de Miembro Superior Con Suspensión ajustable.,” *somim.org.mx*, 11-Jun-2014. [Online]. Available: https://www.academia.edu/1217691/DISE%C3%91O_DE_UN_SOCKET_DE_MIEMBRO_SUPERIOR_CON_SUSPENSI%C3%93N_AJUSTABLE. [Accessed: 24-Nov-2021].
- [20] Mediprax, *Mediprax*. [Online]. Available: <https://mediprax.mx/cambios-posturales-tras-la-amputacion-de-brazo/>. [Accessed: 11-Dec-2021].
- [21] “Hackberry: 3D-printable open-source bionic arm,” *exiii*. [Online]. Available: <http://exiii-hackberry.com/>. [Accessed: 11-Dec-2021].
- [22] D. Corte, M. Rotfleisch, R. Santos, Meir, Lou, S. Santos, Gianluca, F. Cardoso, Nkt, Fabio, Jeff, Davide, Phil, J. Bredahl, J. Bredahl, J. Pierre, J. Bredahl, Chris, Vilius, Shyam, D. Konash, Jan, B. O. D. S. O. N. Xavier, G. R. O. S. S. Vincent, R. Villeda, R. James, Alex, P. Chisholm, Bob, J. Anderson, Enrique, Alejandro, Alejhandro, Antonio, J. B. Bugarin, R. Ramírez, Sidharth, Franck, Stephen, and Tony, “ESP32 websocket server: Control outputs (Arduino IDE),” *Random Nerd Tutorials*, 12-Oct-2020. [Online]. Available: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-websocket-server-arduino/>. [Accessed: 26-Nov-2021].
- [23] “¿Qué es un archive .stl?,” *3D Systems*, 14-Oct-2019. [Online]. Available: <https://es.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file>. [Accessed: 12-Dec-2021].

ANEXOS

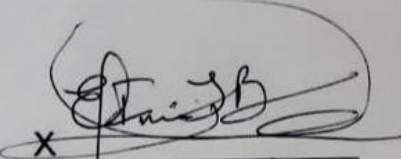
Anexo 1. Consentimiento informado Emmanuel Bornachera.



Humanos3D

Consentimiento informado de uso de fotos e información

Yo con C.C. Erwin José Borrachera 15.171.563 acepto el uso de las fotos y la información tomadas al infante Emmanuel Borrachera J En caso de ser publicadas por parte de la Corporación Humanos 3D, para aumentar la conciencia del proyecto y así mismo para propósitos de gestión de donaciones.

X 
15.171.563
Padre del Menor
Valledupar, Dte 11 de 2021

Anexo 2. Información y medidas de Emmanuel.

DATOS PERSONALES

¡BIENVENIDOS A HUMANOS3D SOMOS UN EQUIPO DE VOLUNTARIOS Y QUEREMOS CREAR UN PRÓTESIS DE TU ELECCIÓN! ¡DE CUALQUIER COLOR O DISEÑO!

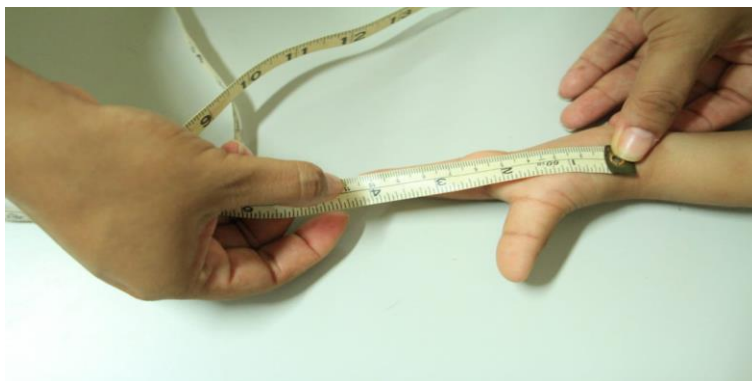
NOMBRE DEL BENEFICIARIO:	EMANNUEL BORNACHERA JIMENEZ
CÉDULA DEL BENEFICIARIO:	1137724783
FECHA DE NACIMIENTO:	18/08/2012
REPRESENTANTE LEGAL:	JHOANA JIMENEZ
RELACIÓN O PARENTESCO:	MAMÁ
NÚMERO DE CONTACTO:	3007254632
DIRECCIÓN DE BENEFICIARIO:	MZ 184 CASA 12 DON ALBERTO
IDENTIFICACIÓN DEL REPRESENTANTE LEGAL:	40879671
TIPO DE PRÓTESIS:	TRANSHUMERAL
COLOR Y PERSONAJE FAVORITO:	CAPITÁN AMÉRICA
¿POR QUÉ NECESITAS LA PRÓTESIS?	MEJORAR LA CALIDAD DE VIDA

Información del brazo SIN amputación

Largo del antebrazo (codo a articulación de muñeca): 12 CM



Largo de la mano (articulación de muñeca a punta del dedo medio): 11 CM



Circunferencia de antebrazo (En la parte más gruesa del antebrazo, proximal al codo): 16.2 CM



Circunferencia del brazo o bicep (En la parte más gruesa del brazo, proximal al codo): 16.1 CM



Información del lado CON AMPUTACION

Circunferencia de antebrazo (proximal al codo): 12 CM



Circunferencia del brazo o bicep (proximal al codo): 13.2 CM



Anexo 3. Presupuesto prótesis transhumeral Emmanuel.

Microcontrolador para el control del brazo robótico			Precio total (cop)
	Cantidad	Precio (cop)	
ESP32	1	\$ 32.011	\$ 32.011
Servomotor movimiento del dedo indice			
	Cantidad	Precio (cop)	
Servo Digital EMAX ES9251	1	\$ 49.724	\$ 49.724
Servomotor movimiento de los dedos pulgar, medio, anular y meñique			
	Cantidad	Precio (cop)	
Servo MG90S		\$ 11.820	\$ 0
Fuente de alimentación para el funcionamiento del brazo robótico			
	Cantidad	Precio (cop)	
Batería de litio (3,7 V - 3400 mAh)	2	\$ 23.500	\$ 47.000
Cargador de batería (Tarjeta de protección)			
	Cantidad	Precio (cop)	
TP4056	2	\$ 5.000	\$ 10.000
Elevador de voltaje Step Up Boost			
	Cantidad	Precio (cop)	
XL6019	1	\$ 15.000	\$ 15.000
Indicador de carga del brazo robótico			
	Cantidad	Precio (cop)	
Indicador de 1 celda para batería de litio	1	\$ 7.021	\$ 7.021
Cables de conexión circuito eléctrico			
	Cantidad	Precio (cop)	
Cable M/M y M/H	6	\$ 333	\$ 1.999
Tornillería del brazo robótico			
	Cantidad	Precio (cop)	
Tornillo M3 x 8	3	\$ 1.000	\$ 3.000
Tornillo M2 x 6	3	\$ 4.995	\$ 14.985
Tornillo M2 x 10	1	\$ 14.350	\$ 14.350
Material de impresión e impresión del brazo robótico			
	Cantidad	Precio (cop)	
Brazo robótico transhumeral	1	\$ 900.000	\$ 900.000
Costo total prótesis (cop)			\$ 1.095.090