

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

EXOESQUELETO POTENCIADOR DE FUERZA PARA LA MANO

Análisis de parámetros de funcionalidad y diseño de un exoesqueleto basado en multi-criterios de la ingeniería concurrente. Enfoque en la rehabilitación de agarre de la mano

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECÁNICA

JOSUÉ ARIEL GARZÓN RUBIO

josue.garzon@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. WILLIAM RICARDO VENEGAS TORO. PhD

william.venegas@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, JOSUÉ ARIEL GARZÓN RUBIO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

JOSUÉ ARIEL GARZÓN RUBIO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JOSUÉ ARIEL GARZÓN RUBIO, bajo mi supervisión.

ING. WILLIAM RICARDO VENEGAS TORO. PhD
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas

Josué Ariel Garzón Rubio

Ing. William Ricardo Venegas Toro. PhD

Jairo Andrés Mangia Cuichan

Darwin Santiago Tigasi Tipan

Dennis Fabian Vilaña Guana

DEDICATORIA

“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas, Josué 1:9”

Dios, padre amado este trabajo te lo dedico.

AGRADECIMIENTO

Agradezco de todo corazón a mis padres por su apoyo incondicional día tras día, pues sin su apoyo no hubiera podido llegar hasta estas instancias. Los amo.

Agradezco de igual manera a mi director de trabajo William Venegas y a todos mis profesores de cátedra que tuve el privilegio de conocer en el transcurso de estos años, gracias por su paciencia, ayuda, por su experiencia y conocimiento transferido.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Alcance.....	4
1.5 Estado del arte	4
1.5.1 Órtesis para mano	4
1.5.2 Prótesis para mano.....	5
1.5.3 Exoesqueletos	7
1.5.4 Exoesqueletos antropomórficos para la mano	9
1.6 Parámetros de funcionalidad de la mano.....	12
1.6.1 Cinemática de la mano	12
1.6.2 Músculos de la mano.....	12
1.6.3 Rangos de movilidad de la muñeca	12
1.6.4 Rango de movilidad de los dedos.....	13
1.6.4.1 Flexión/Extensión con respecto a MCP	14
1.6.4.2 Flexión/Extensión con respecto a IFP.....	14

1.6.4.3	Flexión/Extensión con respecto a IFD	14
1.6.4.4	Abducción y Aducción	15
1.6.5	Movimientos coordinados básicos de la mano.....	15
2	METODOLOGÍA.....	17
2.1	Determinación de especificaciones técnicas.....	17
2.1.1	Consideraciones.....	17
2.1.2	Casa de la calidad	18
2.1.3	Conclusiones de la casa de la calidad	19
2.2	Análisis funcional.....	20
2.2.1	Estructura modular	21
2.3	Soluciones de módulos.....	22
2.3.1	Modulo 1: Soporte zona radio/cubita.	22
2.3.2	Modulo 2: Soporte metacarpiano.....	24
2.3.3	Modulo 3: Conexión zona radio/cubita y zona metacarpiana.	25
2.3.4	Modulo 4: Soporte para dedos.....	27
2.4	Alternativas de solución.....	32
2.4.1	Matriz morfológica	32
2.4.1.1	Alternativa (A1).....	33
2.4.1.2	Alternativa (A2).....	33
2.4.1.3	Alternativa (A3).....	33
2.5	Estudio y selección de alternativas.....	34
2.5.1	Método ordinal corregido de criterios ponderados	34
2.5.2	Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	36
3	EXPERIMENTACIÓN	43
3.1	Pruebas de fuerza de agarre	44
3.2	Marcadores anatómicos.....	44
3.3	Postura corporal	45
3.4	Descripción del movimiento a efectuar	47
3.5	Algoritmo	47

3.6	Graficas	48
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1	Resultados	50
4.2	Discusión	50
4.3	Protocolo de pruebas.....	52
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1	Conclusiones	54
5.2	Recomendaciones	54
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
7	ANEXOS.....	58
	ANEXO I: Certificado de originalidad	58
	ANEXO II: Casa de la Calidad	58
	ANEXO III: Benchmarking	58
	ANEXO IV: Formulario de encuesta.....	58
	ANEXO V: Especificaciones técnicas dinamómetro KFORCE	58
	ANEXO VI: Informe registro de fuerza de agarre App KFORCE	58
	ANEXO VII: Algoritmo.....	58
	ANEXO VIII: Formato protocolo de pruebas	58
	ANEXO IX: Planos.....	58
	ANEXO X: Fotografías.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura del trabajo.	2
Figura 1.2. Clasificación general de órtesis.	5
Figura 1.3. a) Órtesis activa dinámica y b) Órtesis pasiva correctora.	5
Figura 1.4. Prótesis mecánica para mano.	6
Figura 1.5. Prótesis eléctrica para mano.	6
Figura 1.6. Prótesis mioeléctrica para mano.	6
Figura 1.7. Prótesis estética para mano.	7
Figura 1.8. Clasificación general de prótesis.	7
Figura 1.9. Clasificación de exoesqueletos por su fuente de energía.	8
Figura 1.10. Exoesqueleto activo dinámico para rehabilitación de mano.	8
Figura 1.11. Exoesqueleto pasivo de bloque utilizado para trabajos sobre cabeza.	9
Figura 1.12. Vista lateral de exoesqueleto de mano.	9
Figura 1.13. Vista lateral de exoesqueleto de dedo.	10
Figura 1.14. Vista lateral de exoesqueleto con sistema circuitous joint.	10
Figura 1.15. Vista lateral de exoesqueleto WIFRE.	11
Figura 1.16. MCPDrive exoesqueleto antropomórfico pasivo.	11
Figura 1.17. Rangos de movilidad de Flexión y extensión de la muñeca.	12
Figura 1.18. Rangos de movilidad de desviación cubita y radial de la muñeca.	13
Figura 1.19. Articulaciones del dedo.	13
Figura 1.20. Rango de movilidad flexión/extensión con respecto a MCP.	14
Figura 1.21. Rango de movilidad flexión/extensión con respecto a IFP.	14
Figura 1.22. Rango de movilidad flexión/extensión con respecto a IFD.	15
Figura 1.23. Abducción y Aducción de los dedos.	15
Figura 1.24. Seis tipos de agarre básicos, según Schlesinger.	16
Figura 2.1. Etapas para el desarrollo y selección de alternativas.	17
Figura 2.2. Función global nivel 0.	20
Figura 2.3. Desarrollo del nivel 1.	22
Figura 2.4. Soporte antebrazo tipo 1.	22
Figura 2.5. Soporte antebrazo tipo 2.	23
Figura 2.6. Soporte antebrazo tipo 3.	24
Figura 2.7. Mano trasera.	24
Figura 2.8. Back Hand.	25
Figura 2.9. Mecanismo articulado tres eslabones.	26

Figura 2.10. Mecanismo articulado 1 eslabón.....	26
Figura 2.11. Conector tipo 1.....	27
Figura 2.12. Conector tipo 2.....	27
Figura 2.13. Cube Universal Joint.....	28
Figura 2.14. Articulación dos eslabones.....	29
Figura 2.15. Ring Link Index Finger.....	29
Figura 2.16. Soporte falange media y distal.....	30
Figura 2.17. Ring Link Index Finger.....	31
Figura 2.18. Exoesqueleto de mano A1.....	33
Figura 2.19. Exoesqueleto de mano A2.....	33
Figura 2.20. Exoesqueleto de mano A3.....	33
Figura 2.21. Escala de juicio según el método AHP.....	36
Figura 3.1. Etapas de la experimentación.....	43
Figura 3.2. Ubicación de marcas anatómicas en la mano.....	45
Figura 3.3. Postura sugerida para la espalda.....	45
Figura 3.4. Postura sugerida hombro.....	46
Figura 3.5. Promo-supinación media del antebrazo y de la mano.....	46
Figura 3.6. Postura de dedos.....	47
Figura 3.7. Etapas para la aplicación del algoritmo.....	48
Figura 3.8. Gráfica comparativa de fuerza de agarre.....	48
Figura 3.9. Fuerza de agarre en función del movimiento de la mano.....	49
Figura 3.10. Fuerza de agarre en función de la posición angular.....	49
Figura 4.1. Etapas para el desarrollo del protocolo de pruebas.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas.	20
Tabla 2.2. Matriz morfológica.	32
Tabla 2.3. Evaluación del peso específico de cada criterio.....	34
Tabla 2.4. Evaluación del peso específico del criterio SEGURIDAD.....	34
Tabla 2.5. Evaluación del peso específico del criterio ADAPTACIÓN.....	35
Tabla 2.6. Evaluación del peso específico del criterio COMPLEJIDAD.....	35
Tabla 2.7. Evaluación del peso específico del criterio CONSTRUCCIÓN.....	35
Tabla 2.8. Evaluación del peso específico del criterio PESO.....	35
Tabla 2.9. Evaluación general de pesos específicos.	35
Tabla 2.10. Resultados por el método de residuos ponderados.	35
Tabla 2.11. Valoración de alternativas según cada criterio.	37
Tabla 2.12. Prioridad entre criterios.....	38
Tabla 2.13. Ponderación AHP según el espaciado de prioridad.	38
Tabla 2.14. Ponderación AHP según el espaciado de prioridad.	38
Tabla 2.15. Valor de juicio AHP respecto al número de votos.	39
Tabla 2.16. Desarrollo de la matriz de criterios.....	40
Tabla 2.17. Vector de valores propios.	40
Tabla 2.18. Cálculo de la razón de consistencia RC.....	41
Tabla 2.19. Evaluación del peso específico del criterio ADAPTACIÓN.....	41
Tabla 2.20. Evaluación del peso específico del criterio COMPLEJIDAD.....	41
Tabla 2.21. Evaluación del peso específico del criterio CONFIABILIDAD.....	41
Tabla 2.22. Evaluación del peso específico del criterio CONFORT.	42
Tabla 2.23. Evaluación del peso específico del criterio CONSTRUCCIÓN.....	42
Tabla 2.24. Evaluación del peso específico del criterio ESTÉTICA.	42
Tabla 2.25. Evaluación del peso específico del criterio SEGURIDAD.....	42
Tabla 2.26. Matriz Morfológica con vectores promedio.....	42
Tabla 2.27. Resultados obtenidos por el método AHP.....	43
Tabla 3.1. Materiales y equipos principales.	44
Tabla 4.1. Valores máximos de fuerza de agarre.	50
Tabla 4.2. Parámetros que influyen en el procedimiento.	53

RESUMEN

El componente de trabajo realizado busca implantar un estudio preliminar que permita la evaluación de la fuerza de agarre desarrollada por la mano junto con la incorporación de un prototipo de exoesqueleto previamente seleccionado. La intención es establecer a la fuerza de agarre como un parámetro fundamental que se debe tomar en cuenta para la validación funcional de prototipos de exoesqueletos destinados para áreas de la medicina, rehabilitación física, salud y seguridad ocupacional.

Para lograrlo, se definió un diseño de exoesqueleto para la mano haciendo uso de la función de la calidad, se propuso diseños conceptuales aplicando herramientas presentes en el diseño concurrente y se seleccionó la mejor alternativa para su prototipado mediante la incorporación de métodos multicriterio para la toma de decisiones.

Una vez materializado el exoesqueleto se procede junto al sujeto colaborador a la ejecución de pruebas experimentales para registrar la fuerza de agarre cilíndrico de potencia, además de, detectar fallos cometidos en el procedimiento. La realización de pruebas experimentales piloto confirmó fallos cometidos y parámetros no considerados en el procedimiento. Con esto, se adoptó medidas correctivas para la elaboración de un protocolo de pruebas, garantizando un procedimiento reproducible y confiable en el proceso de medición de fuerza del agarre cilíndrico de potencia.

PALABRAS CLAVE: Exoesqueleto para la mano, fuerza de agarre, agarre cilíndrico de potencia, valoración funcional, protocolo de pruebas.

ABSTRACT

The work component carried out seeks to implement a preliminary study that allows the evaluation of the grip strength developed by the hand together with the incorporation of a previously selected exoskeleton prototype. The intention is to establish grip strength as a fundamental parameter that must be taken into account for the functional validation of exoskeleton prototypes intended for areas of medicine, physical rehabilitation, health and occupational safety.

To achieve this, an exoskeleton design for the hand was defined using the quality function, conceptual designs were proposed by applying tools present in the concurrent design, and the best alternative was selected for prototyping by incorporating multicriteria methods for decision-making. of decisions.

Once the exoskeleton materialized, the collaborating subject proceeded to carry out experimental tests to record the power cylindrical grip force, in addition to detecting errors made in the procedure. Carrying out pilot experimental tests confirmed mistakes made and parameters not considered in the procedure. With this, corrective measures were adopted for the elaboration of a test protocol, guaranteeing a reproducible and reliable procedure in the force measurement process of the cylindrical power grip.

KEYWORDS: Hand exoskeleton, grip strength, power cylindrical grip, functional assessment, test protocol.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El componente busca implantar un estudio preliminar que permita la evaluación de la fuerza de agarre desarrollada por la mano junto con la incorporación de un prototipo de exoesqueleto, esto servirá para establecer a la fuerza desarrollada por el agarre cilíndrico de potencia como un parámetro fundamental que debe ser tomado en cuenta a la hora de validar la funcionalidad de un prototipo de exoesqueleto.

Esto se logra mediante el cumplimiento de 6 fases. La primera fase “Levantamiento de información”, se recopila información sobre exoesqueletos para la mano, diseños y aplicaciones, así como parámetros de funcionalidad de la mano.

La segunda fase “Desarrollo y selección de alternativas de diseño”, se define los requerimientos que debe tener un exoesqueleto para ser utilizado en actividades de rehabilitación física de la mano, haciendo uso de la función de calidad, metodología descrita en (Riba, 2002). Proponer alternativas de exoesqueletos para su posterior prototipado haciendo uso de herramientas presentes en el diseño concurrente. Además, se incluye la valoración de las alternativas mediante métodos de evaluación multicriterio para la toma de decisiones (Jahan , Edwards, & Bahraminasab, 2016).

La tercera fase “Experimentación”, aborda las pruebas experimentales efectuadas sobre el prototipo de exoesqueleto seleccionado. Se realiza pruebas enfocadas a la medición de la fuerza de agarre cilíndrico de potencia, desarrollada por el conjunto mano-exoesqueleto.

La cuarta fase “Aplicación de algoritmo”, conforma el uso del algoritmo desarrollado por el Instituto de Biomecánica de Valencia en conjunto con la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador para determinar parámetros cinemáticos del movimiento efectuado por un miembro del cuerpo humano.

La fase cinco “Análisis de resultados y discusión”, se enfoca en la interpretación de las gráficas de fuerza de agarre y de tasa de fuerza desarrollada (RFD). Involucra la identificación de fallos cometidos en la fase de experimentación para poder tomar las respectivas medidas correctivas.

Por último, la fase seis “Elaboración del protocolo de pruebas”, que se encarga de elaborar un procedimiento reproducible y confiable de la medición de fuerza de agarre del conjunto mano-exoesqueleto, que sirva para estudios más minuciosos de este parámetro de funcionalidad.

La estructura desarrollada para el cumplimiento del componente del presente trabajo se muestra en la **Figura 1.1**. La estructura muestra las 6 fases descritas anteriormente con los conceptos que los constituyen.

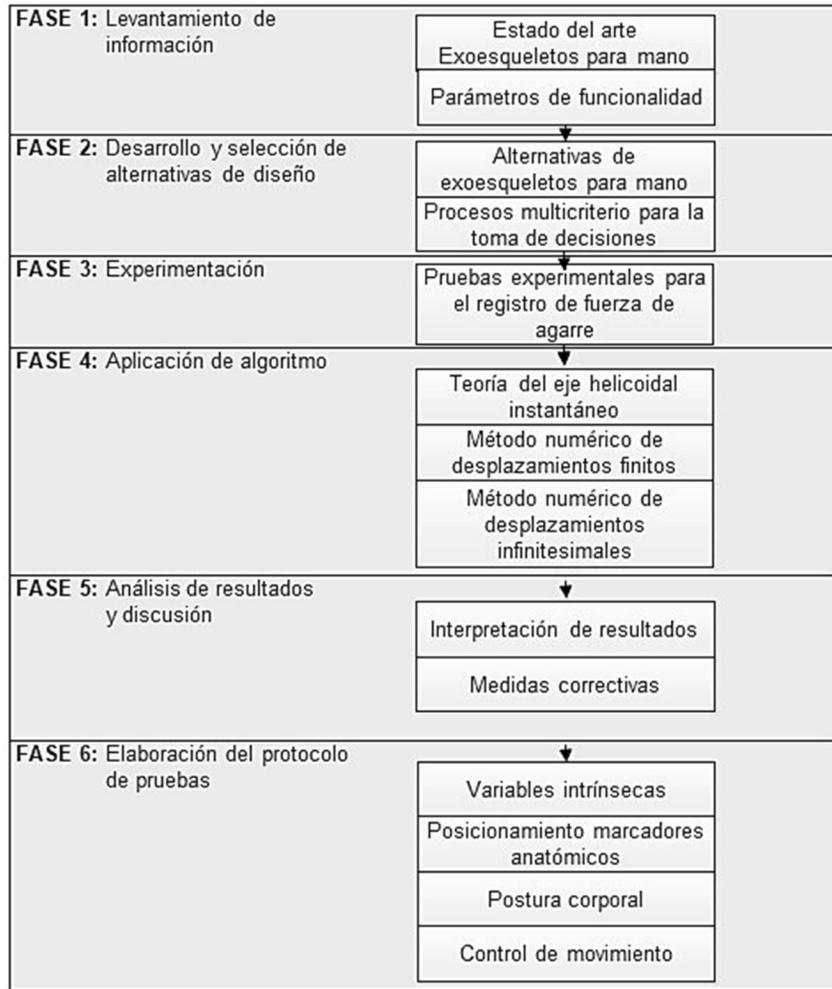


Figura 1.1. Estructura del trabajo.
(Fuente: Propia)

1.1 Objetivo general

Analizar parámetros de funcionalidad y diseño de un prototipo de exoesqueleto enfocado para actividades de rehabilitación física de la mano.

1.2 Objetivos específicos

- Levantar un estudio del estado del arte referente a exoesqueletos para la mano y sus aplicaciones.
- Definir requerimientos del exoesqueleto para la mano aplicando el despliegue de la función de calidad.
- Proponer y seleccionar alternativas de exoesqueletos para la mano.
- Realizar pruebas experimentales para medir la fuerza del agarre cilíndrico de potencia.
- Analizar los registros de la fuerza de agarre en función al movimiento efectuado por la mano.
- Establecer un protocolo de pruebas para el procedimiento de medición de la fuerza de agarre desarrollada por el conjunto mano-exoesqueleto.

1.3 Justificación

Actividades cotidianas del miembro superior suelen afectar entre otros, en la capacidad de fuerza de agarre de la mano e inclusive la misma movilidad de los dedos, esto estrictamente hablando de movimientos repetitivos (Byl, y otros, 1996; Kidd, McCoy, & Steenberg, 2000). Sin embargo, cuando suceden situaciones no tan comunes como una ACV (accidente cerebrovascular) o enfermedades neurodegenerativas, los pacientes quedan con afectaciones en sus funciones motoras.

La mano es uno de los miembros más importantes del cuerpo humano y su capacidad motora normal es decisiva para las actividades diarias de una persona. Por esta razón, el uso y desarrollo de nuevas tecnologías como exoesqueletos son ahora de interés clínico y ergonómico. A nivel clínico se busca brindar una pronta rehabilitación, optimizando los procesos de fisioterapia convencionales (Xing, y otros, 2008). A nivel ergonómico la prioridad es minimizar afecciones en la función motora y potencializar movimientos en tareas diversas (Muggleton, Allen, & Chappell, 1999).

Si bien es cierto, existe un alto grado de complejidad en replicar los movimientos de las articulaciones de miembros del cuerpo humano, pero en las últimas décadas el desarrollo de exoesqueletos enfocados a la salud ocupacional y optimización para la rehabilitación física han tomado mayor presencia, proporcionando bases de diseño y complejos mecanismos de transmisión de movimientos que necesitan seguir mejorando (Fras & Althoefer , 2018).

1.4 Alcance

La valoración de las diferentes funciones y actividades de la mano es de interés médico y ergonómico. La mano puede realizar complejos movimientos y varias formas de agarre. El agarre cilíndrico de potencia es el más utilizado en actividades cotidianas. Dado su importancia, la caracterización biomecánica de este agarre es de interés de estudio, pues, la funcionalidad de la mano se fundamenta en que dicho agarre pueda ser efectuado.

El presente trabajo analiza parámetros de funcionalidad y diseño de un exoesqueleto mediante la elaboración de un protocolo de pruebas y el uso de herramientas del diseño concurrente. El protocolo determina las directrices que se debe seguir en el procedimiento de medición de la fuerza, con el fin de minimizar errores generados por parámetros no controlados.

La medición de la fuerza de agarre es un parámetro que permite evaluar secuelas de lesiones, el grado de actividad muscular, además lograr determinar un nivel de esfuerzo requerido que está relacionado como un factor de riesgo (Vázquez, Díaz, Lázaro, & Guáman, 2021). Esto permitirá tomar decisiones sobre la valoración clínica y planificación de tratamientos para la rehabilitación.

1.5 Estado del arte

1.5.1 Órtesis para mano

Son dispositivos externos aplicados sobre cualquier región anatómica cuyo propósito es modificar los aspectos funcionales o estructurales del sistema musculo-esquelético (Zambudio, 2009). La **Figura 1.2**, muestra una clasificación general, sin embargo, Gourang & kumar, (2012) profundizan y menciona las siguientes categorías:

- Clasificación en base a la aplicación
- Clasificación según la función
- Clasificación según la configuración
- Clasificación sobre la base del método de producción
- Clasificación sobre el sitio de aplicación

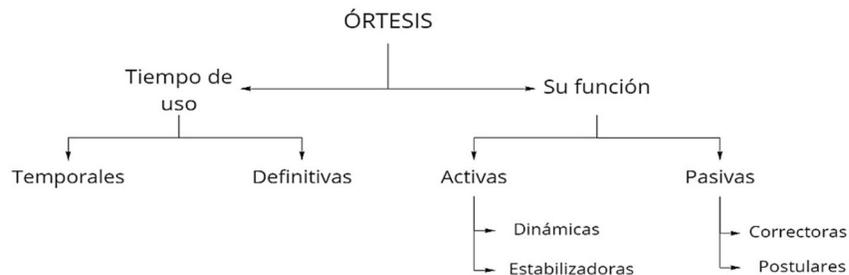


Figura 1.2. Clasificación general de órtesis.
(Fuente: Propia)

Se entiende como órtesis activa al dispositivo externo que reemplaza la función perdida del músculo. A su vez, se clasifican en dinámicas, cuando permiten el movimiento, y estabilizadoras cuando su propósito es controlar una posición. Por su parte, las órtesis pasivas evitan movimientos no deseados, corrigen deformaciones o desalineaciones y cumplen con la función de protección de miembros (Gourang & kumar , 2012).



Figura 1.3. a) Órtesis activa dinámica y b) Órtesis pasiva correctora.
(Fuente: (Uniprox, 2019))

1.5.2 Prótesis para mano

Es una extensión o sustitución artificial de una parte del cuerpo humano (Zambudio, 2009)

Dentro de su clasificación encontramos:

- Prótesis Mecánicas: Logran movimientos de apertura y cierre mediante señales mecánicas obtenidas por otro miembro del cuerpo. Tienen limitaciones en cuanto a sus movimientos (Ayats, 2017).



Figura 1.4. Prótesis mecánica para mano.

(Fuente: (Medprax, 2021))

- . - Prótesis Eléctricas: Logran movimientos de apertura y cierre mediante el uso de servomotores, pulsadores o interruptores (Ayats, 2017).



Figura 1.5. Prótesis eléctrica para mano.

(Fuente: (Medprax, 2021))

- Prótesis Mioeléctricas: Son prótesis eléctricas controladas por medio de comandos activados por señales obtenidas de los músculos del cuerpo (Ayats, 2017).



Figura 1.6. Prótesis mioeléctrica para mano.

(Fuente: (Medprax, 2021))

- Prótesis Estéticas: Su funcionalidad no es prioridad, carecen de movimiento.



Figura 1.7. Prótesis estética para mano.

(Fuente: (Medprax, 2021))

La **Figura 1.8**, muestra una clasificación general de las prótesis para mano.

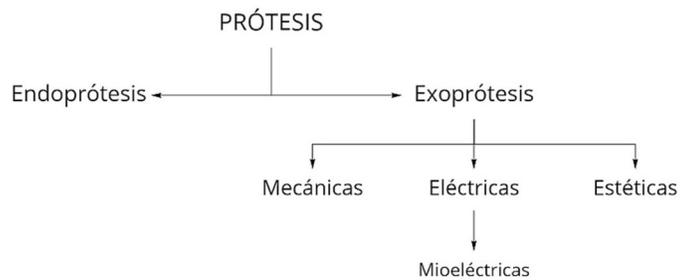


Figura 1.8. Clasificación general de prótesis.

(Fuente: Propia)

1.5.3 Exoesqueletos

Se considera exoesqueleto al dispositivo antropomórfico usado sobre cualquier parte del cuerpo. Entre sus funciones podemos mencionar que brindan apoyo al sistema musculoesquelético para aumentar las capacidades del cuerpo humano, asisten movimientos a miembros anatómicos afectados en su función motora y sirven para proteger alguna parte del cuerpo (Caicedo, 2017). La **Figura 1.9**, muestra la clasificación de exoesqueletos por su fuente de energía.

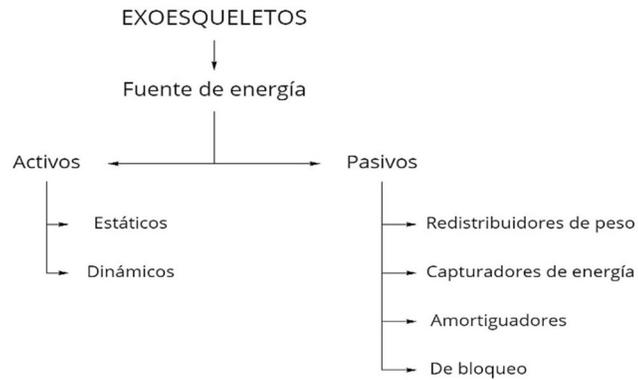


Figura 1.9. Clasificación de exoesqueletos por su fuente de energía.
(Fuente: Propia)

Dentro de su clasificación con respecto a la fuente de energía, los exoesqueletos activos utilizan una fuente de alimentación externa que proporciona energía a los actuadores encargados del movimiento. En los exoesqueletos-activos-estáticos sus actuadores deben permanecer encendidos para que el dispositivo mantenga su forma, mientras que los exoesqueletos-activos-dinámicos sus actuadores no requieren permanecer siempre encendidos para conservar su forma (Caicedo, 2017).



Figura 1.10. Exoesqueleto activo dinámico para rehabilitación de mano.
(Fuente: (3DNatives, 2021))

Los exoesqueletos pasivos no poseen ninguna fuente de alimentación, sin embargo, utilizan las fuerzas de restauración de resortes, amortiguadores, embragues u otros materiales para ayudar al movimiento. Además, permiten captar energía producida exclusivamente por el movimiento del usuario para ser utilizada en la generación de movimientos. También, algunos diseños permiten la redistribución de cargas para proteger regiones específicas del cuerpo (Caicedo, 2017).



Figura 1.11. Exoesqueleto pasivo de bloque utilizado para trabajos sobre cabeza.
(Fuente: (Hilti, 2021))

1.5.4 Exoesqueletos antropomórficos para la mano

Shields, Main, Peterson, & Strauss, (1997) desarrollaron un exoesqueleto antropomórfico de mano, enfocado en ayudar a los astronautas a facilitar la movilidad del miembro en actividades diversas. Se busco contrarrestar la rigidez del guante convencional debido a que en la zona metacarpofalángica el guante se hincha en sus alrededores lo que dificulta la movilidad de la mano.

A pesar de que su estudio no se enfocó con fines fisioterapéuticos es interesante el mecanismo de eslabones utilizados de cuatro barras que rotan en sus centros instantáneos. El mecanismo se acciona mediante cables tensores conectados a un tornillo sin fin que aplica un momento que permite la flexión de los dedos a 90°.

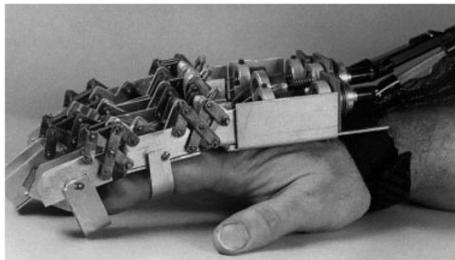


Figura 1.12. Vista lateral de exoesqueleto de mano.
(Fuente: (Shields, Main, Peterson, & Strauss, 1997))

Para el año 2005, el desarrollo de exoesqueletos con fines terapéuticos comienza a tener mayor desarrollo. Para ese año, Wege, Kondak, & Hommel, (2005) desarrollan un exoesqueleto con 4 grado de libertad para cada dedo, pudiendo realizar ejercicios de extensión y flexión. Los dedos se mueven mediante eslabones en forma de palancas que están conectadas a la mano mediante accesorios ortopédicos. Las longitudes de los eslabones fueron diseñadas para permitir un rango de movimiento casi completo, cada

palanca termina en una polea donde se fijan dos extremos de un cable Bowden. Los cables Bowden están conectados a motores de accionamiento con engranajes de transmisión.



Figura 1.13. Vista lateral de exoesqueleto de dedo.
(Fuente: (Wege, Kondak, & Hommel, 2005))

Zhang, Hua, Fu, Chen , & Wang, (2013) proponen un exoesqueleto portátil para rehabilitación de la mano, cada dedo tiene tres articulaciones que emplean un mecanismo llamado por los autores “articulación tortuosa o circuitous joint”. Para la generación de movimiento se adaptó un piñón simétrico y cremallera con un mecanismo de deslizamiento paralelo, con esto la articulación tortuosa puede cubrir una mayor área de trabajo del dedo y adaptarse a dedos de diferentes tamaños.

El mecanismo de deslizamiento paralelo asegura que la fuerza de contacto entre el exoesqueleto y el dedo sea perpendicular al hueso del dedo, lo que minimiza las lesiones secundarias por su uso. Además, el método de conducción por cable Bowden reduce la carga en los dedos al colocar el sistema de conducción y control en el antebrazo.



Figura 1.14. Vista lateral de exoesqueleto con sistema circuitous joint.
(Fuente: (Zhang, Hua, Fu, Chen , & Wang , 2013))

Li, Cheng, & Sun, (2021) presentan un artículo enfocado en el diseño, análisis de la manipulación y optimización de un exoesqueleto para la rehabilitación del dedo índice, denominado “WIFRE”. El estudio propone incorporar un mecanismo que permita a la

articulación DIP (Distal Interphalangeal) y la articulación MCP (Metacarpophalangeal) del dedo actuar de manera independiente, además de permitir la aducción y abducción del dedo movimientos que por lo general la mayoría de exoesqueletos no lo permiten. Para accionar las juntas que generan el movimiento, el diseño contempla un sistema de transmisión por cables Bowen conectados a 3 servomotores.

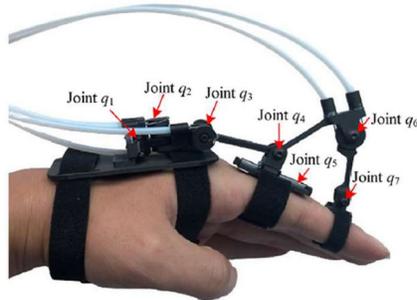


Figura 1.15. Vista lateral de exoesqueleto WIFRE.
(Fuente: (Li, Cheng, & Sun, 2021))

MCPDriver es un exoesqueleto pasivo cuyo objetivo principal es suplir las funciones motoras suprimidas por la amputación a nivel de la articulación interfalángica proximal del dedo. El dispositivo reemplaza las falanges media y distal del dedo, permitiendo recuperar de cierta manera la destreza en los diferentes tipos de agarre que puede desarrollar la mano. MCPDrive es un dispositivo personalizado, exclusivamente diseñado para cada paciente. Su diseño se fundamenta en el uso de eslabones articulados con el fin de lograr la flexión, extensión, aducción y abducción del dedo afectado (Naked Prosthetics, 2022).

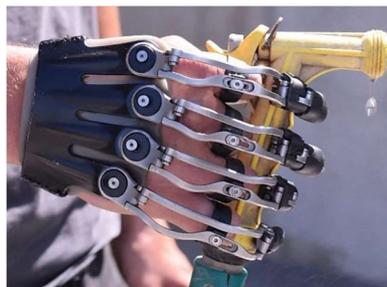


Figura 1.16. MCPDrive exoesqueleto antropomórfico pasivo.
(Fuente: (Naked Prosthetics, 2022))

1.6 Parámetros de funcionalidad de la mano

1.6.1 Cinemática de la mano

La estructura de la mano se define como una cadena cinemática que contempla 28 grados de libertad. Se entiende como cadena cinemática a la unión de varios eslabones articulados que al recibir un estímulo de entrada (movimiento suministrado) generan en los demás eslabones un movimiento controlado de salida (Norton, 2009).

Dependiendo del criterio de diseño se puede reducir los grados de libertad de la cadena cinemática que puede constituir un exoesqueleto para la mano, sin embargo, para esto es importante identificar los rangos de movimiento de los miembros que conforman.

1.6.2 Músculos de la mano

Se categoriza de manera general los músculos que influyen en el movimiento de la mano. Los músculos intrínsecos son músculos pequeños que se localizan en la zona de la mano, además son los encargados de movimientos delicados y de alta precisión por parte de los dedos. Los músculos extrínsecos son músculos grandes relacionados con la fuerza que puede desarrollar la mano, estos músculos están localizados en el brazo y antebrazo.

1.6.3 Rangos de movilidad de la muñeca

La movilidad de la muñeca está restringida por la unión entre los huesos del brazo (radio y cubito) y los huesos que forman la mano. El arco formado por la flexión de la muñeca con respecto a la posición cero es de 80° , mientras que el arco formado por la extensión con respecto a la posición cero es de 70° (Taboadela, 2007).

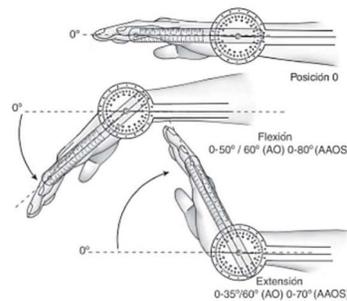


Figura 1.17. Rangos de movilidad de Flexión y extensión de la muñeca.

(Fuente: (Taboadela, 2007))

La desviación es un movimiento mucho más restringido y puede ser cubita o radial. La desviación cubita forma un arco de 30° con respecto a la posición cero, mientras que la desviación radial forma un arco de 20° con respecto a la posición cero (Taboadela, 2007).

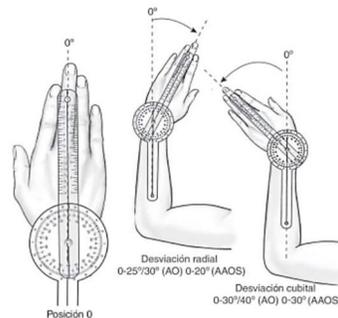


Figura 1.18. Rangos de movilidad de desviación cubita y radial de la muñeca.
(Fuente: (Taboadela, 2007))

1.6.4 Rango de movilidad de los dedos

Los dedos de la mano están en la capacidad de realizar movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción. Sin embargo, para describir los rangos de movilidad de acuerdo al tipo de movimientos mencionados se debe considerar las articulaciones presentes en los dedos como puntos de pivot.

En la **Figura 1.19**, se muestra las tres articulaciones consideradas como puntos pivot para describir el rango de movilidad de los dedos. Estas son: Articulación Metacarpofalangeal (MCP), Articulación Interfalange Proximal (IFP) y Articulación Interfalange Distal (IFD).



Figura 1.19. Articulaciones del dedo.
(Fuente: (http://robots-argentina.com.ar/Actuadores_manos.htm))

1.6.4.1 Flexión/Extensión con respecto a MCP

El arco por la flexión forma un ángulo de 90° con respecto a la posición cero, mientras que el arco formado por la extensión puede variar entre 30° hasta 45° respecto de la posición cero (Morado, 2013).

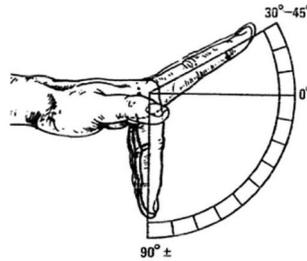


Figura 1.20. Rango de movilidad flexión/extensión con respecto a MCP.

(Fuente: (Morado, 2013))

1.6.4.2 Flexión/Extensión con respecto a IFP

La articulación no permite la extensión de los dedos. El movimiento de flexión es el único y su arco forma un ángulo de hasta 100° con respecto a la posición cero (Morado, 2013).

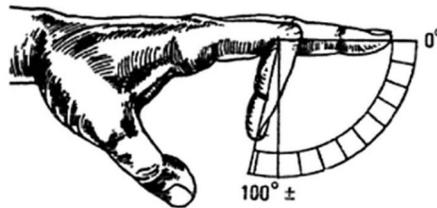


Figura 1.21. Rango de movilidad flexión/extensión con respecto a IFP.

(Fuente: (Morado, 2013))

1.6.4.3 Flexión/Extensión con respecto a IFD

El arco por flexión puede alcanzar un ángulo entre los 90° y 100° con respecto a la posición cero, mientras que el arco formado por extensión puede variar entre 0° hasta 10° respecto a la posición cero (Morado, 2013).

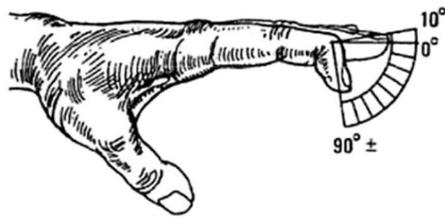


Figura 1.22. Rango de movilidad flexión/extensión con respecto a IFE.

(Fuente: (Morado, 2013))

1.6.4.4 Abducción y Aducción

La abducción es el movimiento de separación que realizan los dedos respecto a un eje central de referencia, estos pueden formar un ángulo de separación de hasta 20°. Por lo contrario, la aducción es el movimiento de acercamiento de los dedos respecto a un eje central de referencia (Morado, 2013).

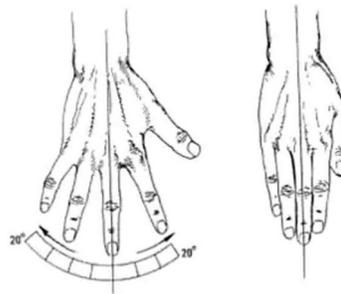


Figura 1.23. Abducción y Aducción de los dedos.

(Fuente: (Morado, 2013))

1.6.5 Movimientos coordinados básicos de la mano

La composición estructural de la mano permite la ejecución de diferentes tipos de agarre. Taylor & Schwarz, (1955) hace mención en su trabajo el desarrollo de la clasificación de los movimientos de agarre de la mano propuesta por Schlesinger.

Schlesinger clasificó en seis categorías el agarre de la mano humana, dentro de las mismas caen sus diferentes variantes: agarre cilíndrico (Cylindrical Grasp), de punta (Tip), de gancho (Hook o Snap), de palma (Palmar), esférico (Spherical Grasp) y de lado (Lateral).

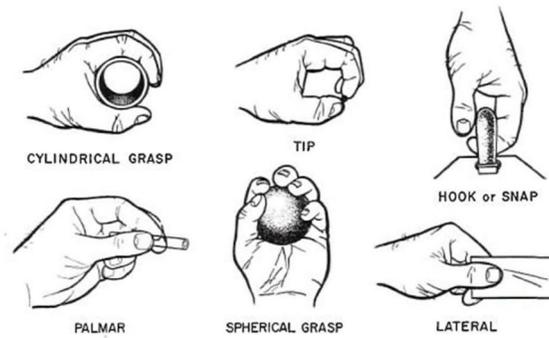


Figura 1.24. Seis tipos de agarre básicos, según Schlesinger.
(Fuente: (Taylor & Schwarz, 1955))

El agarre cilíndrico, esférico y de gancho son considerados agarres de potencia. Mientras, que el agarre de punta, de palma y de lado son considerados agarres de precisión. Tanto los agarres de potencia como los de precisión utilizan los músculos extrínsecos e intrínsecos de la mano.

De entre todos los agarres mencionados, el agarre cilíndrico de potencia es el más empleado en actividades cotidianas, se describe como un agarre con contacto superficial elevado y con el que se consigue valores de fuerza considerables.

La medición de la fuerza de agarre de la mano es importante para evaluar la reducción del valor de fuerza durante el proceso de envejecimiento, el desarrollo de secuelas provocadas por lesiones que acarrearán afectaciones en la función motora y ayuda en la planificación de tratamientos de rehabilitación. El dinamómetro, es el instrumento adecuado y confiable para la medición de la fuerza de agarre de la mano.

Para la realización de pruebas de agarre es necesario considerar ciertas variables que afectan de manera directa la fiabilidad de la evaluación, estas son entre otras: el género, la edad, peso, mano dominante y la postura corporal (Vázquez, Díaz, Lázaro, & Guáman, 2021).

2 METODOLOGÍA

Se enfoca en el desarrollo y selección de alternativas de exoesqueletos para la mano y su posterior prototipado. La **Figura 2.1**, muestra el conjunto de procedimientos y herramientas utilizadas para el cumplimiento de objetivos.

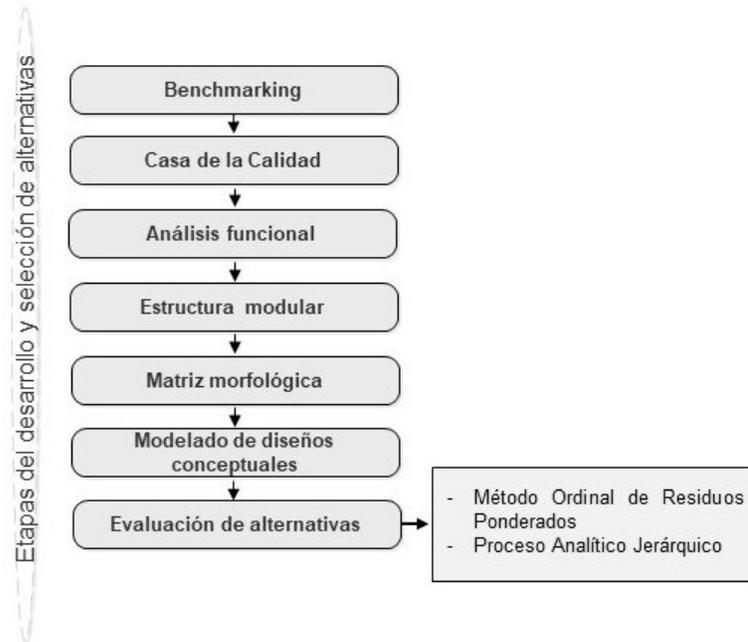


Figura 2.1. Etapas para el desarrollo y selección de alternativas.

(Fuente: Propia)

2.1 Determinación de especificaciones técnicas

2.1.1 Consideraciones

La determinación de las especificaciones técnicas se realizará mediante la investigación de modelos de exoesqueletos para la mano. Además, se integrará criterios y sugerencias de personas con experiencia en rehabilitación física, seguridad y salud ocupacional.

Cabe aclarar que para el desarrollo de la casa de la calidad ya se cuenta con un diseño previo de exoesqueleto. Sin embargo, sus diseñadores 3D Print it, (2015) no han especificado su aplicación. Es por esto que dentro de la calificación de “diseño propio” en la metodología de la casa de la calidad propuesta por Riba, (2002) el diseño se sujetará a los criterios de la voz del usuario.

2.1.2 Casa de la calidad

Dentro del desarrollo de la función de calidad QFD (Quality Function Deployment), La casa de la calidad es una técnica de planificación de productos que involucra la voz del usuario, (profesionales de la rehabilitación física, seguridad y salud ocupacional) con la voz del ingeniero que se encarga de traducir las necesidades, sugerencias y deseos receptados en especificaciones técnicas (Riba, 2002).

Voz del usuario

De acuerdo al criterio del usuario el exoesqueleto para la mano debe procurar tener los siguientes requerimientos.

- Que permita la movilidad de cada articulación de la mano.
- Que sea ligero y portátil.
- Que se adapte anatómicamente
- Que su uso sea cómodo.
- Que su mantenimiento sea fácil.
- Que permita el contacto sensorial de la palma de la mano.

Voz del ingeniero

Conociendo los requerimiento, sugerencias y deseos del usuario se procede a traducirlos en especificaciones técnicas, y son:

- Grados de libertad
- Peso
- Tipo de conexión
- Ergonomía
- Complejidad
- Porcentaje de palma libre

Resultados

El desarrollo de la casa de la calidad con la metodología propuesta por Riba, (2002) se muestra en el **ANEXO II**. Además, se complementa en el **ANEXO III** el benchmarking realizado para la valoración de competencias.

2.1.3 Conclusiones de la casa de la calidad

El desarrollo de la casa de la calidad arrojó valiosa información. A continuación, se describen las especificaciones técnicas que deberá cumplir el diseño conceptual de exoesqueleto para la mano.

- Ergonomía

En este trabajo estará orientada en el control de la fuerza de agarre y en la maniobrabilidad del exoesqueleto en uso. Se requiere un diseño antropomórfico de exoesqueleto.

- Complejidad

Se enfoca en el grado de dificultad que tienen los elementos individuales para su prototipado, y en la capacidad que tienen los mismos para facilitar el montaje y desmontaje. Debe ser de baja complejidad.

- Peso

Recae en la selección del material. El material requerido para el prototipado es PLA.

- Tipo de conexión

Con el uso de conexiones articuladas se pretende mejorar la capacidad de adaptación anatómica del exoesqueleto.

- Grados de libertad

Permite la movilidad en las uniones.

- Porcentaje de palma libre

Mayor al 50%. Permite estímulos sensoriales en la palma para su rehabilitación.

La **Tabla 2.1**, muestra los requerimientos técnicos obtenidos en el desarrollo de la casa de la calidad.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas.

Empresa Cliente: N/A		Producto: Exoesqueleto pasivo de mano		Fecha inicial: Última revisión:
Diseñadores: Josué Garzón				Página 1
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función		C	R	Exoesqueleto pasivo para apoyar la función motora de la mano. Incorporación en pruebas de fuerza de agarre.
Dimensiones		D	R	Peso máximo 350 gramos.
Movimientos		D	R	Tipo de conexión articulada.
Seguridad y Ergonomía		C	R	Control de fuerza de agarre y maniobrabilidad.
Mantenimiento		D	R	Baja complejidad para el fácil montaje y desmontaje.
Propone: M=Marketing, D=Diseño, P=Producción, F=Fabricación, C=Cliente. R/D: R=Requerimiento, D=Deseo, MR=Modificación de Requerimiento.				

Fuente: Propia

2.2 Análisis funcional

El análisis funcional permite encontrar soluciones a un problema, esta herramienta de diseño define las funciones primarias y secundarias de un producto logrando minimizar costos en su desarrollo. Las funciones primarias representan el propósito de un producto, mientras que, las secundarias permiten la ejecución de las funciones primarias.

Para el caso del exoesqueleto para la mano el propósito o función principal es apoyar la función motora de la mano. Las funciones secundarias deben analizarse y ordenarse mediante la creación de módulos.

La representación del análisis funcional se realiza mediante diagramas de flujos organizado en dos niveles. Se desarrolló el nivel 0 denominado “Función primaria o global” y el nivel 1 denominado “Módulos y funciones secundarias”.

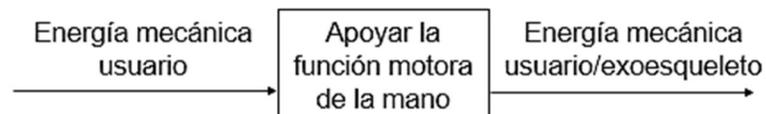


Figura 2.2. Función global nivel 0.

(Fuente: Propia)

2.2.1 Estructura modular

Se denomina estructura modular a la organización de bloques constructivos llamados “módulos”, que se encargan de la composición de un producto a través del desglose de subfunciones.

La **Figura 2.3**, muestra la estructura modular que se analizará para la solución de los módulos. Se puede observar el desarrollo de cuatro módulos funcionales con sus respectivas subfunciones e interfases. Se entiende como interfases a cualquier superficie real o imaginaria entre dos módulos, a través de las cuales se pueden establecer relaciones de: unión, flujo energético, flujo de masa o flujo de señal (Riba, 2002).

En el análisis de la estructura modular se descarta la presencia de ciertas interfases las cuales es pertinente mencionar:

- Interfase de señal

El objetivo en este trabajo no es el control automatizado del exoesqueleto.

- Interfase de transferencia de material

No existe un flujo de material o materia prima, ni una transformación de la misma.

También, se muestra la presencia de las siguientes interfases, y son:

- Interfase mecánica

Se establece necesariamente una unión mecánica entre módulos. Esta unión puede ser móvil si permite el movimiento relativo entre las partes, o fija si no permite el movimiento relativo entre las partes.

- Interfase de energía

La función global nos muestra que, es necesario la aplicación de energía mecánica proveniente del usuario al exoesqueleto para generar energía mecánica combinada, denominada “usuario/exoesqueleto”.

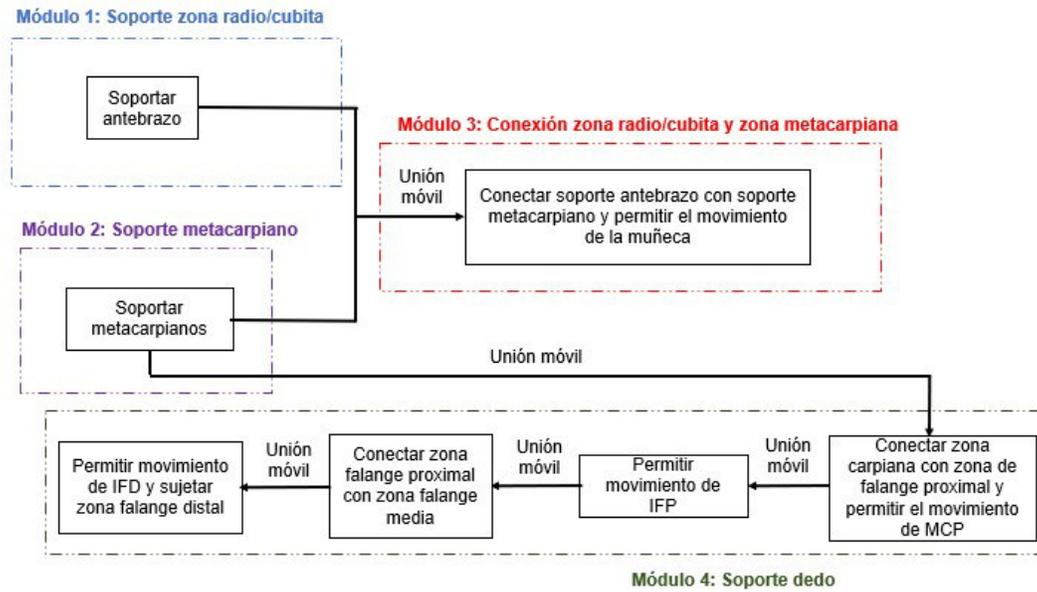


Figura 2.3. Desarrollo del nivel 1.
(Fuente: Propia)

2.3 Soluciones de módulos

El siguiente paso consiste en proponer posibles soluciones para cada subfunción presente en los respectivos módulos funcionales.

2.3.1 Modulo 1: Soporte zona radio/cubita.

Función:

- Soportar antebrazo

Alternativa (B1)

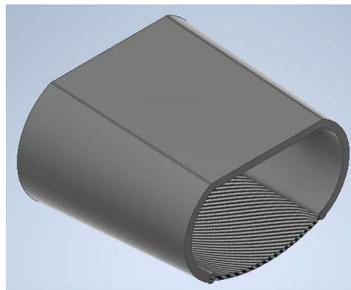


Figura 2.4. Soporte antebrazo tipo 1.
(Fuente: Propia)

Ventajas:

- Mayor cobertura y protección para el antebrazo.
- Estable en la sujeción gracias a la incorporación de cinta elástica.
- Baja complejidad.

Desventaja:

- Peso

Alternativa (B2)

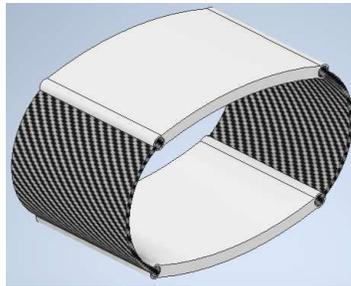


Figura 2.5. Soporte antebrazo tipo 2.

(Fuente: Propia)

Ventajas:

- Estable en la sujeción gracias a la incorporación de dos cintas elásticas.
- Peso.
- Mayor adaptabilidad anatómica.

Desventajas:

- Más piezas para su construcción.
- Baja protección en zonas laterales del antebrazo.
- Complicaciones con la conexión que permite el movimiento de la muñeca,

Alternativa (B3)

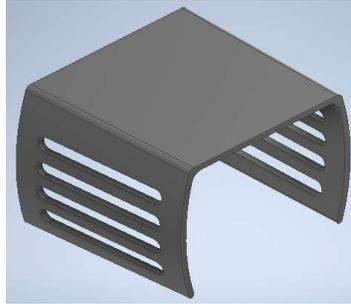


Figura 2.6. Soporte antebrazo tipo 3.
(Fuente: Propia)

Ventajas:

- Mínimo número de piezas.
- Peso
- Buena cobertura y protección.

Desventajas:

- Complejidad en su forma
- Adaptabilidad anatómica limitada

2.3.2 Modulo 2: Soporte metacarpiano.

Función:

- Soportar metacarpianos

Alternativa (C1)

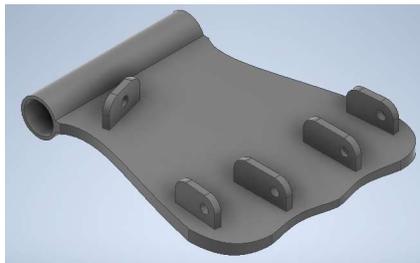


Figura 2.7. Mano trasera.
(Fuente: Propia)

Ventajas:

- Cobertura y protección completa.

Desventajas:

- Limitaciones en conexiones
- Complejidad en su forma
- Peso

Alternativa (C2)

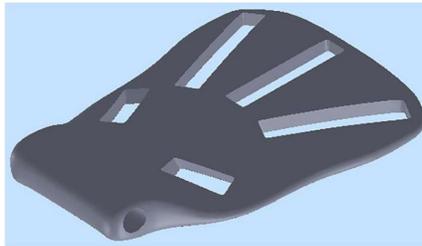


Figura 2.8. Back Hand.

(Fuente: (3D Print it, 2015))

Ventajas:

- Peso
- Buena cobertura y protección

Desventajas

- Limitaciones en conexiones
- Complejidad en su forma

2.3.3 Modulo 3: Conexión zona radio/cubita y zona metacarpiana.

Función:

- Conectar soporte antebrazo con soporte metacarpiano y permitir el movimiento de la muñeca

Alternativa (D1)

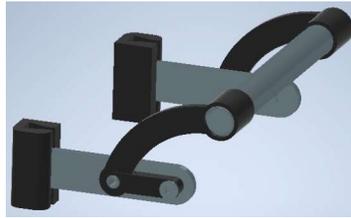


Figura 2.9. Mecanismo articulado tres eslabones.
(Fuente: Propia)

Ventajas:

- Baja complejidad
- Facilidad de adaptación

Desventaja:

- Dimensionamiento de eslabones

Alternativa (D2)

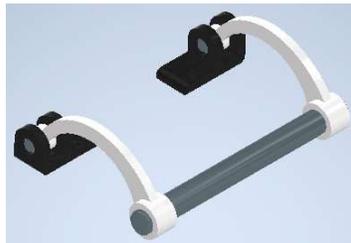


Figura 2.10. Mecanismo articulado 1 eslabón.
(Fuente: Propia)

Ventajas:

- Baja complejidad

Desventaja

- No considera movimientos relativos
- Limitación en su acoplamiento con el soporte del antebrazo.

2.3.4 Modulo 4: Soporte para dedos.

Función:

- Conectar zona carpiana con zona de falange proximal y permitir el movimiento de MCP

Alternativa (E1)

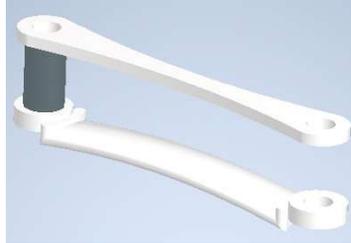


Figura 2.11. Conector tipo 1.
(Fuente: Propia)

Ventajas:

- Baja complejidad en su forma
- Poco número de piezas que lo conforman
- Su conexión puede ser articulada o por inserción.

Desventajas

- No se adapta a diferentes tamaños de manos sin tener que remplazarlo.

Alternativa (E2)



Figura 2.12. Conector tipo 2.
(Fuente: Propia)

Ventajas:

- Mecanismo de baja complejidad
- Poco número de piezas que lo conforman

Desventajas:

- Dimensionamiento en eslabones para que pueda permitir la flexión de los dedos.

Función:

- Permitir movimiento de IFP

Alternativa (F1)



Figura 2.13. Cube Universal Joint.

(Fuente: (3D Print it, 2015))

Ventajas:

- Baja complejidad en su forma
- Permite conexiones articuladas

Desventajas:

- Peso

Alternativa (F2)



Figura 2.14. Articulación dos eslabones.
(Fuente: Propia)

Ventajas:

- Permite la regulación en su conexión para poder adaptarse a diferentes tamaños de manos.
- Baja complejidad en su forma

Desventajas:

- Peso
- Número de piezas

Función:

- Conectar zona falange proximal con zona falange media

Alternativa (G1)

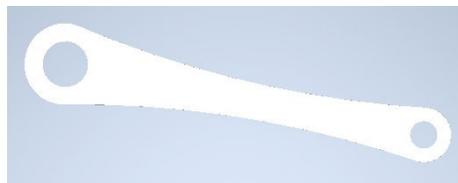


Figura 2.15. Ring Link Index Finger.
(Fuente: (3D Print it, 2015))

Ventajas:

- Baja complejidad.

Desventajas:

- Permite adaptarse a diferentes tamaños de manos al ser remplazado.

Alternativa (G2)

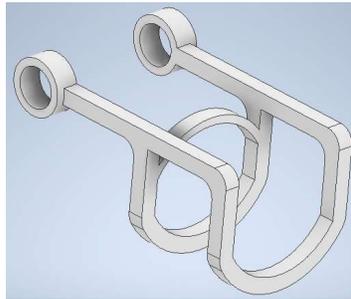


Figura 2.16. Soporte falange media y distal.
(Fuente: Propia)

Ventajas:

- Mínimo número de piezas

Desventajas:

- Alta complejidad en su forma
- Permite la adaptarse a diferentes tamaños de manos al ser remplazado.

Función:

- Permitir movimiento de IFD y sujetar zona falange distal

Alternativa (H1)



Figura 2.17. Ring Link Index Finger.
(Fuente: (3D Print it, 2015))

Ventajas:

- Mínimo número de piezas
- Permite regular su conexión para adaptarse a diferentes tamaños de dedos.

Desventajas:

- Complejidad en su forma

2.4 Alternativas de solución

2.4.1 Matriz morfológica

Es un método que permite combinar conceptos individuales para formar conceptos de carácter general. La **Tabla 2.2**, muestra las rutas que se tomó para formar alternativas potenciales de solución, se aclara que no es necesario realizar todas las combinaciones posibles, sino, aquellas donde se encuentre compatibilidad en su conformación.

Tabla 2.2. Matriz morfológica.

Modulo	Función	Alternativas
1	Soportar antebrazo	B1 B2 B3
2	Soportar metacarpianos	C1 C2
3	Conectar soporte antebrazo con soporte metacarpiano y permitir el movimiento de la muñeca	D1 D2
4	Conectar zona carpiana con zona de falange proximal y permitir el movimiento de MCP	E1 E2
	Permitir movimiento de IFP	F1 F2
	Conectar zona falange proximal con zona falange media	G1 G2
	Permitir movimiento de IFD y sujetar zona falange distal	H1

Alternativa 1
Alternativa 2
Alternativa 3

Fuente: Propia.

2.4.1.1 Alternativa (A1)

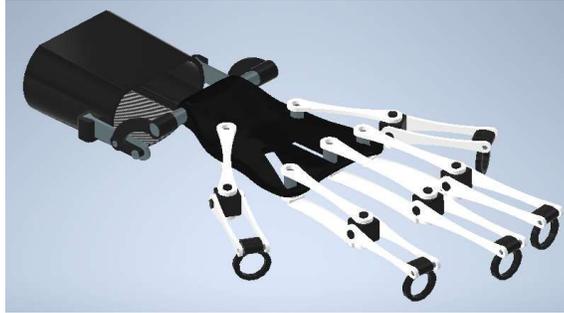


Figura 2.18. Exoesqueleto de mano A1.
(Fuente: Propia)

2.4.1.2 Alternativa (A2)



Figura 2.19. Exoesqueleto de mano A2.
(Fuente: Propia)

2.4.1.3 Alternativa (A3)



Figura 2.20. Exoesqueleto de mano A3.
(Fuente: Propia)

2.5 Estudio y selección de alternativas

Para la selección de la mejor alternativa, se utilizó dos métodos de evaluación multicriterio. El primero, el método Ordinal Corregido de Criterios Ponderados y el segundo, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

2.5.1 Método ordinal corregido de criterios ponderados

A continuación, se enlista los criterios que se tomaron a cabo para la valoración de las alternativas.

- Seguridad: Se enfoca en la capacidad que tiene el exoesqueleto de soportar y proteger la mano.
- Adaptación: Se enfoca en la capacidad de adaptarse a diferentes tamaños de manos.
- Complejidad: Está enfocado en la dificultad que presentan las piezas individuales para su prototipado.
- Construcción: Se enfoca en la facilidad con la que cuentan los elementos individuales para su montaje y desmontaje.
- Peso: Debe ser lo más ligero posible, sin descuidar la seguridad que pueda brindar.

Tabla 2.3. Evaluación del peso específico de cada criterio.

Seguridad > Adaptación = Complejidad > Construcción > Peso							
CRITERIO	Seguridad	Adaptación	Complejidad	Construcción	Peso	$\Sigma+1$	Ponderación
Seguridad		1	1	1	1	5	0.333
Adaptación	0		0.5	1	1	3.5	0.233
Complejidad	0	0.5		1	1	3.5	0.233
Construcción	0	0	0		1	2	0.133
Peso	0	0	0	0		1	0.067
Suma						15	1

Tabla 2.4. Evaluación del peso específico del criterio SEGURIDAD.

A1 > A2 > A3					
SEGURIDAD	A1	A2	A3	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		1	1	3	0.500
A2	0		1	2	0.333
A3	0	0		1	0.167
Suma				6	1

Tabla 2.5. Evaluación del peso específico del criterio ADAPTACIÓN.

A1 > A2 = A3					
ADAPTACIÓN	A1	A2	A3	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		1	1	3	0.500
A2	0		0.5	1.5	0.250
A3	0	0.5		1.5	0.250
			Suma	6	1

Tabla 2.6. Evaluación del peso específico del criterio COMPLEJIDAD.

A3 > A2 > A1					
COMPLEJIDAD	A1	A2	A3	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		0	0	1	0.167
A2	1		0	2	0.333
A3	1	1		3	0.500
			Suma	6	1

Tabla 2.7. Evaluación del peso específico del criterio CONSTRUCCIÓN.

A1 > A3 > A2					
CONSTRUCCIÓN	A1	A2	A3	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		1	1	3	0.500
A2	0		0	1	0.167
A3	0	1		2	0.333
			Suma	6	1

Tabla 2.8. Evaluación del peso específico del criterio PESO.

A3 > A2 > A1					
PESO	A1	A2	A3	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		0	0	1	0.167
A2	1		0	2	0.333
A3	1	1		3	0.500
			Suma	6	1

Tabla 2.9. Evaluación general de pesos específicos.

	Seguridad	Adaptación	Complejidad	Construcción	Peso	Σ
A1	0.167	0.117	0.039	0.067	0.011	0.400
A2	0.111	0.058	0.078	0.022	0.022	0.292
A3	0.056	0.058	0.117	0.044	0.033	0.308

Tabla 2.10. Resultados por el método de residuos ponderados.

Alternativas	Prioridad
A1	1
A2	3
A3	2

Según la aplicación del método de criterios ponderados se concluye que la alternativa A1 es la primera opción, seguido de la alternativa A3 y por último la alternativa A2.

2.5.2 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Este método sirve para la toma de decisiones mediante la jerarquización de criterios y alternativas, sin embargo, a diferencia de otros métodos este se utiliza cuando se requiere satisfacer criterios subjetivos o intangibles para los que no existen escalas de medición estandarizadas (Nantes, 2019).

La **Figura 2.21**, muestra la escala de juicio desarrollada por Saaty en el proceso analítico jerárquico, la misma que servirá para definir valores que pueden tomar los diferentes criterios y alternativas.

Escala numérica	Escala verbal	Descripción
1	Igual importancia.	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro.	Un elemento domina fuertemente.
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	
Incrementos 0,1	Valores intermedios entre incrementos (utilice esta escala si cree que su valoración necesita un alto grado de precisión).	
Inversos $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar.	

Figura 2.21. Escala de juicio según el método AHP.
(Fuente: (Nantes, 2019))

A continuación, se enlista los criterios que se consideraron para el desarrollo de esta metodología.

- Seguridad: Se enfoca en la capacidad que tienen las alternativas de brindar protección y soporte a la mano.
- Adaptación: Se enfoca en la capacidad que tienen las alternativas para adaptarse anatómicamente a manos de diferentes tamaños.
- Complejidad: Se enfoca en la dificultad que presentan las piezas individuales para su prototipado.
- Construcción: Se enfoca en la capacidad que tienen las alternativas para realizar el montaje y desmontaje de sus piezas individuales.
- Estética: Se enfoca en el atractivo visual.

- **Confiabilidad:** Se enfoca en la capacidad que tienen las alternativas para desempeñar su función de manera correcta. En este caso, apoyar la movilidad de la mano para realizar pruebas de agarre.
- **Confort:** Se enfoca en la capacidad que tienen las alternativas para brindar comodidad en su uso.

Definido los criterios, se realizó el siguiente procedimiento:

- Elaborar un formulario con información que permita comparar y jerarquizar alternativas de solución y criterios. En el **ANEXO IV**, se encuentra el formato del formulario.
- Enviar el formulario a personas con conocimiento en ingeniería mecánica, seguridad y salud ocupacional.
- Receptar los formularios para el análisis y comprensión de datos.
- Buscar la forma de interpretar los resultados obtenidos con la escala de juicio de la metodología AHP.

Resultados e Interpretación

La muestra fue de 31 participantes. En la **Tabla 2.11**, se resume los resultados obtenidos de la valoración de prioridad de las alternativas con respecto a cada criterio y en la **Tabla 2.12**, se muestra la prioridad entre criterios.

Tabla 2.11. Valoración de alternativas según cada criterio.

Valoración de	Lugar de prioridad		
	1	2	3
Seguridad	A1	A2	A3
Adaptación	A1	A2	A3
Complejidad	A2	A3	A1
Construcción	A1	A2	A3
Estética	A1	A2 y A3	
Confiabilidad	A1 y A2		A3
Confort	A1	A2	A3

Tabla 2.12. Prioridad entre criterios.

CRITERIO	PRIORIDAD
Seguridad	1
Adaptación	2
Confort	3
Confiabilidad	4
Complejidad	5
Construcción	6
Estética	7

Se otorga valores según la escala de juicio AHP dependiendo del lugar de prioridad que ocupe un criterio en comparación con otro (véase **Tabla 2.12**). Si el primer criterio comparado ocupa un grado mayor de prioridad que el segundo, se deberá contar cuántos espacios hacia abajo el segundo criterio se encuentra respecto al primero. Por lo contrario, si el primer criterio comparado ocupa un grado menor de prioridad que el segundo, se deberá contar cuántos espacios hacia arriba el segundo criterio se encuentra respecto al primero.

La **Tabla 2.13**, muestra el valor que se debe otorgar respecto al número de espacios recorridos hacia abajo, mientras que la **Tabla 2.14**, muestra el valor que se debe otorgar respecto al número de espacios recorridos hacia arriba.

Tabla 2.13. Ponderación AHP según el espaciado de prioridad.

Espacios ↓	Valor
1 a 2	3
3 a 4	5
5	7
6	9

Tabla 2.14. Ponderación AHP según el espaciado de prioridad.

Espacios ↑	Valor
1 a 2	1/3
3 a 4	1/5
5	1/7
6	1/9

A continuación, se parte como base de la **Tabla 2.11**, para otorgar valores según la escala de juicio AHP en la comparación de alternativas respecto a cada criterio. Identificada la alternativa más votada por los participantes se procede a comparar la relación de votos

entre la primera alternativa con las otras. La **Tabla 2.15**, muestra el valor que se debe otorgar a cada alternativa según la relación de votos.

Tabla 2.15. Valor de juicio AHP respecto al número de votos.

Rango de alejamiento	Valor
Menos de la mitad	3
Casi la mitad	5
Más de la mitad	7
Más del triple	9

La **Tabla 2.16**, muestra el desarrollo para la ponderación de los criterios según el método AHP.

Tabla 2.16. Desarrollo de la matriz de criterios.

MATRIZ DE CRITERIOS C								MATRIZ MORFOLÓGICA M								Pond.
CRITERIO	Adaptación	Complejidad	Confiabilidad	Confort	Construcción	Estética	Seguridad									
Adaptación	1	5	3	3	5	7	1/3	0.19	0.28	0.23	0.37	0.21	0.21	0.14	0.23	
Complejidad	1/5	1	1/3	1/3	3	3	1/5	0.04	0.06	0.03	0.04	0.12	0.09	0.09	0.07	
Confiabilidad	1/3	3	1	1/3	3	5	1/5	0.06	0.17	0.08	0.04	0.12	0.15	0.09	0.10	
Confort	1/3	3	3	1	5	5	1/3	0.06	0.17	0.23	0.12	0.21	0.15	0.14	0.16	
Construcción	1/5	1/3	1/3	1/5	1	3	1/7	0.04	0.02	0.03	0.02	0.04	0.09	0.06	0.04	
Estética	1/7	1/3	1/5	1/5	1/3	1	1/9	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.05	0.03	
Seguridad	3	5	5	3	7	9	1	0.58	0.28	0.39	0.37	0.29	0.27	0.43	0.37	
	5.2	17.7	12.9	8.1	24.3	33.0	2.3									

Tabla 2.17. Vector de valores propios.

C X Pond	
	1.86
	0.48
	0.76
	1.21
	0.31
	0.19
	2.92
Suma	7.71

Para verificar la escala de juicio impuestas en las **Tabla 2.13**, **Tabla 2.14** y **Tabla 2.15** es necesario cumplir con cierto condicionante llamada razón de consistencia RC, que en el caso de ser mayor a 0.1, se considera inconsistentes los valores impuestos, sin embargo, si su valor es menor o igual a 0.1, se considera consistentes los valores impuestos.

Tabla 2.18. Cálculo de la razón de consistencia RC.

Condicionantes	
IC	0.12
IA	1.41
RC	0.084

En la **Tabla 2.18**, podemos ver que el cálculo de la razón de consistencia es menor a 0.1. Por lo tanto, los valores impuestos en las **Tabla 2.13**, **Tabla 2.14** y **Tabla 2.15** son aceptables y se puede seguir con el proceso de ponderación.

Tabla 2.19. Evaluación del peso específico del criterio ADAPTACIÓN.

ADAPTACIÓN							
Alternativas	A1	A2	A3	M. Morfológica			V. Promedio
A1	1	5	7	0.7	0.8	0.6	0.7
A2	1/5	1	3	0.1	0.2	0.3	0.2
A3	1/7	1/3	1	0.1	0.1	0.1	0.1
	1.3	6.3	11.0				

Tabla 2.20. Evaluación del peso específico del criterio COMPLEJIDAD.

COMPLEJIDAD							
Alternativas	A1	A2	A3	M. Morfológica			V. Promedio
A1	1	1/7	1/3	0.1	0.02	0.23	0.1
A2	7	1	1/7	0.6	0.12	0.10	0.3
A3	3	7	1	0.3	0.86	0.68	0.6
	11.0	8.1	1.5				

Tabla 2.21. Evaluación del peso específico del criterio CONFIABILIDAD.

CONFIABILIDAD							
Alternativas	A1	A2	A3	M. Morfológica			V. Promedio
A1	1	1/3	1/3	0.1	0.1	0.2	0.1
A2	3	1	1/3	0.4	0.2	0.2	0.3
A3	3	3	1	0.4	0.7	0.6	0.6
	7.0	4.3	1.7				

Tabla 2.22. Evaluación del peso específico del criterio CONFORT.

CONFORT							
Alternativas	A1	A2	A3	M. Morfológica			V. Promedio
A1	1	3	3	0.6	0.7	0.3	0.5
A2	1/3	1	5	0.2	0.2	0.6	0.3
A3	1/3	1/5	1	0.2	0.0	0.1	0.1
	1.7	4.2	9.0				

Tabla 2.23. Evaluación del peso específico del criterio CONSTRUCCIÓN.

CONSTRUCCIÓN							
Alternativas	A1	A2	A3	M. Morfológica			V. Promedio
A1	1	9	9	0.8	0.9	0.6	0.8
A2	1/9	1	5	0.1	0.1	0.3	0.2
A3	1/9	1/5	1	0.1	0.0	0.1	0.1
	1.2	10.2	15.0				

Tabla 2.24. Evaluación del peso específico del criterio ESTÉTICA.

ESTÉTICA							
Alternativas	A1	A2	A3	M. Morfológica			V. Promedio
A1	1	3	5	0.7	0.7	0.6	0.6
A2	1/3	1	3	0.2	0.2	0.3	0.3
A3	1/5	1/3	1	0.1	0.1	0.1	0.1
	1.5	4.3	9.0				

Tabla 2.25. Evaluación del peso específico del criterio SEGURIDAD.

SEGURIDAD							
Alternativas	A1	A2	A3	M. Morfológica			V. Promedio
A1	1	3	3	0.6	0.7	0.3	0.5
A2	1/3	1	5	0.2	0.2	0.6	0.3
A3	1/3	1/5	1	0.2	0.05	0.1	0.1
	1.7	4.2	9.0				

Tabla 2.26. Matriz Morfológica con vectores promedio.

	Adaptación	Complejidad	Confiabilidad	Confort	Construcción	Estética	Seguridad	Pond.
A1	0.7	0.1	0.1	0.5	0.8	0.6	0.5	0.53
A2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.28
A3	0.1	0.6	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.19
Pond.	0.23	0.07	0.10	0.16	0.04	0.03	0.37	

Tabla 2.27. Resultados obtenidos por el método AHP.

Alternativa	Prioridad
A1	1
A2	2
A3	3

Según la aplicación del método AHP se concluye que la alternativa A1 es la primera opción, seguido de la alternativa A2 y por último la alternativa A3.

Los dos métodos utilizados para la evaluación de las alternativas de diseño dan como prioridad a la alternativa A1.

3 EXPERIMENTACIÓN

La **Figura 3.1**, muestra las etapas que conforman la fase de “Experimentación”.

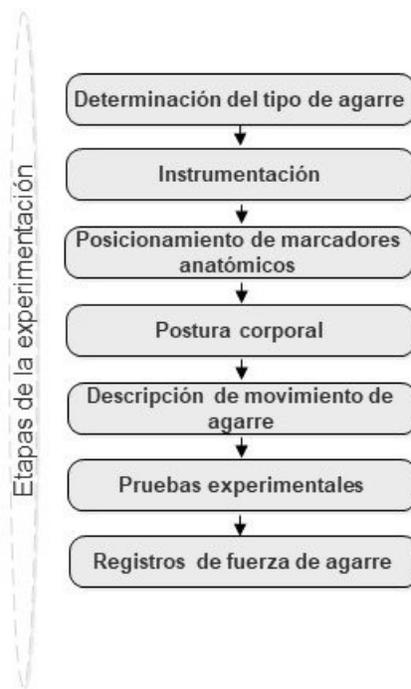


Figura 3.1. Etapas de la experimentación.

(Fuente: Propia)

3.1 Pruebas de fuerza de agarre

Se conoce que la mano puede realizar varias formas de agarre. Sin embargo, en este trabajo la realización de las pruebas de fuerza se enfoca exclusivamente en el agarre cilíndrico de potencia. Las pruebas se realizarán en el Laboratorio de Biomecánica, de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Materiales y Equipos

En la **Tabla 3.1**, se hace mención los materiales y equipos principales para la realización de las pruebas de fuerza y análisis de movimiento.

Tabla 3.1. Materiales y equipos principales.

Materiales
Prototipo de exoesqueleto para mano
Marcadores anatómicos
Indumentaria para mano

Equipos
Dinamómetro de mano
Equipo para videototogrametría

El laboratorio de biomecánica cuenta con un dinamómetro para la evaluación de la fuerza de agarre, de marca KINVENT. En el **ANEXO V**, se encuentra con detalle las especificaciones técnicas del producto.

3.2 Marcadores anatómicos

Los marcadores anatómicos son esferas reflectivas reutilizables que fungen como puntos de referencia de fácil identificación localizadas en cualquier parte del cuerpo humano y cuya posición en el espacio es registrada por un número finito de cámaras digitales. Se utilizará 8 marcadores con la siguiente disposición: Dos marcadores se ubicarán a la altura de la zona de los huesos carpianos de la mano, estas marcas servirán como puntos de referencia para los demás marcadores. Para los dedos, se elige el pulgar, índice y meñique, estos contarán con dos marcadores respectivamente, el primero se ubicará al nivel del hueso falange proximal y el segundo se ubicará al nivel de la articulación metacarpofalangeal (véase **Figura 3.2**).

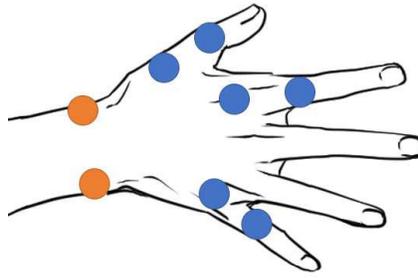


Figura 3.2. Ubicación de marcas anatómicas en la mano.
(Fuente: Propia)

3.3 Postura corporal

La Goniometría en términos generales se encarga de estudiar la medición de los ángulos. Para la ciencia médica, es una técnica que se encarga de medir los ángulos que se forman por la intersección de ejes que convergen en una articulación (Taboadela, 2007). Dentro de las áreas de aplicación podemos destacar: La ortopedia, traumatología, reumatología, industria biomédica, rehabilitación física, medicina del deporte, entre otras.

La Goniometría en medicina tiene dos objetivos, evaluar la posición de una articulación en el espacio y evaluar el arco de movimiento de una articulación en cada uno de los tres planos del espacio (Taboadela, 2007). Para esto se adopta ciertas posturas que garantizan la correcta medición de estos arcos. Estas son las posturas que se mencionan para la ejecución de las pruebas experimentales para medir la fuerza de agarre del conjunto mano-exoesqueleto.

- Postura de espalda recta. La postura encorvada afecta la movilidad de las articulaciones. Además, al realizar movimientos cíclicos de potencia es necesario mantener un control adecuado de la respiración.

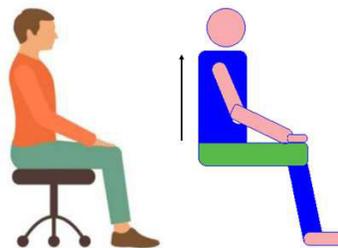


Figura 3.3. Postura sugerida para la espalda.
(Fuente: Propia)

- Para el hombro, la abducción no puede superar los 45° debido a que se produce fatiga muscular en el musculo supraespinoso, los deltoides y musculatura paraespinal. Se recomienda una posición casi neutral.

Con respecto a la flexión del hombro se parte del mismo criterio, para que no se produzca una fatiga muscular se recomienda no sobrepasar los 45°. Se puede flexionar el hombro en un rango de 0° a 15°.

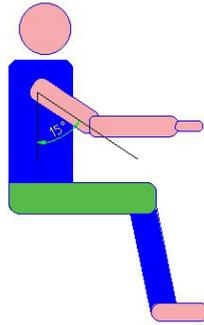


Figura 3.4. Postura sugerida hombro.
(Fuente: Propia)

- La posición del antebrazo y de la mano debe estar en prono-supinación media.

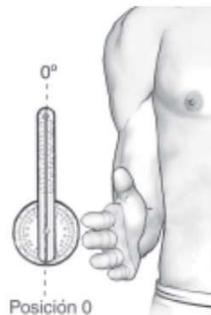


Figura 3.5. Prono-supinación media del antebrazo y de la mano.
(Fuente: (Taboadela, 2007))

- Los dedos de la mano en posición flexo/extensión neutral. Mano totalmente abierta.



Figura 3.6. Postura de dedos.

(Fuente: Propia)

3.4 Descripción del movimiento a efectuar

- El participante adopta la postura descrita en el apartado anterior para iniciar con las pruebas.
- El participante de manera controlada procede a la sujeción del dinamómetro tratando de mantener una uniformidad entre el contacto de los dedos con el instrumento de medida. Una vez efectuado completamente el agarre se procede a mantener la presión por 2 segundos. Finalmente terminamos el movimiento de agarre volviendo a la posición neutral de la mano y dedos. Se repite el proceso durante 1 minuto.
- Se realiza una primera prueba con el fin de registrar la fuerza de agarre de la mano sin la incorporación del exoesqueleto. En esta prueba también se registrará el movimiento efectuado por los marcadores anatómicos colocados en puntos estratégicos anteriormente mencionados.
- Se realiza una segunda prueba con el fin de registrar la fuerza de agarre de la mano con la incorporación del exoesqueleto. En esta prueba también se registrará el movimiento efectuado por los marcadores anatómicos colocados en el exoesqueleto. Es importante que los marcadores en lo posible coincidan con la ubicación de la primera prueba.

3.5 Algoritmo

El algoritmo fue desarrollado en MATLAB por el Instituto de Biomecánica de Valencia en colaboración con la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. Dentro de sus funciones incluye el tratamiento de datos y el cálculo de parámetros cinemáticos. El cálculo cinemático se logra mediante el análisis de la nube de puntos dejada por los marcadores anatómicos al ejecutar un movimiento. La **Figura 3.7**, muestra las etapas que se consideró para la aplicación del algoritmo.

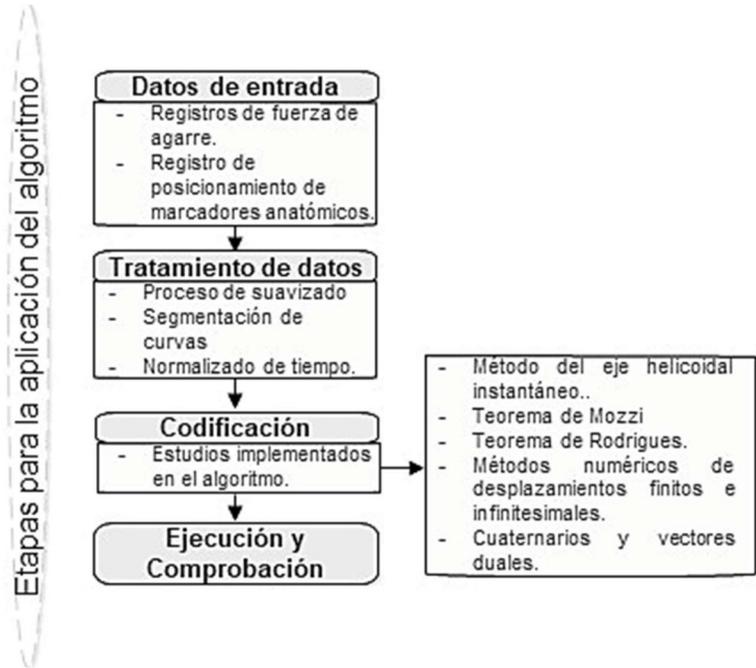


Figura 3.7. Etapas para la aplicación del algoritmo.
(Fuente: Propia)

En el **ANEXO VII**, se encuentra el algoritmo desarrollado para el caso del movimiento de agarre y registro de fuerza.

3.6 Graficas

La **Figura 3.8**, muestra una comparativa del desarrollo de la fuerza de agarre en kilogramos con respecto al tiempo que dura el movimiento.

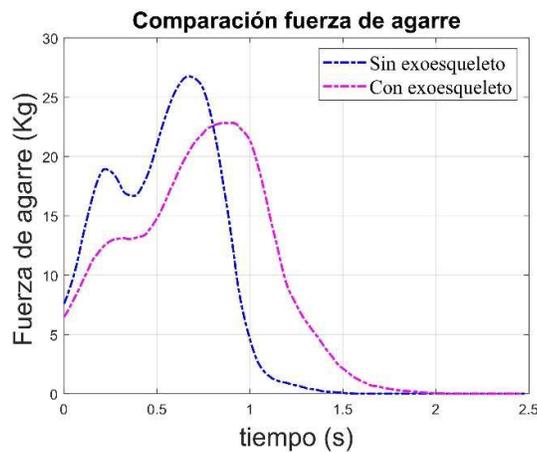


Figura 3.8. Gráfica comparativa de fuerza de agarre.

La **Figura 3.9**, muestra la gráfica comparativa de la tasa de fuerza desarrollada (también conocida como Rate of Force Development. "RFD") con respecto al tiempo normalizado en porcentaje de movimiento de 0 a 100.

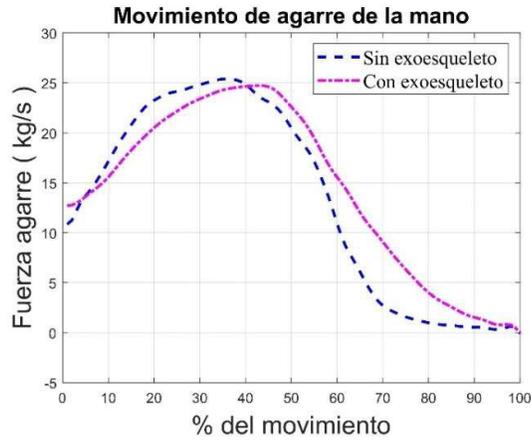


Figura 3.9. Fuerza de agarre en función del movimiento de la mano.

La **Figura 3.10**, muestra la gráfica comparativa de la tasa de fuerza desarrollada en función a la posición angular de la mano.

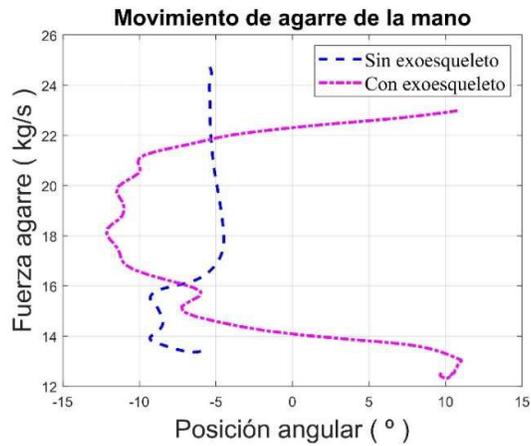


Figura 3.10. Fuerza de agarre en función de la posición angular.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

En la **Figura 3.8**, podemos interpretar que el uso del exoesqueleto provocó una disminución de la fuerza de agarre. Comparando los valores de los picos más altos de cada curva (véase **Tabla 4.1**), existe una disminución de fuerza de un **14.68%**. Además, se observa que la curva de fuerza de agarre “con exoesqueleto” sufre un desfase, lo que significa que el movimiento de agarre efectuado en la prueba concluyó más tarde. Esto pudo darse por factores que influyen en la interacción mano-exoesqueleto.

Tabla 4.1. Valores máximos de fuerza de agarre.

Fuerza de agarre en (Kg)	
Con exoesqueleto	22.84
Sin exoesqueleto	26.77

La **Figura 3.9**, relaciona la tasa de fuerza desarrollada (RFD) con respecto al tiempo normalizado en porcentaje de movimiento. La RFD es un parámetro que relaciona la capacidad de aumentar la fuerza contráctil partiendo de un estado de reposo hasta su activación muscular en periodos muy cortos de tiempo (Rodríguez-Rosell, Pareja-Blanco, Aagaard, & González-Badillo, 2017). Se puede interpretar que el uso del prototipo de exoesqueleto afectó de manera insustancial el rendimiento del agarre cilíndrico de potencia pues ambas curvas se acercan a un valor máximo de **25 kg/s**, lo que difieren es en el valor del porcentaje de movimiento en el cual alcanzaron dicho valor.

La **Figura 3.10**, muestra la tasa de fuerza desarrollada (RFD) con respecto a la posición angular, la gráfica pretende relacionar la parte dinámica con la parte cinemática del movimiento de agarre, con el fin de identificar escenarios donde se produzcan mayores esfuerzos físicos y determinar potenciales zonas donde se puedan generar lesiones. Sin embargo, no es posible debido a que no se identifica un patrón lógico definido que permita emitir una interpretación acertada.

4.2 Discusión

Hasta ahora podemos establecer que el uso del exoesqueleto seleccionado disminuye un porcentaje desdeñable de la fuerza de agarre en comparación a la capacidad de maniobrabilidad que ofrece el prototipo. Lo que sugiere que existe una relación indirecta

entre ambos criterios, esto serviría para definir un rango porcentual de pérdida de fuerza que permita valorar la capacidad de maniobrabilidad de un prototipo de exoesqueleto.

El valor máximo de fuerza alcanzada sin el uso del exoesqueleto según los registros proporcionados por la App KFORCE (véase **ANEXO VI**) fue de **28.9 kg**, poniendo en contraste este valor con estudios similares podemos notar que para una muestra de 162 hombres con un rango de edad de (20 a 29) años se registraron valores de fuerza de **39.63 ± 7.24 kg**, haciendo uso de su mano dominante (Bustos y otros, 2018). Otro estudio refleja que para una muestra de 23 hombres con un rango de edad de (19 a 21) años y haciendo uso de datos antropométricos para el análisis se registraron valores de fuerza de **36.78 ± 9.32 kg** (Barraza y otros, 2019). Por último, Jashimoto y otros, (2009) en su estudio reflejan que para una muestra de 10 hombres con un rango de edad de (18 a 30) años se registraron valores de fuerza de **(42 a 47) kg** en sus percentiles 50 y 75 respectivamente, haciendo uso de su mano dominante.

Se evidencia un patrón poco alentador, y es que mientras transcurren los años el valor promedio de fuerza de agarre comparado con generaciones pasadas va disminuyendo cada vez más. Los estudios confirman, que se deben considerar para un análisis típico de fuerza de agarre variables antropométricas, de género, de edad, de peso, de altura, características intrínsecas del cuerpo humano como mano dominante e incluso afectaciones en la función motora.

Por otro lado, la tasa de fuerza desarrollada (RFD) demuestra la capacidad de realizar movimientos rápidos y de alta potencia. Con esto, se puede establecer al valor RFD como un indicador que valore la maniobrabilidad de un prototipo de exoesqueleto para la mano.

De lo positivo, pasamos a lo negativo pues tenemos un fallo muy evidente en la **Figura 3.10**, lo que se pretendía es relacionar la parte dinámica del proceso con la parte cinemática, pero las curvas no proporcionan información coherente. Esto se debe netamente a fallos en el proceso de medición de la fuerza de agarre, fallos como desplazamientos relativos de los marcadores anatómicos, la no uniformidad a la hora de efectuar el movimiento de agarre y en tratar de unificar el registro de fuerza de agarre con el registro de movimiento de solo tres dedos, cuando en realidad son cinco dedos que participan en el movimiento de agarre cilíndrico de potencia.

Sin embargo, estos resultados vislumbran un escenario favorable para posteriores estudios más complejos con uso de técnicas estadísticas que involucren una muestra mucho más grande y variada, tomando en cuenta esta vez ciertos parámetros no considerados en el

proceso experimental. En vista de lo discutido se debe realizar las siguientes correcciones para la elaboración del protocolo de pruebas:

- Fijar de mejor manera los marcadores anatómicos para evitar movimientos relativos en especial de los marcadores de referencia.
- Buscar la forma de mantener el dinamómetro fijo en las pruebas de fuerza, con el fin de evitar el registro de movimientos innecesarios que no ayudan a la valoración de la fuerza de agarre.
- Considerar el cambio del tamaño y número de marcadores anatómicos, con el fin de facilitar la identificación del patrón de movimiento de los dedos.
- Reubicar los marcadores anatómicos de los dedos. Los marcadores ubicados al nivel de la articulación metacarpofalangeal se trasladarán a la zona del hueso falange media, esto para los dedos índice y meñique, para el dedo pulgar se trasladará a la zona del hueso falange distal.
- Considerar en la elaboración del protocolo variables antropométricas, de género, de edad, de peso, de altura, características intrínsecas del cuerpo humano como mano dominante e incluso afectaciones presentes en la función motora de la mano.

4.3 Protocolo de pruebas



Figura 4.1. Etapas para el desarrollo del protocolo de pruebas.

(Fuente: Propia)

En la **Figura 4.1**, podemos encontrar las etapas que se tomaron en cuenta para la elaboración del protocolo de pruebas.

A continuación, se describen las etapas para el desarrollo del protocolo.

- Reconocimiento de la necesidad: Se necesita realizar un procedimiento confiable, reproducible, con fundamentos que garantice el correcto procedimiento para la realización de las pruebas piloto.
- Determinación de los parámetros a ser evaluados: En este caso, los registros de fuerza del agarre cilíndrico de potencia incorporando el prototipo de exoesqueleto de mano.
- Identificación de fallos en pruebas experimentales: Se identifican los posibles fallos en el proceso de medición de fuerza con el fin de corregirlos y asegurar un procedimiento fiable y robusto.
- Variables Intrínsecas: Es información que pueden influir de manera directa en el procedimiento, afectando la fiabilidad de las pruebas. Mientras variables se consideren, los resultados son susceptibles a estudios estadísticos más completos. La **Tabla 4.2**, muestra los parámetros considerados para la elaboración del protocolo de pruebas.

Tabla 4.2. Parámetros que influyen en el procedimiento.

<u>Parámetros de conformidad</u>
Información del participante
Inspección visual exoesqueleto
Inspección de instrumentación
Implementación del exoesqueleto
Postura corporal
Ejecución del movimiento

- Formato del protocolo para pruebas piloto: Se finaliza con la elaboración del formato, este vinculará todo lo antes mencionado de una manera sencilla y organizada. El formato se encuentra en el **ANEXO VIII**.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El desarrollo de exoesqueletos para la mano ha tomado gran protagonismo en áreas de la medicina, rehabilitación física, salud y seguridad ocupacional. Sin embargo, aún sigue siendo un desafío alcanzar a replicar perfectamente los movimientos anatómicos y mucho más consolidar un diseño que se adapte anatómicamente a cualquier individuo.
- Se logró establecer requerimientos técnicos mediante la aplicación del despliegue de la función de calidad, así como proponer alternativas conceptuales utilizando herramientas presentes en el diseño concurrente. Además, se seleccionó la mejor alternativa de exoesqueleto para su posterior prototipado, haciendo uso de métodos de evaluación multicriterio para la toma de decisiones con la participación de un grupo multidisciplinario dedicado a la valoración de criterios.
- El valor de la fuerza del agarre cilíndrico de potencia, así como la tasa de fuerza desarrollada (RFD) son parámetros que se deben considerar para la evaluación de la funcionalidad de prototipos de exoesqueletos. El agarre cilíndrico de potencia es uno de los más utilizados en actividades cotidianas, además de ser un referente en el seguimiento y evaluación de lesiones, y en la planificación de tratamientos fisioterapéuticos.
- El protocolo de pruebas garantiza un correcto procedimiento de medición de la fuerza de agarre, considerando en su estructura los parámetros intrínsecos que afectan el valor de la fuerza y fallos identificados en las pruebas experimentales. Al considerar la presencia de estos parámetros se puede realizar un estudio más completo aplicando técnicas estadísticas como el ANOVA (Análisis de la varianza). El ANOVA permitirá detectar diferencias significativas en el valor de la fuerza de agarre con respecto a las variables involucradas en el proceso.

5.2 Recomendaciones

- Para la ejecución de las pruebas piloto se recomienda trabajar con una muestra significativa y variada en edad, género e incluir en lo posible participantes con afectaciones en la función motora de la mano.
- Para las pruebas piloto se debe hallar la forma de que el dinamómetro permanezca fijo, con esto eliminamos registros con movimientos no deseados.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D Print it. (22 de Junio de 2015). MakerBot Thingiverse. (3. P. Hands, Productor) Obtenido de <https://www.thingiverse.com/thing:892654>

Ayats, S. M. (2017). *Diseño de una prótesis de mano adaptable para niños*.

Barraza, P., Herrera, V., Macías, J., Espinal, M., & Gómez, K. (2019). *Determinación de fuerza de agarre y antropometría de la mano en una muestra de estudiantes universitarios*. *Academia Journals*. Obtenido de <http://cathi.uacj.mx/bitstream/handle/20.500.11961/8076/Memorias%20Academia%20Journals%20Oaxaca%202019%20-%20Fuerza%20de%20agarre.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bustos, B., Acevedo, A., & Lozano, R. (2018). *Hand Grip Strength Values in Apparently Healthy Subjects of the City of Cúcuta, Colombia*. doi:<https://doi.org/10.29375/01237047.2791>

Byl, N., Wilson, F., Merzenich, M., Melnick, M., Scott, P., Oakes, A., & McKenzie, A. (1996). *Sensory dysfunction associated with repetitive strain injuries of tendinitis and focal hand dystoni*. *Journal of Orthopaedic and Sport Physical Therapy* 23(4), 234-244.

Caicedo, B. E. (21 de Noviembre de 2017). *Tendencia en el diseño de exoesqueletos*. (R. I. REASISTE, Ed.) Bogotá. Obtenido de <http://reasiste.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/1258/2017/11/TENDENCIAS-EN-EL-DISE%C3%91O-DE-EXOESQUELETOS-I.pdf>

Fras, J., & Althoefer, K. (2018). *Soft biomimetic prosthetic hand: Desing, manufacturing and preliminary examination*. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (IROS) (pp.1-6)*. IEEE.

Gourang, A., & kumar, S. (2012). *Orthoses, Prostheses and Assistive Devices for Physiotherapists* (Primera ed.).

Harmonic Drive SE. (2021). Obtenido de <https://harmonicdrive.de/es/glosario/protesis>

Jahan, A., Edwards, K., & Bahraminasab, M. (2016). *Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design*. *Butterworth-Heinemann*.

- Jashimoto , L., De la Vega , E., Lopez, F., Ortiz, B., & Lucero , K. (2009). *Fuerza máxima de agarre con mano dominante y no dominante. Congreso Internacional de Ergonomía SEMAC.*
- Kidd, P., McCoy, C., & Steenbergen , L. (2000). *Repetitive strain injuries in youth. Journal of the American Academy of Nurse Practitioners , 12(10), 413-426.*
- Li, G., Cheng, L., & Sun, N. (2021). *Design, manipulability analysis and optimization of an index finger. ELSEVIER - Mechanism and Machine Theory, 167.*
- Morado, G. I. (2013). *Arcos y ángulos de movimiento. Universidad Nacional Autónoma de México, México. D.F.*
- Muggleton , J. M., Allen, R., & Chappell, P. (1999). *Hand and arm injuries associated with repetitive manual work in industry. Risk factor and Preventive measures. Ergonomics 42(5), 714-739.*
- Naked Prosthetics. (2022). MCPDrive. Obtenido de <https://www.npdevices.com/product/mcpdriver/>
- Nantes, E. (Noviembre de 2019). *El Método Analytic Hierarchy Process para la toma de decisiones, repaso de la metodología y aplicaciones. Investigación Operativa, 54 - 73.*
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de Maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos (4ta. ed.). México. D.F: McGraw-Hill.*
- Peña, E., Ticófalquera, N., López , J., Abenoza , M., & Romero , G. (2012). *Exoesqueleto para mano discapacitada con movimiento y sensibilidad pero sin fuerza. Ortopedia Técnica.*
- Pérez, A., Jurado, M., & Sancho, J. (2012). *Fuerza de contacto entre mano y objeto en el agarre cilíndrico: Comparación de dos técnicas de medición. Dpto. de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universidad Jaume I.*
- Riba, R. C. (2002). *Diseño Concurrente (1ra. ed.). Barcelona.*
- Rodríguez-Rosell, D., Pareja-Blanco, F., Aagaard, P., & González-Badillo, J. (2017). *Physiological and methodological aspects of rate of force. Clin Physiol Funct Imaging. doi:10.1111/cpf.12495*
- Shields, B., Main, J., Peterson, S., & Strauss, A. (5 de Septiembre de 1997). *An anthropomorphic hand exoskeleton to prevent astronaut hand fatigue during*

extravehicular activities. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans , 27, 668 - 673.

Taboadela, C. (2007). Goniometría, una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales. Buenos Aires.

Taylor, C., & Schwarz, R. (1955). *The Anatomy and Mechanics of the Human Hand . Artificial Limbs* . Obtenido de http://www.oandplibrary.org/al/1955_02_022.asp

Vázquez, A., Díaz, J., Lázaro, M., & Guáman, M. (2021). *Measurement of the pressure force and hand clamps in healthy patients. doi:10.35366/100932*

Velásquez, A. (2007). Caracterización cinemática e implementación de una mano robótica multiarticulada. México. D.F: [Tesis Doctoral].

Wege, A., Kondak, K., & Hommel, G. (2005). *Mechanical Design and Motion Control of a Hand. IEEE International Conference Mechatronics and Automation.*

Xing, K., Xu, Q., He, J., Wang , Y., Liu, Z., & Huang , X. (2008). *A wearable device for repetitive hand therapy. International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, In 2008 2nd IEEE RAS & EMBS .*

Zambudio, P. R. (2009). Prótesis, órtesis y ayudas técnicas. Barcelona.

Zhang, F., Hua, L., Fu, Y., Chen , H., & Wang , S. (29 de Octubre de 2013). Design and development of a hand exoskeleton for. *ELSEVIER - Mechanism and Machine Theory.*

7 ANEXOS

ANEXO I: Certificado de originalidad

ANEXO II: Casa de la Calidad

ANEXO III: Benchmarking

ANEXO IV: Formulario de encuesta y resultados

ANEXO V: Especificaciones técnicas dinamómetro KFORCE.

ANEXO VI: Informe registro de fuerza de agarre App KFORCE

ANEXO VII: Algoritmo

ANEXO VIII: Formato protocolo de pruebas

ANEXO IX: Planos

ANEXO X: Fotografías