



Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

Facultad de Arquitectura, Diseño y Arte
Carrera de Diseño de Productos

Diseño de exoesqueleto de torso y exoprótesis de brazos

María Andreina Calenda Batista

Director del proyecto:
PhD. Caridad González



QUITO
Diciembre
2022

Índice de contenidos

Resumen.....	5	Capítulo III. Desarrollo Conceptual y validación	31
Palabras claves.....	5	X. Proceso de ideación.....	31
Abstract	6	XI. Descripción y visualización de la propuesta conceptual.....	35
Key words	6	Capítulo IV. Propuesta final, diseño a detalle, prototipado y validación.....	38
Introducción.....	7	XII. Definición y justificación de la propuesta	38
Capítulo I: Planteamiento del proyecto de investigación.....	8	XIII. Prototipo.....	46
I. Antecedentes.....	8	XIV. Validaciones y comprobaciones.....	51
II. Marco teórico.....	10	XV. Análisis de costos.....	53
III. Problema.....	13	Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones.....	55
Capítulo II: Planteamiento metodológico.....	14	XVI. Conclusiones.....	55
IV. Objetivos generales.....	14	XVII. Recomendaciones.....	57
V. Objetivos específicos	14	Referencias Bibliográficas.....	58
VI. Marco Metodológico	15		
VII. Desarrollo de la investigación.....	18		
VIII. Requerimientos del proyecto	26		
IX. Brief de diseño.....	30		

Índice de figuras

Figura 1 Relación dentro del sistema ergonómico de robots.....10	Figura 15 Movimientos de pronación y supinación del antebrazo27	Figura 30 <i>Eje horizontal del codo</i> 39
Figura 2 Esquema del marco teórico integrado a los requerimientos.....12	Figura 16 Movimientos de flexión y extensión del codo27	Figura 31 Prótesis para amputación a nivel del hombro de Johns Hopkins Applied Physics Laboratory..... 40
Figura 3 Fases del proceso de diseño New Product Development15	Figura 17 Movimientos del hombro28	Figura 32 Rotación de antebrazo 40
Figura 4 Vista frontal, lateral y posterior brazos extendidos.....19	Figura 18 8W-Brief de diseño.....30	Figura 33 Modelo de estudio físico tamaño real del hombro 41
Figura 5 Modelados 3D del escáner: Brazos en reposo y brazos flexionados....19	Figura 19 Organización de las palabras según importancia.....31	Figura 34 Mecanismo de eje aplicado a codos robóticos..... 41
Figura 6 Vista lateral, frontal y posterior brazos recogidos19	Figura 20 Moodboard para generación de ideas32	Figura 35 Relleno giroide impreso en PLA 42
Figura 7 Prótesis para amputación a nivel del hombro de Johns Hopkins Applied Physics Laboratory20	Figura 21 Áreas importantes que tomar en consideración en los diseños33	Figura 36 Flexibilidad del TPU en las uniones del dedo..... 42
Figura 8 Modelado de exoesqueleto por Andrea Piccinno.....21	Figura 22 Elementos escogidos posterior al análisis34	Figura 37 Tela piel de durazno 43
Figura 9 Modelo de estudio de mano infantil realizado por Jubilous 3D21	Figura 23 Modelado 3D digital del concepto.....36	Figura 38 Proceso de impresión 3D de la prótesis..... 44
Figura 10 Despiece de brazo impreso en 3D por Mahdi Hussein.....22	Figura 24 Modelo Físico camisa y socket, acoples y restricciones de movimiento vista frontal.....37	Figura 39 Simulación en Fritzing de las conexiones entre motores, potenciómetros y el Arduino Uno..... 45
Figura 11 Organización de los servomotores dentro de la mano por Mahdi Hussein22	Figura 25 Modelo Físico camisa y socket, acoples y restricciones de movimiento vista posterior.....37	Figura 40 Conexiones físicas de los componentes..... 45
Figura 12 Modelo de estudio de un dedo en PLA y TPU realizado por Jubilous 3D..22	Figura 26 Modelo físico del brazo tamaño real y restricciones de movimiento.....37	Figura 41 Numeración de las partes impresas de la prótesis..... 46
Figura 13 Articulaciones de la mano26	Figura 27 Componentes electrónicos38	Figura 42 Medidas generales de la prótesis en milímetros 46
Figura 14 Movimientos de la muñeca.....27	Figura 28 Uniones de TPU de los dedos.39	Figura 43 Render de detalles pecho, mano, hombro..... 48
	Figura 29 <i>Mecanismo interno para el movimiento de los dedos</i>39	

Figura 44 Render de la prótesis en la figura humana48
Figura 45 Render frontal y perspectiva....48
Figura 46 Modo de uso49

Tabla 1 Medidas de referencia.....20
Tabla 2 Requerimientos antropométricos específicos.....28

Figura 47 Prototipo final50
Figura 48 Validación de uso51
Figura 49 Validación de movimiento de sistema de mecanismos51

Índice de tablas

Tabla 3 Resumen del proceso productivo por impresión 3D.....44
Tabla 4 Listado de partes de la figura 42 47

Figura 50 Validación de sistemas electrónicos mediante agarres 51

Tabla 5 Costos de producción del prototipo de la prótesis..... 53

Resumen

En este proyecto se realizó el diseño de un prototipo de un exoesqueleto de torso y exoprótesis de brazo para solventar la dificultad de aquellas personas que han sufrido una amputación total de miembros superiores, de realizar de manera autónoma las actividades cotidianas. Durante el proyecto se definieron los movimientos que necesitaría un usuario sujeto de estudio para apoyar con una prótesis impresa en 3D con las necesidades básicas como comer y

vestirse a través de agarres de pinza y cilíndricos. En este caso, tales movimientos se definen por la facilidad de adquisición en Ecuador de componentes electrónicos de rotación en un eje. Además, se toma en cuenta parámetros antropométricos que definen el espacio disponible para los elementos tecnológicos, como es el caso del hombro en el que se optó por una propuesta que garantizaba la proporción adecuada

tanto en el ancho de hombros como en el largo del brazo.

Considerando al usuario como centro de este proyecto de Diseño, se trabajó de la mano de un grupo interdisciplinar incluido una Psicóloga para facilitar el proceso de adaptación antes, durante y después de la prótesis, debido a que es un producto de asistencia que genera un cambio en la persona y su estilo de vida.

Palabras claves

Usabilidad de la exoprótesis.

Diseño y nuevas tecnologías.

Diseño emocional y exoprótesis.

Abstract

In this project was develop the design of the prototype of a torso exoskeleton and a prosthetic arm to solve the difficulty of those that have suffer a complete amputation of their superior limbs, of doing autonomously their daily activities. During the project were defined the movements that the user subject of study would need, supported by a 3D printed prosthetic with their basic needs like eating and dressing though pincer and

cylindrical grips. For these case, said movements were defined by the ease of acquisition in Ecuador of electronic components that rotate on one axis. Additionally, it was taken into account anthropometric parameters that define the space for the electronic components, as it is the case of the shoulder in which was chosen the proposal that guaranteed the

appropriate proportion both in the width of the shoulders and in the length of the arm.

Contemplating the user as the center of this Design project, work was done hand in hand with an interdisciplinary group including a psychologist to facilitate the adaptation process before, during and after the prosthesis.

Key words

Usability of the exoprosthesis.

Design and new technologies.

Emotional design and exoprosthesis.

Introducción

En el proyecto se propone crear una propuesta de exoesqueleto de torso y exoprótesis de brazo dirigido al caso de un usuario de estudio que cuenta con una amputación total de ambos brazos por accidente con muñones menores a 6 cm, por lo que se presenta la dificultad de sujeción al torso de las prótesis en el mercado ecuatoriano. Aquellas personas que sufren una amputación atraviesan por un período de duelo que implica un proceso de adaptación al momento del accidente y posteriormente, si deciden adquirir una prótesis, deben nuevamente adaptarse al producto.

Con el fin de mejorar la experiencia del usuario se aplican nuevas tecnologías como

la impresión 3D, el modelado por computadora y el escaneo 3D; ya que estas constituyen un proceso no industrial, personalizado, sin el uso de materiales tóxicos. Se propone involucrar al usuario desde la producción, para que observe mientras se imprimen las piezas en 3D, facilitando la adaptación desde la relación usuario-prótesis.

En el Capítulo I se explica los antecedentes de la situación actual en cuanto al mercado de prótesis analizando sus precios, materiales, procesos productivos y los problemas percibidos por los usuarios. Además, se presenta el marco teórico desde el Diseño Emocional centrado en Diseño y Psicología.

En el Capítulo II se establecen los objetivos del proyecto y la metodología New Product Development (NPD) (Takeuchi & Nonaka, 1986 en Sttuton, 2022) para su desarrollo. Dentro del Capítulo III se realizó una exploración conceptual de tipo formal y funcional validada mediante modelos de estudio. En el Capítulo IV se realiza el diseño a detalle de la prótesis y el prototipo, se describen los mecanismos, componentes electrónicos, materiales, proveedores, procesos productivos y costos de producción. Finalmente, en el Capítulo V se establecen las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

Capítulo I: Planteamiento del proyecto de investigación

I. Antecedentes

En Ecuador hay 28.316 personas que padecen alguna discapacidad física¹ que se encuentran registradas en Quito, dentro de este grupo el 52.13% se encuentran entre los 36 y los 64 años de los cuales el 49.21% y el 31.91% están registradas con un porcentaje de discapacidad entre el 30%-49% y el 50%-74% respectivamente (Ministerio De Salud Pública, 2020).

Tomando en cuenta que algunas personas con pérdida de extremidades deciden no utilizar prótesis o abandonar el uso de las que poseen por incomodidad de peso elevados, ajuste no personalizados, por sonido que puedan generar los mecanismos u otros factores. Como

resultado se han aplicado las nuevas tecnologías en el campo de la salud las cuales pueden ofrecer resultados centrados en las necesidades del ser humano con menos dificultades que las que ofrecen los procesos actuales, donde se realizan generalmente, moldes de yeso al paciente para el termoformado del socket que se ajusta al muñón. (Bates et al., 2020). Con el paso de los años la medicina avanza y la utilización de tecnologías novedosas para la fabricación de prótesis o implementos de rehabilitación también, estos procesos contribuyen a mejorar la experiencia de los pacientes y su adaptación a la prótesis.

Los procesos de fabricación como la impresión 3D son utilizados en países desarrollados para la creación de exoprótesis² que aportan al paciente una pieza personalizada a sus necesidades específicas, en cuanto a medidas, especificaciones de la amputación, restricciones de peso, entre otros. El diseño de prótesis (tanto internas como externas) va más allá del uso de las nuevas tecnologías utilizadas para su producción, sino también en los materiales en los que se puede imprimir, tomando en cuenta la compatibilidad con el cuerpo y el software de modelado adecuado donde permite

¹ **Discapacidad física:** Es el estado físico en el que el usuario de alguna forma se le impide de forma permanente e irreversible cumplir plenamente la

funcionalidad de su sistema motriz (Observatorio De Discapacidad Física, s. f.).

² **Exoprótesis:** Se refiere a aquellas prótesis que se encuentran fuera del cuerpo como es el caso de las prótesis de brazos, manos o piernas (Harmonic Drive SE, s. f.).

acoplar la pieza a las medidas específicas del usuario y su lesión o discapacidad.

Estos objetos impresos en 3D son conocidos por su bajo costo en comparación con otras opciones en el mercado ecuatoriano donde; en el caso de las exoprótesis, dependiendo de la discapacidad, pueden llegar a valores entre los \$7000USD y los \$10000USD diseñadas y elaboradas en aluminio; mientras que las fabricadas nacionalmente mediante impresoras 3D están entre los \$700 y los \$1000. Es debido a su alto costo, problemas de movilidad hacia los espacios donde se fabrican, los procesos de adaptación,

pruebas y seguimientos de la prótesis, los tiempos de fabricación, percepción psicológica de la amputación, entre otros aspectos, que las personas con discapacidad, por ausencia de miembro o extremidad superior, en ocasiones deciden no adquirir una prótesis (Barberán Vizueta & Chela Criollo, 2021, p. 4).

Con estos antecedentes, este proyecto se desarrollará en la ciudad de Quito en colaboración con el grupo de Investigación aplicada Jubilous 3D de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE) enfocado a ofrecer soluciones innovadoras de calidad mediante la

fabricación aditiva en el área del Diseño para la Salud. El enfoque se dirige a personas con discapacidad física específicamente por ausencia de uno a más miembros o extremidades por pérdida. Además, se toma de caso de estudio un hombre ecuatoriano, joven de contextura delgada con pérdida de ambas extremidades superiores por accidente, la identidad del usuario se mantendrá en el anonimato por lo que se utilizará a un joven como modelo de estudio referencial con características físicas similares.

II. Marco teórico

En el estudio de The Design Society “Robot ergonomics: towards humancentred and robot-inclusive design” (2018) escrito por Ricardo Sosa y otros autores hablan de la **Ergonomía de los robots** que tiene como objetivo integrar el comportamiento resultado de la interacción de los objetos cotidianos y los robots que se encuentran dentro de la sociedad con el fin de desarrollar productos y entornos que sean centrados en la persona pero también sean inclusivos con los robots, tomando en cuenta las limitaciones que estos puedan tener dentro del entorno. Las prótesis son consideradas como robots que pueden controlar otros objetos, esto debido a que por sus limitaciones mecánicas tienen mayor similitud con manos robóticas que a una mano humana.

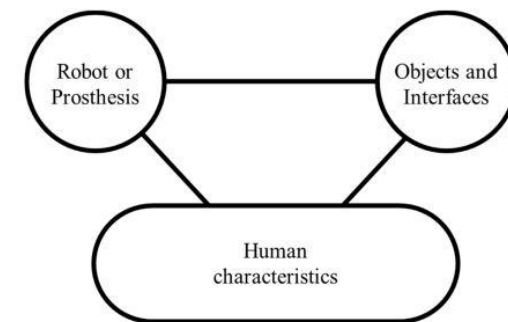
La ergonomía de los robots cuenta con 6 principios de los cuales cuatro están más

relacionados con lo que se plantea desarrollar en este proyecto: **Prioridad:** Las necesidades y características humanas son el eje para lo que se busca resolver al definir las posibilidades dadas por las dimensiones físicas, la estética y las características culturales; **Claridad:** Al diseñar prótesis es importante definir las acciones específicas que debe realizar el objeto debido a su complejidad; **Integración:** objetos, robots o prótesis deben ser diseñados tomando en cuenta datos cuantitativos y objetivos (dimensiones, el peso, las fuerzas) pero también tomar en cuenta aspectos cualitativos como los aspectos culturales del entorno donde se desarrollan; **Simplicidad:** durante el proceso es necesario priorizar las soluciones simples tanto en los objetos como en los prótesis tomando en cuenta la adaptabilidad a largo plazo, incluyendo las

nuevas tecnologías y las percepciones sociales actuales.

Desde la ergonomía de los robots hay tres enfoques de los cuales para el proyecto se va a orientar en el enfoque **Robot(prótesis)-Objeto** en el cual se toman a los objetos y los espacios como definidos por lo que no cambia, y se centra en que los robots se acoplen a las actividades y los objetos del entorno (Figura 1). (The Design Society, 2018)

Figura 1 *Relación dentro del sistema ergonómico de robots* (The Design Society, 2018)



En la propuesta de tesis de una maestría de España denominado “Amputación y salud mental: una revisión sistemática” (2021), donde la autora Aline de Mesquita Dummar desde el campo de la Salud mental y particularmente de la Psicología General realiza un estudio sobre las consecuencias psicológicas que puede sufrir el paciente al momento de la rehabilitación posterior a la amputación de un miembro como el caso del sujeto de estudio. Por el contrario, en la mayoría de proyectos donde se desarrollan prótesis impresas en 3D funcionales se realizan desde un enfoque técnico en cuanto a los componentes y características necesarias, desde el punto de vista de este estudio se destaca que los aspectos emocionales que acompañan el proceso de amputación cambian de un paciente a otro, pero los aspectos que se tomarán en cuenta durante la fase de diseño, con el fin de contribuir a la salud del sujeto de estudio, son **la alteración de la imagen corporal, el**

ajuste de la prótesis, el nivel de funcionalidad y de independencia que se aporte con la prótesis. (Mesquita Dummar, A.; 2021)

En Chile se desarrolla la memoria de título: “Diseño afectivo en la prótesis como un medio hacia una mejor relación entre usuario-producto.” (2021) del autor Nicolás Barqui Pérez realiza una prótesis de dedo centrándose en la relación usuario-producto donde establece la relación entre los aspectos que involucra una amputación (Físico, psicológico, emocional y social) y como se abordan estos aspectos desde el diseño (Funcionalidad y estética) con el fin de establecer un área en común desde donde desarrollar las propuestas de diseño. Esto lo plantea desde el **Diseño Afectivo** el cual se enfoca en las emociones que genera un producto o servicio con el fin de crear un significado e incrementar la felicidad de los usuarios. Para comprender cómo generar

experiencias positivas, se plantean dos enfoques: la psicología y el diseño.

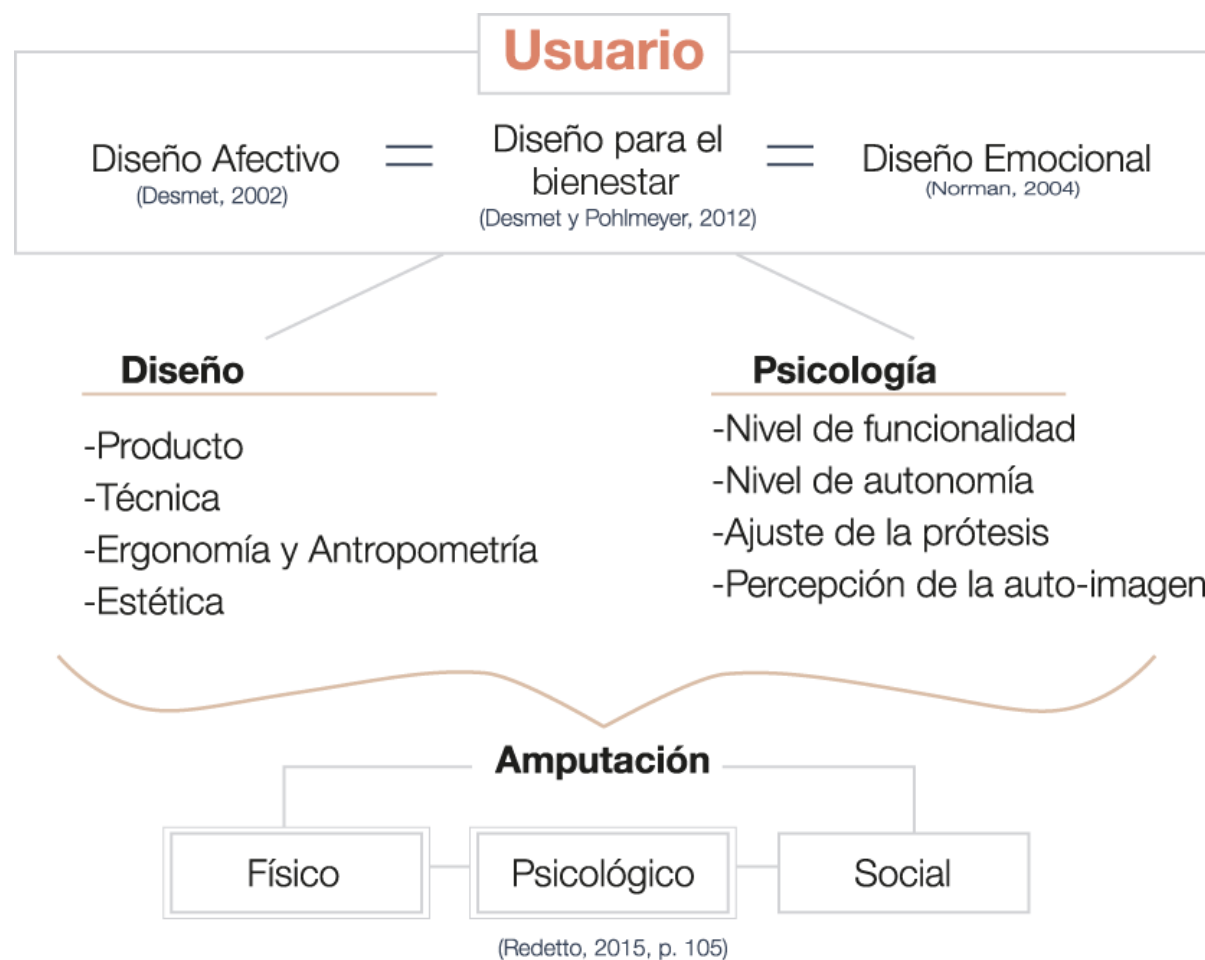
Desde la psicología se utiliza la teoría del bienestar psicológico la cual se utiliza de manera de apoyo para lograr la felicidad del usuario con la intención de lograr un mayor impacto.

La teoría del bienestar psicológico esta está compuesta por 6 aristas de las cuales para este proyecto se centra en la **Autonomía** la cual es la sensación de ser independiente en los aspectos generales de la vida del paciente que en términos de acciones se establecen como: comer, dormir, asearse, vestirse, entre otros, las cuales pueden cambiar en cada persona.

Por otro lado, desde el diseño hay dos aspectos que se deben considerar: el **Diseño emocional** específicamente el **diseño de comportamiento**, el cual las expectativas de la persona cumplen un papel principal con el fin de generar

emociones positivas desde el funcionamiento correcto de los productos que se encuentran dentro de la rutina; y el **diseño reflexivo** donde se enfoca en la autoimagen y la satisfacción personal relacionado con el significado simbólico que se le aportan a los objetos (Barqui Pérez; 2021). Según el mismo autor el segundo aspecto es el **diseño para el bienestar** en el cual se plantea que durante el proceso de diseño debe estar incluido los factores necesarios para el desarrollo emocional del usuario. Para el cual en el diseño de las prótesis es necesario **diseñar para la significancia personal**. (Barqui Pérez; 2021)

Figura 2 Esquema del marco teórico integrado a los requerimientos



III. Problema

En Ecuador dentro de las personas discapacitadas registradas hay un 45.66% que cuentan con alguna discapacidad física de algún tipo (Ministerio De Salud Pública, 2020), los cuales pueden necesitar algún elemento externo para mantener su autonomía o independencia. Las prótesis que ofrece el ministerio de salud cuestan entre los \$2000 y los \$3000 lo cual es considerado un precio alto, esto conlleva a que estas personas prefieran adecuarse a sus discapacidades y a aprender a vivir con ellas, además de esto hay pacientes que consideran que aquellas prótesis ofrecidas por el ministerio de salud no cumplen con sus expectativas estéticas (Zambrano, 2018). Con lo que las personas con discapacidad por ausencia de miembro o extremidades por amputación aprenden a vivir con la discapacidad, aún si esta no les

ofrece las mismas oportunidades que al utilizar un elemento externo.

La amputación afecta a la persona en los aspectos físicos, emocionales, psicológicos y social (Barqui, 2021) lo cual puede causar que estos grupos vulnerables no poseen las mismas oportunidades laborales, una integración social adecuada y es necesario el acompañamiento psicológico que debe ir de la mano de la incorporación de la prótesis para mejor adaptación del usuario.

Diagnóstico: Falta de ambas extremidades superiores por amputación de brazos tras accidente.

Problemática: Dificultad de las personas con amputación de brazos de llevar a cabo de manera autónoma las funciones básicas de su cotidianidad.

Capítulo II: Planteamiento metodológico

IV. Objetivos generales

Desarrollar un prototipo de prótesis de brazo mediante impresión 3D para restaurar de manera parcial las funciones básicas de un sujeto de estudio con amputación total por accidente.

V. Objetivos específicos

1. Indagar en los aspectos físicos, emocionales y psicológicos que afectan al sujeto de estudio estableciendo una propuesta pertinente a sus necesidades.
2. Aplicar los aspectos técnicos, electrónicos y mecánicos, conociendo las capacidades y las limitaciones de estos para el desarrollo de la prótesis.
3. Crear un prototipo funcional que se apegue a la apariencia final de la prótesis validando las funciones básicas en interacción con el usuario.

VI. Marco Metodológico

Figura 3 Fases del proceso de diseño New Product Development



Se plantea la utilización de la metodología New Product Development (NPD) (Takeuchi & Nonaka, 1986 en Sttuton, 2022) ya que esta ayuda a la concepción de un producto donde se empieza con la generación de una idea general de qué es lo que se busca desarrollar durante el proceso de diseño.

Resulta pertinente para este proyecto ya que se conoce desde el inicio del proceso de diseño qué se va a realizar, este caso es el exoesqueleto de torso superior y las exoprótesis de brazo.

Al ser un proyecto en colaboración con Jubilous 3D, tomando en consideración a los plazos de tiempos estipulados para el proyecto hasta diciembre del 2022, se

definió la realización de un prototipo con el cual se pueda comprobar su funcionamiento y la apariencia que se busca obtener en el producto final.

Fases de la metodología NPD

1. Generación de ideas

En esta fase de la metodología de diseño se plantea la idea inicial del producto con el que se va a trabajar el resto del proceso. Para este proyecto se conoce que se va a desarrollar un exoesqueleto de torso en conjunto con exoprótesis de brazos con el fin de restaurar parte de las funciones que cumplen las extremidades ausentes.

Herramienta:

- Método de pesos ponderados

2. Investigación

Tomando en consideración que el producto a realizar no está dirigido a un grupo amplio del mercado, se planea la validación de la idea desde el funcionamiento tecnológico, las restricciones de rehabilitación por la que debe pasar el usuario y conocer aquellos

puntos de discomfort que los pacientes sin extremidades han encontrado durante el proceso de fisioterapia, con el fin de poder generar los requerimientos de diseño

Herramientas:

- Análisis de lo existente
- Escaneado 3D
- Entrevista a experto (Psicología)
- Entrevista a experto (Electrónica)
- Focus group

3. Diseño

Con los requerimientos ya establecidos se pasa a la fase de conceptualizar el producto con herramientas que faciliten la comunicación de todas las especificaciones que tienen el producto para su fabricación.

Herramientas:

- ADN
- Moodboard
- Generación de bocetos

- Ilustraciones
- Modelados 3D
- Modelos de estudio
- Planimetría

4. Prototipado

En esta fase se realizarán diferentes maquetas y modelos para comprobar el funcionamiento de los mecanismos planteados con el fin de perfeccionar cada una de sus partes tanto tecnológicas como estéticas con el fin de llegar a un prototipo que se pueda validar junto con el usuario para así ser generados los cambios necesarios.

5. Planificación de recursos

Al tener un prototipo que funcione adecuadamente y que presente una apariencia estética aproximada a lo que se busca en el resultado final, se genera una documentación de los materiales y proveedores que se van a utilizar para el

desarrollo del producto final.

6. Costos

De los materiales y procesos productivos planeados se documentan los costos del proceso de diseño y de producción del prototipo con el fin de almacenar la información en caso de realizar la fabricación de un producto con las mismas características a largo plazo.

7. Comercialización

No se lleva a cabo esta fase dentro de los tiempos destinados para el proyecto de titulación y por la complejidad del proyecto.

VII. Desarrollo de la investigación

1. Generación de ideas

Método de pesos ponderados

Es una herramienta utilizada para la delimitación de objetivos, restricciones y funciones de un proyecto el cual se realiza en conjunto con en el “cliente” el cual en el caso del desarrollo del proyecto sería Jubilous 3D.

Objetivos: Se estableció debido a los plazos de tiempo estipulados dentro del proceso de desarrollo del proyecto de titulación y tomando en cuenta los diferentes aspectos que pueden intervenir en el proceso, se planteó el desarrollo de un prototipo el cual pueda ser presentado al usuario para realizar pruebas de funcionamiento con el fin de obtener retroalimentación y así poder generar modificaciones que puedan mejorar la experiencia del usuario.

Funciones:

1. Implementación de sensores por movimiento muscular en el pecho y espalda para la recepción de movimiento.
2. Agarre básico de la mano.
3. Movilidad de los dedos independiente.
4. Movilidad del codo.

Restricciones:

1. Tipos de agarres limitados
2. Los dedos no poseerán motores independientes.
3. Pesos que debe tolerar.
4. Distribución de esfuerzos.
5. No cumplirá con funciones de escritura manual o el uso de computadora.

2. Investigación

Escaneado 3D y fotografías referenciales

Se elige un sujeto de análisis que comparta las características físicas del sujeto de estudio con el fin de tener un modelado de referencia para utilizarlo durante la etapa de diseño dado el anonimato solicitado. El sujeto de estudio debe presentarse con ropa ajustada con el fin de obtener la silueta correctamente, se escanea a la persona con las poses necesarias, propuestas por Jubilous 3D; para captar los detalles sin imperfecciones, posteriormente se modifica el modelo 3D para obtener una silueta similar a la necesitada. Con las fotografías se busca solventar cualquier duda con respecto a detalles del modelado que surjan durante la fase de diseño.

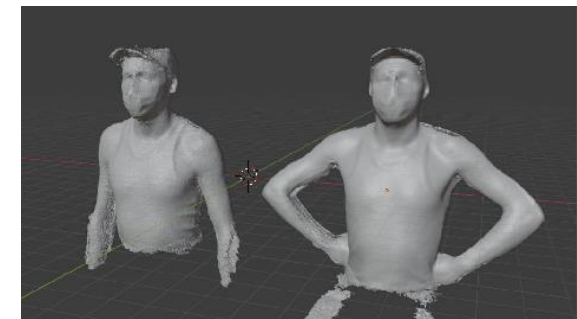
Figura 4 Vista frontal, lateral y posterior brazos extendidos



Figura 5 Vista lateral, frontal y posterior brazos recogidos



Figura 6 Modelados 3D del escáner:
Brazos en reposo y brazos flexionados



Medidas de referencia

Se toman medidas de referencia para ser colocadas posteriormente en las imágenes, de esta forma en caso de que los modelos 3D del sujeto de referencia se escale accidentalmente perdiendo las medidas reales del sujeto se pueda solucionar sin inconvenientes. Por otro lado, estas son las medidas guía que se deben tomar en cuenta al momento de modelar las piezas en los programas de software 3D.

Tabla 1 Medidas de referencia

Componentes	Medida
Altura total	175 cm
Peso total	70 kg
Contorno del brazo	32 cm
Ancho de hombros	48 cm
Contorno del torso	88 cm - 92 cm
Contorno de la cintura	84 cm
Largo de espalda	47 cm

Análisis de lo existente

Es una herramienta de investigación que se realiza con el fin de recopilar información sobre objetos que cumplen las mismas funciones o similares con el fin de conocer mecanismos, materiales, procesos productivos, componentes electrónicos, entre otros factores que puedan ser necesarios para el desarrollo del proyecto.

Johns Hopkins Applied Physics Laboratory

Este es un proyecto desarrollado por Johns Hopkins Applied Physics Laboratory en el que se realizaron brazos prostéticos para una amputación a nivel de los hombros las cuales puede ser movidas debido a sensores de movimiento muscular ubicados en el pecho y la espalda del paciente. Este proyecto le permite al usuario mover hombro, codos, muñeca y dedos con la dificultad de que el paciente debe decidir que parte específica quiere controlar de la

prótesis, para lo que se necesita tiempo de rehabilitación para aprender a controlar el prototipo.

Figura 7 Prótesis para amputación a nivel del hombro de Johns Hopkins Applied Physics Laboratory

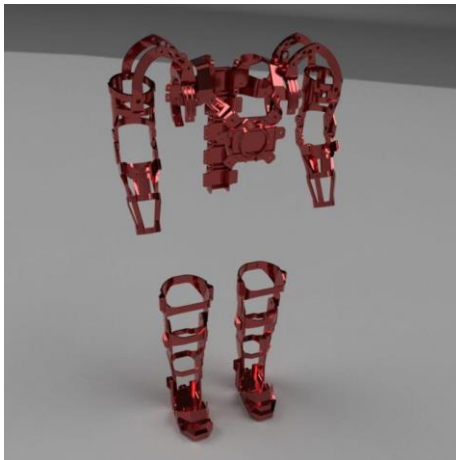


Andrea Piccinno

Andrea Piccinno es un ingeniero mecánico el cual muestra en su página de Instagram su desarrollo de un exoesqueleto impreso en 3D. Con esto el demuestra la movilidad que alcanza a realizar la pieza, y como está estructurada para no incomodar a la persona mientras lo utiliza. De este proyecto es interesante analizar las restricciones de movimiento que genera la

pieza en contacto con la persona. Tomando en consideración que el sujeto de estudio del proyecto a realizarse posee partes de los hombros, se puede tomar en consideración los mecanismos utilizados por Piccinno en su exoesqueleto para simular el movimiento que esta articulación debe cumplir.

Figura 8 Modelado de exoesqueleto por Andrea Piccinno (Piccino, 2021)



Objetos existentes fabricados por Jubilous

El proyecto de impresión de 3D: Jubilous 3D-Icarus tiene experiencia desarrollando diversos implementos protésicos ya sea para cumplir una necesidad estética o funcional, desarrollando exoprótesis y endoprótesis impresas en 3d con el fin de proporcionar una solución parcial a las necesidades de sus usuarios.

Mano para niños impresa en 3D

Es un proyecto desarrollado con el fin de proporcionar movilidad en la mano de un niño el cual no tenía dedos. Este modelo funciona mediante cuerdas y elásticos para generar los movimientos siguiendo el movimiento realizado por la muñeca del usuario. De este modelo de estudio se pudo observar los beneficios de generar los movimientos con un sistema de cuerdas y elásticos, pero por otro lado se debe tomar en consideración que con el uso constante

de estas piezas las cuerdas necesitarán ser ajustadas cada cierto tiempo para que continúen funcionando con normalidad.

Figura 9 Modelo de estudio de mano infantil realizado por Jubilous 3D



Modelo de estudio de un dedo impreso en 3D

Otro modelo de estudio desarrollado por Jubilous es un dedo impreso en 3D por parte en el cual se utiliza una mezcla de materiales entre PLA y TPU el cual es un material flexible que utilizó para simular las articulaciones y de esta manera reemplazar los elásticos que regresaban al dedo a su

posición de descanso luego de generarse el movimiento a causa de tirar de una cuerda que recorría internamente el dedo.

Figura 10 Modelo de estudio de un dedo en PLA y TPU realizado por Jubilous 3D



Mahdi Hussein

Mahdi Hussein es un ingeniero mecánico el cual ha desarrollado proyectos de prototipado de prótesis mioeléctrica de brazo de bajo costo en donde imprimen las piezas en 3D y posteriormente pasa al desarrollo de los mecanismos electrónicos necesarios para realizar el movimiento de los dedos. En los modelados que el presenta en su video muestra la organización interna de

los servomotores que general el movimiento de los dedos, además de su solución para mantener los movimientos complejos del pulgar y de esta manera poder ofrecer mayor cantidad de agarres a la persona a la cual este dirigida la prótesis de mano.

Figura 11 Organización de los servomotores dentro de la mano por Mahdi Hussein (Hussein, 2020)

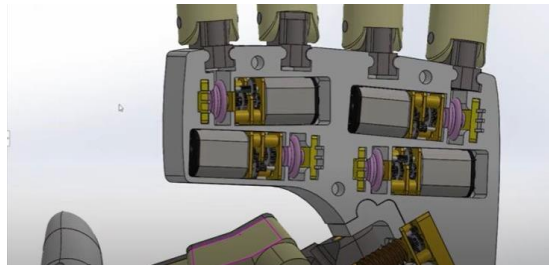
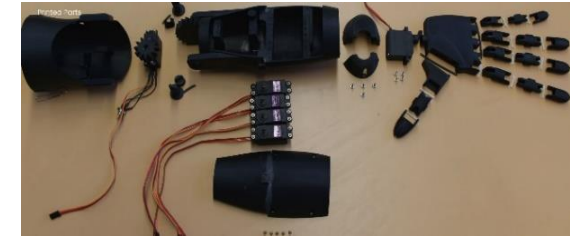


Figura 12 Despiece de brazo impreso en 3D por Mahdi Hussein (M. Hussein, s. f.)



Entrevista a un experto en electrónica

Tomando en cuenta la información recopilada del análisis de lo existente se organizó una entrevista a un experto en electrónica para conocer las limitaciones de movimiento proporcionadas por los componentes, además de tener un acercamiento a las especificaciones de estos para ser tomadas en cuenta en el proceso de diseño.

Alberto Larrea (Gerente de la empresa de prototipado en impresión 3D Monsterhealh)

- Determinar cómo se va a generar el movimiento: mediante cuerdas o mediante conductos que contengan agua o aire el cual sea empujado.
- En caso de utilizar las cuerdas tomar en cuenta que es probable que se deban ajustar de vez en cuando.
- Para que el mecanismo con cuerdas y elásticos funcione se debe utilizar servomotores, se debe tomar en cuenta que por el tamaño hay dos opciones: colocar el servomotor en la muñeca para controlar los dedos lo cual nos da el mismo movimiento en los dedos, pero nos limita el movimiento de la muñeca o colocarlos dentro de la palma, pero por el reducido espacio no se puede colocar uno para cada dedo.

- Para generar el movimiento del codo se debe tomar en cuenta que para cada giro se debe utilizar un servomotor diferente.
- Por las conexiones necesarias en un brazo, que pueden ir entre 7 servomotores, y la conexión con los sensores de movimiento se debe tomar en cuenta los puertos disponibles en los arduinos para definir el tamaño de este.

Entrevista a un experto: Psicología

Para este proyecto la experiencia y necesidades del usuario son primordiales, y debido a que no se puede hacer un acercamiento directo al usuario, se realizó una entrevista a la psicóloga involucrada en el proyecto para conocer los aspectos que afectan al usuario con respecto a todo el proceso que involucra el uso de una prótesis.

Verónica Maldonado (Investigadora del grupo Jubilous 3D, PUCE)

- Al inicio de un proyecto con una persona que tiene una discapacidad física es importante reconocer desde un inicio si es de nacimiento o es adquirida ya que las personas que nacen con la condición aprenden a acoplarse sin esa parte del cuerpo con mayor facilidad que aquellos que la pierden.
- En el caso de personas que sufren una amputación se debe tomar en cuenta la pérdida de autoestima, los estados depresivos, temor a no ser aceptados por las personas de su entorno y la inseguridad a espacios nuevos.
- Para una persona que sufre la pérdida de una extremidad pueden pasar por un proceso de duelo.
- En el entorno social de estas personas, se pueden presentar dos tipos de personas: las primeras son aquellos que

manifiestan rechazo hacia estas y su condición y la segundas son aquellas que toman una actitud paternalista la cual se puede considerar como discriminación.

- Pueden rechazar la prótesis ya que las personas que sufren una amputación deben pasar por un proceso de adaptación por la ausencia de su extremidad y al presentarles la prótesis deben realizar otro proceso de adaptación a esta.
- Lo más importante es escuchar la voz de la persona y cuáles son sus necesidades, ya que puede haber dos pacientes con en mismos el diagnóstico, pero no cuentan con las mismas necesidades.

Focus Group

Psicología

- **Verónica Maldonado** (Investigadora del grupo Jubilous 3D, PUCE)
- Investigador asociado 1
- Investigador asociado 2

Diseño Industrial

- **Caridad González** (Investigadora del grupo Jubilous 3D, PUCE)
- Desde el nivel psicológico tomar en cuenta a la persona y como se encuentra para la aceptación de la prótesis y trabajar siempre desde la necesidad. Si la persona adquirió la discapacidad y no trabajo el proceso de duelo, es posible que no busque una prótesis.
- Desde la psicología al trabajar con personas con discapacidad se busca lograr el mayor índice de autonomía e independencia dentro de las capacidades de la persona.

- Considerar los aspectos biológicos, psicológicos y sociales de la persona, cuáles son sus necesidades, el impacto que va a tener la prótesis según su contexto, la amputación, es de nacimiento o lo perdió posteriormente, hace cuánto tiempo cuenta con la discapacidad.
- Considerar la relación que la prótesis tiene con la persona, aunque se considere un elemento separado de cuerpo el paciente lo puede percibir como parte de su cuerpo.
- Significación por encima de la función de la prótesis, analizar más allá de lo que puede realizar, tomar en consideración los cambios que va a generar la prótesis en la vida de la persona.
- Tomar en consideración la experiencia de la persona y su contexto para definir como se hace el proceso de adaptación.
- Manejar adecuadamente el criterio de realidad con el fin de no aportar falsas

esperanzas, establecer desde un inicio los límites y capacidades que va a poder realizar la prótesis para evitar desilusionar al paciente.

- Posibilidad de que pueda aplicarse progresivamente la prótesis dependiendo del caso e involucrar a la persona en el proceso productivo para contribuir en la adaptación y generar un sentido de pertenencia previo a la colocación de la prótesis.

VII. Requerimientos del proyecto

Función

- Funciones básicas: mano relajada, sujeción cilíndrica, dedo pulgar en aducción.
- Las dimensiones del diseño deben estar dentro del rango fisiológico aceptable (dimensiones equivalentes a las longitudes promedio de un brazo humano).
- Accesibilidad a las cuerdas que generan los movimientos de flexión y extensión de los dedos para realizar ajustes cada cierto tiempo.
- Articulaciones sin restricciones de movimiento por desgaste.
- Distribución de la fuerza durante impactos de manera que no afecten al usuario.
- Distribución de la fuerza durante impactos de manera que no afecte la integridad estructural de las prótesis.

- Menor cantidad de pasos para el desacople de la prótesis y el exoesqueleto del torso.

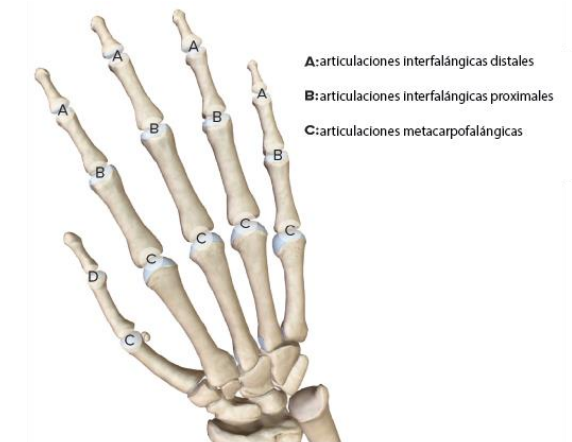
Rangos de movimiento

Mano-Dedos

- Mecanismos de actuación independientes de los dedos de la mano.
- Movimiento de flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas proximales (AIP) de 0° a 100° .
- Movimiento de flexión-extensión de las articulaciones metacarpofalángicas (MCF) de 0° a 90° .
- Movimiento de flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas distales (AID) de 0° a 90° .
- Movimiento de flexión de la articulación del metacarpo del pulgar desde la posición 0 oscila entre el 30° y 90° .

(Lecturio, 2022)

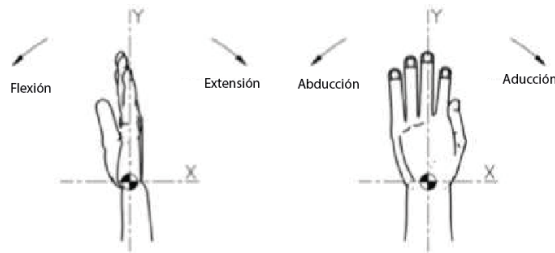
Figura 13 Articulaciones de la mano



Muñeca

- Movimiento de flexión de la muñeca inclinación de la palma de la mano hacia el antebrazo de 65° a 85° .
- Movimiento de extensión de la muñeca inclinación de la palma de la mano alejada del antebrazo de 55° a 75° .

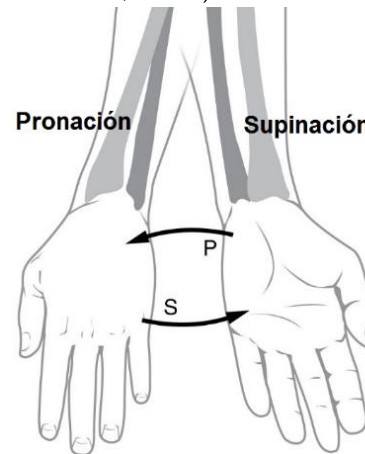
Figura 14 Movimientos de la muñeca
(Vergara Paredes et al., 2017)



Antebrazo

- Movimiento de pronación del antebrazo, giro que dirige la palma de la mano hacia abajo con un rango de movimiento de 71° .
- Movimiento de supinación del antebrazo, giro que dirige la palma de la mano hacia arriba con un rango de movimiento de 81° .

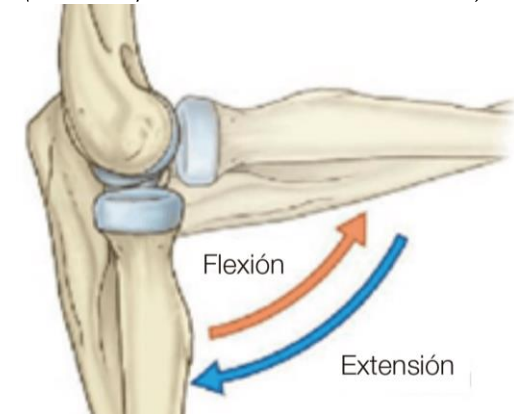
Figura 15 Movimientos de pronación y supinación del antebrazo
(Homo Medicus, 2021)



Codo

- Movimiento de flexión del codo desde 0° a 146° .
- Movimiento de extensión del codo desde 146° a 0° .

Figura 16 Movimientos de flexión y extensión del codo
(Fisioterapia avanzada Fabián, 2020)



Hombro

- Movimiento de flexión del hombro en varones desde 0° a 167° .
- Movimiento de extensión posterior desde 0° a 60° .
- Movimiento de abducción desde 0° a

90°.

- Movimiento de aducción desde 90° a 0°.
- Movimiento de rotación lateral desde 0° a 160°

Figura 17 Movimientos del hombro
(Noé NTRE, 2020)

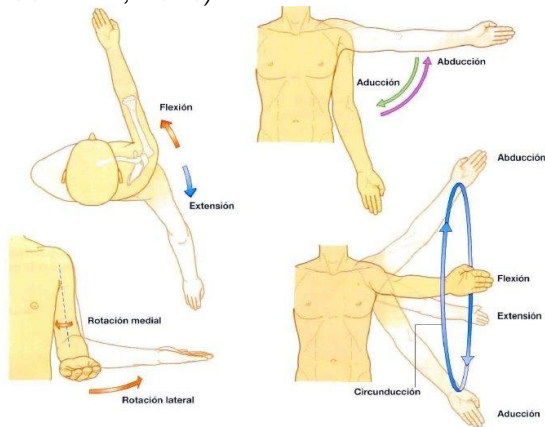


Tabla 2 Requerimientos antropométricos específicos

Componentes necesarios	Dimensiones - máximos de extremos
Circunferencia brazo	del 32 cm
Ancho de hombros	48 cm
Contorno del torso	88 cm - 92 cm
Contorno de la cintura	84 cm
Largo de espalda	47 cm
Dimensión del muñón	3 cm - 6cm

Materiales

- Los materiales del prototipo deben ser resistentes al impacto.
- Sensores de reconocimiento muscular
- Mecanismo de cuerdas y elásticos para el movimiento de los dedos.
- Mínimo de 3 servomotores para la movilidad de los dedos.
- Servomotores encargados del movimiento de los dedos ubicados en la palma de la mano.
- Impresión de las piezas en PLA de alta

calidad.

- Recubrimiento de las piezas impresas en 3D con silicón de grado médico.

Estética

- Apariencia de los brazos similar al tono de piel del usuario.
- Mantener la apariencia de las prótesis similares a las extremidades humanas (dedos, mano, brazo).
- Mantener los componentes eléctricos accesible pero ocultos a la vista.

Expectativas el usuario

- Aceptación emocional de las prótesis por parte del usuario.
- Reconocimiento de las prótesis como parte de su cuerpo por parte del usuario.
- Las prótesis no generen incomodidad al realizar movimientos.
- El exoesqueleto de torso se acopla a las proporciones del cuerpo del usuario.
- Las piezas de PLA no incomodan o

generan daños físicos al usuario.

- El material que se encuentra en contacto directo con la piel se puede limpiar sin comprometer los componentes eléctricos de la exoprótesis.
- Lograr el mayor índice de autonomía e independencia dentro de las capacidades de la persona.
- Significación por encima de la función de la prótesis.
- Posibilidad de que pueda aplicarse progresivamente la prótesis.

IX. Brief de diseño

Figura 18 8W-Brief de diseño



Capítulo III. Desarrollo Conceptual y validación

X. Proceso de ideación

Herramienta ADN

Tras seguir las preguntas guía establecidas por la herramienta se definió que el proyecto debía transmitir seguridad, unidad, protección (shielding), confianza y empoderamiento con el fin de que el usuario genere una conexión con la prótesis y la considere parte de él sin crear dependencia del producto procurando potenciar a la persona.

Figura 19 Organización de las palabras según importancia

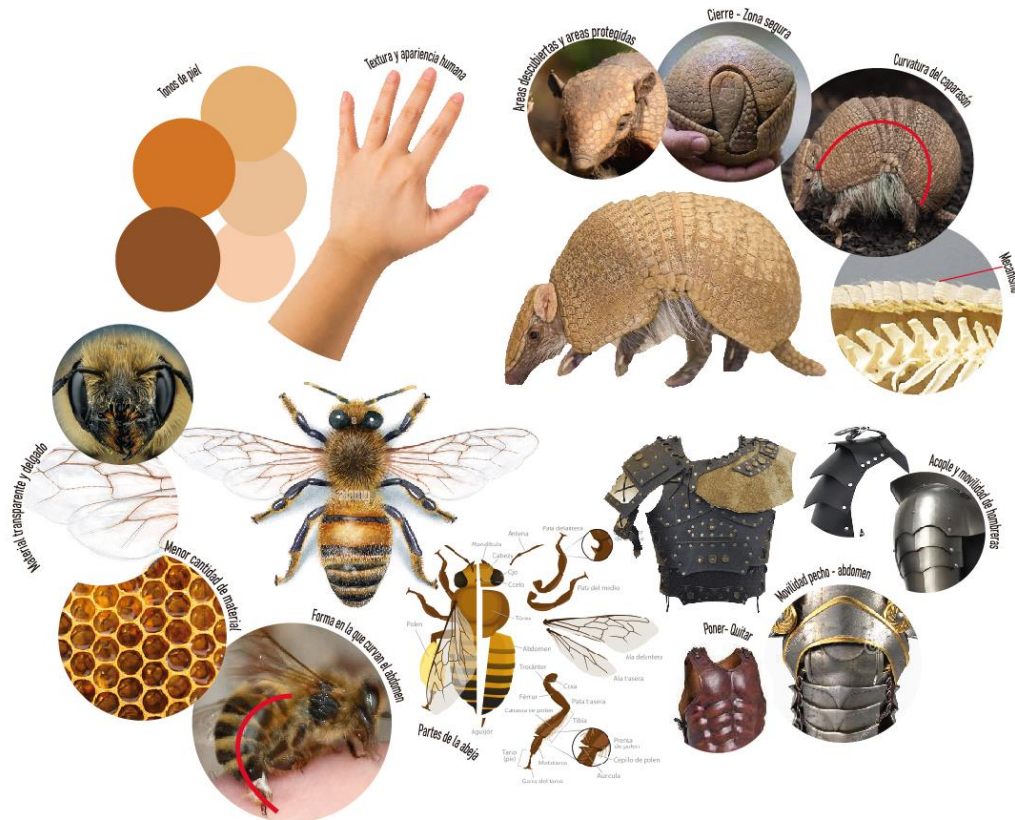


Inspiración

Con las palabras que surgieron de la herramienta ADN se buscaron elementos que transmitieran las mismas características. Con esto se desarrolló un moodboard para presentar elementos de inspiración para el desarrollo de un proyecto.

Busca transmitir seguridad en el día a día convirtiendo los objetos del entorno en parte de ti, se utilizaron elementos de la abeja en cuanto a aspectos formales y funcionales de su cuerpo comprendiéndolo como el trabajo en conjunto de diversas cosas pequeñas que conforman un todo más grande que es vital para la persona. Se inspira de las abejas por su organización interna en la colmena con la que logran, trabajando unidas, potenciar el ecosistema. Por otro lado, solventar la necesidad de seguridad y confianza como es el caso del armadillo de tres bandas el cual se protege a sí mismo en ocasiones de peligro y generar una zona

Figura 20 Moodboard para generación de ideas



segura donde se sienta tranquilo y cómodo. También se encuentran las armaduras como inspiración en cuanto a mecanismos utilizados en piezas que se colocan sobre la

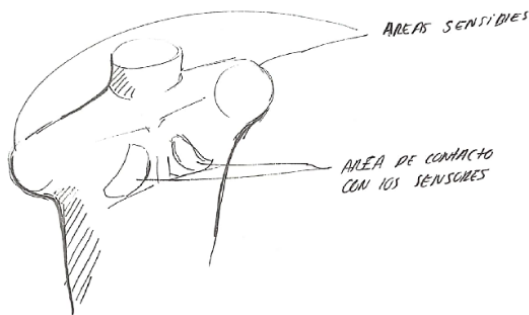
persona como proteger el hombro sin comprometer la movilidad. Por último, está la figura humana en cuanto a su textura forma y los posibles tonos de piel.

Proceso conceptual

Para los primeros bocetos se consideraron aspectos funcionales como:

- 1) Ubicación de sensores de reconocimiento muscular para lograr el movimiento requerido de las prótesis.
- 2) La comodidad del usuario en cuestión de consideraciones con las áreas sensibles y la distribución de pesos para no causar daño a la persona. (ver figura 21)

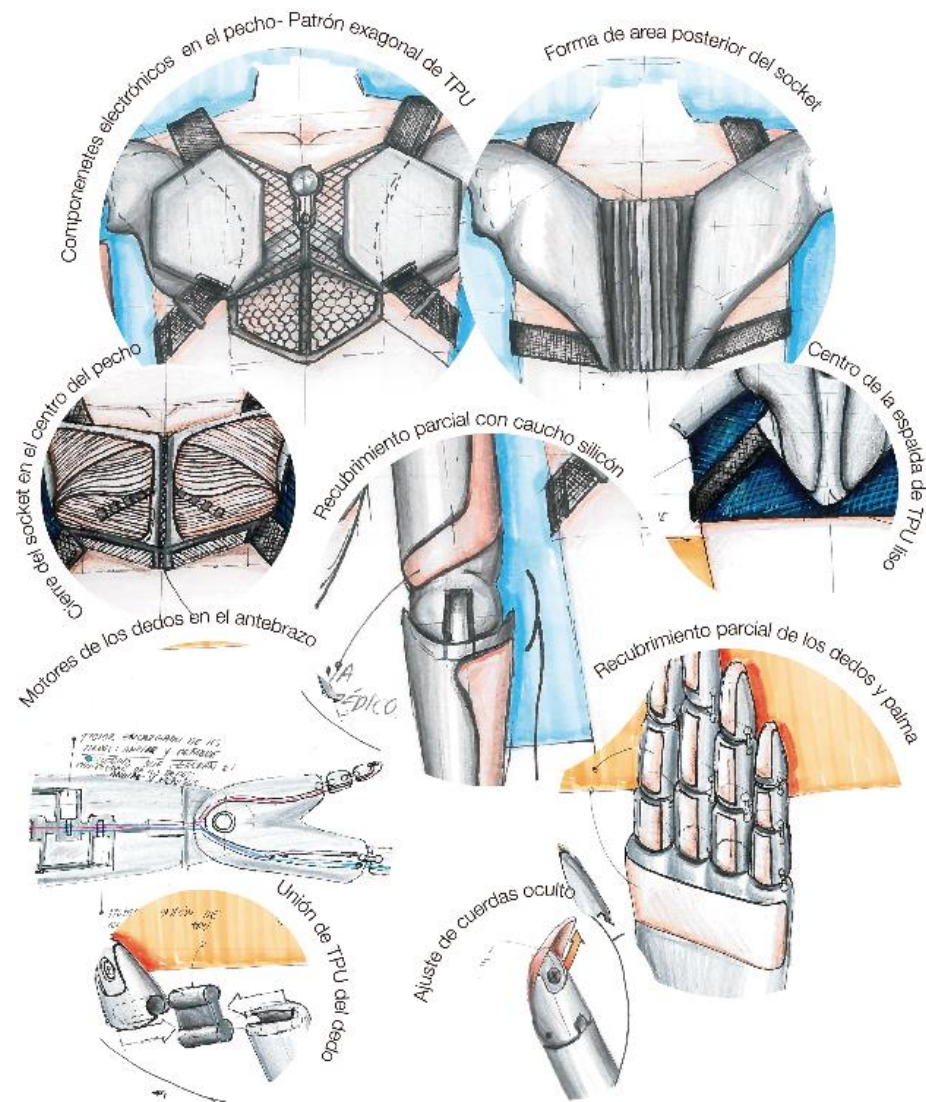
Figura 21 Áreas importantes que tomar en consideración en los diseños



En conjunto con Jubilous 3D, se desarrollaron láminas de bocetos con detalles generales de funcionamiento, las cuales se discutieron con el fin de seleccionar los componentes con mayor potencial para ser detallados a mayor profundidad en las 2 alternativas de concepto que surgieron de la unión de estos. (Ver anexo 4)

Posteriormente, se realizaron modelos de estudio de ambas propuestas con los cuales se planteó comprobar los mecanismos, además, se analizaron en base a los requerimientos de diseño especialmente aquellos relacionados con la experiencia del usuario, los cuales surgieron a base de la entrevista con la psicóloga y el focus group, para seleccionar los componentes que contribuyen a potenciar el estilo de vida del usuario tomando en consideración sus necesidades y las limitaciones tecnológicas del prototipo.

Figura 22 Elementos escogidos posterior al análisis



XI. Descripción y visualización de la propuesta conceptual

La prótesis consta con 2 partes, la primera es una camisa que se ajusta al socket utilizando velcro y la segunda es el socket, el cual contiene los componentes eléctricos y está unido en la espalda por una zona flexible.

La camisa se puede incorporar de dos maneras, se ajusta directamente a la prótesis o se coloca en la persona para luego ajustarla a la prótesis. En cuanto al proceso para ajustar el equipo, se realiza de la misma manera que un chaleco, desde la espalda introduciendo los muñones en los sockets y acomodándolo en la parte frontal para que los sensores estén en contacto con la piel, se cierran ambas partes en el centro del pecho por un sistema de cintas y velcro.

La camisa proporciona una capa de protección a la piel del paciente la cual al ajustarse a la prótesis contribuye en el

proceso de desmonte para que la persona pueda salir de la prótesis sin algún elemento que estorbe. Por otro lado, los sensores perciben el movimiento de los nervios en los músculos del pecho y la información pasa a ser interpretada por la prótesis, para luego transformarse en los movimientos del brazo en general.

Como se ve en la Figura 23, el socket, las piezas que contienen los componentes eléctricos y los elementos del brazo (las áreas grises y lisas) son de PLA ya que son áreas que necesitan la rigidez del material para soportar el peso del resto de la prótesis.

En la parte frontal, en el centro del pecho se utiliza un tramado en TPU, para permitir el paso del aire por la zona, aportando flexibilidad en el centro del pecho, además en la parte posterior, en el centro de la espalda se puede encontrar una pieza lisa

del mismo material (TPU) que permite flexibilidad en el área al momento de colocarse la prótesis y al realizar los movimientos necesarios para suplir las funciones básicas de la persona.

Las áreas de un tono piel representan piezas de caucho silicón las cuales se encuentran recubriendo el brazo para proporcionar una textura suave al contacto con el cuerpo y proteger el material y los componentes eléctricos de los factores del entorno, además se encuentran en la palma de la mano y en los dedos para ofrecer una superficie impermeable al momento de agarrar objetos.

Los motores de movimiento de los dedos se encuentran dentro del antebrazo con el fin de contar con una palma más delgada y proteger los cables del desgaste además de proporcionar al usuario la

posibilidad de que se mojen las manos sin afectar a los componentes electrónicos.

Por otro lado, los componentes electrónicos necesarios para interpretar la información que perciben los sensores de movimiento, ubicados en el pecho dentro de los sockets, permiten que la persona tenga acceso a los puertos de carga con mayor facilidad.

Se busca que la prótesis se acople a contexto del usuario, y permitirle realizar la mayor cantidad de actividades de manera autónoma, es por eso que se plantea que la persona pueda en un futuro ocuparse el mismo del cuidado y colocación de su prótesis. Además de esto, se toma en cuenta el ensamble por fases de la prótesis, para aquellos casos en lo que se tenga que trabajar un proceso de adaptación progresivo con la persona.

Figura 23 Modelado 3D digital del concepto



Modelos físicos

Figura 24 Modelo físico del brazo tamaño real y restricciones de movimiento

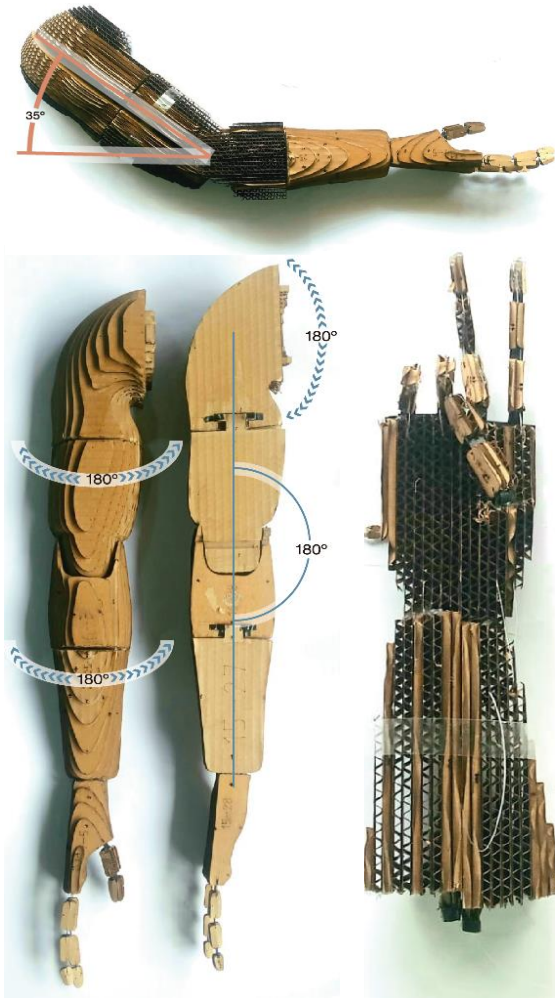


Figura 25 Modelo Físico camisa y socket, acoples y restricciones de movimiento vista posterior



Figura 26 Modelo Físico camisa y socket, acoples y restricciones de movimiento vista frontal



Capítulo IV. Propuesta final, diseño a detalle, prototipado y validación

XII. Definición y justificación de la propuesta

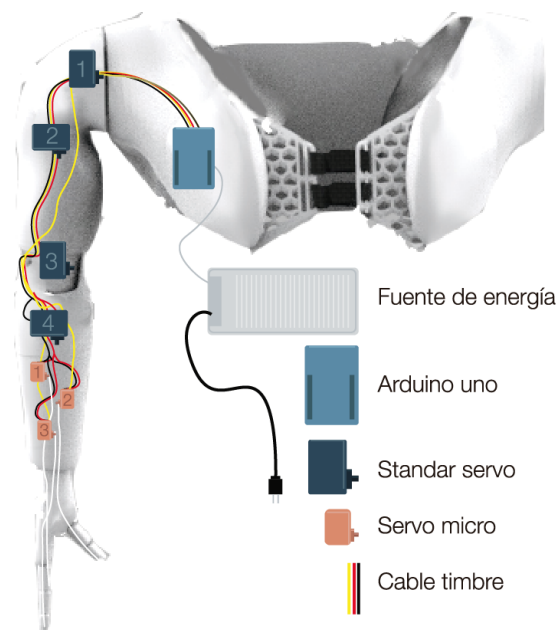
Componentes electrónicos

Como se puede ver en la figura 27, para el prototipo se utilizarán cuatro estándares servo de 12kg de torque con una amplitud de giro de 180 grados (Ver anexo 5). El N°1 genera el movimiento de flexión y extensión del hombro, el N°2 se encarga de los movimientos de rotación lateral del brazo, el N°3 genera el movimiento de flexión y extensión del codo y el N°4 controla el movimiento de pronación y supinación del antebrazo.

Por otro lado, se utilizarán tres servos micro para los dedos (Ver anexo 6), el N°1 controla el movimiento de los dedos meñique y anular, el N°2 se encarga del movimiento del dedo pulgar y el N°3 controla el medio e índice con el fin de proporcionar

agarre cilíndrico de la mano y de pinza de tres dedos.

Figura 27 Componentes electrónicos

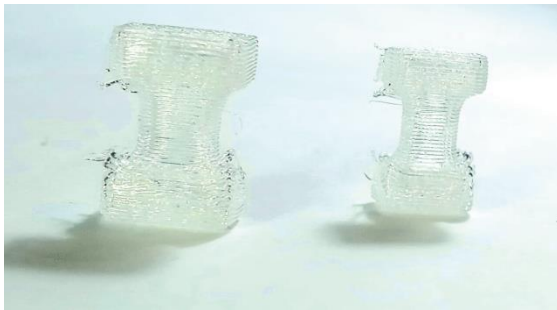


Estos 7 servo motores son conectados a un arduino uno (Ver anexo 7) que almacena la programación propia a los movimientos del brazo controlados por 7 potenciómetros. Debido a que el alcance del proyecto es de prototipo inicial no se utilizarán sensores de movimientos en el pecho sino potenciómetros (Ver anexo 8) con los que se controlarán de manera externa el movimiento de los motores de modo individual.

Mecanismos

En lo adelante se establecen los diferentes mecanismos para los movimientos de las articulaciones y que se distinguen según la complejidad de los movimientos en 1) dedos, 2) codo 3) antebrazo y brazo, 4) hombro.

Figura 28 Uniones de TPU de los dedos



En los dedos se utiliza uniones de TPU (Figura 28) para permitir que estos se cierren y vuelvan a su posición inicial sin necesidad de utilizar un sistema de elásticos o ligas. Para colocar esta pieza de unión se dividió

³**Poliamida:** Es una fibra sintética que contiene grupos químicos, esta fibra presenta propiedades físicas resaltante en los cuales están la resistencia, su

cada dedo en dos partes facilitando el ensamble.

Figura 29 Mecanismo interno para el movimiento de los dedos

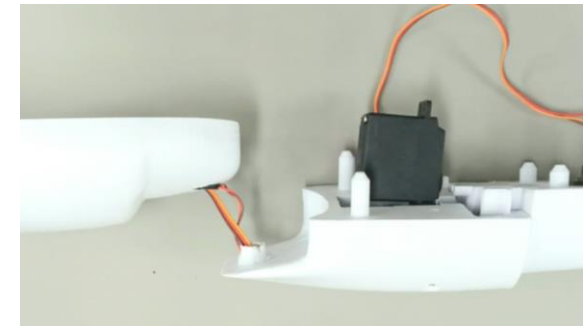


elasticidad, dureza y transparencia. (Poliamida: Qué es y características, 2019)

En la punta de cada dedo se agrega una pieza para el ajuste de cuerdas de poliamida³, que facilitan la tensión y extensión para los agarres a través de un canal guía mediante vaciado.

En el caso del codo se utiliza un eje horizontal de rotación transversal al largo del brazo y que se conecta directamente al motor permitiendo generar un movimiento entre 0 y 146 grados.

Figura 30 Eje horizontal del codo



Para crear la rotación del antebrazo y el brazo se utiliza en el eje vertical a lo largo del brazo, una pieza de unión que encaja en un vaciado de la impresión 3D.

Figura 31 Rotación de antebrazo

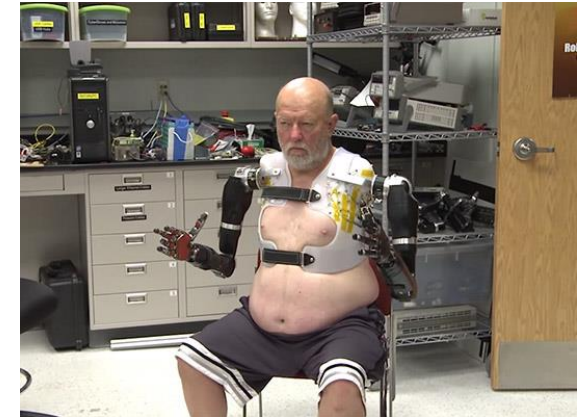


Debido a que se trabaja con un caso de amputación alta de los miembros superiores se analizaron tres opciones de mecanismos para definir el movimiento de flexión y extensión del hombro, pertinente a la proporción de miembros superiores del

sujeto de estudio y tomando en cuenta el espacio disponible para los componentes electrónicos.

La primera opción que se analizó fue desarrollada por Jhon Hopkins University en Estados Unidos (2014) donde trabajaron con un caso de diagnóstico similar. Para generar los movimientos del hombro se separan los brazos del cuerpo dando espacio a los motores necesarios para lograr los movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción del hombro. En ese caso se considera que existe una desproporción en el área de los hombros que puede influir negativamente en la mirada propia del cuerpo del sujeto.

Figura 32 Prótesis para amputación a nivel del hombro de Johns Hopkins Applied Physics Laboratory



La segunda opción es parte de un análisis propio que propone ubicar el motor dentro del brazo en respuesta a la desproporción del primer caso. Para esto se fija el motor al brazo y el eje principal del motor genera la conexión del brazo con la exoprótesis (Motor-Socket). Para esta conexión se diseña un vaciado circular en el socket que permite descansar el peso del brazo evitando una rotura o daño del motor.

Figura 33 Modelo de estudio físico tamaño real del hombro



Para la tercera opción igual de análisis propio se consideró un mecanismo similar al del codo (eje horizontal de rotación) conectado al motor. En esta instancia y para mejorar la problemática de la primera opción, se exploró una unión no en el hombro sino desplazada al brazo. El hombro se uniría al socket evitando sobredimensionamientos antropométricos en ancho, sin embargo, se alteran las medidas en el largo del brazo desplazando el problema a otra zona.

Figura 34 Mecanismo de eje aplicado a codos robóticos



Para cerrar y tomando en consideración las expectativas del usuario en relación al logro de movimientos para apoyo con la prótesis en sus necesidades básicas, así como pasar desapercibidos en la sociedad dada su discapacidad; se decidió trabajar sobre la segunda opción analizada con el fin de mantener la proporción del ancho de hombros y el largo del brazo acorde con la contextura de usuario de estudio.

Materiales

En lo adelante se describen los diversos materiales utilizados para el desarrollo del prototipo.

El prototipo se realizará mediante tecnología en impresión 3D. Se plantea el uso del filamento **PLA** en las carcasas de los sockets, brazo, antebrazo, mano y dedos debido a que son áreas que necesitan rigidez y resistencia para contener los mecanismos de movimiento (Ver anexo 9).

Otro material de impresión 3D utilizado es el filamento **TPU** (Ver anexo 10) que proporciona flexibilidad en las piezas del centro del pecho y espalda en el exoesqueleto de torso facilitando la movilidad. Además, se utiliza en las articulaciones interfalángicas en piezas negras de los dedos (ver figura 35) para lograr la flexibilidad en movimientos de flexión y extensión.

Figura 35 Flexibilidad del TPU en las uniones del dedo



Tanto para el PLA como el TPU se plantea la utilización del tipo de relleno giroide ya que debido a sus propiedades es resistente en cualquier dirección, además contribuye a disminuir los tiempos de impresión y la cantidad de filamento utilizado sin comprometer su resistencia. Debido a la forma de su patrón, conformado por la rotación de la onda en diferentes ejes, permite el paso de aire por lo que es recomendado en carcasas para

componentes electrónicos para evitar el calentamiento de las piezas (Mayer, 2021).

Figura 36 Relleno giroide impreso en PLA



Otro factor que se debe tomar en consideración al momento de imprimir es el **espesor** y el **relleno** donde a mayor porcentaje mayor compactación del patrón utilizado (giroide) y a menor porcentaje menor compactación. En el caso de las carcasas se utiliza un espesor de 5mm y uno de 10mm en el caso del socket.

En relación al relleno y en los dedos se utiliza el 50% ya que son piezas sólidas y pequeñas que deben tener mayor resistencia.

En cuanto al TPU, para las uniones de los dedos se utiliza un 0% de relleno luego de realizar pruebas de flexibilidad para 15%, 15% y 0%. Para las piezas del pecho y espalda se utiliza un relleno del 15% que ofrece mayor resistencia a la tracción que se adapte a los movimientos naturales del sujeto (respiración, estiramientos de pecho y hombro, etc.)

Para la camisa, que ofrece una capa de protección a la piel y se dispone entre el exoesqueleto y el pecho se utiliza tela de poliéster denominada **Piel de durazno o mimossa** con 93% de poliéster y 7% lycra. Esta composición es resistente al rasgado, de secado rápido, resguarda de climas fríos y aunque no es transpirable no se acumula el sudor provocado por la prótesis (¿Algodón o poliéster? Conoce las ventajas de cada

material, 2019). Además, por su elasticidad y suavidad proporciona comodidad para el ajuste a los movimientos que realiza la persona evitando rozamientos del exoesqueleto con la piel.

Figura 37 *Tela piel de durazno*



Proceso productivo

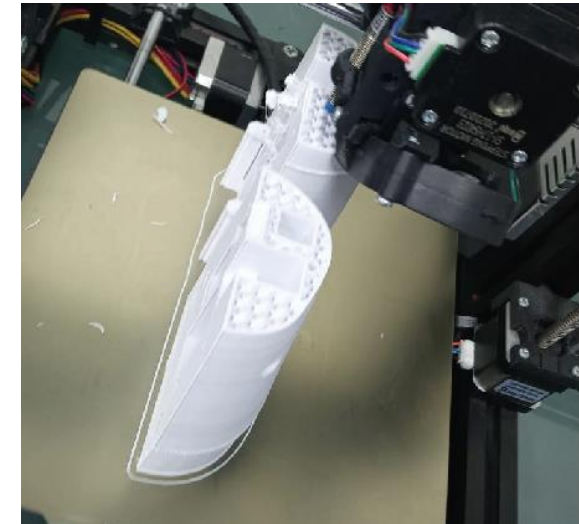
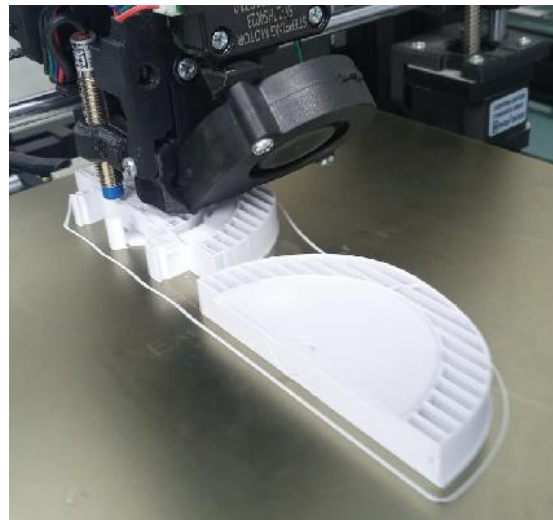
Debido a que se trata de un proceso productivo de piezas a la medida del sujeto de estudio, se utilizó la tecnología de impresión 3D para la fabricación (Ver anexos 12, 13 y 14).

En este punto se resalta como parte del Diseño emocional y vinculado a favorecer la adaptación del sujeto a la prótesis, la estrategia de involucrarle en el proceso de impresión 3D. Asimismo este enfoque definió un orden de impresión desde los dedos hasta el socket con el fin de que el sujeto pueda presenciar la creación de la prótesis por fases y tomando en cuenta que la mano es una de las partes que genera por su uso mayor nexo con el ser humano.

Tabla 3 Resumen del proceso productivo por impresión 3D

	Cantidad de piezas	Cantidad de material		Horas de impresión	Días de impresión
		PLA	TPU		
Mano	23	151 gramos	6.8 gramos	30 horas	1 día y 6 horas
Antebrazo	7	537.4 gramos	(-)	70 horas 32 min	2 días 22 horas 32 min
Brazo	6	922 gramos	(-)	109 horas 40 min	4 días 13 horas 40 min
Socket	9	1 kilo 198 gramos	158 gramos	351 horas 35 min	14 días 15 horas 35 min
TOTAL	45	2 kilos 808.4 gramos	164.8 gramos	561 horas 47min	23 días 9 horas 47 min

Figura 38 Proceso de impresión 3D de la prótesis



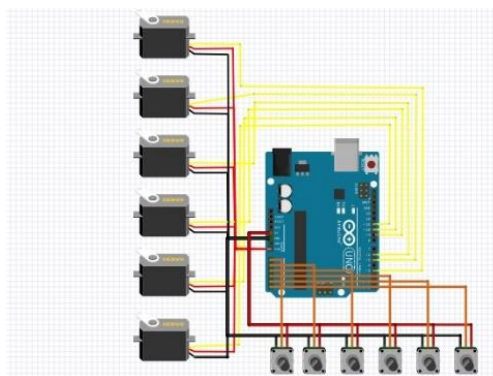
De manera simultánea e iterativa, se realizan en paralelo a la impresión 3D de piezas las conexiones de los componentes electrónicos previamente indicados en la Figura 27.

Se diseñó un diagrama electrónico en el programa llamado Fritzing, en el cual se comprueba la conexión de los pines analógicos de los potenciómetros y la conexión PWN⁴ para los servomotores presentes en el arduino Uno. Se analizó que los pines que contiene la placa sean los suficientes para conectar los motores y potenciómetros elegidos. El resultado de la conexión se la puede observar en la figura 39.

Se tiene entendido que la conectividad para el funcionamiento del arduino se la realiza con una fuente externa de voltaje de

5 voltios 10 amperios para el funcionamiento del sistema completo.

Figura 39 Simulación en Fritzing de las conexiones entre motores, potenciómetros y el arduino Uno

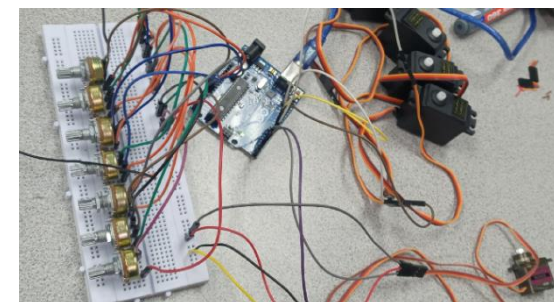


Posterior a esto se ensambla físicamente las conexiones tomando en cuenta el largo necesario de los cables según las dimensiones del brazo y los espacios diseñados en las carcasas para los motores.

Se pudo observar que una placa programable no cubre con los pines necesario PWM (6 pines) y es importante

contar con otra placa adicional o una de mayor capacidad (Arduino ADK) (Ver anexo 15).

Figura 40 Conexiones físicas de los componentes



Con las conexiones realizadas se procede a escribir el código de programación (Ver anexo 16). Este se comprueba con las piezas impresas en PLA para observar si funcionan los movimientos esperados o si se deben hacer reajustes en la programación o conexiones.

⁴ Reciben la información de los potenciómetros y modulan la señal o ancho de pulso de los mismos para remitir al motor.

XIII. Prototipo

Planos (Ver anexo 17)

Figura 41 Medidas generales de la prótesis en milímetros

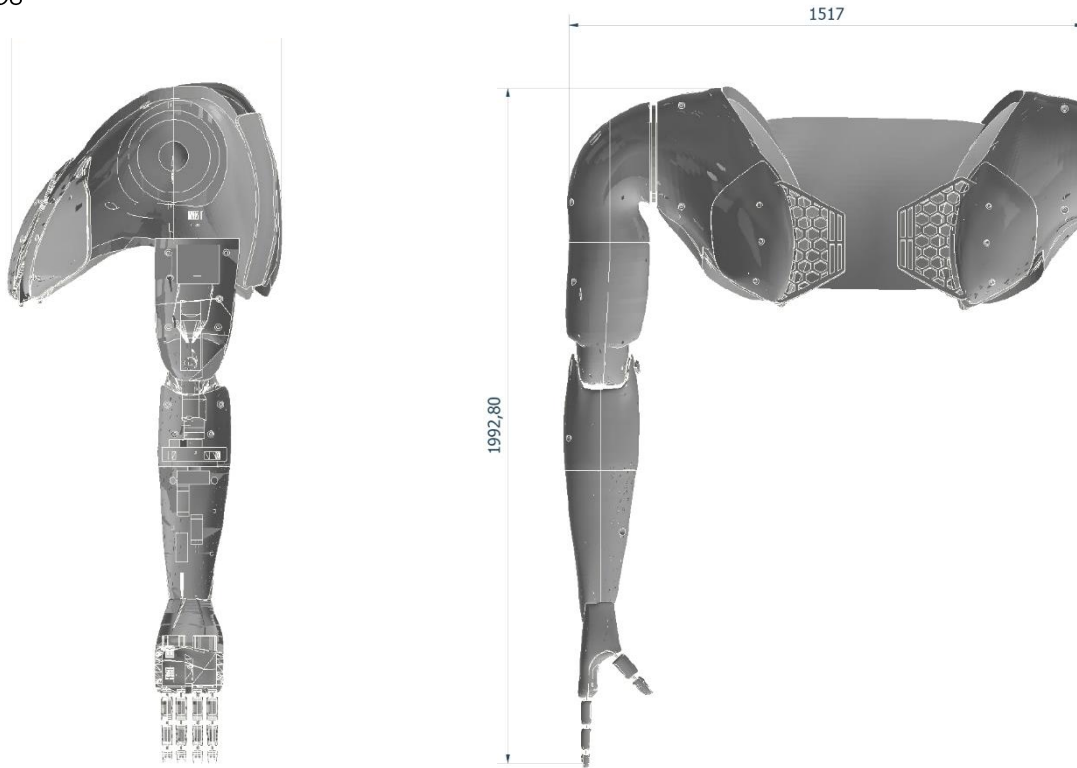


Figura 42 Numeración de las partes impresas de la prótesis

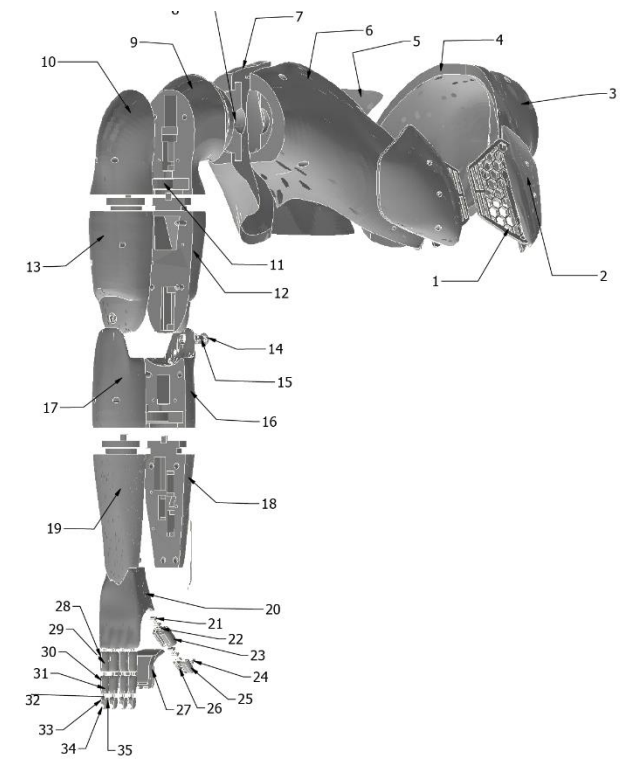


Tabla 4 Listado de partes de la figura 42

Numero de pieza	Nombre de pieza	Cantidad
1	Unión TPU de pecho	2
2	Tapa compartimiento de pecho	2
3	Socket frontal izquierdo	1
4	Socket posterior izquierdo	1
5	Unión TPU espalda	1
6	Socket frontal derecho	1
7	Socket posterior derecho	1
8	Eje movimiento del hombro	1
9	Brazo superior –Pieza derecha	1
10	Brazo superior –pieza izquierda	1
11	Unión de ejes vertical	2
12	Brazo inferior-pieza derecha	1
13	Brazo inferior-	1

	Pieza izquierda	
14	Tapa eje del codo	1
15	Eje del codo	1
16	Antebrazo superior-pieza derecha	1
17	Antebrazo superior-pieza izquierda	1
18	Antebrazo inferior-pieza derecha	1
19	Antebrazo inferior-pieza izquierda	1
20	Palma de la mano	1
21	Unión de TPU pulgar	2
22	Base pulgar-pieza derecha	1
23	Base pulgar-pieza izquierda	1
24	Ajuste de cuerda dedo pulgar	1

25	Punta pulgar – pieza derecha	1
26	Punta pulgar – pieza izquierda	1
27	Tapa pala de la mano	1
28	Base dedo-pieza izquierda	4
29	Base dedo-pieza derecha	4
30	Centro dedo-pieza izquierda	4
31	Centro dedo-pieza derecha	4
32	Unión de TPU dedo	12
33	Punta dedo-pieza izquierda	4
34	Punta dedo-pieza derecha	4
35	Ajuste de cuerda dedo	4

Renders (Ver anexo 18)

Figura 43 Render frontal y perspectiva

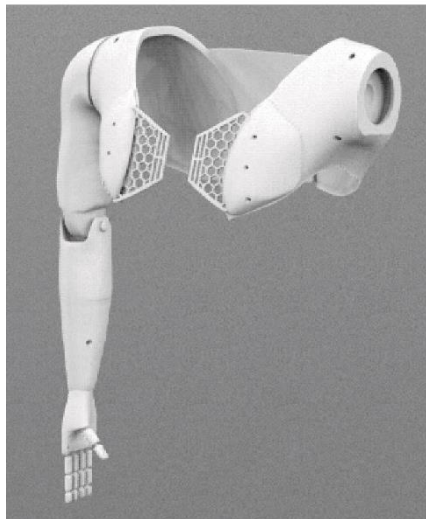
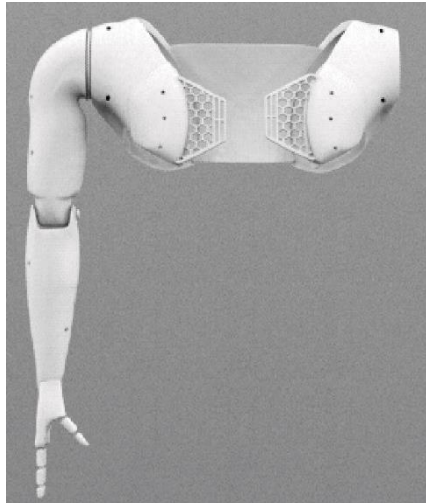


Figura 44 Render de detalles pecho, mano, hombro

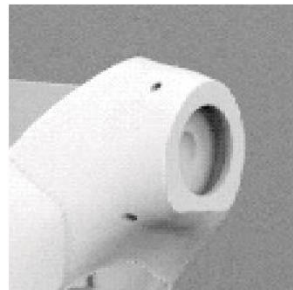
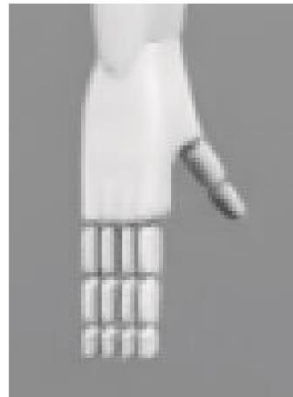
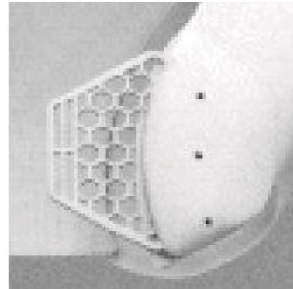


Figura 45 Render de la prótesis en la figura humana

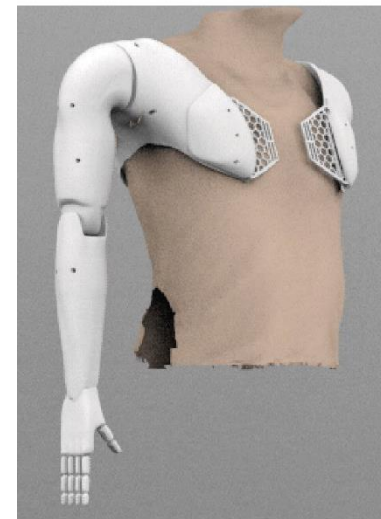
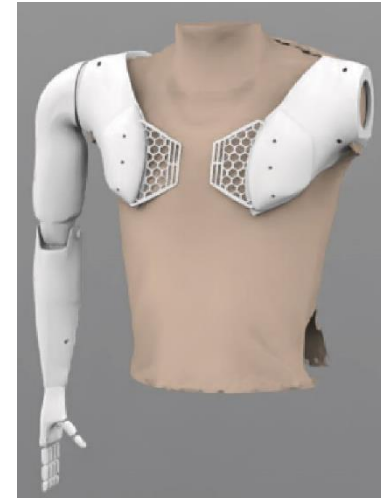
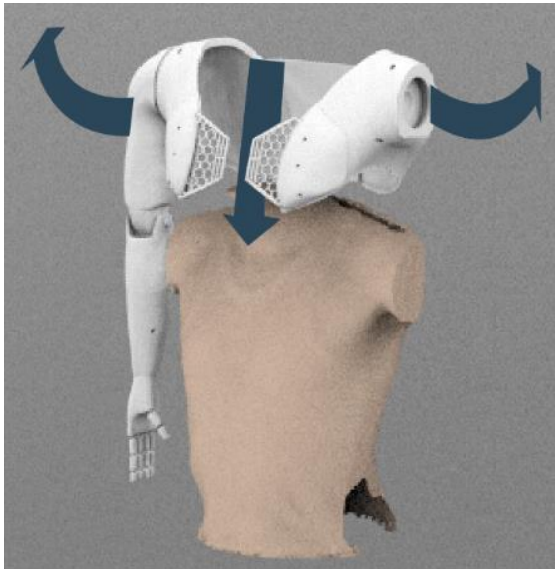
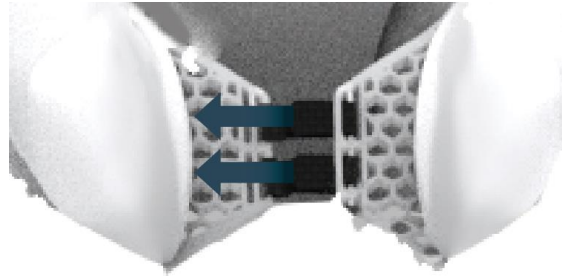


Figura 46 *Modo de uso*



La prótesis se puede colocar desde arriba o en forma de chaleco utilizando la parte flexible de la espalda para abrir la parte frontal lo necesario para que ingrese la persona.



Posterior a esto, se procede a ajustar las correas en el pecho con el fin de asegurar la prótesis a la persona.



Por último, en el caso del prototipo se procede a controlar los movimientos de la prótesis a través de los potenciómetros que se encuentran fuera de esta.

Fotos del prototipo (Ver anexo 19)

Figura 47 *Prototipo final*

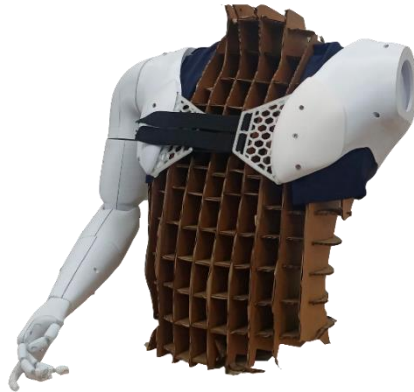


XIV. Validaciones y comprobaciones

En adelante se establecen las validaciones en términos de 1) uso, 2) función y 3) teórica.

La de uso se la define utilizando un busto de tamaño real de cartón del escaneado 3D con el que se realizó el modelado por computadora de la prótesis, dado que al ser el exoesqueleto un producto diseñado para un sujeto sin miembros superiores, se somete a códigos de ética y confidencialidad que no permiten mostrar el uso directo en el caso.

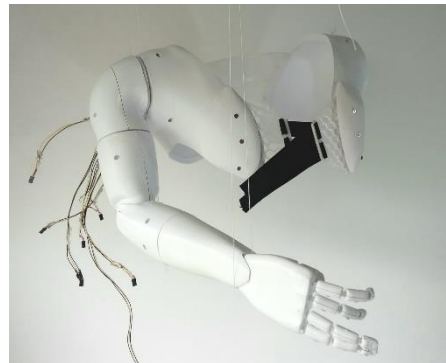
Figura 48 Validación de uso



Para la validación de funcionamiento se establecen 3 videos en directo (Ver anexo 20) que muestran:

- El movimiento del sistema de mecanismos en articulaciones mediante video general frontal
- El movimiento del sistema de mecanismos en articulaciones mediante video general lateral.

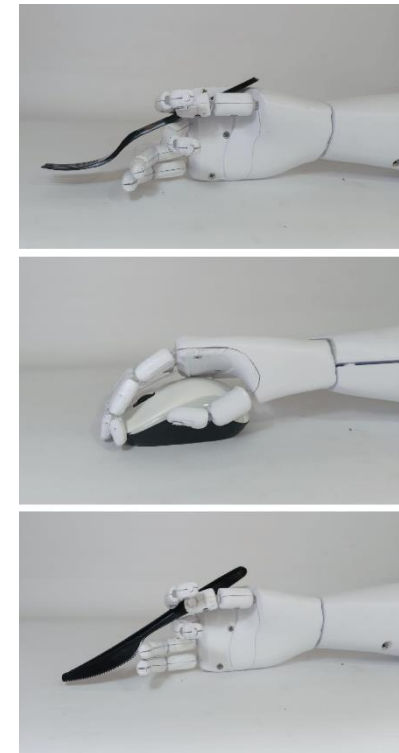
Figura 49 Validación de movimiento de sistema de mecanismos



- El movimiento del sistema de mecanismos de la mano mediante video de acercamiento con agarres de pinza y

cilíndrico respondiendo a necesidades básicas principalmente de comer, mediante el agarre de cubiertos, beber y el uso de mouse.

Figura 50 Validación de sistemas electrónicos mediante agarres



Debido a la textura lisa del PLA, se percibió una mayor dificultad de agarre de objetos con los mismos acabados (liso) ya que los mismo se resalaban de la mano.

Además, se proponer la utilización de motores de mayor torque en las áreas del codo y el hombro ya que a causa del peso del mismo brazo no se pudo realizar un levantamiento del mismo a partir de los componentes electrónicos.

Finalmente, la validación teórica (Ver anexo 21) se aborda mediante una entrevista con el sujeto de estudio y psicólogos asociados en el marco del grupo de investigación colaborador del presente estudio, sus criterios desde el Diseño Emocional y vinculado a variables de percepción y sensación como cromática, peso, morfología.

Esta última validación arroja los siguientes resultados:

- Se mencionó la importancia de la adaptabilidad del diseño a las necesidades, preferencias de cromática, el peso adecuado y mantener la proporción con el cuerpo de la persona.
- En cuanto al involucramiento del sujeto en la producción, se estableció por parte de los psicólogos asociados que facilita el proceso de adaptación a la prótesis ya que la persona conoce las capacidades de la misma con el fin de manejar adecuadamente el criterio de realidad con el fin de no aportar falsas esperanzas.
- Dar a conocer no solo al paciente sino también a los familiares sobre las precauciones que se deben tener en caso de ser necesario mantenimiento o reposición d las piezas a fin de involucrar a las personas de su entorno.
- Se considera adecuado el uso del principio de individualización en el que no se aplican los mismos criterios de

función, uso, morfología y cromática de manera general y uniforme a personas que cuentan con una amputación ya que se debe trabajar desde la necesidad y no desde el diagnóstico.

XV. Análisis de costos

Tabla 5 Costos de producción del prototipo de la prótesis

Materia prima:	Q	Cu	CT
Filamento TPU	0.2	\$ 31.00	\$ 6.20
Caucho silicón	0.5	\$ 35.00	\$ 17.50
Standar Servo	4	\$ 9.35	\$ 37.40
Placa electrónica	1	\$ 17.00	\$ 17.00
Fuente de energía- adaptador	1	\$ 16.00	\$ 16.00
Cable timbre	10	\$ 0.30	\$ 3.00
Micro servomotor	3	\$ 5.98	\$ 17.94
Tela piel de durazno	0.5	\$ 2.70	\$ 1.35
Cuerda de nylon	0.5	\$ 1.00	\$ 0.50
Potenciómetros	7	\$ 0.50	\$ 3.50
Filamento PLA	3	\$ 25.00	\$ 75.00
TOTAL MATERIA PRIMA		\$	195.39
Mano de obra directa:	Q	Cu	CT
Costurera	1	\$ 10	\$ 10
Ingeniero en electrónica	1	\$ 100	\$ 100
TOTAL DE MANO DE OBRA DIRECTA		\$	110.00
Costos indirectos de fabricación:	Q	Cu	CT
Tornillos 13.2mm x 3mm (11 unidades)	2	\$ 0.40	\$ 0.80
Tornillos 19.0mm x 4.2mm (10 unidades)	1	\$ 0.36	\$ 0.36
Tornillos 25.0mm x 4.2mm (10 unidades)	2	\$ 0.42	\$ 0.84
TOTAL COSTOS INDIRECTOS		\$	2.00
COSTO DE PRODUCCION TOTAL		\$	307.39
CPU		\$	307.39

Debido a que el proceso productivo del proyecto se realizó en las instalaciones de la universidad donde cuenta con impresoras 3D no se toma en cuenta en la tabla los costos de impresión.

Según la cantidad de horas calculadas en la tabla 3 el proyecto necesita 562 horas de impresión aproximadamente, en Quito la hora de impresión 3D varía entre los \$2,50 y los \$3, por lo que, en el caso de imprimir en una empresa externa, los costos de producción aumentarían entre \$1405 y \$1686 correspondientes al costo de impresión 3D por hora. (Ver anexo 22)

En la tienda Taiced se puede encontrar una impresora Prusa MK3S+ al precio de \$1600 y en 3Dtronix cuentan con la creality CR 6-SE a \$839,99, en ambos casos el precio de la impresora se encuentra por debajo del costo de impresión de la prótesis, tomando en cuenta que se pueden

encontrar impresoras a precios menores, es recomendable la adquisición de una impresora con un área de impresión mínima de 220mm x 220mm x280mm con el fin de producir la prótesis.

Para ver lista de proveedores referirse al anexo 23.

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

XVI. Conclusiones

Dentro del diseño fue necesario conocer al usuario al que se dirige el producto, si bien no se levantó información específica y directa de éste en cuanto a su experiencia durante y posterior al accidente, su proceso de duelo, cómo se acopla en su día a día, entre otros factores, se pudo recoger información general entre texto y entrevistas a psicólogos, las cuales llevaron a la definición de un proceso de producción de la prótesis en el que se involucre al paciente con el fin de que pueda crear una conexión con la prótesis desde antes de ser entregada para su uso.

Se observó que en otros casos de discapacidad física en los que es necesario un producto de asistencia, desde el punto de vista del diseño emocional, es importante entender que para el usuario el objeto es

más que un elemento de su cotidianidad pasando a ser parte de su configuración humana por lo que se debe tomar en consideración en todo momento la relación usuario-prótesis.

Además, en cuanto a tiempos de producción tanto de modelado como de impresión, al ser un producto que genera un cambio en el estilo de vida del usuario, cuando los procesos productivos se alargan y no se presentan avances a la persona con regularidad, esta pierde la ilusión o la esperanza de que se entregue la prótesis, es por esto que al estar involucrado en las diferentes etapas el usuario conocerá en qué fase del proceso se encuentra y ser parte de éste.

Por otro lado, se analizaron los movimientos necesarios para cumplir con las actividades cotidianas del usuario, para esto se trabajó desde los mecanismos y los componentes electrónicos con el fin de proporcionar los movimientos mínimos necesarios. Dentro de un proyecto que consta de diversos elementos, es de importancia encontrar soluciones sencillas como es el caso de los vaciados en la impresión 3D para entender las posiciones de los componentes electrónicos y comprobar el paso de los cables.

Si bien es cierto, todavía el proyecto necesita una fase de mayor experimentación se llegó a un prototipo inicial en la que se puede demostrar la funcionalidad a través de movimientos básicos como agarres de pinza y cilíndricos orientados a cumplir las

necesidades de comer, beber y el uso de mouse que pueden ser probados por la prótesis, pero es necesario realizar una fase de maduración tecnológica para poder ser utilizados por el usuario durante su vida

XVII. Recomendaciones

Dentro de la etapa de investigación es necesario tener un acercamiento con el usuario específico para el que se diseña, con el fin de conocer en qué contexto se va a trabajar, además, permite la posibilidad de ser validado con el usuario en cuanto a usabilidad, acoples, comodidad y pesos además de generar un mayor acercamiento al funcionamiento de los sensores de movimientos que se ubicarían en el pecho para generar las actividades.

En adición del apoyo de los psicólogos en el caso, para tener en consideración el proceso de adaptación del paciente, es recomendado mantener un acercamiento con los doctores y fisioterapeutas del usuario para conocer de mejor manera el estado físico en el que se encuentra el paciente.

En la etapa de diseño, debido a que se trabajó con un sujeto de estudio el cual no

contaba con la discapacidad física, es necesario hacer una mayor exploración en cuanto a qué medidas son necesarias para obtener a través del uso de percentiles y datos antropométricos los largos, anchos y perímetros en el brazo con el fin de que la prótesis mantenga una proporción similar al cuerpo de la persona.

Por otro lado, en el prototipado se recomienda realizar una experimentación con los diferentes procesos y materiales de impresión 3D, como es el caso de la resina, los diferentes tipos de rellenos y los porcentajes de los mismos con el fin de proponer el que mejor se acople al acabado final de la prótesis en cuestión de peso, resistencia a impacto, ventilación tanto del usuario como de los componentes electrónicos y asepsia.

Para el desarrollo de una prótesis efectiva es necesario analizar la tecnología

disponible a nivel nacional y las posibilidades de importación de los componentes electrónicos a nivel internacional a fin de generar los movimientos necesarios para cumplir las necesidades básicas del usuario.

Asimismo, se propone analizar diferentes soluciones para el encaje de las uniones de TPU de los dedos a manera de solucionar el acople desde las propiedades del mismo material, de esta manera se disminuye la cantidad de tornillos necesarios en la mano.

Por último, realizar una exploración respecto a acabados en cromática y materiales a fin de proporcionar diferentes sensaciones en cuanto a la textura de los mismos trabajando desde vaciados y relieves.

Referencias Bibliográficas

- Barberán Vizueta, M. S., & Chela Criollo, J. K. (2021, abril). Prótesis impresa en 3D y aplicativo móvil de geolocalización: caso de estudio Novus Spem. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20293/1/UPS-GT003216.pdf>. Recuperado 28 de febrero de 2022, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20293/1/UPS-GT003216.pdf>
- Objetivos – Ministerio de Salud Pública. (s. f.). Ministerio de Salud pública. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://www.salud.gob.ec/objetivos/>
- Sundholm, M. (s. f.). OMS: Organización Mundial de la Salud – Oficina del Secretario General para la Juventud. Office of the secretary-general, envoy on youth. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://www.un.org/youthenvoy/es/2013/09/oms-organizacion-mundial-de-la-salud/>
- Estados Miembros. (2015). Objetivo 3: Salud y bienestar | El PNUD en Ecuador. UNDP. Recuperado 25 de febrero de 2022, de <https://www.ec.undp.org/content/ecuador/es/home/sustainable-development-goals/goal-3-good-health-and-well-being.html>
- Bates, T. J., Fergason, J. R., & Pierrie, S. N. (2020, 3 junio). Technological Advances in Prosthesis Design and Rehabilitation Following Upper Extremity Limb Loss. NCBI. Recuperado 28 de febrero de 2022, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7340716/>
- Ministerio De Salud Pública. (2020, enero). Estadísticas de Discapacidad – Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades. Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas-de-discapacidad/>
- Zambrano, R. (2018, 4 noviembre). Acceso a prótesis mejora en Ecuador, pero aún hay deficiencias. Informes | Noticias | El Universo. Recuperado 9 de marzo de 2022, de <https://www.eluniverso.com/noticias/2018/10/28/nota/7016252/acceso-protesis-mejora-ecuador-aun-hay-deficiencias/?outputType=amp>
- O.M.S. (2021, 24 noviembre). Discapacidad y salud. OMS. Recuperado 9 de marzo de 2022, de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>
- The Design Society. (2018). *ROBOT ERGONOMICS: TOWARDS HUMAN-CENTRED AND ROBOT-INCLUSIVE DESIGN*. The Design Society - a Worldwide Community. Recuperado 4 de septiembre de 2022, de <https://www.designsociety.org/publication/40627/ROBOT+ERGONOMICS%3A+TOWA>

RDS+HUMAN-CENTRED+AND+ROBOT-
INCLUSIVE+DESIGN

Barqui Pérez, N. (2021). *"Diseño afectivo en la
protésica como un medio hacia una mejor
relación entre usuario-producto."* [Memoria
de título] Universidad de Chile

Mesquita Dummar, A. (2021). *AMPUTACIÓN Y
SALUD MENTAL: UNA VISIÓN
SISTEMÁTICA* [Tesis de maestría,
Universidad de Oviedo]. Repositorio
institucional de la Universidad de Oviedo
<https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/60268>

Desmet, P.M.A. (2018). Measuring emotion:
Development and application of an
instrument to measure emotional responses
to products. In: M.A. Blythe & A.F.

Desmet, P.M.A. (2002). Designing Emotions.
Unpublished doctoral dissertation.

Norman, D. A. (2004). Emotional Design: Why
We Love (or Hate) Everyday Things. Basic
Books.

Pohlmeyer, A. E. (2012, p. 11)' Design for
Happiness. Interfaces, 92,8-11.

Achs. (2015). Estadísticas n° de accidentes con
consecuencias de amputación traumática
2015.

Sutton, M. (2022, 31 julio). The 7 Step Product
Development Process Explained (2022).
Shopify. Recuperado 11 de septiembre de
2022, de
<https://www.shopify.com/blog/product-development-process>

Observatorio De Discapacidad Física. (s. f.). La
discapacidad física: ¿qué es y qué tipos
hay? | Observatorio de la Discapacidad
Física. Observatorio de discapacidad física.

Recuperado 9 de abril de 2022, de
<https://www.observatoriodiscapacitat.org/es/la-discapacidad-fisica-que-es-y-que-tipos-hay>

Harmonic Drive SE. (s. f.). Harmonic Drive SE -
Glosario. Harmonic Drive SE. Recuperado
15 de abril de 2022, de
<https://harmonicdrive.de/es/glosario/protesis#:~:text=Las%20pr%C3%B3tesis%20que%20se%20encuentran,totamente%20rodeadas%20de%20tejido%20corporal.>

Espinosa, A. (2020, 24 febrero). TODO LO QUE
DEBES SABER ACERCA DEL FILAMENTO
PLA. TRESDE. Recuperado 15 de abril de
2022, de <https://tresde.pe/todo-lo-que-debes-saber-acerca-del-filamento-pla/>

Mayer, M. (2021, 20 agosto). 3D printing
with Gyroid Infills: all you need to know!
3D Solved. <https://3dsolved.com/3d-printing-with-gyroid-infills-all-you-need-to-know/>

- M., A. (2022, 9 marzo). Guía completa: el TPU en la impresión 3D. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-tpu-040620202/>
- Daniels, S. (2021, 20 noviembre). ¿Qué es la silicona de grado alimenticio? ehowenespanol. https://www.ehowenespanol.com/silicona-grado-alimenticio-sobre_421483/
- ¿Algodón o poliéster? Conoce las ventajas de cada material. (2019, 26 noviembre). Confecciones Emilio. <https://confeccionesemilio.com/algodon-poliester-conoce-ventajas-cada-material/>
- Vergara Paredes, M., Días Rodríguez, M., Rivas Echeverría, F., & Restrepo Moná, M. (2017). Movimientos de la muñeca. (a) Flexión y extensión. (b) Abducción y aducción [Gráfico]. https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Movimientos-de-la-muneca-a-Flexion-y-extension-b-Abduccion-y-aduccion_fig9_323971491
- Oiseth, S., Jones, L., & Maza, E. (2022, 12 mayo). Articulaciones de la mano [Ilustración]. <https://www.lecturio.com/es/concepts/mano/>
- Homo Medicus. (2021, 17 julio). Tipos de movimientos [Ilustración]. <https://www.homomedicus.com/tipos-movimientos-extremidades/>
- Fisioterapia avanzada Fabián. (2020, 28 diciembre). CODO DE GOLFISTA AUNQUE NO PRACTIQUES EL GOLF [Ilustración]. <https://xn-fabianespaa-beb.com/codo-de-golfista/>
- Noé NTRE. (2020, 28 octubre). Ejercicios de Estabilidad Glenohumeral [Ilustración]. <https://ntrentrenamientos.com/estabilidad-glenohumeral/>
- Johns Hopkins Applied Physics Laboratory [JHU Applied Physics Laboratory]. (2014, 16 diciembre). Amputee Makes History with APL's Modular Prosthetic Limb [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=9NOnox2jU0Q&ab_channel=JHUAppliedPhysicsLaboratory
- Piccino, A. (2021). Andrea Piccino [Fotografía]. Instagram. https://www.instagram.com/nozzle_torino/?utm_medium=copy_link
- Mahdi Designs. (2020, 6 septiembre). Designing Bionic Fingers [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=Zis_RQNokw
- Hussein, M. [Mahdi Designs]. (2020, 6 septiembre). Designing Bionic Fingers [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=Zis_RQNokw
- Hussein, M. (s. f.). Myoelectric Prosthetic Arm. Mahdi Designs. <https://mdesigns.space/projects/project-three-2jhsa>
- Lofgren, K. (2014). Double amputee is fitted with

two limbs that he controls with his mind.

INHABITAT. <https://inhabitat.com/video-double-amputee-is-fitted-with-two-limbs-that-he-controls-with-his-mind/>

Poliamida: Qué es y características. (2019, 4 noviembre). Inyección de Plásticos | Plásticos Ascaso.

<https://plasticosascaso.es/que-es-la-poliamida/>

Fritzing. (s. f.). <https://fritzing.org/>