



REDISEÑO DE UNA AYUDA TÉCNICA MULTIFUNCIONAL TELEOPERADA PARA UNA PRODUCCIÓN EN SERIE

Presentado por:

Autor: Robert Steven Delgado Peralta
robert.delgado@correounivalle.edu.co

Director: José Isidro García Melo. PhD
jose.i.garcia@correounivalle.edu.co

Tesis para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico



BIONOVO

Grupo Interdisciplinario de Innovación Biotecnológica y Transformación Ecosocial
Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad del Valle
Noviembre 2025

Resumen

Teniendo en cuenta la importancia del servicio de rehabilitación física de rodilla para todas las personas, se desarrolla una propuesta de rediseño para un ayuda técnica multifuncional teleoperada, con el fin de lograr una producción en serie del prototipo funcional de rehabilitación de rodilla que permita ensamblar una mayor cantidad de unidades del modelo. Para lograrlo, se desarrolla una metodología de trabajo integradora que permita consolidar conceptos previamente adquiridos en el programa y adquirir nuevos en el marco del desarrollo del proyecto. Como resultado del desarrollo de esta propuesta se consolidará un sistema de información que permitirá una posterior implementación de un modelo de ensamble en línea de producción para la nueva arquitectura de la ayuda técnica teleoperada.

Palabras Clave: Ayuda técnica multifuncional teleoperada, rehabilitación física, diseño, procesos de manufactura, implementación, línea de producción.

A mis padres,

Olga Lucia Peralta Guerrera & Roberth Delgado Bolaños

A mi abuelo,

José Ascensión Peralta Hernández

A mis hermanos,

*Francia Helena Serna Peralta, Cesar Augusto Serna Peralta
& Diana Maria Serna Peralta*

A mis pilares del alma,

*Carolina Lozada Quintero, Alexander Molineros Peralta
Isabela Ramírez Garcés & Andrés Zambrano Bolaños*

A mi tutor,

José Isidro García Melo

Agradecimientos

Agradezco profundamente al equipo multidisciplinario que hizo parte de este camino, los Ingenieros Libreros, Octaliver, Chamorro y Camacho, y las diseñadoras Zúñiga y Rodríguez, por compartir su conocimiento con generosidad y entrega. Cada uno, aportó una visión que enriqueció este trabajo más allá de lo académico. Sus consejos y perspectivas fueron una valiosa orientación en momentos de incertidumbre, y su acompañamiento constante me recordó que los procesos colaborativos construyen con más fuerza. Gracias por la disposición y por el tiempo dedicado.

A mi tutor, José Isidro García, gracias por ser guía constante y presencia serena a lo largo de esta etapa. Su mirada crítica, su paciencia al corregir y su manera de enseñar con respeto y claridad marcaron profundamente mi proceso formativo. Nunca faltaron sus palabras oportunas, su acompañamiento honesto ni su confianza en mis capacidades, incluso en los momentos en que yo mismo dudaba. Su mano tendida en todas y cada una de las situaciones tanto académicas como personales me permiten considerarlo, más que un tutor o profesor, un maestro en mi vida.

A mi familia, gracias por ser raíz y sostén. Por estar cuando lo necesité y por celebrar cada pequeño logro como si fuera el más grande. Gracias por acompañarme con amor incondicional, por cada gesto, palabra, abrazo y espacio de escucha. En medio de los días difíciles, su compañía me dio fuerzas. Y en los días de alegría, su presencia multiplicó mi felicidad. Con especial cariño quiero agradecer a Carolina, Alexander y Andrés, por acompañarme tan estrechamente en mi vida, su camino, por razones que solo la vida entenderá, se entrelazo con el mío, su existencia es mi felicidad, su cercanía conmigo, mi amor total.

A mis padres, seres maravillosos y misteriosos en mi vida, les agradezco por si y por no, por exceso y escases, por lo complejo de lo vivido y lo ansioso de lo esperado. Su cuidado me ha brindado siempre el abrigo y la confianza de saber que tengo un hogar al cual volver, que puedo salir a explorar el mundo y volver si me pierdo. Gracias por hacer que mis perdones sean irrelevantes con su excesiva comprensión, si algo bueno llevo conmigo hoy, sé que es por ustedes. Sé que podría recorrer mil veces solo este camino, pero mil y una veces escogería hacerlo con ustedes. Gracias por tomar mi mano todas las veces que me acerque, gracias por confiar en mí sin dejar de presionarme para que alcanzara más, gracias por darle sentido al tiempo, gracias, gracias, gracias.

Finalmente, quiero darme las gracias que no suelo reconocerme. Me agradezco por haberlo intentado, por avanzar sin fuerzas, por creer en mí aún con la mirada nublada, por caer y seguir cayendo sin dejar de intentarlo. Agradezco a la vida por todas y cada una de las circunstancias que ha dispuesto en mi camino, y me agradezco a mí por afrontar todo con amor, por no desfallecer. Por ser lo que soy, con todos los aciertos y derrotas, me agradezco.

«Y por si no volvemos a vernos, ¡buenos días, buenas tardes y buenas noches!» - The Truman Show, 1998

Robert Steven Delgado Peralta, 2025

Contenido

Resumen	2
Agradecimientos	4
Lista de figuras	7
Lista de tablas	11
1. Introducción	12
1.1. Antecedentes	12
1.2. Formulación del problema	13
1.2.1. Planteamiento del problema	13
1.2.2. Árbol del problema	13
1.3. Justificación	14
1.4. Objetivos	14
1.4.1. Objetivo general	14
1.4.2. Objetivos específicos	14
2. Marco conceptual	15
2.1. Estado del arte	15
2.1.1. Desarrollos internacionales	15
2.1.2. Desarrollos nacionales	17
2.2. Marco teórico	17
2.2.1. Ayuda técnica teleoperada	18
2.2.2. Diseño	20
2.2.3. Procesos de manufactura	22
2.2.4. Implementación	26
2.3. Marco metodológico	26
2.3.1. Metodología	26
3. Definición de los requerimientos de rediseño	30
3.1. Caracterización de la ayuda técnica	30
3.2. Análisis del funcionamiento de la ayuda técnica con su ensamble actual	33
3.3. Análisis de la manufactura en la ayuda técnica	33
3.4. Definición de los requerimientos de los componentes que se reemplazarán	36

4. Propuestas de mejora para la ayuda técnica	37
4.1. Diagrama IDEF0 para el rediseño de la ayuda técnica	37
4.2. Condiciones de entorno de los elementos	40
4.2.1. Consideraciones iniciales	41
4.2.2. Soporte de la unidad motriz	42
4.2.3. Soportes de las chumaceras	43
4.2.4. Soportes del freno	44
4.2.5. Placa base	45
4.2.6. Eje del motor y eje del freno	46
4.3. Geometrías propuestas	47
4.3.1. Ensamble de la ayuda técnica	48
4.3.2. Soportes	49
4.3.3. Placa base	52
4.3.4. Ejes	53
4.3.5. Acoples	54
4.3.6. Carcasa	56
4.3.7. Utilajes	58
4.4. Experiencia con los procesos de manufactura	60
5. Ensamble de la ayuda técnica	64
5.1. Modelo IDEF0 del proceso productivo de la ayuda técnica para su producción en serie	64
5.2. Paso a paso del ensamble de la ayuda técnica	67
5.3. Renderizado del ensamble de la ayuda técnica	69
6. Proyecto ALFI, evolución de la carcasa	72
6.1. El aporte de la conformación de equipos multidisciplinarios	73
6.2. Un proyecto con propósito	75
7. Conclusiones	77
7.1. Trabajos futuros	78
Referencias	79

Lista de figuras

1.1. Distribución de IPS de nivel III en Colombia con énfasis en el departamento del Valle del Cauca. Tomado de [4]	12
1.2. Árbol del problema	14
2.3. Ejemplos de distintos tipos de ayudas funcionales para las terapias pasivas.	16
2.4. Ejemplos de ayudas funcionales para las terapias activas/pasivas.	16
2.5. Ayuda técnica multifuncional teleoperada desarrollada en la universidad del valle. Tomado de [14]	17
2.6. Representación esquemática de los factores involucrados en la operación de la ayuda técnica y sus interacciones. Tomada de [14]	18
2.7. Representación de los componentes principales de la ayuda técnica multifuncional teleoperada, modelo renderizado. Tomada de [15]	19
2.8. Representación esquemática de las principales etapas de diseño y las relaciones iterativas entre ellas. Tomada de [20]	21
2.9. Esquema representativo de los procesos de manufactura y sus divisiones categóricas. Tomado de [22]	23
2.10. Gráfico de procesos de operación estándar. Tomado de [24]	25
3.11. Representación en conjuntos de la ayuda técnica.	30
3.12. Fotografía del ensamble actual sobre la estructura base.	34
3.13. Fotografías de los soportes del conjunto motriz y el desgaste en el acople flexible y engranajes del encoder.	34
3.14. Comparación del cambio de dimensión del freno.	35
3.15. Fotografía de la carcasa de la ayuda técnica.	35
4.16. Representación en diagrama de flujo para el proceso de rediseño con perspectiva unitaria en el nodo A-0 del modelo IDEF0.	38
4.17. Representación en diagrama de flujo para el proceso descriptivo en el nodo A0 del modelo IDEF0 del rediseño de la ayuda técnica.	38
4.18. Representación en diagrama de flujo para el proceso descriptivo del diseño de los elementos del conjunto actuador en el nodo A2 del modelo IDEF0 del rediseño de la ayuda técnica.	39
4.19. Representación en diagrama de flujo para el proceso descriptivo de la simulación del ensamble en el nodo A7 del modelo IDEF0 del rediseño de la ayuda técnica.	40
4.20. Representación en software ANSYS del modelo para el análisis de elementos finitos del entorno del soporte para la unidad motriz.	42
4.21. Representación en software ANSYS del resultado para el análisis de elementos finitos del entorno del soporte para la unidad motriz.	43
4.22. Representación en software ANSYS del modelo para el análisis de elementos finitos del entorno del soporte para las chumaceras.	43

4.23. Representación en software ANSYS del resultado para el análisis de elementos finitos del entorno del soporte para las chumaceras.	44
4.24. Representación en software ANSYS del modelo para el análisis de elementos finitos del entorno de los soportes para el freno.	44
4.25. Representación en software ANSYS del resultado para el análisis de elementos finitos del entorno de los soportes para el freno.	45
4.26. Representación en software ANSYS del modelo para el análisis de elementos finitos del entorno de la placa base.	45
4.27. Representación en software ANSYS del resultado para el análisis de elementos finitos del entorno de la placa base.	46
4.28. Representación en software ANSYS del modelo para el análisis de elementos finitos de los ejes del motor y del freno.	46
4.29. Representación en software ANSYS del resultado para el análisis de elementos finitos de los ejes del motor y del freno.	47
4.30. Representación del plano de conjunto de los elementos que componen el rediseño de la ayuda técnica.	48
4.31. Representación en software AutoDesk Inventor del ensamble de la ayuda tecnica multifuncional teleoperada con los elementos diseñados y los adquiridos a proveedores.	49
4.32. Representación en software AutoDesk Inventor del soporte diseñado para el conjunto motor.	50
4.33. Representación en software AutoDesk Inventor de los soportes diseñados para las chumaceras del eje de motor y el eje de salida con el sensor capacitivo.	50
4.34. Representación en software AutoDesk Inventor de la unión para los soportes de motor y chumacera.	51
4.35. Representación en software AutoDesk Inventor de los soportes diseñados para el freno magnético, el clutch y el soporte del encoder.	51
4.36. Representación en software AutoDesk Inventor de los componentes diseñados para el soporte del encoder de posición del eje de salida.	52
4.37. Representación en software AutoDesk Inventor de la placa base diseñada para el montaje de los soportes y componentes de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.	53
4.38. Representación en software AutoDesk Inventor del eje diseñado para transmitir movimiento desde la salida del conjunto motor hasta la primera etapa del clutch.	54
4.39. Representación en software AutoDesk Inventor del eje diseñado para transmitir movimiento desde la segunda etapa del clutch y a través del freno magnético.	54
4.40. Representación en software AutoDesk Inventor del acople diseñado para conectar el eje de salida del motor al acople flexible.	55
4.41. Representación en software AutoDesk Inventor del acople diseñado para conectar el eje de salida de la ayuda técnica con el brazo actuador para las terapias.	55
4.42. Representación en software AutoDesk Inventor del acople diseñado para conectar el brazo actuador a la ayuda tecnica multifuncional teleoperada.	56
4.43. Representación en software AutoDesk Inventor de la rueda diseñada para medir el movimiento angular del eje de salida acoplándose al encoder.	56
4.44. Representación en software AutoDesk Inventor de las tapas laterales de la carcasa.	57
4.45. Representación en software AutoDesk Inventor de la tapa superior fija de la carcasa.	57
4.46. Representación en software AutoDesk Inventor de la tapa superior abatible de la carcasa.	58

4.47. Representación en software AutoDesk Inventor del utilaje de las barras de apoyo para el conjunto actuador de la ayuda técnica.	59
4.48. Representación en software AutoDesk Inventor del conjunto armado del utilaje para soportes utilizado en el ensamble de la ayuda técnica.	59
4.49. Representación en software AutoDesk Inventor de los componentes diseñados para el utilaje de soportes utilizado en el ensamble de la ayuda técnica.	60
4.50. Prototipo funcional de la propuesta de rediseño de la ayuda técnica con la integración de los componentes electrónicos y de software del grupo interdisciplinario.	61
4.51. Operaciones en CNC para la manufactura de los elementos propuestos de la ayuda técnica.	61
4.52. Registro fotográfico de los elementos manufacturados para el prototipo de la ayuda técnica.	62
4.53. Registro fotográfico del proceso de ensamble de la propuesta de rediseño de la ayuda técnica.	63
5.54. Representación en diagrama de flujo para el proceso de ensamble con perspectiva unitaria en el nodo A-0 del modelo IDEF0 de la construcción de la ayuda técnica.	65
5.55. Representación en diagrama de flujo para el proceso descriptivo en el nodo A0 del modelo IDEF0 de la construcción de la ayuda técnica.	65
5.56. Representación en diagrama de flujo para el proceso detallado de la fase de manufactura de componentes en el nodo A3 del modelo IDEF0 de la construcción de la ayuda técnica.	66
5.57. Representación en diagrama de flujo para el proceso detallado de la fase de ensamble de la ayuda técnica en el nodo A3 del modelo IDEF0 de la construcción de la ayuda técnica.	67
5.58. Portada del manual de ensamble de la ayuda técnica diseñado con el software Canva.	67
5.59. Paginas introductorias del manual de ensamble de la ayuda técnica.	68
5.60. Representaciones gráficas para el contenido del paso a paso de los ensambles del utilaje y la ayuda técnica multifuncional teleoperada.	69
5.61. Representación del esquema final del ensamble de la ayuda técnica con una imagen alámbrica generada con el software Autodesk Inventor.	69
5.62. Portada del video renderizado del ensamble de la ayuda técnica diseñado con el software Canva.	70
5.63. Representaciones a través de fotogramas del renderizado de ensamble del utilaje de soportes en software Autodesk Inventor.	70
5.64. Representación de un fotograma del renderizado para procesos de ensamble aislado de los subconjuntos de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.	71
5.65. Representaciones a través de fotogramas del renderizado de ensamble de la ayuda técnica multifuncional teleoperada en software Autodesk Inventor.	71
6.66. Renderizado del prototipo comercial de la ayuda técnica multifuncional teleoperada bajo el proyecto ALFI en un ambiente de procedimientos para terapias.	72
6.67. Representación del conjunto de la evolución de la carcasa del Proyecto ALFI y los elementos que la componen en el manual de ensamble.	73
6.68. Ensamble del prototipo de evolución de la ayuda técnica multifuncional teleoperada, Proyecto ALFI.	74
6.69. Representación del accesorio para terapia de rodilla de la evolución del Proyecto ALFI en el manual de ensamble.	75
6.70. Imagen corporativa del Spin-Off de MovaCenter.	75

6.71. Video elaborado para la presentación de la evolución del proyecto ALFI en la Spin-Off de MovaCenter.	76
6.72. Conjunto ensamblado de la propuesta de evolución de la carcasa del Proyecto ALFI y la propuesta de mejora del conjunto actuador.	76

Lista de tablas

3.1. Caracterización de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.	31
4.2. Propiedades mecánicas del Acero AISI 4140 y el Aluminio 7075 T73	41
4.3. Propiedades físicas de los elementos adquiridos a terceros fabricantes y piezas propuestas para el rediseño	41
4.4. Precargas obtenidas de MechaniCalc para cada una de las referencias de los pernos con un valor de 67,0 % el límite de elasticidad como parámetro	42

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los estudios demográficos realizados por el DANE en 2018 muestran que el 77,1 % de la población se ubica en sectores urbanos con acceso a centros médicos con tecnología y personal altamente capacitado [1]. El 22,9 % que complementa la totalidad de la población censada se ubica en sectores rurales poblados y dispersos, sectores en los que se evidencia una población con vulnerabilidad geográfica con referencia al acceso al servicio de salud especializado, como rehabilitación física [2]. Los factores que más inciden en esta población vulnerable son tres: Primero, el geográfico, debido a las distancias, los medios para llegar a estas localidades y la infraestructura vial que se utiliza. Segundo, el económico, que limita la capacidad de pago por acceso al servicio de salud. Y, tercero, el cultural, referente al conocimiento para la utilización de los servicios que depende de las condiciones de la localidad y su administración [3].

En Colombia, las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS) se clasifican en cuatro niveles según el tipo de complejidad del servicio. De acuerdo con la base de datos del Registro Especial de Prestadores de Servicios de Salud [4], los centros de nivel II y III que ofrecen servicios especializados, como rehabilitación física, están distribuidos geográficamente en las principales ciudades, como se muestra en la Figura 1.1. A nivel departamental, este tipo de institución también se centraliza en los principales municipios, como Cali y Palmira. Mientras que aquellos de nivel I, principalmente orientados a actividades de promoción y prevención, se encuentran en áreas rurales, pequeños municipios y periferias de las ciudades.

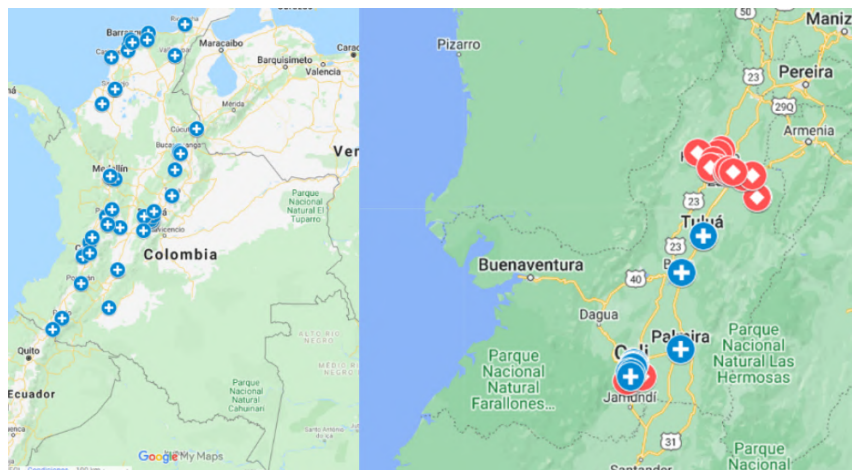


Figura 1.1: Distribución de IPS de nivel III en Colombia con énfasis en el departamento del Valle del Cauca. Tomado de [4]

Con base en los estudios realizados por [5], se observa que el 20.5 % del total de los casos de discapacidades a nivel nacional están relacionadas con el movimiento del cuerpo, manos, brazos y piernas. Además, el 27.1 % de estos casos particulares se presentan en la población con vulnerabilidad geográfica, siendo las zonas rurales dispersas las que presentan el mayor número de casos. Para el tratamiento de estas discapacidades, una de las herramientas frecuentemente utilizadas por los profesionales de la salud es la terapia física [6]. Los centros médicos más avanzados cuentan con una amplia variedad de técnicas como lo son la fisioterapia, la ergoterapia y la logopedia [7].

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Planteamiento del problema

El conjunto de estas dos situaciones, la necesidad de un servicio médico especializado para atender discapacidades de movilidad y la dificultad para que las poblaciones con vulnerabilidad geográfica accedan a este servicio, crean la necesidad de diseñar una ayuda técnica teleoperada que permita conectar un profesional de la salud con los pacientes de dichas poblaciones, diseño que fue realizado en proyectos anteriores concernientes a este tema. En este contexto, el grupo de investigación BioNovo ejecuto el proyecto denominado desarrollo de un sistema teleoperado vía internet para incrementar la cobertura de atención en rehabilitación de rodilla en pacientes con vulnerabilidad geográfica, CI 809, con el profesor José Isidro García como director. Como resultado se propuso un sistema multifuncional y teleoperado vía internet el cual fue patentado en el año 2019 mediante la resolución N.^o 71480 de la superintendencia de industria y comercio.

Actualmente, se desea comercializar la solución propuesta lo cual demanda un rediseño orientado a la producción en serie a fin de alcanzar los siguientes beneficios: disminución de los costos de fabricación y el tiempo de ensamble, pues los procesos se estandarizarán y acoplarán a una línea de producción y ensamble. Además, se disminuirá el tiempo de operación, minimizando los ajustes de la ayuda técnica por exceso de piezas y grados de libertad indeseados. Adicionalmente, se minimizarán las reclamaciones de usuario debido a insatisfacciones de operación y utilización de esta herramienta por parte de los usuarios finales. Una descripción gráfica de la problemática descrita se puede observar en la Figura 1.2 de la sección 1.2.2.

1.2.2. Árbol del problema

Para dar una solución a la problemática principal, *La baja capacidad de producción en serie del diseño de una ayuda técnica teleoperada para rehabilitación física*, se profundizó en las causas que generan dicha problemática y los efectos de esta. De esta forma, en la Figura 1.2, se muestra el Árbol del Problema, donde se encuentran consignadas las Causas en la parte inferior, siendo estas descritas de forma breve y abarcando principalmente las áreas de Diseño de la Arquitectura, Procesos de Manufactura y Ensamble de esta. En la parte superior se encuentran los Efectos que produce la problemática planteada en el centro del Árbol, tomando estos efectos desde la afectación económica de la producción, su posterior comercialización y la satisfacción del consumidor.

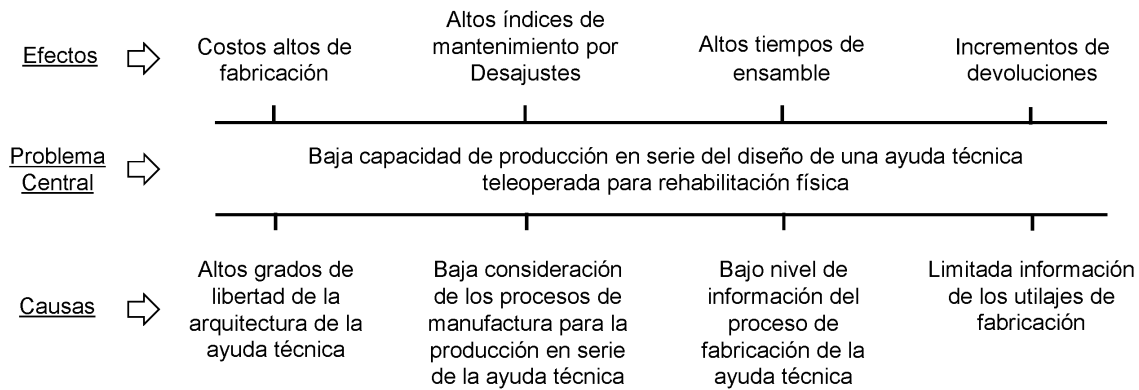


Figura 1.2: Árbol del problema

1.3. Justificación

Específicamente, este trabajo de grado atiende la problemática que se genera al no poder reproducir este modelo de una forma repetitiva y costo-eficiente. Por consiguiente, este proyecto se presenta con una justificación en dos contextos. El primero, desde la formación personal, ya que permite la integración de habilidades y competencias desarrolladas en el Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle aportando en la solución de una problemática que se presenta en una población vulnerable, como lo es la población con discapacidades de movilidad ubicada en zonas con vulnerabilidad geográfica. Y, en un segundo contexto, al considerar que la fase de fabricación es una parte integral del proceso de definición de especificaciones de la solución, el proyecto amplía el alcance de los proyectos de diseño mecánico clásico.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Rediseñar una ayuda técnica teleoperada teniendo en cuenta los procesos de manufactura necesarios para una producción en serie.

1.4.2. Objetivos específicos

- Definir los requerimientos de rediseño de la ayuda técnica teleoperada teniendo en cuenta los procesos de manufactura disponibles en el Valle del Cauca.
- Definir la arquitectura del sistema mediante un modelo funcional IDF0.
- Especificar los componentes mecánicos de la arquitectura definida y los utilajes necesarios para el ensamble mediante herramientas analíticas y/o computacionales.
- Definir un proceso de ensamblaje mediante herramientas computacionales CAD 3D.

2. Marco conceptual

2.1. Estado del arte

El desarrollo de herramientas tecnológicas que ayuden en las terapias físicas de las rehabilitaciones es de amplio interés en el ámbito de la salud y el bienestar de las personas. Un análisis a las propuestas de las diferentes compañías desarrolladoras de estas tecnologías permite hacer una distinción entre dos grupos de máquinas de acuerdo con el tipo de terapia que pueden ayudar a realizar. Adicionalmente, un sentido más globalizado de la investigación de los marcos de referencia del proyecto, distingue entre los desarrollos realizados por entidades internacionales que ya cuentan con una línea de producción y distribución de sus productos y una línea investigativa nacional. La segmentación de acuerdo con estos parámetros resulta así:

1. Desarrollos internacionales

- a) Dispositivos para terapias pasivas
- b) Dispositivos para terapias activas/pasivas

2. Desarrollos nacionales

- a) Prototipo BioNovo/Univalle

2.1.1. Desarrollos internacionales

2.1.1.1. Dispositivos para terapias pasivas

En el primer grupo se clasifican las máquinas que brindan ayuda para la realización de terapias pasivas en diferentes extremidades. En este grupo, una de las ayudas más representativas del mercado es desarrollada por la compañía japonesa Rehab Medical [8], esta compañía desarrollo el modelo LKJ-01, ver Figura 2.3a, el cual está diseñado para la rehabilitación de rodilla en terapias que se desarrollen tanto es centros especializados como en visitas al hogar pues su construcción permite una fácil portabilidad. Otros ejemplos de ayudas para la rehabilitación con terapias pasivas son el Prima Advance, desarrollado por la compañía francesa Kinetec [9], que permite la rehabilitación de rodilla, ver Figura 2.3b, y el Ortomed 4060 de la compañía Carci [10], dispositivo que permite la rehabilitación tanto de rodilla como cadera, ver Figura 2.3c. Ambos dispositivos son fácilmente portables permitiendo su uso clínico y en visitas médicas al hogar.



(a) Rehab Medical JKL-01.
Tomado de [8]



(b) Kinetec Prima Advance.
Tomado de [9]



(c) Carci Ortomed 4060.
Tomado de [10]

Figura 2.3: Ejemplos de distintos tipos de ayudas funcionales para las terapias pasivas.

2.1.1.2. Dispositivos para terapias activas/pasivas

El segundo grupo de equipos están destinados a realizar terapias tanto activas como pasivas permitiendo así un mejor seguimiento del paciente pues completa gran parte de su rehabilitación con el mismo equipo. Uno de los equipos más representativos de este segmento es el desarrollado por la empresa estadounidense Chattanooga [11], el dispositivo llamado Active-K permite desarrollar terapias activas y pasivas en las extremidades inferiores, este dispositivo también está desarrollado de forma tal que puede ser transportado a diferentes lugares y cumplir así con sus funciones para terapias rutinarias en visitas médicas al hogar, ver Figura 2.4a. También pertenecientes a este grupo, pero con una diferencia de portabilidad, pues desarrollan su trabajo en plantas hospitalarias fijas, se encuentran los dispositivos Kinevia, ver Figura 2.4b, desarrollado por la compañía francesa Kinetec [12] y el MOTomed muvi, ver Figura 2.4c, desarrollado por la compañía mexicana Equipos Interferenciales [13], ambos equipos desarrollan terapias tanto pasivas como activas en miembros inferiores y superiores.



(a) Chattanooga Active-K.
Tomado de [11]



(b) Kinetec Kinevia. Tomado de [12]



(c) Equipos Interferenciales
MOTomed muvi. Tomado de [13]

Figura 2.4: Ejemplos de ayudas funcionales para las terapias activas/pasivas.

Ninguno de los dispositivos anteriormente mencionados cuenta con el desarrollo de una operación a distancia integrado en su diseño (teleoperación), estos están pensados para la rehabilitación física en centros especializados y visitas médicas al hogar dentro del área urbana, donde el transporte y monitoreo de estos es económico y fácil de realizar.

2.1.2. Desarrollos nacionales

2.1.2.1. Prototipo BioNovo/Univalle

A nivel nacional, la ayuda técnica multifuncional teleoperada, ver Figura 2.5, desarrollada a través de diferentes proyectos de grado en la Universidad del Valle [14][15] es capaz de desarrollar tanto terapias activas como pasivas, clasificando así en el segundo grupo de equipos mencionado antes. Este dispositivo cuenta también con la posibilidad de ser fácilmente transportado, pues está diseñado con el fin de ayudar a poblaciones con vulnerabilidad geográfica. La diferencia con los otros dispositivos del segmento está en su diseño pensando en su producción en serie, ya que este modelo no se ha podido comercializar por su difícil y costoso ensamble.



Figura 2.5: Ayuda técnica multifuncional teleoperada desarrollada en la universidad del valle.
Tomado de [14]

Como se ha mostrado anteriormente, se han logrado identificar distintos desarrollos comerciales de equipos para terapias activas y pasivas a nivel internacional [8][9][10][11][12][13], pero el desarrollo de ayudas técnicas a nivel nacional [14][15] se ha visto limitado a involucrar solo la parte de diseño y no continuar con la etapa de manufactura, por esto se ha avanzado poco y no se ha logrado concretar un equipo que sea comercializable.

2.2. Marco teórico

En esta sección, se presentan conceptos fundamentales que resultan esenciales para la comprensión del proyecto. Se exploran temas cruciales como la asistencia técnica teleoperada, delineando su relevancia y aplicación práctica en la ejecución del proyecto. Además, se examinan aspectos

vinculados al diseño, desglosando sus componentes esenciales y resaltando la importancia de una planificación meticulosa en este ámbito. La sección también se adentra en los procesos de manufactura, ofreciendo una visión panorámica que abarque desde la concepción hasta la producción tangible. Finalmente, se discute la fase de implementación, destacando estrategias clave para asegurar una ejecución eficiente y exitosa. Esta exposición de conceptos básicos proporciona una base para comprender la complejidad y el alcance del proyecto.

2.2.1. Ayuda técnica teleoperada

La ayuda técnica multifuncional teleoperada es un sistema diseñado para trabajar como unidad en dos lugares geográficos diferentes, esto gracias a sus características de teleoperación. El desarrollo completo de sus funciones se debe a 7 factores que componen el sistema total. En la Figura 2.6 se presenta el esquema de funcionamiento de la ayuda técnica y sus componentes. Como se aprecia, en el lugar geográfico 1, el especialista interactúa con una computadora para poder realizar las intervenciones pertinentes durante la terapia. La terapia ocurre en el lugar geográfico 2, en este se encuentra ubicados 4 factores del sistema, un computador, un coequipero, la ayuda técnica y el paciente. En este lugar el coequipero sirve como intermediario entre el especialista y el conjunto ayuda técnica-paciente, de esta forma se transmite información que permita realizar una adecuada intervención por parte del especialista hacia el paciente. El séptimo factor que compone este sistema es el internet, que no tiene ubicación específica pues es una red global y permite, en este caso, conectar los dos computadores ubicados en los dos lugares geográficos y así dar paso a la teleoperación de la ayuda técnica [14].

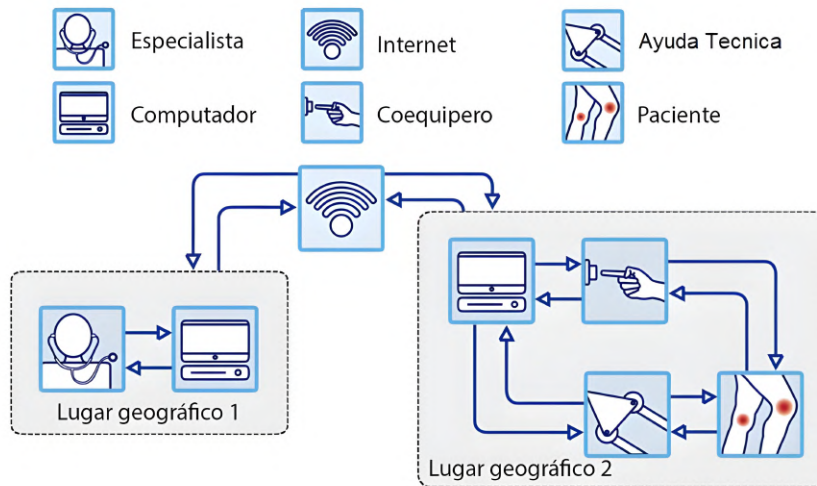


Figura 2.6: Representación esquemática de los factores involucrados en la operación de la ayuda técnica y sus interacciones. Tomada de [14]

La ayuda técnica se desarrolló para intervenir en la rehabilitación física de una persona a través de terapias físicas realizadas por un especialista desde un lugar geográfico distinto al del paciente. Estas terapias físicas se desarrollan de dos tipos, terapia pasiva y terapia activa. Para realizar estas tareas la ayuda técnica cuenta con un sistema motor compuesto de un conjunto encoder-motor-reductor que genera el movimiento, amplifica la fuerza y mide la posición angular del eje. El eje

de salida de este conjunto es el que lleva el movimiento a el paciente por medio del dispositivo de tipo férula que esté conectado a la extremidad del paciente [15].

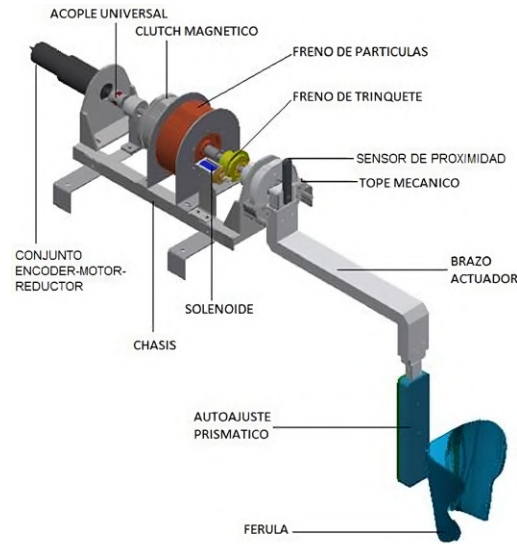


Figura 2.7: Representación de los componentes principales de la ayuda técnica multifuncional teleoperada, modelo renderizado. Tomada de [15]

En la Figura 2.7 se muestra una vista renderizada del ensamble de los componentes de la ayuda técnica. En el extremo de entrada encontramos el sistema motor (encoder-motor-reductor), luego es dispone de un clutch magnético que permite la conexión y desconexión de la transmisión de movimiento, posterior a este encontramos un freno de partículas que genera una fuerza que se opone a cualquier movimiento externo ejercido sobre el brazo actuador [15].

2.2.1.1. Rehabilitación física

La rehabilitación se refiere a la restauración de la persona que padece una discapacidad hasta el máximo límite posible: físico, mental, social, profesional y económico. La efectividad de la rehabilitación depende obviamente del potencial de recuperación del paciente, lo que determina la efectividad del tratamiento para contrarrestar la enfermedad. Por lo tanto, debe entenderse que el grado de aceptación de los tratamientos relacionados varía entre los pacientes [16].

Hay distintos tipos de rehabilitación física que se adoptan de acuerdo con las necesidades del paciente y las limitaciones de este. Entre las formas más comúnmente usadas se encuentran: Las ortesis o férulas dinámicas, que son ayudas biomecánicas que restauran funciones del sistema musculo- esqueleto. El kinesiotaping, cuya técnica consiste en el vendaje de masa muscular para ayudar en su fortalecimiento en los tramos lesionados del musculo. Exoesqueletos, que permiten asistir las capacidades del paciente para recuperar la función de músculos debilitados por no usarlos en largos periodos de tiempo. Y como ejemplo final está el movimiento continuo pasivo, que consiste en asistir el movimiento del paciente especialmente en recuperación de miembros inferiores [16].

2.2.1.2. Tipos de terapia

Terapia pasiva: Este tipo de tratamiento incluye movimientos asistidos de las extremidades del paciente, estos movimientos están totalmente guiados por fuerzas externas específicas para la

rehabilitación cuya intensidad y el alcance dependen de la experiencia del ejecutante. Por lo general, se implementa en las primeras etapas de la recuperación y son realizadas por un fisioterapeuta o su asistente [17].

Terapia activa: Este tipo de terapia se basa en el movimiento repetitivo de las extremidades del paciente. Estos movimientos generan fuerzas aplicando resistencia o carga corporal para fortalecer los músculos dañados por la lesión. La operación suele realizarse en instalaciones dotadas con máquinas diseñadas para ejercer estas fuerzas a través de contrapesos o elementos elásticos. Estas terapias son supervisadas por un fisioterapeuta y su asistente [17].

2.2.1.3. Teleoperación

La teleoperación se entiende como un conjunto de tecnologías que permiten extender las capacidades de control de la máquina del operador a ubicaciones remotas. El término teleactuación se refiere a la capacidad de manipular de forma remota los actuadores del sistema y la telesensorización realiza la captura o visualización remota de las señales enviadas por los sensores. Es a través de la unión de las técnicas de teleactuación y telesensorización, además de la ayuda de un grupo de sensores que componen el sistema, que el equipo se puede controlar de forma remota y también se puede comprender su interacción con el entorno. Es por esto por lo que el tipo y nivel de interacción entre el sistema y el entorno definen la clase y el número de sensores que deben integrarse en el sistema. Los sistemas teleoperados constan de los siguientes elementos: Operador (en este caso, teleoperador), dispositivo teleoperado, controles y canales de comunicación, interfaz y sensores [18].

2.2.2. Diseño

Diseñar es un proceso de planificación en el cual se formula un planteamiento inicial como respuesta a una necesidad específica, un problema en concreto o por innovación. Durante el proceso de diseño se integran diferentes herramientas teóricas y prácticas, esta integración se aprecia tanto en el trabajo individual como también en el trabajo en conjunto de personal capacitado en distintas disciplinas. El diseño requiere de mucha comunicación, trabajo iterativo y toma de decisiones, estas últimas dependen de la información disponible para el proceso de diseño, esta información puede ser escasa o excesiva y confusa, por esta razón, el diseñador debe ser una persona capaz de integrar diferentes conocimientos (matemática, estadística, gráficos, lenguaje, herramientas computacionales, idiomas, etc.) y de esta forma tomar las mejores decisiones. Si el planteamiento y el desarrollo subsecuente tienen éxito, se debe obtener como resultado final un producto que sea útil, competitivo, seguro, funcional, confiable y que se pueda desarrollar y comercializar [19].

2.2.2.1. Diseño en Ingeniería Mecánica

La ingeniería mecánica cuenta con una extensa base teórica que capacita a sus ingenieros en las áreas de mecánica de sólidos y fluidos, termodinámica, procesos de manufactura, teorías de electricidad y uso de herramientas computacionales. De la integración de estas diferentes áreas que componen la disciplina se obtienen relaciones con la producción y el procesamiento de energía, desarrollo de medios de producción, herramientas de transporte y técnicas de automatización [20].

Los problemas reales que se afrontan desde el punto de vista de la ingeniería mecánica están lejos

de ser problemas particulares y especializados. El diseño de un elemento de maquina puede requerir del conocimiento de flujo de fluidos, transferencia de calor, fricción, transporte de energía, selección de materiales, tratamientos termo-mecánicos, descripciones estadísticas, etc. Existen enunciados tales como diseño mecánico, diseño de sistemas térmicos, diseño de modelos simulados y diseño de elementos de máquinas, todas ellas hacen referencia a formas específicas del diseño en ingeniería mecánica y más aún, el diseño en ingeniería mecánica es una forma específica del diseño en general, por lo tanto se conserva el crisol del diseño que es la integración de diferentes áreas de conocimiento para dar respuesta a un problema específico [20].

2.2.2.2. Proceso de diseño

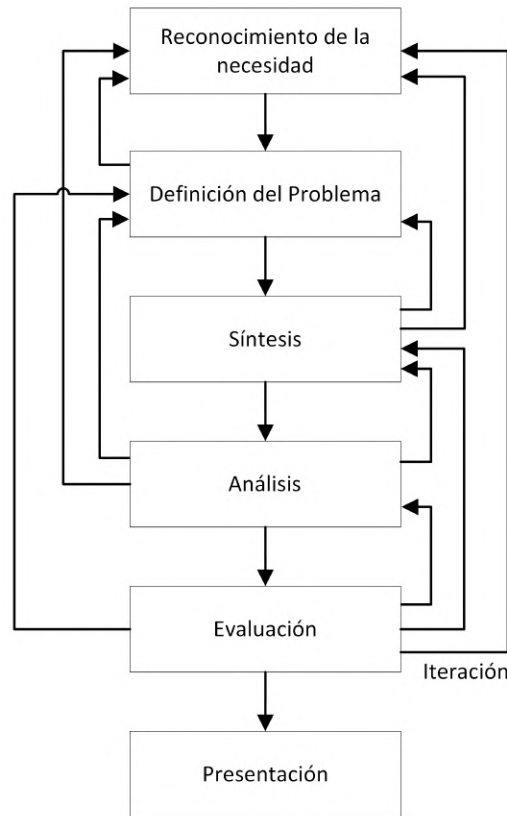


Figura 2.8: Representación esquemática de las principales etapas de diseño y las relaciones iterativas entre ellas. Tomada de [20]

El proceso de diseño es altamente iterativo y necesita de la comprobación de pasos previos para garantizar un correcto avance hacia los siguientes. Una representación de forma esquemática con los aspectos más importantes del diseño se presenta a continuación, ver Figura 2.8. Este proceso inicia con el reconocimiento de una necesidad y la decisión de resolverla. Luego se avanza por una serie de pasos que dan sentido a la forma final a través de un proceso iterativo de comprobación y avance. Al finalizar este proceso se espera tener como resultado los planes para satisfacer la necesidad reconocida como objetivo principal [19].

Hay una diferencia entre el reconocimiento de la necesidad y la definición del problema. La primera es un planteamiento que requiere de experiencia y creatividad para identificar la necesi-

dad en base a la primera información que se obtiene, información que puede tener especificaciones técnicas que faciliten la identificación o presentarse en un lenguaje informal que requiera de experiencia y creatividad para su análisis. La segunda involucra aspectos más específicos del producto que se va a diseñar, implica la identificación de las entradas y salidas que tendrá el producto así como también las restricciones y parámetros que determinen el entorno en el cual se desarrollará la solución [19].

Es común llamar a la síntesis de un esquema que conecta posibles elementos del sistema como “invención del concepto” o “diseño conceptual”. En este proceso deben proponerse distintos esquemas y analizarlos para cuantificarse en una medida que permita compararlos. Los esquemas se evaluarán para ver si su desempeño es satisfactorio, y si lo es, determinar cuan bien se desempeñará, de no cumplir con los parámetros, se analizan y mejoran, si la mejora no es posible, entonces se desechan. Como se puede apreciar, la síntesis, la mejora y la evaluación tienen una relación estrecha y altamente iterativa [20].

Por último, se presentan los resultados obtenidos. Esta etapa es la más importante del diseño, pues es en ella en la que se le da forma a todo el trabajo anterior de manera que se pueda comprender por los interesados en la solución de la problemática. También es en este punto en el que la solución se vende y por consiguiente se vende el propio diseñador [20].

2.2.2.3. Herramientas y recursos para diseño en ingeniería

La ingeniería asistida por computadora (CAE) describe las diferentes aplicaciones de las computadoras en la ingeniería. En el caso particular de la ingeniería mecánica existen varias clases de programas de acuerdo con la necesidad del diseñador, por ejemplo, herramientas para el análisis de elementos finitos (FEA), para el análisis de la dinámica computacional de fluidos (CFD) y software para el análisis del movimiento de mecanismos (Working Model). Estas herramientas realizan análisis de ingeniería específicos, aun así, no se consideran una herramienta para el diseño como lo es el CAD [21].

Los programas de diseño asistido por computador (CAD) permite al usuario elaborar modelos tridimensionales de piezas y desarrollar distintos tipos de planos de acuerdo con las vistas ortogonales que se requieran. Adicional a esto, el software CAD permiten realizar cálculos con exactitud de las propiedades de la pieza tales como esfuerzos, momento de inercia, masa, etc. variando parámetros como el material o las fuerzas aplicadas. También permite realizar una amplia cantidad de mediciones de su geometría por compleja que sea. Además, estos programas integran algunas de las herramientas para análisis mencionadas anteriormente, haciéndolos así softwares muy completos para la elaboración de diseños y se convierten en una herramienta vital para el diseñador [21].

2.2.3. Procesos de manufactura

La palabra manufactura proviene del latín y traduce “hecho a mano”, traducción que se remonta a varios siglos de antigüedad y que evidencia la forma en la que se llevaban a cabo los procesos de fabricación en esos tiempos. En la actualidad, los procesos de manufactura son realizados por maquinaria automatizada y controlada por personal capacitado a través de computadoras [22].

En el contexto actual, la manufactura se puede definir como la aplicación de diferentes procesos, tanto físicos como químicos, para transformar la materia prima de un producto y lograr así piezas o productos de acuerdo con las características especificadas, además de estos procesos de fabricación,

también se cuenta como proceso de manufactura el ensamble de distintas piezas para conformar un producto mayor. Los procesos de manufactura resultan de una combinación adecuada de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual. Por lo general, hasta en las piezas menos complejas, la manufactura se desarrolla como una secuencia ordenada de múltiples operaciones, logrando en cada etapa una pieza más próxima al resultado esperado [22].

2.2.3.1. Proceso de diseño

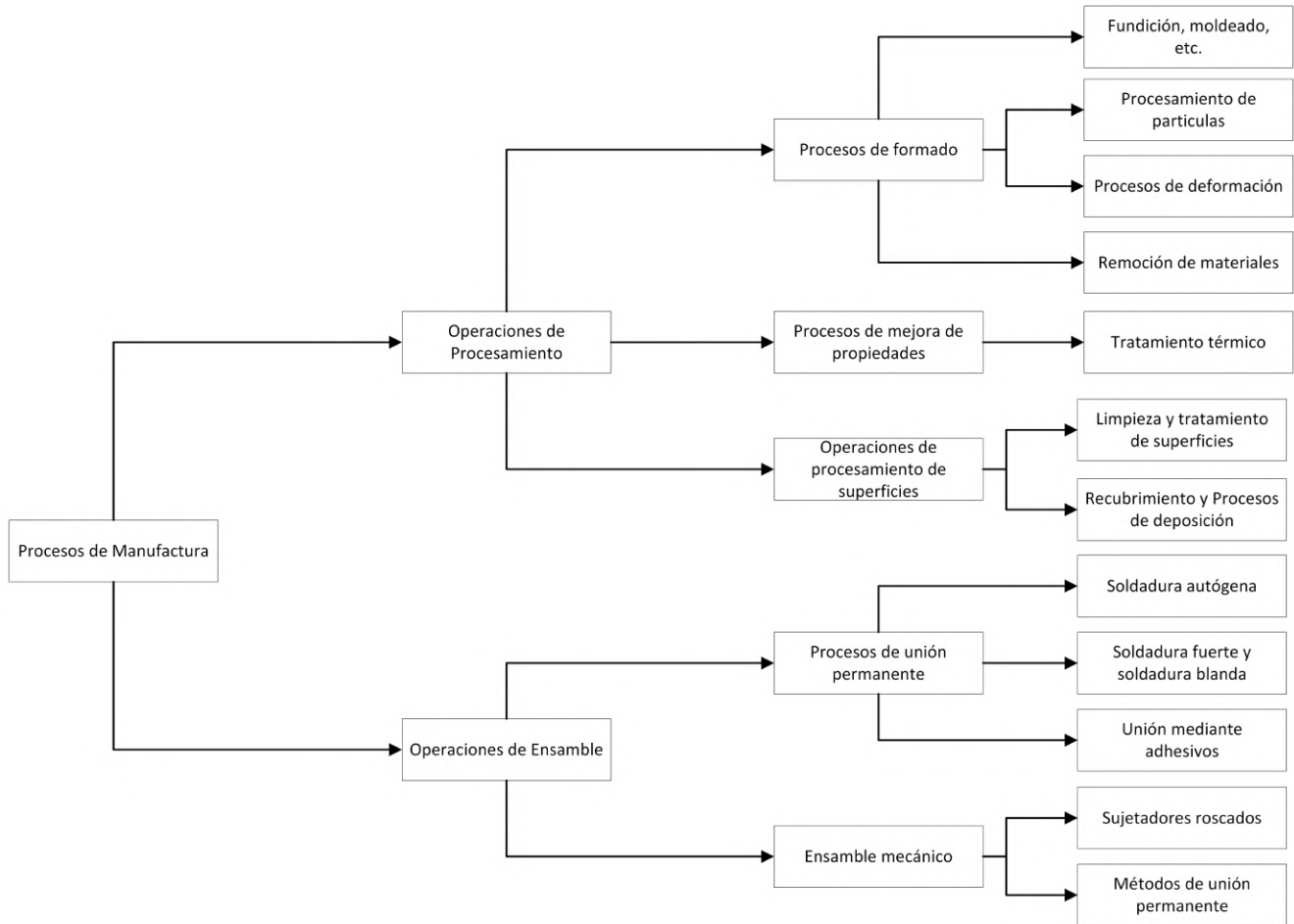


Figura 2.9: Esquema representativo de los procesos de manufactura y sus divisiones categóricas. Tomado de [22]

Como se puede ver en la Figura 2.9, los procesos de manufactura se agrupan en dos tipos. La primera, operaciones de procesamiento, agrupa los procesos en los cuales el material de trabajo se procesa de un estado a otro en el cual se le da valor agregado a su geometría, propiedades físicas o apariencia. La segunda, operaciones de ensamblado, agrupa a los procesos donde el producto final consta de la unión de dos o más componentes con el fin de lograr un producto nuevo llamado ensamble, subensamble u otro termino que designe al producto como resultado de la unión de sus piezas componentes [22].

2.2.3.2. Operaciones de procesamiento

Las operaciones de procesamiento utilizan energía para modificar la forma, las propiedades físicas o la apariencia de las piezas, lo que agrega valor al material. Las formas de energía incluyen la mecánica, térmica, eléctrica y química. La energía se aplica de forma controlada a través de maquinaria y herramientas. También se requiere mano de obra, pero los trabajadores generalmente intervienen antes y después de cada ciclo de operación para controlar la máquina, supervisar la operación y cargar y descargar piezas. Como se observa en la Figura 4, dentro de las operaciones de procesamiento se distinguen tres categorías. La primera, operaciones de formado, incluyen procesos que transforman la forma del material por medio de distintos métodos, los más comunes son: Fundición, moldeado, procesamiento de partículas, procesos de deformación y remoción de materiales. La segunda, procesos de mejora de propiedades, cambia las propiedades de los materiales sin afectar la forma, generalmente se realiza a través de tratamientos térmicos. El tercer y último grupo, operaciones de procesamiento de superficies, abarca los procesos para limpiar, tratar, recubrir o depositar material sobre la superficie de la pieza, procesos como estos se aprecian en el cromado y pintado de una pieza [22].

2.2.3.3. Operaciones de ensamblado

Los procesos de ensamblado son aquellos en los que dos o más piezas que inicialmente se encontraban separadas se unen para formar un nuevo producto final. Estos componentes se conectan de forma permanente o semipermanente. Los procesos de unión permanente incluyen soldadura homogénea, soldadura fuerte, soldadura blanda y unión adhesiva, estos forman una combinación de componentes que no se pueden separar fácilmente. Existen métodos de ensamblaje mecánico que pueden fijar dos o más partes en una sola pieza y se pueden desmontar cuando sea conveniente. El uso de tornillos, remaches y otros sujetadores mecánicos son métodos tradicionales importantes en esta categoría. Otras técnicas de ensamblaje mecánico para formar una conexión permanente incluyen remaches, ajustes de presión y ajustes de expansión. En el montaje de productos electrónicos, se utilizan métodos especiales de unión y sujeción. Algunos de estos métodos son iguales o aplicables a los procesos anteriores, tales como la soldadura blanda. El montaje electrónico implica principalmente el montaje de componentes, como paquetes de circuitos integrados, en placas de circuitos impresos para producir los circuitos complejos que se utilizan en muchos productos en la actualidad [22].

2.2.3.4. Líneas de producción

En la línea de producción o línea de montaje, el tiempo de ciclo más corto es beneficioso para el efecto de aprendizaje del equipo de trabajo al realizar repetidamente la misma tarea. Además, al reducir el tiempo del ciclo, la operación es menos difícil. Las máquinas también son más específicas, por lo que necesitan realizar menos tareas, por lo que pueden ser más eficientes y cada máquina requerir de menos inversión, aunque el conjunto acumulado de máquinas puede ser más caro y menos flexible. La línea de producción reduce las posibles categorías de productos, pero debido a que hay pocas categorías es fácil distinguir y separar las actividades de valor agregado y las actividades sin valor agregado y, una vez separadas estas actividades, se pueden optimizar. Las tareas de la línea de producción se relacionan entre sí a través de los productos que generan, por lo que es necesario establecer un conjunto de relaciones prioritarias a la hora de diseñar la línea de producción. El modo más común de implementar el denominado “one piece flow”, son las líneas de producción. Entre ellos, las máquinas y los recursos se ordenan según el orden de tareas, y los

productos se pasan de una maquina a otra de forma más o menos automatizada y directa. En la línea de montaje, los productos se fabrican mediante la agregación de materiales, por lo que se puede decir que el flujo de llegada de materiales es muy importante. Además, en la línea de montaje suele haber mano de obra cuando la línea está en funcionamiento y las actividades se llevan a cabo de acuerdo con el ritmo de funcionamiento. La actividad básica en el proceso de diseño de estas líneas es el equilibrio entre la denominada línea y el diseño del puesto de trabajo [23].

2.2.3.5. Gráficos de operación y flujo de procesos

Los diagramas de operaciones y flujos de procesos, estandarizados por la ASME en 1947, representan una metodología fundamental en la ingeniería mecánica para la documentación, análisis y mejora de la eficiencia del flujo de trabajo, como se muestra en la Figura 2.10. Estas herramientas, desarrolladas en las primeras etapas de la modernización industrial, proporcionan una visión detallada y estructurada de los procesos operativos, permitiendo la identificación de cuellos de botella, redundancias y pasos innecesarios. En el contexto actual, su relevancia persiste en diversas áreas, desde la manufactura hasta los servicios, adaptándose a tecnologías modernas y metodologías ágiles. La optimización de procesos conduce a una mayor productividad y calidad, principios fundamentales en la gestión de operaciones moderna. A través del análisis crítico de las contribuciones históricas y la aplicación contemporánea de estos diagramas, se busca comprender cómo las técnicas establecidas por la ASME han evolucionado y cómo pueden aplicarse efectivamente en el entorno actual para impulsar la mejora continua y la excelencia operativa [24].

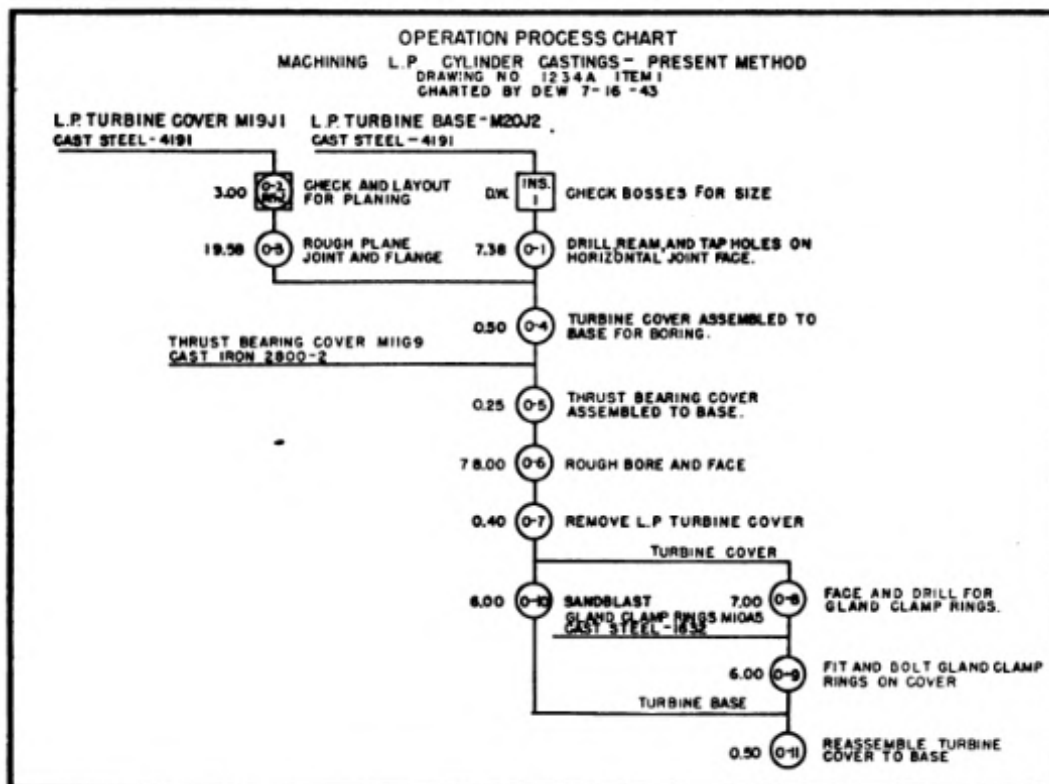


Figura 2.10: Gráfico de procesos de operación estándar. Tomado de [24]

2.2.4. Implementación

Desde un enfoque gerencial, la implementación debe considerar la complejidad de las rutinas, actividades e interacciones que inician y mantienen el proyecto. Esta reflexión es útil para los desarrolladores de proyectos porque les permite identificar aquellos procesos y sistemas en los que deben tomar acciones para mejorar el desempeño de sus programas [25].

Por otro lado, el pensamiento estratégico sobre la implementación se centra en cómo las operaciones y los procesos de control de gestión agregan valor a los planes actuales. La gestión y el pensamiento estratégico de la implementación, ayuda a los desarrolladores de proyectos a mejorar la comprensión de sus propias actividades. Pero, lo que es más importante, les ayuda a descubrir nuevas oportunidades y luego les ayudará a determinar las capacidades (capacidades de gestión y organizativas) que deben mejorarse o desarrollarse en el campo de la gestión de operaciones y el control de gestión [25].

2.3. Marco metodológico

2.3.1. Metodología

El enfoque metodológico adoptado para el desarrollo de este proyecto se basó en una secuencia de pasos que garantizaron una progresión lógica y eficiente. Inicialmente, se delinearon objetivos específicos que, de manera interconectada, establecieron un marco que guió el proceso. Cada objetivo, al ser cumplido, marcó el punto de partida para la consecución del siguiente, generando una coherencia en la evolución del proyecto. Para lograr estos objetivos, se desglosaron en actividades concretas que acotaban, en tiempo y avance, cada uno de estos. Al culminar todas las actividades asociadas a un objetivo específico, se obtuvo un entregable que no solo validó el logro de dicho objetivo, sino que también proporcionó una base tangible para la progresión del proyecto en su conjunto. La secuencia de objetivos, actividades y entregables se presenta a continuación, complementada con breves explicaciones detallando la ejecución de cada actividad.

2.3.1.1. Definir los requerimientos de rediseño de la ayuda técnica teleoperada teniendo en cuenta los procesos de manufactura disponibles en el Valle del Cauca

Para el cumplimiento de este objetivo se establecieron las siguientes actividades:

1. **Caracterización de la ayuda técnica:** Se hizo una inspección física de la ayuda técnica existente, evaluando tanto su eficacia como su idoneidad para el proyecto en curso. Además, se obtuvo asesoramiento directo de aquellos involucrados en trabajos anteriores relacionados con la ayuda técnica, aprovechando su experiencia y perspectivas para fundamentar los cambios requeridos. La inspección de los planos del modelo actual proporcionó una comprensión visual y técnica, identificando posibles áreas de mejora y optimización.
2. **Análisis del funcionamiento de la ayuda técnica con su ensamble actual:** Se realizaron pruebas de funcionalidad con la versión existente de la ayuda técnica con el fin de interiorizar los aspectos funcionales críticos de la versión y derivar de estos los registros apropiados para alinear los cambios necesarios con la funcionalidad requerida.

3. **Análisis de los componentes que presentan dificultad a la hora de ensamblar la ayuda:** Se inicio el despiece de la ayuda técnica, acompañado de un registro de los pasos para su ensamblaje y despiece. Se realizó un análisis de las piezas críticas, identificando las áreas de mejora, y se evaluaron las posibles dificultades de ensamblaje. Este enfoque permitió una comprensión clara de la estructura y la optimización de componentes clave.
4. **Definir los requerimientos de los componentes que se reemplazaran:** Se realizo una revisión de los datos derivados de la caracterización y el análisis de la ayuda técnica. Este análisis minucioso no solo permitió identificar patrones significativos, sino que también sirvió como cimiento para comprender a fondo las particularidades y requisitos del proyecto. Posteriormente, se llevó a cabo una investigación detallada sobre los procesos de manufactura esenciales para el diseño de los componentes identificados en la etapa anterior. Esta investigación abordó tanto aspectos teóricos como prácticos, asegurando una base sólida para las decisiones de diseño. Finalmente, se implementaron matrices de decisión para evaluar los modelos propuestos, proporcionando un marco sistemático para la comparación de opciones y facilitando la selección de aquellas que mejor se alinearan con los objetivos y requisitos del proyecto.

Indicador de cumplimiento

Luego de cumplir con todas las actividades de este objetivo, se reporta como entregable, el sumario de requisitos de la ayuda técnica que permita una producción en serie.

2.3.1.2. Definir la arquitectura del sistema mediante un modelo funcional IDF0

Para el cumplimiento de este objetivo se establecieron las siguientes actividades:

1. **Plantear la geometría y materiales para los nuevos componentes:** Se desarrollo un análisis de la matriz de parámetros de los componentes, donde se examinaron las especificaciones técnicas y características principales. Este análisis proporcionó una comprensión más precisa de los requisitos y funcionamiento de cada elemento, sirviendo como base para la etapa de modelamiento a través de software CAD de los nuevos componentes diseñados. Este proceso no solo permitió visualizar virtualmente las modificaciones propuestas, sino que también facilitó la identificación de posibles mejoras y la optimización de la funcionalidad general. Simultáneamente, se buscó asesoría y se llevó a cabo una investigación para seleccionar los materiales más adecuados para las nuevas piezas, considerando factores como resistencia, durabilidad y compatibilidad con el diseño propuesto.
2. **Establecer las condiciones del entorno de cada uno de los elementos:** Se modelo la intersección de los componentes y su entorno utilizando software para crear representaciones detalladas. Este enfoque no solo buscó visualizar la disposición precisa de los elementos, sino también permitir la cuantificación de las cargas que actúan sobre ellos. Este proceso permitió una evaluación cuantitativa para optimizar la resistencia y el rendimiento de los componentes en condiciones de carga real.
3. **Verificación del correcto funcionamiento de los nuevos elementos en el ensamble de la ayuda técnica:** Se evaluó a través de software la resistencia y la integridad de los componentes. Estos modelos permitieron simular diferentes escenarios y cargas, aplicando criterios para identificar posibles puntos de fallo o debilidad en la estructura. Este proceso

contribuyo a la detección de posibles vulnerabilidades, y sirvió como base para realizar ajustes y mejoras en el diseño, asegurando así la robustez y el rendimiento óptimo de los componentes en situaciones de carga real.

Indicador de cumplimiento

Luego de cumplir con todas las actividades de este objetivo, se reportan como entregables, las especificaciones de la geometría y los materiales para cada una de las piezas, el modelo IDEF0 de la arquitectura propuesta y el modelo representativo del ensamble en software CAD.

2.3.1.3. Especificar los componentes mecánicos de la arquitectura definida y los utilajes necesarios para el ensamble mediante herramientas analíticas y computacionales

Para el cumplimiento de este objetivo se establecieron las siguientes actividades:

1. **Definir los parámetros de función de los utilajes necesarios para el ensamble de la ayuda técnica:** Se realizó la inspección del ensamblaje de los nuevos componentes, así como las necesidades de acople de todos los elementos del sistema. Se verificó la alineación precisa, la integridad estructural y la funcionalidad adecuada de cada componente en el conjunto. Además, se prestó especial atención a las interacciones entre los nuevos elementos y los componentes existentes, garantizando una correcta integración. La evaluación abordó no solo aspectos visuales, sino también la verificación de tolerancias y medidas exactas para asegurar un ajuste ideal. De este análisis se derivaron los requerimientos de los utilajes necesarios para garantizar todas las evaluaciones anteriormente realizadas, consolidando la información necesaria para el diseño de los utilajes.
2. **Plantear la geometría y materiales para los utilajes:** Se analizó la matriz de parámetros de funcionamiento de los utilajes. Esta evaluación permitió definir la resistencia, durabilidad y eficiencia operativa de cada componente. Posteriormente, se procedió al modelamiento de los utilajes mediante software CAD, permitiendo una visualización detallada y precisa de cada elemento. Finalmente, se buscó asesoría especializada y se llevó a cabo una investigación para seleccionar los materiales más adecuados de acuerdo con el modelamiento de los utilajes. La combinación de modelamiento preciso y selección de materiales informada aseguró no solo un diseño eficiente, sino también la durabilidad y confiabilidad de los utilajes en su aplicación práctica.

Indicador de cumplimiento

Luego de cumplir con todas las actividades de este objetivo, se reportan como entregables, las especificaciones de la geometría y los materiales para cada una de las piezas del utilaje y el modelo representativo del ensamble en software CAD.

2.3.1.4. Definir un proceso de ensamblaje mediante herramientas computacionales CAD 3D

Para el cumplimiento de este objetivo se establecieron las siguientes actividades:

1. **Analizar el despiece de la ayuda técnica y escoger una estrategia de ensamble eficiente:** Se realizó un análisis detallado de las piezas componentes y su disposición dentro del ensamble, buscando identificar la secuencia más eficiente y funcional para el ensamblaje. Este proceso no solo consideró la interacción de las piezas entre sí, sino también su integración en el ensamble global. Se evaluaron criterios de eficiencia, como la minimización de pasos y la optimización del tiempo de ensamblaje, para seleccionar la estrategia más eficiente. Además, se implementaron matrices de decisión que proporcionaron un marco sistemático para evaluar diferentes enfoques de ensamblaje. Estas matrices consideraron factores como la complejidad de la tarea, los recursos necesarios y la robustez del resultado final. En conjunto, este enfoque integral desde el despiece hasta la estrategia de ensamble, respaldado por análisis detallados y matrices de decisión, aseguró la implementación de una estrategia de ensamblaje eficiente y optimizada para la ayuda técnica.
2. **Desarrollar el plan para el ensamble de la ayuda técnica en la línea de ensamble:** Se realizó una investigación, aprovechando la experiencia y conocimientos de profesionales con una trayectoria destacada en el sector de producción y ensamble industrial. Se realizaron consultas y asesorías con expertos que poseen una visión práctica y contextualizada de los desafíos y mejores prácticas dentro de la industria. Este enfoque estratégico no solo permitió acceder a un conocimiento especializado sobre tecnologías emergentes, eficiencias de producción y soluciones innovadoras, sino que también ofreció perspectivas valiosas sobre las tendencias actuales y futuras del sector. La colaboración con profesionales experimentados garantizó la integración de prácticas probadas y un enfoque realista en el desarrollo de estrategias para la producción y ensamble, mejorando así la eficiencia y la calidad en cada fase del ensamble.
3. **Modelar el proceso usando software CAD:** La etapa de comunicación visual y documentación del proceso se llevó a un nivel más dinámico mediante la creación de un vídeo detallado utilizando las avanzadas herramientas de ensamblaje disponibles en software CAD. Este enfoque no solo permitió una representación tridimensional inmersiva del ensamble, sino que también ofreció una narrativa visual que destacó de manera efectiva cada paso del proceso.

Indicador de cumplimiento

Luego de cumplir con todas las actividades de este objetivo, se reportan como entregables, las instrucciones de ensamble de la ayuda técnica teleoperada y el modelo renderizado del paso a paso del ensamble de la ayuda técnica.

3. Definición de los requerimientos de rediseño

3.1. Caracterización de la ayuda técnica

La ayuda técnica, al inicio de este proyecto, presentaba un ensamble funcional y un prototipo capaz de llevar a cabo las tareas para las que fue diseñado, aun así, su diseño no permitía una replicabilidad y escalabilidad que fuesen costo eficientes tanto en recurso humano como en recursos económicos. Una vez identificados los principales problemas de esta, representados esquemáticamente en la Figura 1.2 (Árbol del problema), se procedió a realizar la inspección física para caracterizar el estado actual de la máquina y poder realizar un compendio de los requerimientos específicos de la ayuda técnica. Para poder adoptar una metodología ágil en el desarrollo del rediseño, se dividió la máquina en subconjuntos que cumplieran un propósito en específico, acotando así, los desarrollos que requieren cada uno de los conjuntos. En la Figura 3.11, se puede ver una fotografía del ensamble actual de la máquina, con la división y nombre de los conjuntos que se acotaron.

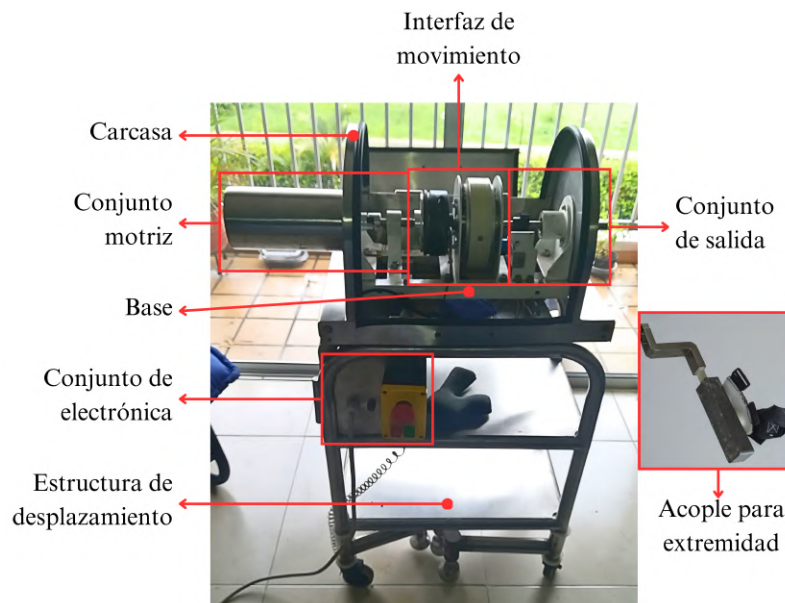


Figura 3.11: Representación en conjuntos de la ayuda técnica.

Para completar la caracterización detallada de los conjuntos, se realizó la Tabla 3.1, en la cual se pueden evidenciar los subconjuntos en los que fue dividida la ayuda técnica, los componentes de cada uno de estos y la función de cada conjunto en particular.

Tabla 3.1: Caracterización de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.

Conjunto	Componentes	Función
Conjunto motriz	Motor Reductor Encoder Eje motor Acople flexible Soporte eje motor Rodamiento	Este conjunto se encarga de generar el movimiento del eje que se conecta con el acople de la extremidad. Este realiza trabajo cuando se hace terapia pasiva. El motor eléctrico y el reductor actúan en conjunto para generar el movimiento y el encoder se encarga de regular la ubicación angular del eje. El eje transmite el movimiento y el soporte le da estabilidad a este.
Interfaz de movimiento	Clutch Freno magnético Eje salida Soporte clutch Soportes de freno	Admite el cambio en la dirección del flujo de movimiento. El clutch permite la desconexión del eje del motor y el eje de salida, con el fin de permitir la generación de movimiento desde ambas direcciones. Por su parte, el freno magnético, se opone a los movimientos con el fin de requerir un esfuerzo de acuerdo con el tipo de terapia que se esté realizando. Los soportes posicionan los elementos y, en el caso del clutch, restringen el giro axial de este.
Conjunto de salida	Engranaje cuenta vueltas Encoder Freno mecánico	Consta de los elementos que monitorean la terapia y previenen el mal funcionamiento de la máquina para salvaguardar la integridad del usuario. El encoder toma la posición angular gracias al engranaje cuenta vueltas y con ello, garantiza que el eje se mueva dentro de los rangos permisibles que se han preestablecido.
Base	Ángulos para ubicación de los elementos	Estructura armada con ángulos metálicos que se encargan de posicionar los elementos soportes y anclarlos al conjunto total de la máquina. Permiten la alineación de los ejes (de motor y de salida) para que los mismos sean concéntricos durante el funcionamiento de la ayuda técnica. Garantizan la estabilidad de los soportes para darle rigidez al ensamble de la máquina.

Conjunto	Componentes	Función
Conjunto de electrónica	Caja metálica Botones de acción y parada Tarjeta madre Cableado eléctrico Buses	Permite la conexión de los elementos electrónicos que se encargan de regular el flujo energético y realizar el control de los componentes electromecánicos para garantizar el correcto funcionamiento de la ayuda. También realiza la conexión remota de la máquina para poder ejercer su teleoperabilidad.
Carcasa	Bisagras Laminas roladas Empaques	Recubre el conjunto motriz, interfaz de movimiento y conjunto de salida para protegerlos de golpes que puedan afectar a sus componentes, además, aísla la ayuda de condiciones ambientales desfavorables. Así mismo, cuando se lo requiere, permite el acceso a los componentes para su mantenimiento.
Estructura para desplazamiento	Chasis de montaje Ruedas Brazos de anclaje	Permite el desplazamiento de la ayuda técnica en los lugares donde prestara su servicio. Facilita la ubicación de la ayuda técnica para garantizar su operabilidad en diferentes entornos. Cuenta con un sistema de bloqueo al suelo para poder estabilizar la estructura durante el uso de esta a la hora de realizar terapias o a la hora de ser transportada en vehículos de un lugar a otros.
Acople para extremidad	Extensor Autoajuste prismático Férula	Es la interfaz entre máquina y usuario. Hace posible la realización de la terapia, ajustando la férula a la extremidad y permitiendo el posicionamiento de esta de acuerdo con las diferentes morfologías humanas gracias a su autoajuste prismático.

3.2. Análisis del funcionamiento de la ayuda técnica con su ensamble actual

El funcionamiento de la ayuda técnica depende del tipo de terapia que esta esté realizando. Cuando la terapia es pasiva, el flujo de movimiento va desde el sistema motor hasta el paciente, ya que en esta terapia se busca lograr un movimiento repetitivo de la extremidad sin que esta requiera ejercer una fuerza. Por otro lado, cuando la terapia es activa, el flujo de movimiento se da desde el paciente hacia la máquina, debido a que en este tipo de terapia se requiere que el músculo realice trabajo y para ello la máquina genera una resistencia que debe ser vencida por la fuerza del paciente. En ambos tipos de terapia hay 3 elementos fundamentales para el correcto flujo de movimiento, el eje del motor, el eje del freno magnético y el clutch.

En la terapia pasiva, el motor debe proporcionar el movimiento a la extremidad del paciente, por lo tanto, el eje del motor y el eje del freno deben ser solidarios. Esta continuidad del movimiento se logra gracias al acople del clutch, quien permite la transmisión de movimiento desde el eje del motor hasta la extremidad del paciente pasando por el eje del freno magnético. En este tipo de terapia el eje del freno se encuentra libre, para esto el freno magnético se deja fuera de funcionamiento. El encoder en el conjunto de salida registra la rotación angular del eje para indicarle al motor cuando debe detenerse y regresar a la posición inicial. Una vez recibida esta señal, se realiza una transición de movimiento en sentido contrario luego de una breve pausa. Así las cosas, la terapia pasiva registra datos de las posiciones angulares del encoder del conjunto motriz y el encoder del conjunto de salida.

En la terapia activa, la musculatura de la extremidad de la persona es la que debe realizar trabajo, por esto, la ayuda técnica se programa con una resistencia que el paciente debe vencer con su propia fuerza. En este caso, el flujo de movimiento va desde el paciente hacia la máquina, en este sentido, el motor debe permanecer en reposo y libre del torque realizado por el paciente, ya que, en caso contrario, el motor podría generar daños a la extremidad del paciente y así mismo. Para tal fin, el clutch desacopla el eje del motor y el eje del freno, además, se pone en funcionamiento el freno y se prepara con una resistencia de valor fijo que el paciente debe superar para realizar la terapia de forma exitosa. En este tipo de terapia el encoder del eje de salida registra el desplazamiento angular logrado por el paciente, con el fin de que el operario pueda ajustar el valor de la resistencia ejercida por el freno magnético.

Los encoders brindan información no solo para el correcto funcionamiento de la máquina, como parte de un equipo de control mecánico, sino que recopilan información con el fin de ser analizada por el operario para analizar la condición del paciente, poder desarrollar una terapia efectiva y tener el sustento para la validación de sus decisiones.

3.3. Análisis de la manufactura en la ayuda técnica

Al inspeccionar los componentes que constituyen el cuerpo de la máquina se encontraron diversas piezas que estaban fuera de su respectivo lugar o dañadas debido a la inestabilidad del conjunto armado. Esta inestabilidad se producía por los altos grados de libertad presentes en el ensamble del chasis que servía de base para el montaje del conjunto motriz, la interfaz de movimiento y el conjunto de salida, este conjunto se presenta en la Figura 3.12.

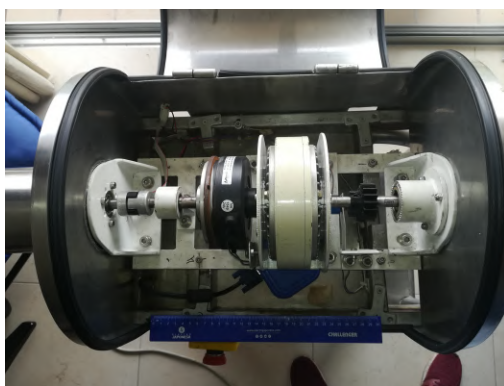


Figura 3.12: Fotografía del ensamble actual sobre la estructura base.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, las estructuras que sirven de base están hechas de ángulos de acero, tubos cuadrados y uniones en forma de T. Ninguno de estos elementos presentaba una correcta alineación, además, las guías no presentaban ningún tipo de garantía para asegurar el paralelismo o perpendicularidad de los elementos según fuera el caso. Estas múltiples fallas en la base trajeron consigo el deterioro prematuro de múltiples piezas tales como el acople flexible y los engranajes para el encoder, Figura 3.13.

Por otro lado, los soportes construidos para los ejes del conjunto motriz y el conjunto de salida carecían de la perpendicularidad y el paralelismo suficiente para garantizar la concentricidad del eje del motor y el eje del freno magnético, generando así esfuerzos indeseados en los rodamientos internos de estos elementos y los rodamientos de los soportes pedestal que brindaban apoyo a dichos ejes, Figura 3.13.

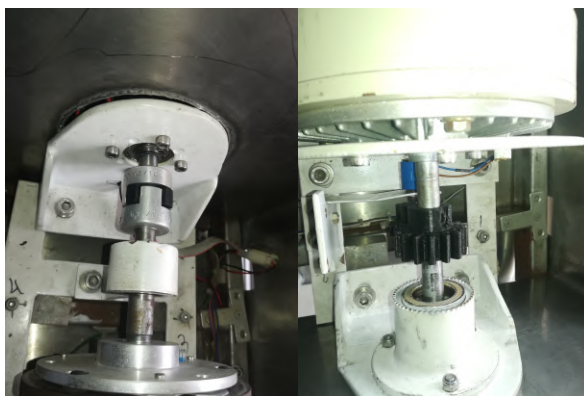


Figura 3.13: Fotografías de los soportes del conjunto motriz y el desgaste en el acople flexible y engranajes del encoder.

Adicionalmente, los ejes sufrieron desgastes prematuros debido a la falta de concentricidad anteriormente mencionada y la falta de rigidez en el conjunto motriz a la hora de desempeñar el movimiento de estos. Debido a estos desgastes y al cambio de la geometría tanto de la base como de los soportes de los elementos, es necesario reemplazar también los ejes, por lo que se consideraron como una pieza con fallas.

Así también, el conjunto total de los elementos anteriormente descritos presenta múltiples dificultades a la hora de realizar el ensamble de la ayuda técnica. Esto debido principalmente

a los múltiples grados de libertad en la unión de los elementos. Esto hacía que no se pudiera lograr precisión en las medidas, que no se pudiera garantizar paralelismo y perpendicularidad entre los diferentes planos de la máquina y que el ensamble tardar mucho más tiempo del esperado, dificultando así su producción en serie y su futuro plan de mantenimiento.

Dado que este prototipo de la ayuda técnica era funcional, se realizó una evaluación de los resultados obtenidos de las experimentaciones realizadas con la máquina. En dicho análisis, se evidenció que todos los elementos funcionales cumplían las tareas que tenían asignadas a excepción del freno magnético, cuya resistencia máxima era inferior a la que un adulto promedio podría ejercer, limitando así el funcionamiento de la ayuda técnica a pacientes con cuadros graves de lesiones o pacientes con masa muscular baja debido a su desarrollo (Niños). Por este motivo, al iniciar este proyecto, ya se contaba con la adquisición de un freno magnético más robusto, lo que supuso también un cambio en el ensamble de la máquina debido al cambio de dimensión de este elemento, Figura 3.14.

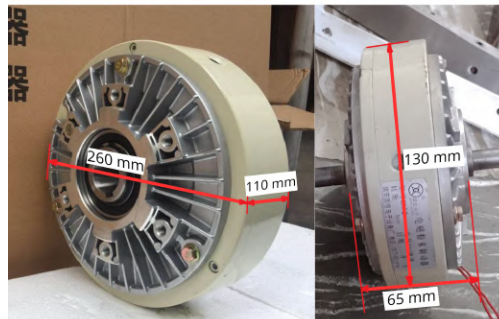


Figura 3.14: Comparación del cambio de dimensión del freno.

Sumados a los elementos que presentaban dificultades o fallas, se encontraba la carcasa de la ayuda técnica. Este elemento brindaba protección de golpes directos en el sistema funcional, además de brindar un mejor acabado y dar valor agregado a la terminación de la máquina, Figura 3.15. Este elemento, afectaba también la forma en la que se ensamblaba la ayuda técnica pues contaba con un compartimiento de difícil acceso para alojar el parte del conjunto motoriz. Por este motivo, los tiempos de ensamble y mantenimiento se incrementaban considerablemente, pues un mantenimiento al motor, reductor o encoder, precisaba de un desensamble completo de la máquina, lo cual es costoso, poco eficiente y sumamente complejo considerando que el volver a ensamblarla acarrearía con todos los problemas anteriormente mencionados.



Figura 3.15: Fotografía de la carcasa de la ayuda técnica.

3.4. Definición de los requerimientos de los componentes que se reemplazaran

1. **Placa base:** Dadas las funciones que desempeña la base dentro del ensamble, se requiere que pueda garantizar el paralelismo y/o perpendicularidad de los elementos que soporta. También se requiere que sea una base rígida que no sufra de pandeos que desestabilicen el conjunto que soporta. Se requiere que cuente con guías que hagan más eficiente y efectivo el ensamble de la ayuda técnica. Además, se requiere de un material que brinde la resistencia necesaria para el correcto funcionamiento de la máquina, pero que no aporte mucho peso, ya que esta solución no puede generar problemas de movilidad, debido a que es uno de los factores más importantes de la teleoperación.
2. **Soportes:** Los Soportes son los encargados de la sujeción y alineación de los elementos que componen el sistema motriz, además de soportar la carga del peso de cada uno de ellos, por estos motivos se requiere que los elementos se fabriquen en un material liviano, pero con la suficiente capacidad de asumir estas cargas. Los soportes deben garantizar principalmente el correcto alineamiento de los elementos, ya que de esto depende la concentricidad de los ejes y el correcto funcionamiento de todo el sistema motriz, por este motivo los soportes deben garantizar el paralelismo y perpendicularidad necesario para alinear todos los componentes, además, deben diseñarse de tal forma que, en conjunto con las guías de la base, permitan un ensamble más eficiente y unos futuros mantenimientos más rápidos y seguros.
3. **Ejes:** Los Ejes están encargados del movimiento de la terapia. Por lo tanto, se requiere que sean capaces de soportar los esfuerzos generados durante la acción de la ayuda técnica sin producir deformaciones que interrumpan el correcto funcionamiento de la ayuda técnica a la hora de brindar el servicio. Adicionalmente, son responsables de interconectar al paciente con el sistema motor y a su vez son responsables de interconectar diferentes elementos de este sistema, por tal motivo, deben diseñarse los cambios de sección necesarios para poder acoplar todos los elementos y garantizar el flujo de movimiento según lo demande el tipo de terapia.
4. **Carcasa:** Teniendo en cuenta las funciones que cumple la carcasa de la máquina, se requiere que brinde protección al sistema motriz de posibles impactos directos en sus elementos componentes y de generar valor agregado en el apartado estético de la ayuda técnica, por estos motivos se requiere que carcasa sea tanto robusta como estética y que además permita el fácil acceso al sistema motriz completo para mejorar tanto los tiempos de ensamble como de mantenimiento.

4. Propuestas de mejora para la ayuda técnica

Una vez realizada la inspección de los elementos, y habiendo determinado anteriormente los requerimientos individuales de cada uno de los mismos, Sección 3.4, se procedió a realizar propuestas de modelos de forma tal que cumplieran, primeramente, con los requerimientos individuales y, posteriormente, con las relaciones de conjunto para así poder analizar su funcionamiento solidario con cada uno de los elementos que componen los subconjuntos de la ayuda técnica. De igual forma, una vez diseñado la totalidad de las piezas, se diseñaron los utilajes para el ensamble de la máquina.

En la práctica, cada una de las propuestas del rediseño de los elementos fue realizada en base a subconjuntos que permitían acotar la totalidad de la ayuda técnica en grupos de elementos más pequeños, Tabla 3.1, esto con el fin de facilitar el diseño iterativo, validando la solución total a través de la suma de las soluciones individuales de estos subconjuntos. Para efectos prácticos y que contribuyan a la legibilidad del presente documentos, en la siguiente sección, se presentaran las soluciones individuales, en grupos de acuerdo con la función que cumple cada elemento y no así, en orden con los subconjuntos anteriormente mencionados.

4.1. Diagrama IDEF0 para el rediseño de la ayuda técnica

En la representación sistemática del rediseño de la ayuda técnica, se establece un diagrama IDEF0 con la descripción de las etapas a desarrollar para obtener una propuesta del rediseño del actual modelo de la ayuda técnica. En un primer momento se presenta el nodo A-0, Figura 4.16, con la representación del objetivo general del diagrama y, en los posteriores flujos, Figuras 4.17, 4.18 y 4.19, se representa la profundización de las etapas de mayor complejidad como subprocesos del proceso general.

La representación en el diagrama IDEF0 inicia con el nodo A-0 de la Figura 4.16, en este se representa el objetivo principal del diagrama como una única entidad, rediseñar la ayuda técnica multifuncional teleoperada. Esta entidad tiene a su izquierda las entradas e insumos requeridos para lograr dicho objetivo como lo son, la antigua versión de la ayuda técnica y los nuevos componentes adquiridos. A la derecha tiene representado el resultado de alcanzar dicho objetivo, que es la propuesta de rediseño de la ayuda técnica multifuncional teleoperada acorde a los requerimientos. Como controles del proceso, parte superior, se indican normativas y soportes técnicos y teóricos de vital importancia para estandarizar, regular y controlar los procesos que se realizaron con el fin de que estos ofrecieran resultados de calidad. Por último, en la parte inferior, se registraron los mecanismos necesarios para llevar a cabo las operaciones posteriormente descritas como subprocesos del objetivo general del diagrama.

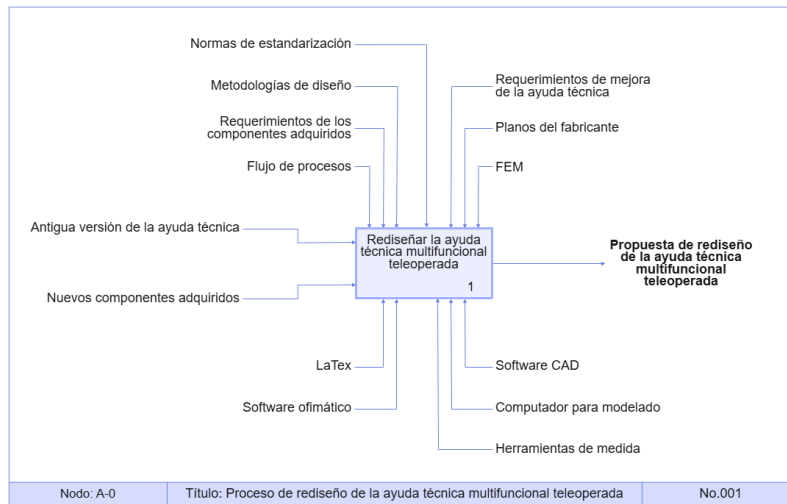


Figura 4.16: Representación en diagrama de flujo para el proceso de rediseño con perspectiva unitaria en el nodo A-0 del modelo IDEF0.

En la Figura 4.17, se aprecia el desglose del objetivo principal del diagrama IDEF0 del rediseño de la ayuda técnica, Figura 4.16. En este se aprecian las principales etapas a desarrollar y los insumos, mecanismos y controles requeridos para producir las salidas deseadas. La etapa inicial hace referencia a la necesidad de establecer los parámetros de dimensión de los nuevos elementos dispuestos para este proyecto y obtener así parámetros para diseñar las nuevas piezas del conjunto actuador. La segunda etapa se enfocó en el diseño de los elementos del conjunto actuados, ejes, soportes y placa base, los cuales son fundamentales para lograr el funcionamiento de la ayuda técnica y permiten dimensionar los demás elementos como lo son los acoples y la carcasa. En la tercera y cuarta etapa se diseñaron, respectivamente, los acoples para los elementos que requerían dicha interfaz y la carcasa que cubría todo el conjunto actuador, resultando tanto de estas como de la etapa inmediatamente anterior, los planos de fabricación de dichos elementos.

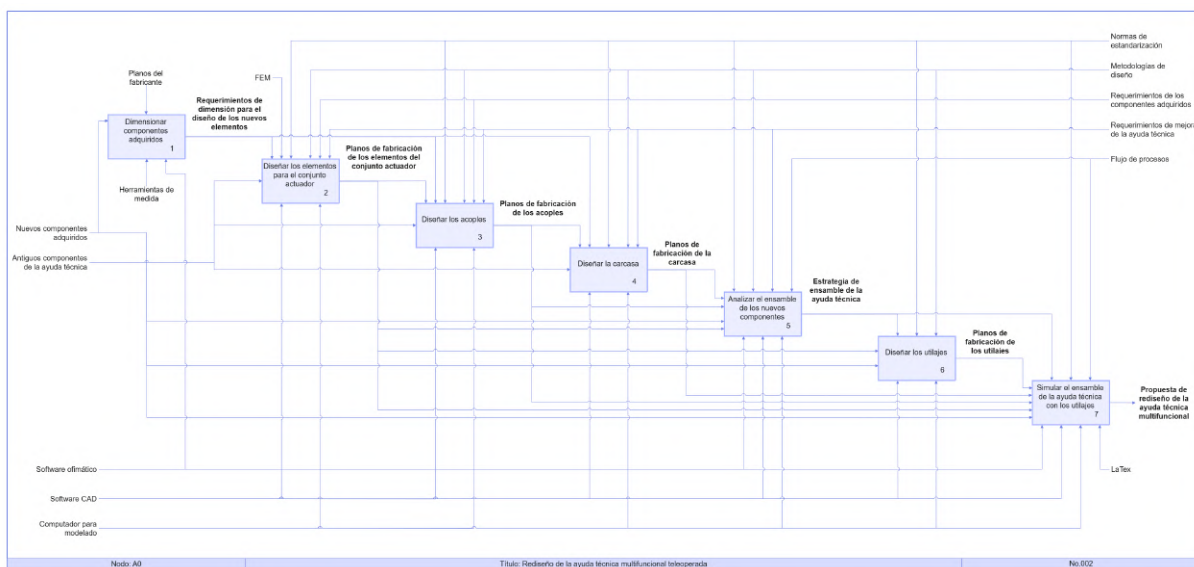


Figura 4.17: Representación en diagrama de flujo para el proceso descriptivo en el nodo A0 del modelo IDEF0 del rediseño de la ayuda técnica.

Las ultimas tres etapas del nodo A0 del diagrama IDEF0, Figura 4.17, desarrollan los procesos de ensamble de la ayuda técnica, en estos, inicialmente, se realiza un análisis del ensamble de los componentes diseñados y los componentes adquiridos para lograr la integración de todos, posteriormente se diseñan utilajes que permitan mejorar la eficiencia del ensamble en pro de una implementación para su producción en serie y finalmente, se realiza una simulación en software CAD del proceso de ensamble de todos los elementos con ayuda de los utilajes dando así como resultado la propuesta de rediseño de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.

En la Figura 4.18 se de talla el proceso de diseño de los elementos del conjunto actuador. Los elementos se separaron en conjuntos de acuerdo con la función que desempeñan dentro del ensamble de la ayuda técnica. Los conjuntos de elementos de ejes, soportes y la placa base se representan con las etapas 1, 2 y 3 indicando los insumos necesarios para el proceso y los mecanismos y controles que se disponían para el mismo. Cada uno de estos da como resultado las propuestas para la elaboración de los mismos, y así también, cada una de ellas se lleva a la etapa 4 donde se analiza el correcto funcionamiento del elemento. En caso de que la pieza cumpla con las condiciones requeridas, se presenta como resultado exitoso su plano de fabricación y, en caso de que la pieza no cumpla, se rediseñara volviendo a su etapa de origen y presentando así un ciclo de diseño iterativo.

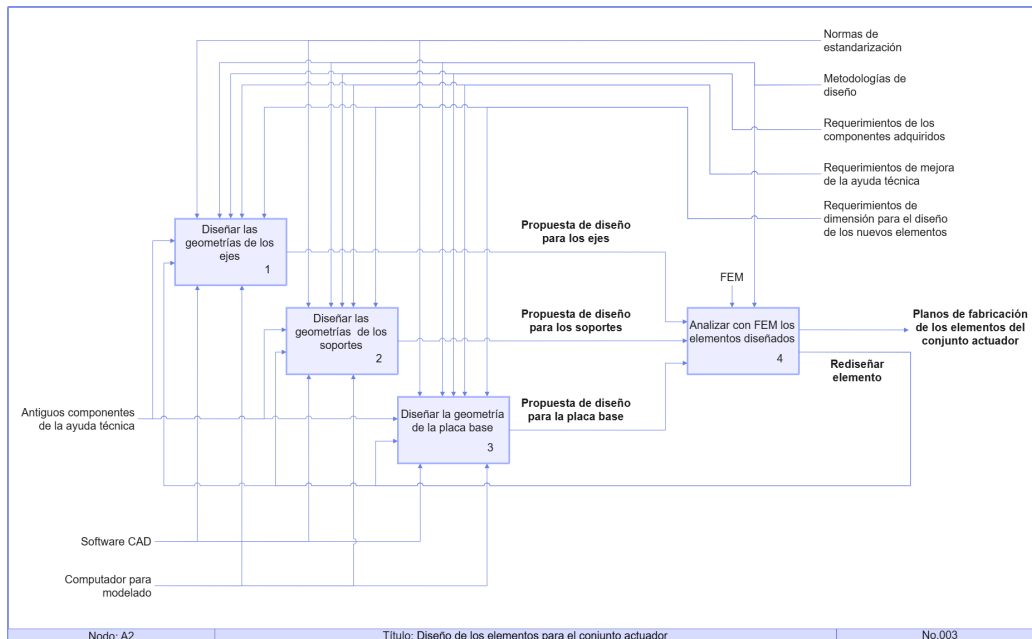


Figura 4.18: Representación en diagrama de flujo para el proceso descriptivo del diseño de los elementos del conjunto actuador en el nodo A2 del modelo IDEF0 del rediseño de la ayuda técnica.

El proceso de simulación del ensamble de la ayuda técnica se evidencia en la vista de detalle del nodo A7 del diagrama IDEF0, Figura 4.19. Inicialmente se plantea el detallado del paso a paso del ensamble como punto de partida vital para poder desarrollar las demás actividades, de esta se obtiene como resultado el orden secuencial de ensamble de la máquina. Luego, se procesa este resultado en Autodesk Inventor que permite el desarrollo de esta secuencia con los ensambles de los elementos diseñados en el software. Una vez realizada esta simulación, se procedió a realizar el manual y el video del renderizado de este proceso a través de la misma herramienta. Una vez finalizados todos estos procesos se cumplió el objetivo principal, Figura 4.16, a través de la

documentación de todos los resultados obtenidos en las etapas descritas a lo largo del desarrollo del plan de trabajo del diagrama IDEF0 del rediseño de la ayuda técnica dando como resultado el consolidado de la propuesta de rediseño.

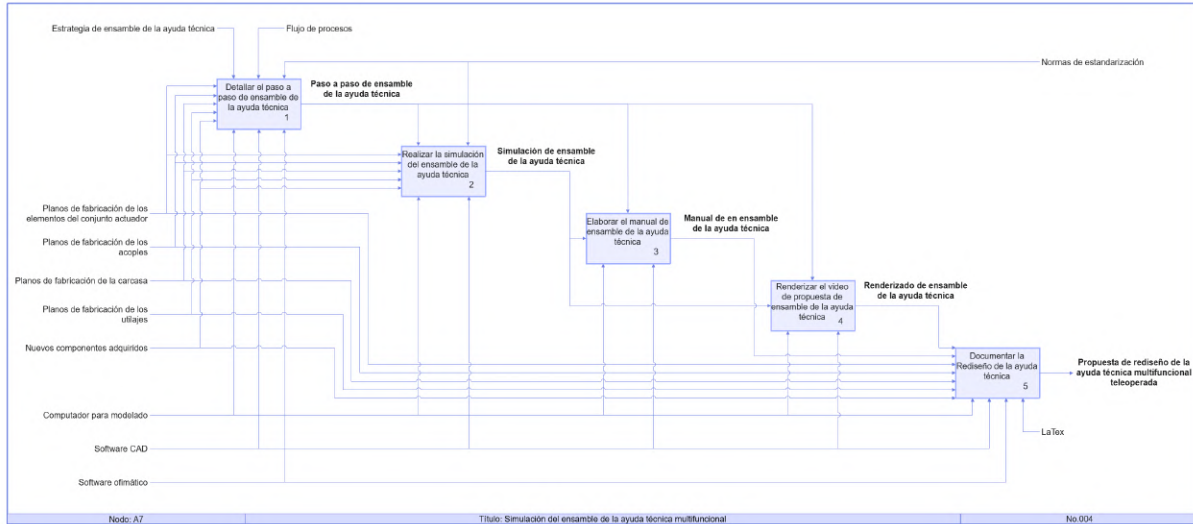


Figura 4.19: Representación en diagrama de flujo para el proceso descriptivo de la simulación del ensamble en el nodo A7 del modelo IDEF0 del rediseño de la ayuda técnica.

4.2. Condiciones de entorno de los elementos

Para el análisis de la interacción de los elementos en la intersección del ensamble de los mismos, se utilizó el software CAE, ANSYS, y su modelado a través del método de elementos finitos (FEM). Se plantearon seis escenarios de análisis de acuerdo con los conjuntos seleccionados con el fin de optimizar la resolución del estudio en el software. Los casos de análisis se realizaron entre los elementos diseñados y las piezas aledañas para simular de una mejor manera las cargas debidas a los cuerpos y en los contactos generados entre estas, todo lo anterior aplica para todos los casos a excepción de los dos ejes propuestos dado que la solución más óptima para estos elementos se encontró en el análisis individual de la pieza con todas las cargas externas aplicadas sobre el mismo.

El primero de estos casos es el del soporte de la unidad motriz, cuyo entorno está compuesto de la unidad motriz y el acople al eje de salida de esta, además de los pernos como elemento de fijación; luego se analizaron los soportes de las chumaceras, que están compuestos por las chumaceras BF15 y los ejes de las mismas, con dos pernos como elementos de fijación; posteriormente los soportes del freno, cuyo conjunto consta del freno magnético, el eje de este y doce elementos de fijación entre el freno y los soportes; así las cosas se analizó la placa base, escenario que se compone de los elementos anteriormente descritos y los respectivos pernos como elementos de fijación y, finalmente, los ejes de salida de la unidad motriz y de del freno magnético, en cuyos casos, como se mencionó anteriormente, se analizaron los elementos de manera aislada.

4.2.1. Consideraciones iniciales

Al iniciar la inspección de las condiciones de entorno, se elaboraron unas tablas de valores de los elementos pertinentes para cada una de las situaciones. Dichas tablas, Tabla 4.2, 4.3 y 4.4, contienen, respectivamente, las propiedades mecánicas de los materiales propuestos para el rediseño de los elementos, las propiedades físicas de los elementos presentes en cada una de las situaciones y los elementos de rediseño y, finalmente, una tabla con los cálculos de las precargas de los elementos de fijación de acuerdo con su respectiva referencia.

La primera de estas tablas, Tabla 4.2, describe las propiedades mecánicas del Acero AISI 4140 y el Aluminio 7075 T73. Estos materiales se usaron a lo largo de toda la propuesta dadas sus propiedades de resistencia mecánica y buen maquinado además de su alta resistencia a la corrosión puesto que, como es objetivo de la ayuda técnica, la maquina esta pensada para alcanzar poblaciones vulnerables con posibles ambientes de alta humedad y salinidad, además de esto, y dada la proyección que tiene el proyecto para futuros desarrollos, estos materiales están en orden con lograr certificaciones de comercialización y estandarización como lo es la ISO9001.

Tabla 4.2: Propiedades mecánicas del Acero AISI 4140 y el Aluminio 7075 T73

Material	Densidad [kg/m^3]	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson	Límite de elasticidad [MPa]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]
Acero AISI 4140	7850	210	0,30	415	655
Aluminio 7075 T73	2810	71,7	0,33	435	505

La Tabla 4.3, presenta las propiedades físicas tanto de los elementos adquiridos a terceros fabricantes: Unidad motriz, freno de partículas, clutch magnético y chumaceras; así también, presenta las propiedades físicas de los elementos propuestos para el rediseño: Soporte para unidad motriz, soportes para chumaceras, soportes para freno, acople para eje del motor y la placa base. Las propiedades se buscaron en orden de realizar los modelos para el análisis de elementos finitos en el software ANSYS, por tal motivo, las propiedades tenidas en cuenta fueron: Masa, peso (con una gravedad supuesta de $9,810m/s^2$) y torque nominal.

Tabla 4.3: Propiedades físicas de los elementos adquiridos a terceros fabricantes y piezas propuestas para el rediseño

Elemento	Masa [kg]	Peso [N]	Torque nominal [Nm]
Freno de partículas	16,24	159,31	100
Clutch magnético	4,90	48,07	
Unidad motriz	9,42	92,41	40
Chumacera BF15	1,40	13,73	
Acople eje motor	0,26	2,59	
Eje del motor	0,49	4,77	
Eje del freno	2,85	27,96	
Soporte de la unidad motriz	1,02	9,99	
Soportes de chumaceras	0,83	8,13	
Soporte izquierdo del freno	1,76	17,26	
Soporte derecho del freno	1,51	14,78	
Placa base	4,33	42,49	

Finalmente, se presenta la tabla de las precargas de los elementos de fijación. Estas se obtuvieron a través de las estandarizaciones de las referencias y con el software MechaniCalc en sus bases de datos de consideraciones y cálculos previos. Para los cálculos, se preciso de: El grado de los pernos, el diámetro y el paso de la rosca. De esta manera, el software calculo las precargas con base en el parámetro del porcentaje del límite elástico.

Tabla 4.4: Precargas obtenidas de MechaniCalc para cada una de las referencias de los pernos con un valor de 67,0 % el límite de elasticidad como parámetro

Perno	Fuerza de precarga [N]	Coefficiente de torque	Torque de instalación [Nm]
M10 x 1,5	16073	0,197	31,70
M6 x 1,0	5578	0,199	6,66
M5 x 0,8	3931	0,198	3,40

4.2.2. Soporte de la unidad motriz

El análisis del entorno del soporte de la unidad motriz consta de los siguientes elementos: Unidad motriz Maxon, que se encuentra ensamblada al soporte a través de una unión pernada de cuatro tornillos M5x0,8 y el acople del eje de la unidad motriz a el eje que lo conecta con el clutch magnético, Figura 4.20. Para este análisis se emplearon los valores de peso de los elementos, el torque nominal de la unidad de la unidad motriz, Tabla 4.3, y la precarga para los pernos de la Tabla 4.4, además, se fijaron las dos superficies del plano $Z - X$ del soporte que empotran en la ranura de la placa base. Los contactos de las superficies pernadas se asumieron como contactos con fricción con un coeficiente de 0,2 y una distribución radial simétrica. Dadas las restricciones de la cantidad de elementos de la licencia académica de ANSYS se parametrizo un tamaño de elemento de 2 mm y un refinamiento de 2 puntos en las superficies de contacto. El material del soporte es Aluminio 7075 T73, Tabla 4.2. Así las cosas, se procedió a resolver el modelo para el esfuerzo equivalente de von-Mises.

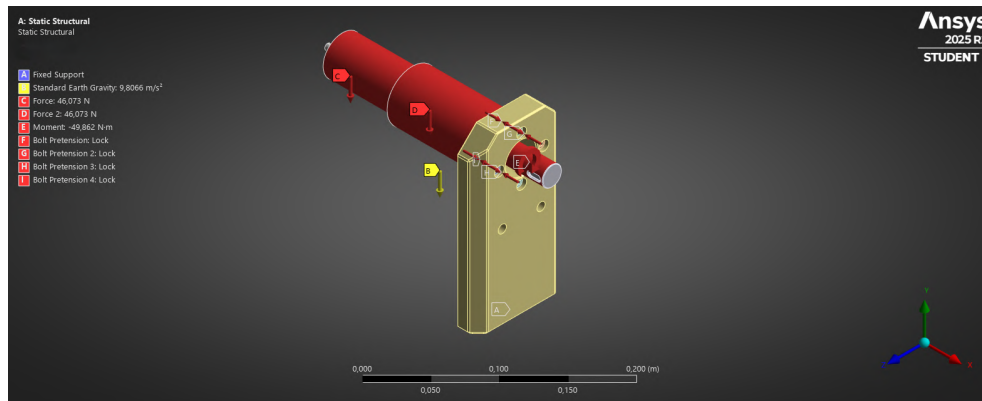


Figura 4.20: Representación en software ANSYS del modelo para el análisis de elementos finitos del entorno del soporte para la unidad motriz.

Una vez alcanzada la convergencia del resultado, el valor obtenido para el esfuerzo máximo en el elemento de interés, soporte de la unidad motriz, fue de 24,293 MPa en la superficie del apoyo de la pestaña de la unidad motriz cerca del agujero para el perno medio izquierdo, y un desplazamiento máximo de $1,125 \times 10^{-1} \text{ mm}$ en el eje x . Con los datos obtenidos se calculo el factor de seguridad para el elemento dando como resultado un valor de 17,26, Figura 4.21.

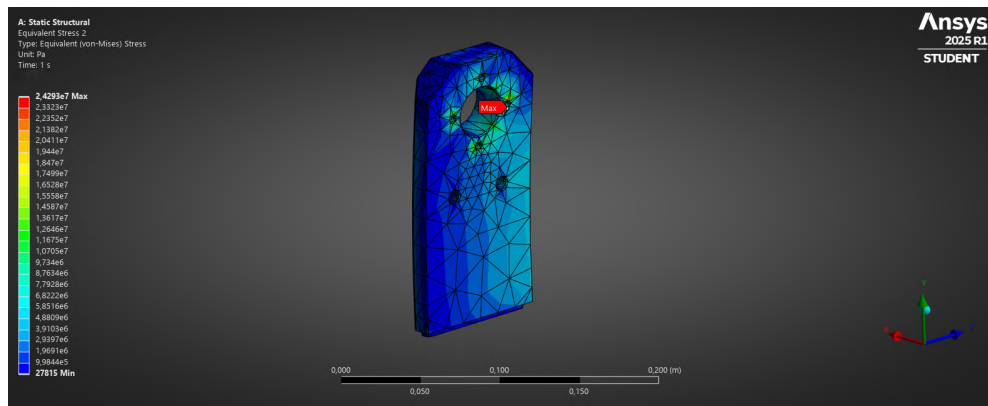


Figura 4.21: Representación en software ANSYS del resultado para el análisis de elementos finitos del entorno del soporte para la unidad motriz.

4.2.3. Soportes de las chumaceras

El análisis del entorno del soporte de las chumaceras consta de los siguientes elementos: Chumacera BF15K, que se encuentra ensamblada al soporte a través de una unión pernada de dos tornillos M6x1,0 y el eje que conecta la unidad motriz con el clutch magnético, Figura refsoporte-ChumaceraModelo. Para este análisis se emplearon los valores de peso de los elementos, Tabla 4.3, el torque nominal de la unidad de la unidad motriz y la precarga para los pernos de la Tabla 4.4, además, se fijaron las dos superficies del plano $Z - X$ del soporte que empotran en la ranura de la placa base. Los contactos de las superficies pernadas se asumieron como contactos con fricción con un coeficiente de 0,2 y una distribución radial simétrica. Dadas las restricciones de la cantidad de elementos de la licencia académica de ANSYS se parametrizo un tamaño de elemento de 2 mm y un refinamiento de 2 puntos en las superficies de contacto. El material del soporte es Aluminio 7075 T73, Tabla 4.2. Así las cosas, se procedió a resolver el modelo para el esfuerzo equivalente de von-Mises.

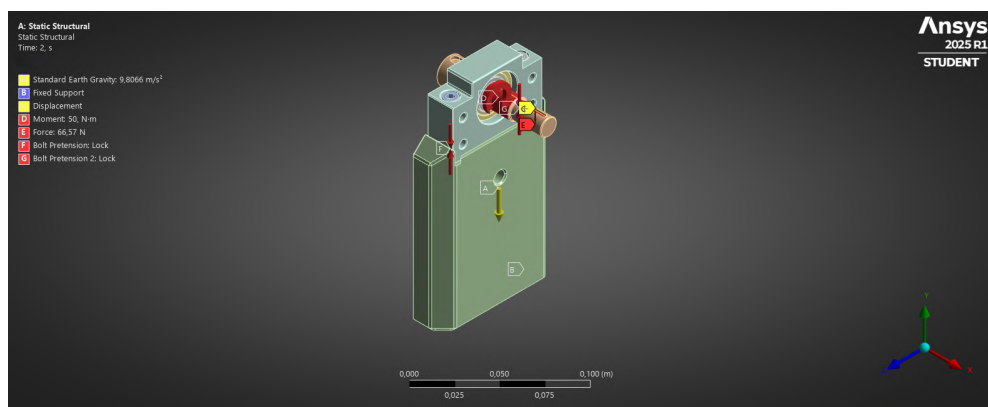


Figura 4.22: Representación en software ANSYS del modelo para el análisis de elementos finitos del entorno del soporte para las chumaceras.

Una vez alcanzada la convergencia del resultado, el valor obtenido para el esfuerzo máximo en el elemento de interés, soporte de las chumaceras, fue de 27,791 MPa en la superficie de la pestaña elevada izquierda para el encajonamiento de la chumacera, y un desplazamiento máximo

de $2,322 \times 10^{-2} \text{ mm}$ en el *eje z*. Con los datos obtenidos se calculo el factor de seguridad para el elemento dando como resultado un valor de 15,11, Figura 4.23.

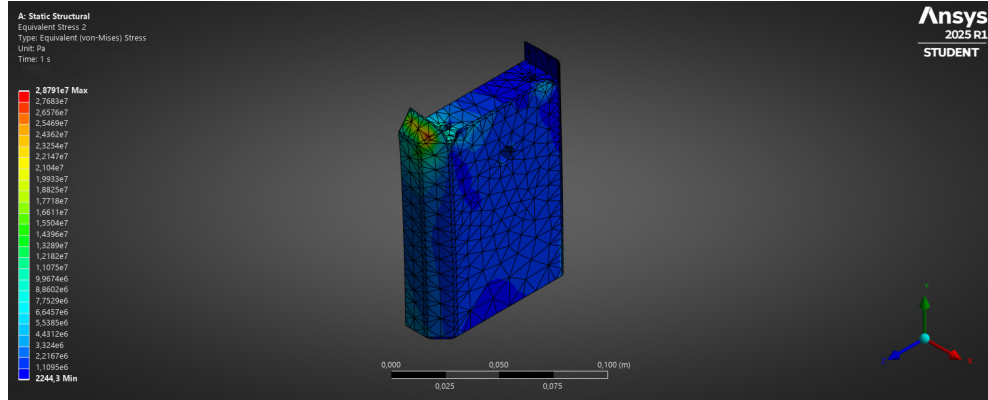


Figura 4.23: Representación en software ANSYS del resultado para el análisis de elementos finitos del entorno del soporte para las chumaceras.

4.2.4. Soportes del freno

El análisis del entorno de los soportes del freno consta de los siguientes elementos: Frenos de partículas FZ100K-1, que se encuentra ensamblado los soportes a través de una unión pernada de doce tornillos M10x1,5 y el eje que conecta el clutch magnético con la salida al acople para la extremidad en la que se efectúa la terapia, Figura refsoporteFrenoModelo. Para este análisis se emplearon los valores de peso de los elementos, Tabla 4.3, el torque nominal del freno de partículas y la precarga para los pernos de la Tabla 4.4, además, se fijaron las cuatro superficies del plano $Z - X$ de los soportes que empotran en las ranuras de la placa base. Los contactos de las superficies pernadas se asumieron como contactos con fricción con un coeficiente de 0,2 y una distribución radial simétrica. Dadas las restricciones de la cantidad de elementos de la licencia académica de ANSYS se parametrizo un tamaño de elemento de 4 mm y un refinamiento de 2 puntos en las superficies de contacto. El material de los soportes es Aluminio 7075 T73, Tabla 4.2. Así las cosas, se procedió a resolver el modelo para el esfuerzo equivalente de von-Mises.

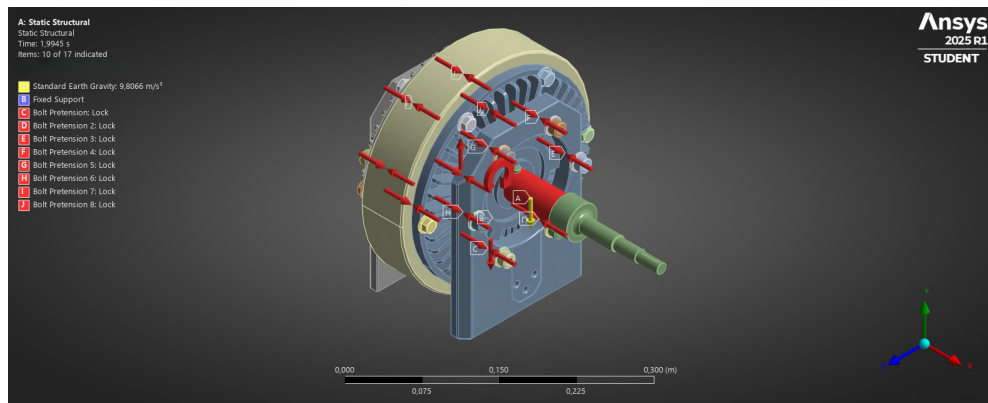


Figura 4.24: Representación en software ANSYS del modelo para el análisis de elementos finitos del entorno de los soportes para el freno.

Una vez alcanzada la convergencia del resultado, el valor obtenido para el esfuerzo máximo

en los elementos de interés, soportes del freno, fue de $64,293 \text{ MPa}$ en la superficie interior de la pestaña donde descansan las caras transversales del lado derecho del freno de partículas, y un desplazamiento máximo de $1,82410^{-2} \text{ mm}$ en el *eje z*. Con los datos obtenidos se calculo el factor de seguridad para el elemento dando como resultado un valor de 6,82, Figura 4.25.

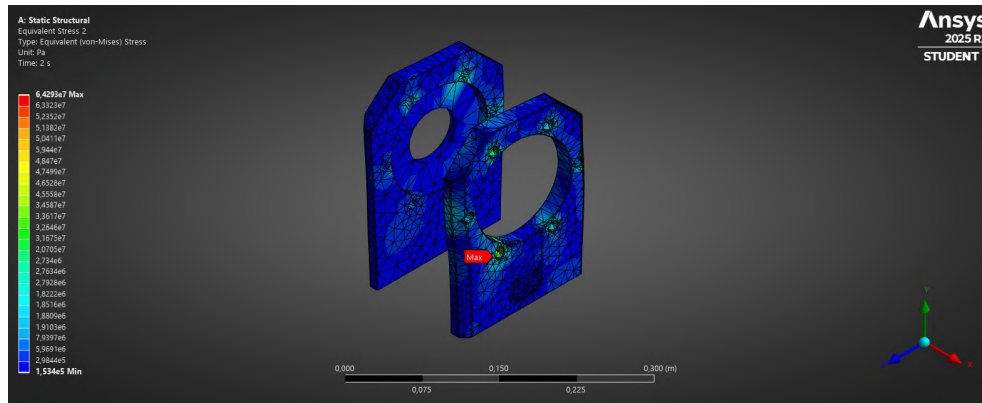


Figura 4.25: Representación en software ANSYS del resultado para el análisis de elementos finitos del entorno de los soportes para el freno.

4.2.5. Placa base

El análisis del entorno de la placa base consta de los siguientes elementos: Soporte de la unidad motriz, dos soportes para chumaceras, dos soportes para el freno de partículas, todos estos elementos se encuentran ensamblados, cada uno, a través de una unión pernada de dos tornillos M10x1,5; Figura replacaBaseModelo. Para este análisis se emplearon los valores de peso de los elementos, Tabla 4.3, el torque nominal del freno de partículas, el torque nominal de la unidad motriz y la precarga para los pernos de la Tabla 4.4, además, se fijaron las dos aristas laterales en dirección al *eje x* de la placa base donde estarían sus elementos de apoyo. Los contactos de las superficies pernadas se asumieron como contactos con fricción con un coeficiente de 0,2 y una distribución radial simétrica. Dadas las restricciones de la cantidad de elementos de la licencia académica de ANSYS se parametrizo un tamaño de elemento de 2 mm y un refinamiento de 2 puntos en las superficies de contacto. El material de los soportes y de la placa base es Aluminio 7075 T73, Tabla 4.2. Así las cosas, se procedió a resolver el modelo para el esfuerzo equivalente de von-Mises.

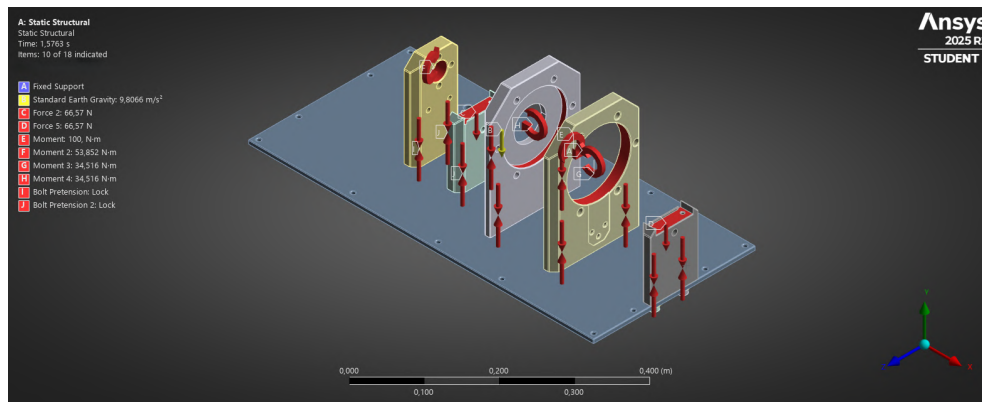


Figura 4.26: Representación en software ANSYS del modelo para el análisis de elementos finitos del entorno de la placa base.

Una vez alcanzada la convergencia del resultado, el valor obtenido para el esfuerzo máximo en los elementos de interés, soportes del freno, fue de $26,604 \text{ MPa}$ en la superficie ranura guía del soporte derecho del freno, el cual también presentaba el mayor esfuerzo de los dos soportes; y un desplazamiento máximo de $0,82410^{-2} \text{ mm}$ en el *eje y*. Con los datos obtenidos se calculo el factor de seguridad para el elemento dando como resultado un valor de 16,35, Figura 4.27.

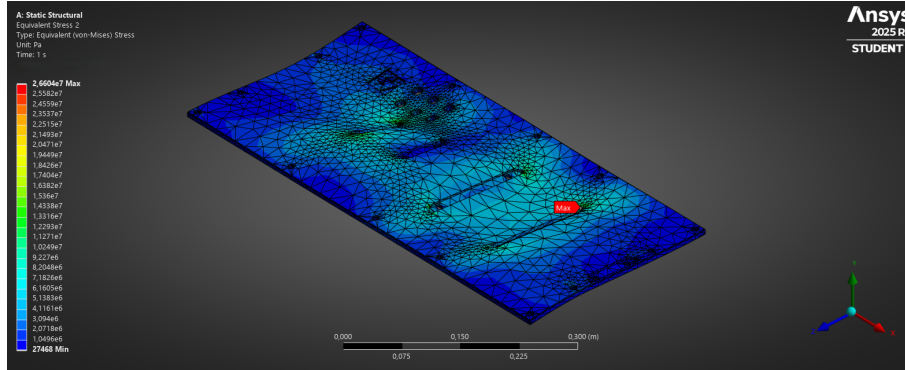


Figura 4.27: Representación en software ANSYS del resultado para el análisis de elementos finitos del entorno de la placa base.

4.2.6. Eje del motor y eje del freno

El análisis de los ejes del motor, 4.28a, y del freno, 4.28b, se realizó con base en el torque calculado para realizar la terapia de rehabilitación de rodilla, comprobado analítica y experimentalmente en la tesis doctoral del Ingeniero Cristian David Chamorro Rodríguez [14]. El valor evidenciado en el documento previamente citado es de $24,7 \text{ Nm}$, estando este compuesto de $24,4 \text{ Nm}$ de toque estático debido a suposición de distribución de masas y medidas para una persona de 130 kg , valor que es el elevado y permite que el diseño este configurado para un percentil 95 de la población, y un $0,3 \text{ Nm}$ de torque dinámico debido a la aceleración. Este momento se ubicó en la superficie lateral derecha en sentido antihorario y en la superficie lateral izquierda se agregó una restricción de desplazamiento en todos los ejes. Dadas las restricciones de la cantidad de elementos de la licencia académica de ANSYS se parametrizo un tamaño de elemento de 2 mm y un refinamiento de 2 puntos en las superficies concentradoras de esfuerzos. El material de los ejes es Acero AISI 4140, Tabla 4.2. Así las cosas, se resolvió el modelo para el esfuerzo equivalente de von-Mises.

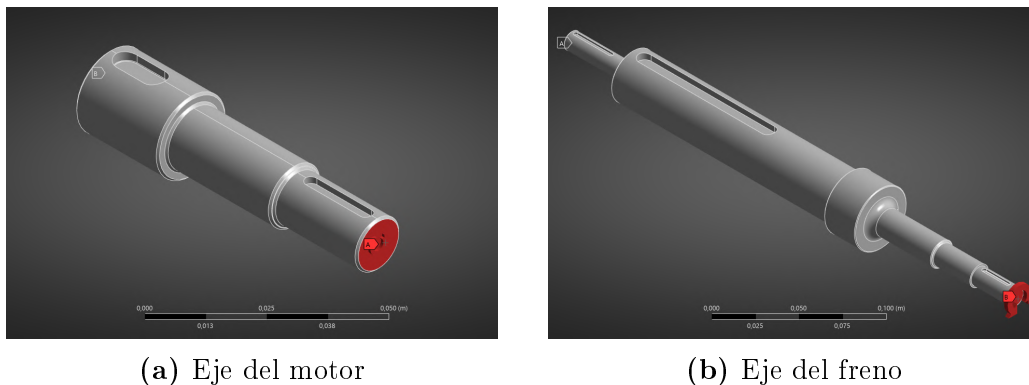


Figura 4.28: Representación en software ANSYS del modelo para el análisis de elementos finitos de los ejes del motor y del freno.

Una vez alcanzada la convergencia de los resultados, el valor obtenido para el esfuerzo máximo en los ejes de motor y freno fue de $106,71 \text{ MPa}$ y $102,34 \text{ MPa}$ respectivamente, para ambos casos, el esfuerzo máximo se presentó en el concentrador de esfuerzos del cambio de sección del apoyo de la. Con los datos obtenidos se calculo el factor de seguridad para los elementos dando como resultado un valor de 3,89 para el eje del motor, Figura 4.29a, y un valor de 4,06 para el eje del freno, Figura 4.29b.

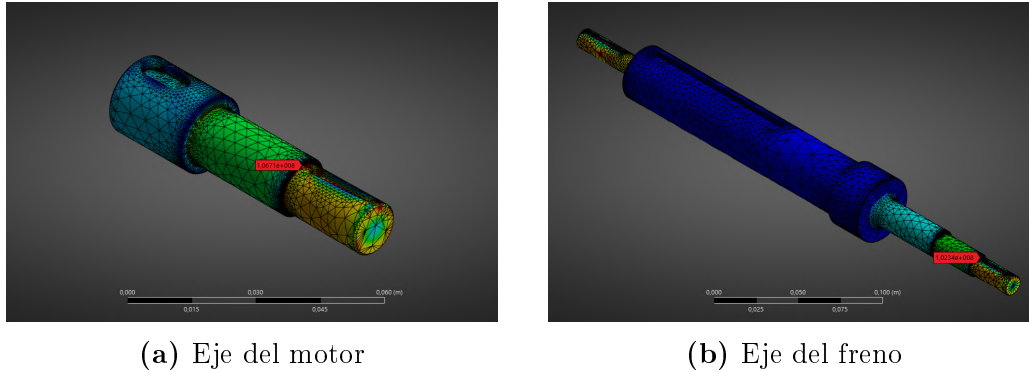


Figura 4.29: Representación en software ANSYS del resultado para el análisis de elementos finitos de los ejes del motor y del freno.

4.3. Geometrías propuestas

Cada uno de los elementos se diseñó, inicialmente, para cumplir con los requerimientos geométricos que planteaban cada uno de los elementos de manufactura inalterable, es decir, los elementos que se deben adquirir de fabricantes externos para poder realizar las actividades propias de la ayuda técnica (Motor, Freno Magnético, Chumaceras, etc. . .). De esta forma, se aseguraba el correcto ensamble de los elementos diseñados con cada uno de los componentes adquiridos. Así también, los componentes diseñados que tenían relaciones con otros igualmente diseñados en el alcance de este trabajo, se modelaron de acuerdo con jerarquías establecidas por la prioridad de la forma entre cada uno de ellos y la interdependencia de estos.

En la Figura 4.30 se muestra el plano de conjunto con sus respectivas anotaciones y la tabla de componentes de la ayuda técnica. Esta muestra una visión integradora de los elementos diseñados y los elementos adquiridos en la composición de la máquina. Cada uno de estos elementos se encuentra debidamente etiquetado y representado en la tabla con la etiqueta como índice. En la tabla de la lista de piezas se encuentra el índice que apunta a el globo numerado, la cantidad de piezas dentro de la composición de la máquina y el nombre asignado a cada uno de los elementos que servirán de referencia para las descripciones que se realizarán en las secciones siguientes.

Una vez establecidos y cumplidos los requerimientos de forma para cada uno de los elementos componentes de la ayuda técnica, se procedió a realizar consultas e investigaciones acerca de los materiales óptimos para la manufactura de cada uno de los elementos. En este sentido, cada uno de los materiales se escogió acorde a la funcionalidad del elemento y en aras de lograr la menor cantidad de materiales diferentes, esto con el fin de lograr una uniformidad en el proceso de manufactura de la ayuda técnica.

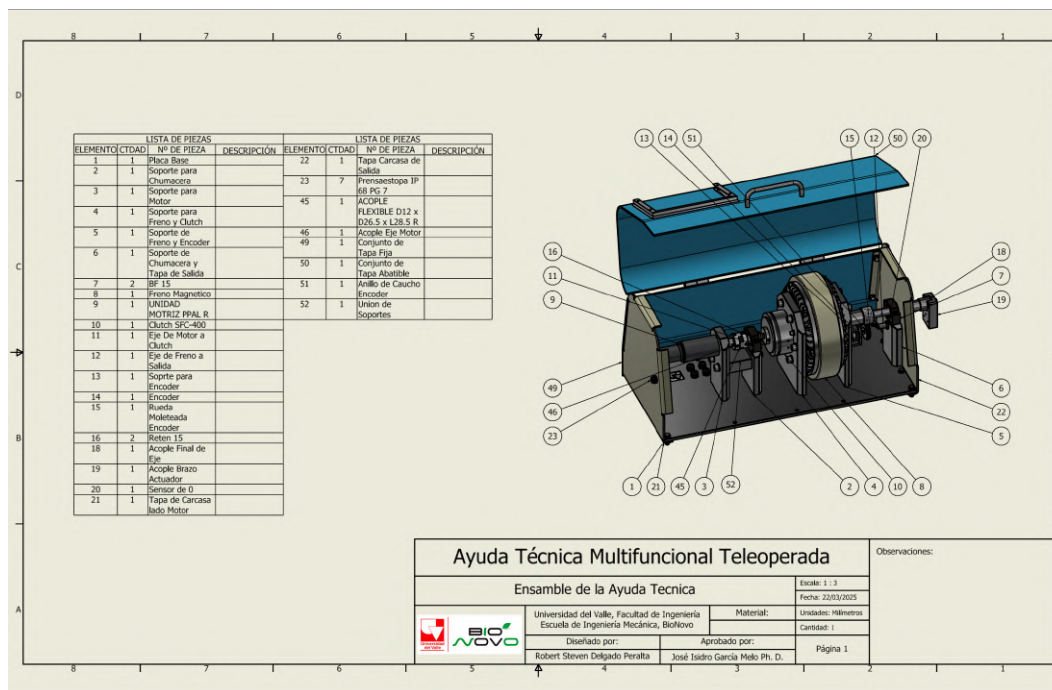


Figura 4.30: Representación del plano de conjunto de los elementos que componen el rediseño de la ayuda técnica.

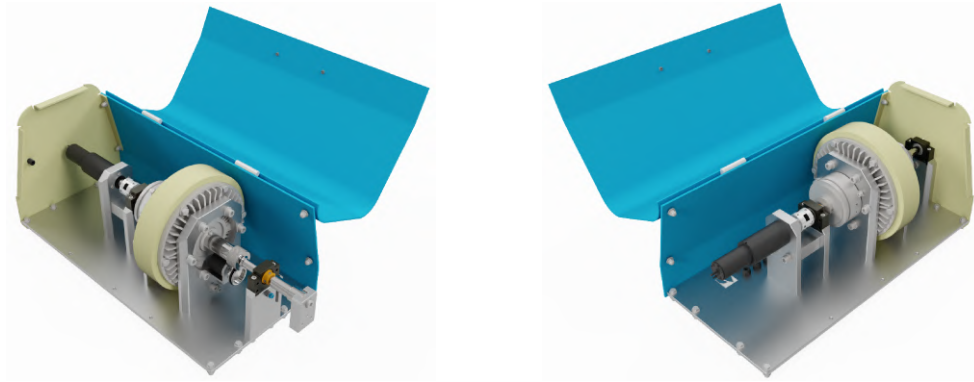
A continuación, se presenta cada uno de los elementos diseñados, separados en grupos de acuerdo con las funciones que desempeñan dentro del conjunto de la ayuda técnica multifuncional, siendo estos, el conjunto de elementos de soporte, la placa base, los ejes, los acoples, la carcasa y finalmente los utilajes.

4.3.1. Ensamble de la ayuda técnica

Para contextualizar al lector, inicialmente se presenta el ensamble final de la maquina en la Figura 4.31. En esta se puede observar la unión de las piezas diseñadas y de los elementos adquiridos. Este montaje presenta los componentes funcionales con la omisión de algunos de los elementos de la carcasa puesto que la misma impediría la visión de la mayoría de los componentes y, dado que su objetivo principal es la preservación de estos, esta no aporta mucha información al lector.

En la Figura 4.31a se puede apreciar la salida del eje desde el freno hacia el acople de la férula. Esta misma permite apreciar el encoder que mide el desplazamiento angular cuyo soporte esta unido al soporte de salida del freno y que mide el desplazamiento a través de una sección moleteada y una rueda con un material de caucho recubriéndola. También se visualiza el soporte y la chumacera de salida ya conformados como un ensamble y el acople de salida que conecta con la férula y el paciente.

En la Figura 4.31b se visualiza el clutch magnético unido al soporte del freno, el conjunto de soporte y chumacera para dar estabilidad al eje, el acople flexible para unir el eje de salida del conjunto motor y el eje del clutch y en la parte inicial el conjunto motriz ensamblado, compuesto de motor, encoder y reductor.



(a) Vista frontal izquierda de la ayuda técnica (b) Vista posterior izquierda de la ayuda técnica

Figura 4.31: Representación en software AutoDesk Inventor del ensamble de la ayuda tecnica multifuncional teleoperada con los elementos diseñados y los adquiridos a proveedores.

4.3.2. Soportes

Los elementos de soporte del conjunto representan los elementos de mayores dimensiones y con la mayoría de las restricciones de forma puesto que están diseñados en función de los elementos adquiridos y de geometría inalterable. Adicionalmente, estos son los encargados de brindar robustez al ensamble, garantizar la precisión en las distancias dispuestas para cada elemento, el paralelismo entre las caras y la concentricidad entre los ejes principales (eje de motor, eje de clutch y eje de freno).

Los soportes se encuentran dispuestos de la siguiente manera. Un soporte para la unidad motriz, un soporte para la chumacera de apoyo del eje entre la unidad motriz y el clutch, dos soportes para el freno magnético y un soporte para la chumacera del eje de freno en su salida al brazo actuador. Por último, se diseñó un soporte especial para el encoder encargado de medir el desplazamiento angular del eje del freno.

4.3.2.1. Soporte de la unidad motriz

La unida motriz Maxon es el conjunto conformado por el encoder, motor y reductor que permiten el movimiento en la terapia pasiva. Este conjunto se encuentra preensamblado al momento de adquirirlo del fabricante, por lo tanto, el requerimiento para este soporte es la conexión pernada que propone el fabricante para su sujeción y la pestaña que brinda apoyo adicional sobre la superficie del soporte.

En la Figura 4.32 se aprecia el renderizado de la vista isométrica del soporte propuesto para la ayuda técnica. Este tiene como objetivo garantizar, en primera instancia, el acople seguro y estable de la unidad motriz Maxon, luego, garantizar la altura para la concentricidad con los otros dos ejes (Eje de clutch y de freno) y, por último, garantizar la estabilidad respecto a la placa y el paralelismo respecto a los otros elementos.



Figura 4.32: Representación en software AutoDesk Inventor del soporte diseñado para el conjunto motor.

4.3.2.2. Soportes para chumacera de eje de motor y salida

El siguiente soporte que diseñar fue el dispuesto para las chumaceras de referencia BF15 para maquinas CNC. Esta chumacera tiene, dos tipos de sujeción, horizontalmente sobre un plano o verticalmente contra la cara del soporte, para el caso de la ayuda técnica, se escogió el apoyo horizontal sobre un plano, por tal motivo el soporte se diseñó para cumplir con dicho posicionamiento y la sujeción que disponía.

En las Figuras 4.33a y 4.33b se observan los soportes diseñados para fijar las dos chumaceras BF15 requeridas en el ensamble de la ayuda técnica. El primero de ellos, Figura 4.33a, únicamente se dispone para soportar esta chumacera, por lo tanto, cuenta con unas perforaciones acordes a las propuestas por el fabricante de la chumacera y una pestaña que sirve de tope para posicionar el elemento a la hora de realizar el ensamble.

Así también, la chumacera de la salida del eje del freno, Figura 4.33b, cumple con las especificaciones anteriormente descritas y, adicional a estas, cuenta con un agujero roscado para el posicionamiento de un sensor NPN que servirá para marcar el 0 del desplazamiento angular del eje de movimiento para las terapias de la ayuda técnica.



(a) Soporte para chumacera del eje del motor



(b) Soporte para eje de salida y sensor capacitivo

Figura 4.33: Representación en software AutoDesk Inventor de los soportes diseñados para las chumaceras del eje de motor y el eje de salida con el sensor capacitivo.

4.3.2.3. Unión para soportes de motor y chumacera

Debido al punto de encuentro entre el eje del motor y el eje del clutch, que presenta como interfaz el acople flexible, se requirió una unión entre el soporte del motor y el soporte de la chumacera intermedia que ayudara a reforzar la estabilidad de estos y garantizara el paralelismo entre las caras frontales, así pues, se diseñó la unión de soportes, Figura 4.34, que permitió mantener la concentricidad de los ejes en cuestión y disminuyo el desgaste del acople flexible debido al movimiento que restaba paralelismo entre los soportes. Este se fija a ambos soportes con tres pernos, dos del lado de soporte de motor y el restante en el soporte de la chumacera. El material de la unión es Aluminio 7075 T73, Tabla 4.2.

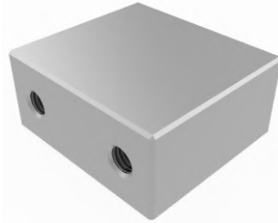
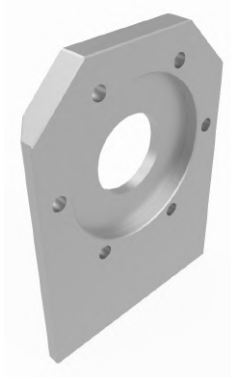


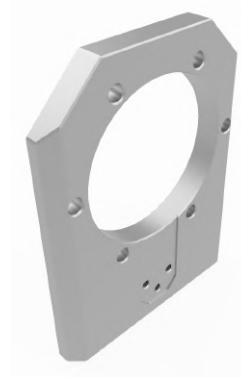
Figura 4.34: Representación en software AutoDesk Inventor de la unión para los soportes de motor y chumacera.

4.3.2.4. Soportes para freno y clutch

Los soportes para el freno magnético FZ100K-1 se diseñaron de acuerdo con el medio de sujeción propuesto por el fabricante de este y, ya que precisaba de dos soportes para ubicarlo en la ayuda técnica, uno para cada lateral, estos se diseñaron con el fin de que, aprovechando su robustez, pudiesen soportar, además del freno, dos elementos de vital importancia como lo son el clutch magnético y el encoder.



(a) Soporte para freno y clutch



(b) Soporte para freno y soporte de encoder

Figura 4.35: Representación en software AutoDesk Inventor de los soportes diseñados para el freno magnético, el clutch y el soporte del encoder.

El primero de estos, Figura 4.35a, está diseñado para apoyar el freno con las pestañas de asentamiento dispuestas en la configuración de este y la unión penada también predispuesta por el fabricante. Adicionalmente, este soporte cuenta con un agujero roscado y una reducción de

diámetro en la salida del soporte que permite acoplar el clutch magnético e impedir la rotación de este sobre su propio eje.

Por otra parte, el segundo soporte del freno, Figura 4.35b, cuenta con una ranura y tres agujeros roscados que permiten acoplar el soporte del encoder, Figura 4.36, para la medición del desplazamiento angular del eje del freno, Figura 4.39, el cual tiene una sección moleteada que gira solidariamente con la rueda montada al encoder y un material de caucho sobre el mismo para aumentar la fricción entre las superficies prevenir el deslizamiento.

4.3.2.5. Soporte para encoder

El encoder E40S6-500-3-T-24 permite medir el desplazamiento angular del eje del freno y por lo tanto, al todos los ejes sobre esta línea estar alineados con el eje de giro de la extremidad del paciente, permite medir el rango de movimiento de la terapia que está realizando este. Debido a sus pequeñas dimensiones, se optó por diseñar un soporte que posicionara este elemento de manera correcta dentro de un subconjunto, Figura 4.36, y este subconjunto se adhirió a la ranura diseñada en la cara exterior del soporte derecho del freno magnético. Este elemento consta de dos partes para poder ubicar de una mejor manera el encoder sobre este, pues la pieza que acopla al frente del encoder, Figura 4.36b, se sujeta con tornillos al elemento y posteriormente se ubica sobre la base que cuenta con ranuras para un óptimo posicionamiento vertical de este conjunto sobre el soporte del freno y garantizando el óptimo contacto con la sección moleteada del eje. El material del soporte es Aluminio 7075 T73, Tabla 4.2.

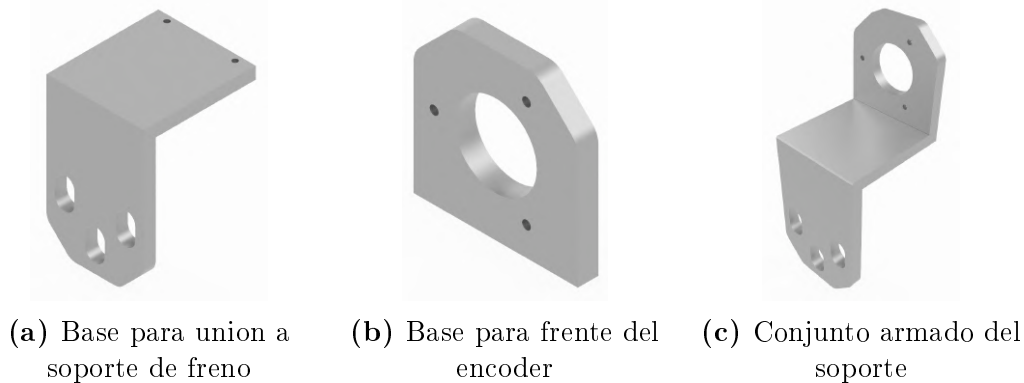


Figura 4.36: Representación en software AutoDesk Inventor de los componentes diseñados para el soporte del encoder de posición del eje de salida.

4.3.3. Placa base

Una vez diseñados los elementos que servirán de soportes para los componentes adquiridos con fabricantes externos (Motor, Freno Magnético, Chumaceras, etc...), se procedió a diseñar la placa base que servirá de soporte para todos estos elementos, les dará una posición fija dentro del conjunto, respetará el espaciado de todos los elementos y permitirá disponer del conjunto para su desplazamiento bien sea con una estructura que actúe como carro móvil o para desplazar el conjunto actuador de un lugar a otro en transporte logístico dada la naturaleza teleoperable de la ayuda técnica.

La placa base, Figura 4.37, se diseñó para posicionar los elementos de forma precisa y única de forma tal que los ensambles tuviesen una mayor agilidad al eliminar la cantidad de errores por

alistamiento incorrecto de las piezas componentes, esto se logró a través de dos estrategias. La primera de ellas fue una decisión de diseño tanto para los soportes como la placa base, que fue la realización de unos chaflanes pronunciados para marcar una dirección en la posición del soporte. La segunda, derivada de la primera, fue la realización de unos canales de posicionamiento de los soportes, los cuales varían en dirección de acuerdo con la dirección del soporte y en dimensión de la ranura. De esta manera, con la variación de dichos parámetros, se logró que cada soporte tuviese una relación única con su ranura para así no dar cabida a la instalación de soportes en lugares que no les correspondiesen, sin perder la uniformidad y estandarización de los elementos.



Figura 4.37: Representación en software AutoDesk Inventor de la placa base diseñada para el montaje de los soportes y componentes de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.

4.3.4. Ejes

Lo ejes son los elementos que tienen la función de transmitir tanto el movimiento como el torque necesario para realizar las terapias, activa y pasiva. En la primera de ellas, la terapia activa, los ejes se encargan de transmitir el movimiento que realiza el paciente a la maquina y a su vez el torque opuesto que realiza el freno a este movimiento. En la terapia pasiva, los ejes se encargan de llevar el movimiento desde la unidad motriz hasta la extremidad del paciente, para que este pueda realizar el movimiento que requiere.

La ayuda técnica cuenta con dos ejes. El eje del motor a clutch, Figuras 4.38, es el encargado de transmitir el movimiento proveniente de la unidad motriz hasta el clutch magnético, donde este último, dependiendo del tipo de terapia, permitirá o no el paso de movimiento entre la unidad motriz y el paciente. El segundo es el eje de freno a salida representado en la Figura 4.39, el cual conecta al freno con el paciente, actuando de acuerdo con la programación de la terapia.

4.3.4.1. Eje de motor a clutch

Este elemento conecta el eje de salida de la unidad motriz con el clutch magnético y tiene un paso intermedio por la chumacera BF15 que le sirve de soporte y posicionamiento para la conexión entre los elementos. Este está diseñado con tres secciones de cambio de diámetro, Figura 4.38, la primera sección se acopla con la chaveta al acople flexible que lo conecta a la unidad motriz, así también, este cambio de sección hacia la segunda etapa sirve de tope mecánico para el posicionamiento del rodamiento de la chumacera. La segunda y tercera sección están diseñadas para ajustarse a su elemento de paso de acuerdo con el diámetro especificado por el fabricante del elemento, teniendo

la tercera y última sección un chavetero para acoplarse con su parte correspondiente del clutch magnético.



Figura 4.38: Representación en software AutoDesk Inventor del eje diseñado para transmitir movimiento desde la salida del conjunto motor hasta la primera etapa del clutch.

4.3.4.2. Eje de freno a salida

El eje de freno a salida transmite el movimiento entre el paciente y el clutch magnético, pasando en su longitud por elementos funcionales como el freno de partículas y el encoder, y por la chumacera como elemento de soporte. En la Figura 4.39 se pueden apreciar las seis secciones de cambio de diámetro del eje. La primera de ellas esta diseñada con un chavetero y el diámetro requeridos por el clutch. El segundo cambio de sección esta definido por el diámetro y chaveta especificados por el freno de partículas. Luego se presenta un aumento en el diámetro y un acabado superficial de moleteado para hacer la medición de la posición con el encoder dispuesto para tal fin, Sección 4.3.2.5.

Luego de pasar estas etapas por elementos funcionales se encuentran las ultimas tres etapas diseñadas para dar soporte al eje con ayuda de la chumacera BF15. La cuarta sección es un cambio de diámetro que sirve de tope para el posicionamiento de la chumacera. La quinta sección esta diseñada con el diámetro del rodamiento dentro de la chumacera y la última sección es la conexión de todo el conjunto actuador al acople que se utilizara en la extremidad del paciente.



Figura 4.39: Representación en software AutoDesk Inventor del eje diseñado para transmitir movimiento desde la segunda etapa del clutch y a través del freno magnético.

4.3.5. Acoples

A lo largo de la construcción de la ayuda técnica se encuentran elementos que precisan una conexión entre si que no se puede realizar de forma directa. Para estos casos, cuatro en total, se

diseñaron elementos que tienen la finalidad de acoplar componentes y asegurar así, su correcto funcionamiento.

4.3.5.1. Acople para el eje de motor

La salida del eje del motor difiere en diámetro a la entrada del acople flexible, por este motivo se diseñó un elemento de acople que, por uno de sus extremos acoge el eje de salida de la unidad motriz y a su chaveta y por el otro extremo presenta el diámetro requerido para el acople flexible y la chaveta de este, Figura 4.40. El material del acople es Acero AISI 4140, Tabla 4.2.



Figura 4.40: Representación en software AutoDesk Inventor del acople diseñado para conectar el eje de salida del motor al acople flexible.

4.3.5.2. Acople para el eje de salida

Al finalizar el recorrido del eje de freno a salida, pasando por todos sus elementos intermedios y transmitiendo el movimiento y el torque de estos, se requiere de un aumento en el diámetro de la sección para ajustar con el elemento que ensambla el brazo actuador con la máquina. Este elemento se diseñó, en el extremo que se ubica del lado de la ayuda técnica, con un agujero que permite el ajuste de la salida del eje y una chaveta que garantice el movimiento solidario y la transmisión efectiva del torque, Figura 4.41. En su otro extremo se presenta un aumento de diámetro en el cambio de sección, una esbeltes en el mismo para generar dos caras planas que deslicen en el elemento del brazo actuador y garanticen la transmisión del movimiento y un agujero roscado que permite la unión pernada de los dos elementos. El material del acople es Acero AISI 4140, Tabla 4.2.

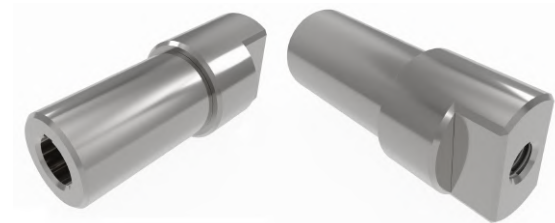


Figura 4.41: Representación en software AutoDesk Inventor del acople diseñado para conectar el eje de salida de la ayuda técnica con el brazo actuador para las terapias.

4.3.5.3. Acople para el brazo actuador

El ensamble del accesorio del brazo actuador a la ayuda técnica requiere de un elemento que acople el elemento vertical del brazo actuador al eje horizontal de la salida de la máquina, por esta necesidad se diseñó un elemento que ajusta tanto el acople descrito en la sección inmediatamente

anterior como el elemento actuador, refacopleBrazoCad. Por un lado, presenta una ranura rectangular que recibe el acople del final del eje, y por el otro lado, a la misma altura, tiene un agujero con asiento para la cabeza del perno que fija estos elementos. En la parte inferior se diseñaron tres agujeros pasantes para asegurar el brazo actuador con una unión pernada. El material del acople es Aluminio 7075 T73, Tabla 4.2.

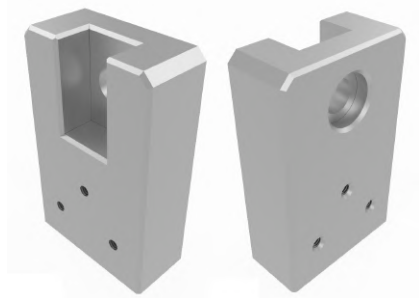


Figura 4.42: Representación en software AutoDesk Inventor del acople diseñado para conectar el brazo actuador a la ayuda tecnica multifuncional teleoperada.

4.3.5.4. Rueda del encoder

Para medir el desplazamiento angular del eje, se utiliza un sistema de transmisión de movimiento por fricción entre la sección moleteada del eje de freno a salida, Figura 4.39, y el encoder, Sección 4.3.2.5. Para el acople entre estos dos elementos, se diseño una rueda que se ubica en el eje del encoder y que tiene un canal para implementar un anillo de caucho que aumente el coeficiente de fricción entre las superficies. Adicionalmente, cuenta con un alma del lado opuesto a la entrada del eje del encoder para disminuir el peso del elemento, Figura 4.43. El material de la rueda es Aluminio 7075 T73, Tabla 4.2.



Figura 4.43: Representación en software AutoDesk Inventor de la rueda diseñada para medir el movimiento angular del eje de salida acoplándose al encoder.

4.3.6. Carcasa

La ayuda técnica tiene como característica vitalicia la practicidad a la hora de transportarse, ya que es esta característica y su teleoperabilidad la que cumplen con su objetivo de alcanzar poblaciones que no tienen un fácil acceso a servicios de salud competentes y del nivel que sus afecciones lo precisan. Por tal motivo, se diseñó una carcasa que cumpliera con el objetivo de resguardar los elementos del conjunto y a su vez permitiese un fácil acceso a los mismos para hacer ajustes, calibraciones y mantenimientos.

4.3.6.1. Tapas laterales

Las tapas laterales se diseñaron con un igual patrón de desarrollo para los dobleces de las pestañas que sirven para fijar los elementos a la placa base y de apoyo para las tapas superiores. La tapa posterior que se encuentra del lado de la unidad motriz del conjunto actuador, Figura 4.44a, cuenta con una perforación para acoplar un prensaestopa que permita el paso de los cables de la pantalla de control hacia el interior de la carcasa y su conexión a la electrónica de la máquina. La tapa lateral frontal, Figura 4.44b, cuenta con dos perforaciones, una para el paso del eje de salida y otra para la salida del sensor npn que marca el 0 del recorrido, además de un boquete en la pestaña inferior que asegura la tapa a la placa base para evitar las cabezas de los pernos de fijación del soporte de la chumacera de salida. El material del elemento es Aluminio 6061.



(a) Tapa del lado de la unidad motriz (b) Tapa del eje de salida de la maquina

Figura 4.44: Representación en software AutoDesk Inventor de las tapas laterales de la carcasa.

4.3.6.2. Tapa superior fija

Esta tapa de la carcasa tiene un desarrollo con un doblez que le permite amoldarse a la forma establecida con las tapas laterales, Figura 4.44. Cuenta con unas perforaciones para fijarse a las pestañas de las tapas laterales con cuatro pernos que tienen la finalidad de hacer que este elemento pueda permanecer en una posición constante y que sirva de conexión que aporte rigidez entre las tapas laterales evitando la flexión hacia el exterior o interior de estas, Figura 4.45. Además, tiene unos elementos cilíndricos diseñados para actuar como bisagras y permitir el acople y movimiento de la tapa superior abatible. El material del elemento es Aluminio 6061.

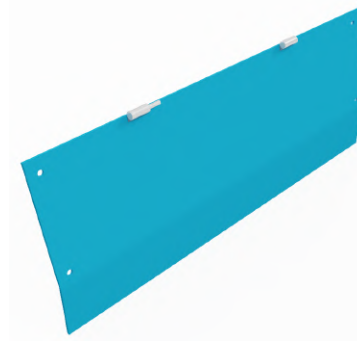


Figura 4.45: Representación en software AutoDesk Inventor de la tapa superior fija de la carcasa.

4.3.6.3. Tapa superior abatible

La tapa superior abatible se acopla a la tapa fija gracias a los elementos cilíndricos soldados que tienen el objetivo de actuar como bisagras para el movimiento angular de esta. El desarrollo diseñado para esta tapa se definió con tres dobleces que se ajustan a la forma de las tapas laterales y dan un cierre al conjunto de la carcasa. Se diseñó también un marco realizado en perfiles en U y soldado a esta tapa que tiene el objetivo de albergar una pantalla o tablet que permitan la comunicación operario-maquina a través del software de la ayuda técnica. Y finalmente se realizaron unas perforaciones que permiten la integración de una manigueta para realizar el proceso de apertura y cierre de la carcasa, Figura 4.46. El material del elemento es Aluminio 6061.

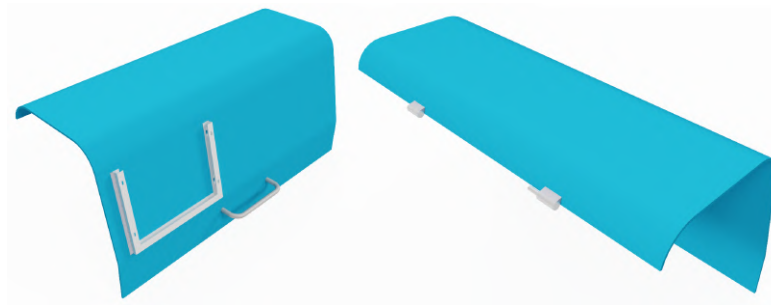


Figura 4.46: Representación en software AutoDesk Inventor de la tapa superior abatible de la carcasa.

4.3.7. Utilajes

Una vez diseñados los elementos componentes de la ayuda técnica multifuncional teleoperada, se empezó a analizar el proceso de ensamble de la misma. Al realizar este proceso de análisis se encontraron unos puntos en el proceso que requerían de utilajes para lograr un correcto ensamble que permitiera el correcto posicionamiento de los elementos y un eficiente tiempo de ensamble. Así también, los utilajes están pensados para resguardar la integridad de los elementos involucrados en cada paso del ensamble y evitar desgastes o daños a la hora del armado de la máquina. Estos utilajes son herramientas de apoyo que permiten el ensamble de múltiples replicas del mismo modelo, cumpliendo así con el objetivo de producción en serie de este rediseño de la ayuda técnica, ya que el ensamble es un paso fundamental para garantizar el correcto funcionamiento de la primera maquina ensamblada y de la unidad numero mil.

4.3.7.1. Utilaje de barras de apoyo para el conjunto principal

Al realizar un análisis del ensamble de los componentes sobre los soportes (Unidad motriz, ejes, clutch, freno, etc. . .). Se noto que, al encontrarse ya fijos los soportes a la placa base con las uniones pernadas en la parte inferior de esta última, todo el conjunto quedaba apoyado sobre las cabezas de estos pernos, lo cual podría generar un daño en estos elementos y afectar la calidad del ensamble y por lo tanto de la ayuda técnica. Para corregir este problema en el ensamble, se diseño un elemento que sirve de apoyo para todo el conjunto actuador durante el proceso de armado, Figura 4.47. Este elemento esta diseñado con una forma primatica cuadrangular que cuenta con unos agujeros roscados para realizar una unión pernada entre la placa base y dos de estas barras de apoyo, una a cada lado. Este utilaje permite no solo resguardar la integridad de las cabezas

de los pernos sino también permitir el ensamble de la carcasa. El material del apoyo es Aluminio 7075 T73, Tabla 4.2.

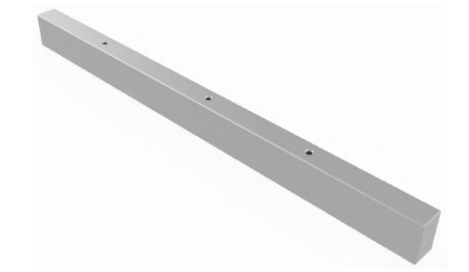


Figura 4.47: Representación en software AutoDesk Inventor del utilaje de las barras de apoyo para el conjunto actuador de la ayuda técnica.

4.3.7.2. Utilaje para soportes

Uno de los procesos más importantes en el ensamble de la ayuda técnica es la ubicación y fijación de los soportes a la placa base. Esta unión se realiza desde el plano inferior de la placa y la ubicación de los soportes desde la parte superior, por tal motivo, y teniendo en cuenta que un ensamble es un proceso aditivo, cada vez se cuenta con más elementos y por lo tanto más masa y menos espacio, se diseñó un utilaje que permitiera realizar este primer paso de forma más precisa, más rápida, menos incómoda para el operario y por ende más eficiente en el proceso general de armado de la máquina. El diseño final de este utilaje es un ensamble de componentes cuya función está definida en función de cada uno de los soportes. En la Figura 4.48 se presenta el ensamble final de todos los componentes de este utilaje y la disposición en la que el mismo se utilizaría.

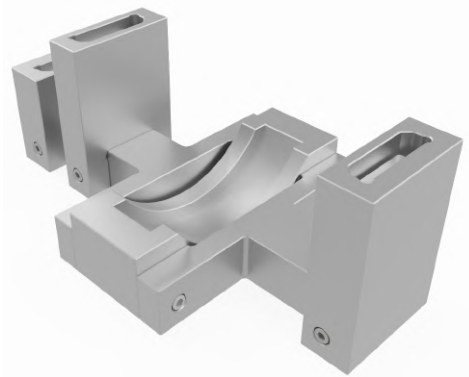


Figura 4.48: Representación en software AutoDesk Inventor del conjunto armado del utilaje para soportes utilizado en el ensamble de la ayuda técnica.

El diseño de este utilaje se dividió en dos tipos de componentes. El grupo inicial se denominó “placas”, ya que estos son los elementos que descansan sobre el plano base de ensamble y sobre estos se ubican los demás elementos. El primero de estos elementos, Figura 4.49a, está diseñado para soportar tres elementos, el pilar del soporte del motor, el pilar de la chumacera intermedia y el soporte de clutch y freno; tiene perforaciones roscadas para la fijación de los pilares con pernos, una ranura para el posicionamiento del pilar de la chumacera y un pin para la orientación correcta de este. La siguiente placa, Figura 4.49b, está diseñada para sostener el freno de partículas mientras se le ubican sus respectivos soportes y los demás de la ayuda técnica. El último de estos elementos

es similar al primero solo que este solo soporta al soporte de freno y encoder y el pilar del soporte de la chumacera de salida de la máquina.

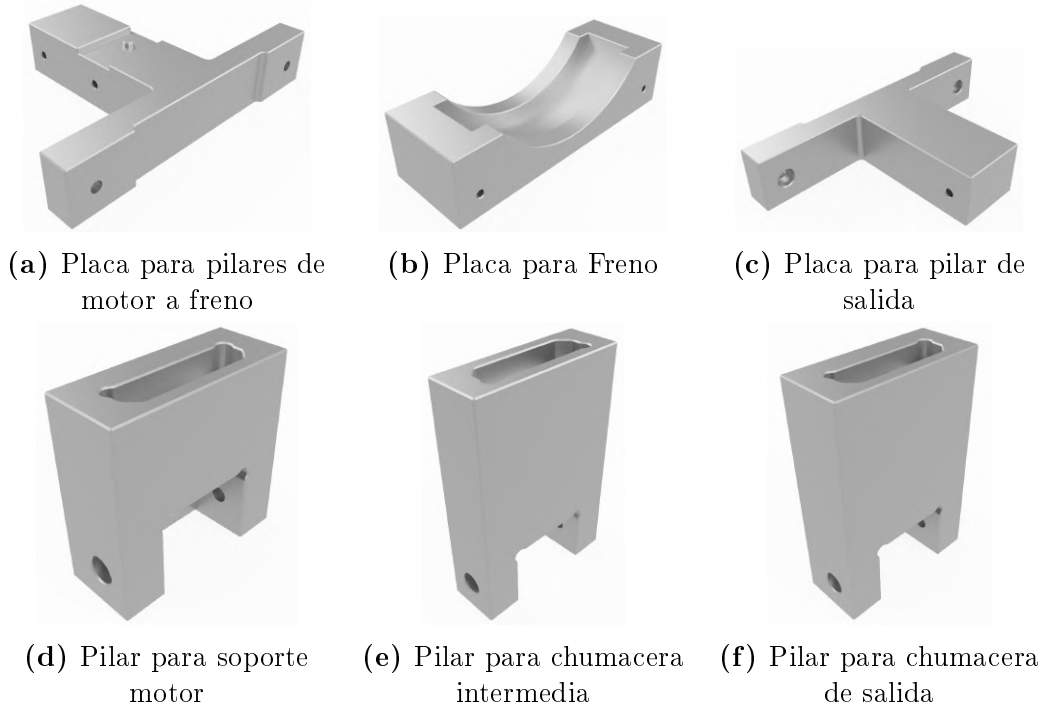


Figura 4.49: Representación en software AutoDesk Inventor de los componentes diseñados para el utilaje de soportes utilizado en el ensamble de la ayuda técnica.

El segundo grupo, Figuras 4.49d, 4.49e y 4.49f, se denominaron “pilares”, ya que son figuras altas que se encuentran ubicadas sobre las denominadas placas. La primera y última de estas se ajustan a su respectiva placa con dos pernos y además tienen una porción de su estructura que está directamente apoyada sobre el plano base del ensamble del utilaje y su ranura para acople no es pasante, por lo tanto, sirve como tope de ajuste y ubicación. El pilar intermedio para la chumacera cuenta con un agujero para la guía maquinada en la placa donde este se apoya. Cada uno de estos pilares tiene maquinado en su parte superior el molde necesario para que su soporte correspondiente entre con un ajuste preciso de tipo deslizante sin necesidad de herramientas adicionales para la ubicación. El material de los elementos es Aluminio 7075 T73, Tabla 4.2.

Los planos de fabricación de la ayuda técnica con sus detalles de geometría y material se puede consultar en el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1pTrK3mHTGrf2b1T_T9a_bbaQ16JiMKYu?usp=sharing

4.4. Experiencia con los procesos de manufactura

Una vez realizado el proceso de diseño de las propuestas de los elementos, se obtuvo una posibilidad, superando el alcance de los objetivos del presente documento, de vivir una experiencia de manufactura real en la compañía de asesores externos y visitando centros de mecanizado de instituciones tanto públicas: SENA Pondaje en la ciudad de Cali, como privadas: Asmetales Ingeniería S.A.S en la ciudad de Cali, Romarco S.A.S en la ciudad de Yumbo y Monres S.A.S de la ciudad de Palmira. Así también, se logró realizar trabajos interdisciplinarios con una gran variedad de

profesionales que hicieron posible la integración de conocimientos que permitieron presentar en prototipo funcional de la propuesta de diseño anteriormente descrita.



Figura 4.50: Prototipo funcional de la propuesta de rediseño de la ayuda técnica con la integración de los componentes electrónicos y de software del grupo interdisciplinario.

En la Figura 4.50, se presenta el ensamble logrado por el grupo interdisciplinario en un esfuerzo conjunto que permitió adquirir conocimientos más profundos de la mecánica y tomar contacto con otras áreas para evidenciar la convergencia de todos los esfuerzos en un único resultado. Esta experiencia fue de suma importancia para el desarrollo profesional de los involucrados al brindar una visión holística de los procesos de manufactura y de integración de conocimientos, así también, permitió desarrollar habilidades de adaptación recursiva ya que no se contaba con todos los insumos y mecanismos necesarios para realizar los procesos como se supone en entornos idealizados. Por tal motivo se tuvo la oportunidad de realizar actividades de gestión de recursos, gestión de personal, trabajos de campo, trabajos operativos, entre otros que enriquecieron esta experiencia.



(a) Desmonte CNC
Monres S.A.S



(b) Montaje CNC SENA
Pondaje



(c) CNC en operación
SENA Pondaje

Figura 4.51: Operaciones en CNC para la manufactura de los elementos propuestos de la ayuda técnica.

Luego de gestionar los recursos necesarios para lograr adquirir materiales para la fabricación de los elementos, se estableció contacto con diferentes centros de mecanizado con el fin de lograr la manufactura de las piezas. Con los planos de cada una de estas y los sólidos de Autodesk Inventor se solicitó el apoyo de los operarios especializados en control numérico para realizar dicha labor. En la Figura 4.51a, se aprecia el momento en el que se está desmontando la placa base de la CNC del centro de mecanizado Monres S.A.S; este mecanizado presentó varias situaciones no deseadas de manufactura: falta de rectificado de las caras principales, irregularidades en las guías de los soportes y la falta de mecanizado del logo de la Universidad del Valle. Por este motivo, la placa base se transportó al centro de mecanizado del SENA de Pondaje, donde contaban con una CNC mucho más completa. En las Figuras 4.51b y 4.51c, se aprecia el momento del alistamiento de la placa base en el área de trabajo de la máquina y el momento de la operación de la misma. Debido a este reproceso en la manufactura de la pieza, el resultado final de la misma fue inferior en 2 mm al propuesto en el plano de fabricación, aun así, la experiencia de maquinar elementos ofreció otras perspectivas y consideraciones muy valiosas para trabajos futuros.

Gracias al apoyo del profesor José Isidro García Melo. PhD y los centros de mecanizado anteriormente mencionados, fue posible lograr la manufactura de todos los elementos incluidos en la propuesta de diseño de la sección 4.3. La posibilidad de asistir los procesos de mecanizado brindó nuevas perspectivas de diseño al conocer las limitaciones que presenta una manufactura real comparada con el diseño cuasi idealizado de un software CAD como lo es Autodesk Inventor, resultando en aprendizajes como los desahogos para las esquinas rectas que una fresadora no puede lograr por la naturaleza de su funcionamiento, entre otros observados durante los procesos. En la Figura 4.52 se presenta un registro fotográfico de los elementos manufacturados en los centros de mecanizado. Por otra parte, entre las dificultades que se presentaron, por motivos de fuerza mayor, las piezas de la carcasa no se lograron realizar como se habían propuesto y se optó por una elaboración distinta acorde a las posibilidades, así también, debido a políticas empresariales del centro de mecanizado Asmetales Ingeniería S.A.S no se tuvo la posibilidad de asistir a la fabricación de los ejes y los acoples realizados en torno.



(a) Soportes y Placa base



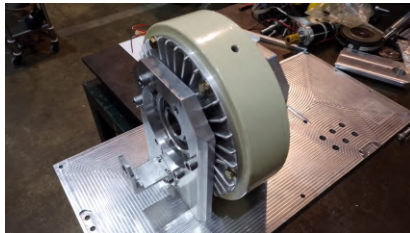
(b) Tapa lateral y posterior de la carcasa

Figura 4.52: Registro fotográfico de los elementos manufacturados para el prototipo de la ayuda técnica.

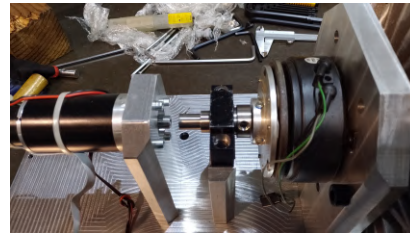
De forma paralela a la obtención de las materias primas para la manufactura de los elementos y la posterior fabricación de estos, se realizaron también, las adquisiciones de los elementos manufacturados por terceros que integran el conjunto total de la ayuda técnica. Dado que este es un proceso de rediseño de los elementos de la estructura, elementos tales como: el conjunto que compone la unidad motriz (Encoder, motor y reductor), el clutch, el carro de desplazamientos, el

brazo actuador y algunos componentes electrónicos, se mantuvieron constantes en los prototipos, esto favoreció la oportunidad de construcción del nuevo modelo ya que disminuyó los costos del proyecto. Así las cosas, elementos como el freno magnético, toda la tornillería, las chumaceras y los nuevos componentes electrónicos, precisaron de un proceso de gestión de presupuesto y compra de los insumos, permitiendo el aprendizaje de procesos transversales al diseño para una ampliación de conocimientos útiles en el ejercicio de esta disciplina.

Una vez obtenidos todos los insumos requeridos y al finalizar el proceso de manufactura de los componentes, el equipo interdisciplinario trabajó por turnos, a veces coincidentes, a veces separados en el ensamble del prototipo de la ayuda técnica. En la Figura 4.53 se presenta el registro fotográfico de algunas de las etapas de ensamble de la ayuda técnica multifuncional teleoperada. En el proceso de ensamble, se tuvo contacto con una parte fundamental del diseño que es la validación de las propuestas realizadas. Entre los aprendizajes de esta experiencia se obtuvo información valiosa para realizar las propuestas de los utilajes que contribuyen a un proceso más eficiente de ensamble de la ayuda técnica, así también, del trabajo conjunto con personal de experiencia en estos procesos, se logró consolidar una estrategia de ensamble que redujera las probabilidades de error en el armado y evitara reprocesos de construcción, lo cual es uno de los objetivos del presente trabajo. Inevitablemente también, se encontraron diversos errores y dificultades de las cuales se extrajo conocimiento valioso y que enmarcó con mucha más naturalidad la enriquecedora oportunidad de tener contacto con la manufactura real y la importancia del trabajo en conjunto con equipos interdisciplinarios.



(a) Montaje del freno



(b) Montaje unidad de la motriz y el clutch



(c) Montaje del conjunto actuador



(d) Ensamble final de la ayuda técnica

Figura 4.53: Registro fotográfico del proceso de ensamble de la propuesta de rediseño de la ayuda técnica.

5. Ensamble de la ayuda técnica

Con los elementos componentes manufacturados y adquiridos se inicia el proceso de ensamble teniendo presente la minimización del tiempo y asegurar la funcionalidad del ensamble. Para guiar al lector en el proceso, se realizó una descripción que va desde lo general, con el diagrama IDEF0 del proceso de producción de múltiples unidades de la ayuda técnica multifuncional teleoperada en una línea de producción, hacia lo particular, con el manual de ensamble y el video renderizado del proceso de armado de una única unidad de la máquina.

En la representación sistemática de la producción de las unidades de la ayuda técnica, Sección 5.1, se establece un diagrama IDEF0 con la descripción de las etapas a implementar en una fábrica o línea de producción para obtener el ensamble unitario y la debida replicación de este. En un primer momento se presenta el nodo A-0, Figura 5.54, con la representación del objetivo general del diagrama y, en los posteriores flujos, Figuras 5.55, 5.56 y 5.57, se representa la profundización de las etapas de mayor complejidad como subprocesos del proceso general.

En la profundización del ensamble particular de una única unidad de la ayuda técnica, Secciones 5.2 y 5.3, se realizó, en primera instancia, la elaboración de un manual de ensamble de la ayuda técnica con el fin de listar las piezas requeridas para el ensamble total de la maquina y sus utilajes, y como estos últimos hallan su función dentro del proceso de armado de la ayuda técnica. Este manual tiene sus propias convenciones y esta diseñado para servir de guía durante todo el proceso de los operarios en la línea de producción. Y, para condensar el proceso descrito en este manual, se elaboró un video renderizando el ensamble de la ayuda técnica a detalle. Este con el fin de dar una visión realista del procedimiento con el apoyo de la tecnología como lo es el software Autodesk Inventor y lograr así tanto un material para una mejor capacitación de los agentes involucrados en este procedimiento, como posibles campañas publicitarias y de marketing para la distribución de la ayuda técnica multifuncional teleoperada como producto final.

5.1. Modelo IDEF0 del proceso productivo de la ayuda técnica para su producción en serie

La representación en el diagrama IDEF0 inicia con el nodo A-0 de la Figura 5.54, en este se representa el objetivo principal del diagrama como una única entidad, producir ayuda técnica multifuncional teleoperada. Esta entidad tiene a su izquierda las entradas e insumos requeridos para lograr dicho objetivo como lo son, materias primas para el maquinado de los elementos diseñados, componentes adquiridos a terceros fabricantes y los recursos económicos necesarios para lograr el funcionamiento de toda la operación. A la derecha tiene representado el resultado de alcanzar dicho objetivo, que es la producción de una unidad de la ayuda técnica multifuncional teleoperada completamente funcional.

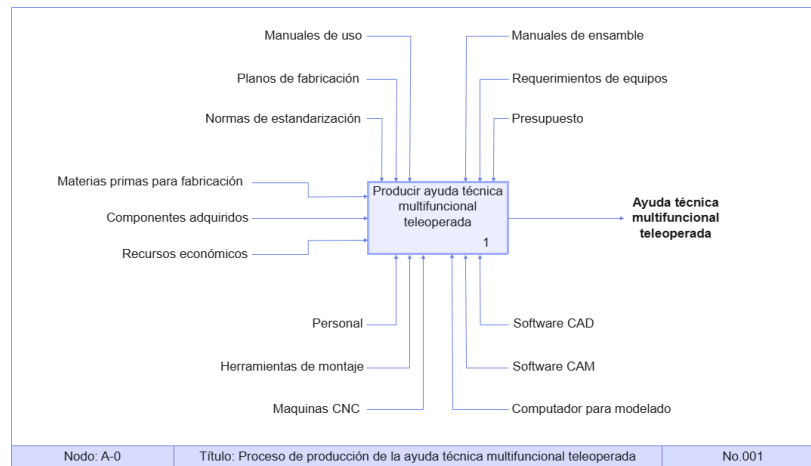


Figura 5.54: Representación en diagrama de flujo para el proceso de ensamble con perspectiva unitaria en el nodo A-0 del modelo IDEF0 de la construcción de la ayuda técnica.

En la parte superior tiene las entradas de los elementos de control que regulan el proceso como lo son los manuales de ensamble de la ayuda técnica, los planos de fabricación de los elementos diseñados, las normas de estandarización para el maquinado de los elementos y el control de calidad de estos y los adquiridos, los manuales de uso de las maquinas, los requerimientos de los elementos adquiridos a terceros y el presupuesto económico de cada etapa. Y finalmente en la parte inferior se encuentran los mecanismos necesarios para cumplir el objetivo, tales como, el personal, software CAD y CAM, las máquinas de control numérico, herramientas de montaje y equipos de cómputo para los procesos.

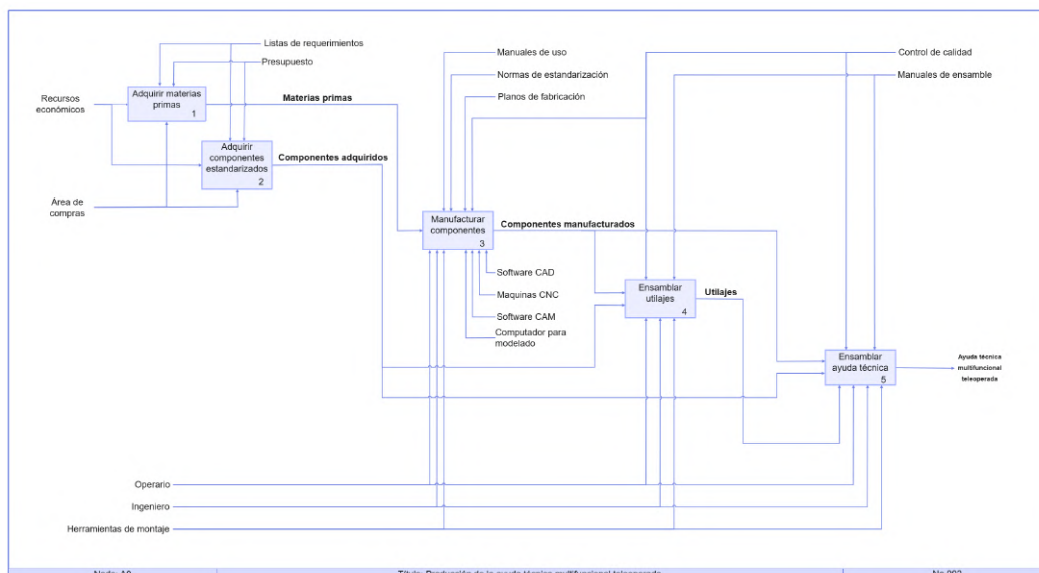


Figura 5.55: Representación en diagrama de flujo para el proceso descriptivo en el nodo A0 del modelo IDEF0 de la construcción de la ayuda técnica.

En la Figura 5.55 se representa el esquema a detalle general del objetivo del diagrama anterior. En este se pueden apreciar un desglose más amplio y detallado de etapas que se resuelven en

la producción de una unidad de la ayuda técnica multifuncional teleoperada. En la etapa inicial se encuentran los procesos transversales de adquisiciones, por una parte, la adquisición de materias primas necesarias para la manufactura de los componentes diseñados y por otra parte la adquisición de los elementos fabricados por terceros necesarios para el ensamble. Posterior a estos procesos, por la ramificación de la adquisición de materias primas, se encuentra la manufactura de los componentes y, una vez realizada esta etapa, ambas ramificaciones convergen en el ensamble de los utilajes necesarios para el armado de la máquina. Para finalizar el proceso, en la etapa final, todas las ramificaciones anteriores convergen en la producción de una unidad de la maquina completamente funcional.

Del esquema anterior se derivan dos diagramas de detalle y profundización de las etapas 3 y 5. En la Figura 5.56 se presenta el diagrama de la profundización de la etapa 3, Manufactura de componentes, en este diagrama se detallan una nuevas subetapas que inician con la inspección de las materias primas adquiridas para determinar la calidad de los mismo y aceptar o rechazar dicho material. Posterior a la aceptación del material de ser el caso, se prepara el funcionamiento de las máquinas de control numérico preparando los archivos CAM de acuerdo con los sólidos de las piezas y la carga de estos a las CNC. Una vez preparadas la maquinas y los materiales se procede con la manufactura de los elementos y, para finalizar esta etapa se realiza una verificación de control de calidad de los elementos manufacturados para su aprobación o descarte.

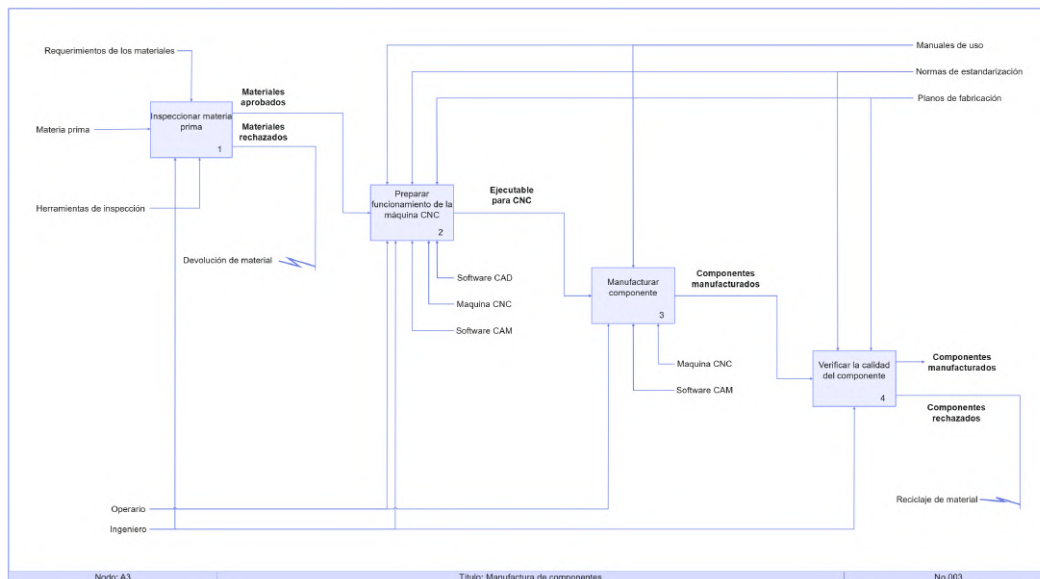


Figura 5.56: Representación en diagrama de flujo para el proceso detallado de la fase de manufactura de componentes en el nodo A3 del modelo IDEF0 de la construcción de la ayuda técnica.

El ultimo diagrama es la profundización de la etapa 5 en la Figura 5.57. Este flujo inicia con la inspección de todos los componentes necesarios para el ensamble de la ayuda técnica, aprobando y rechazando los mismos de acuerdo con los criterios de control establecidos, en caso del rechazo, se deberá solicitar nuevamente dicho elemento en particular para poder continuar con el proceso de ensamble. Una vez obtenidos todos los insumos necesarios para el ensamble de la ayuda técnica se procede con el armado de la misma, guiado principalmente por el manual de ensamble dispuesto para esta, Sección 5.2. Y, finalmente, se realiza el control de calidad de la maquina para poder

dar su aval de salida de la planta o reajustar el ensamble si tiene deficiencias leves o recuperar las piezas no afectadas si las deficiencias son graves.

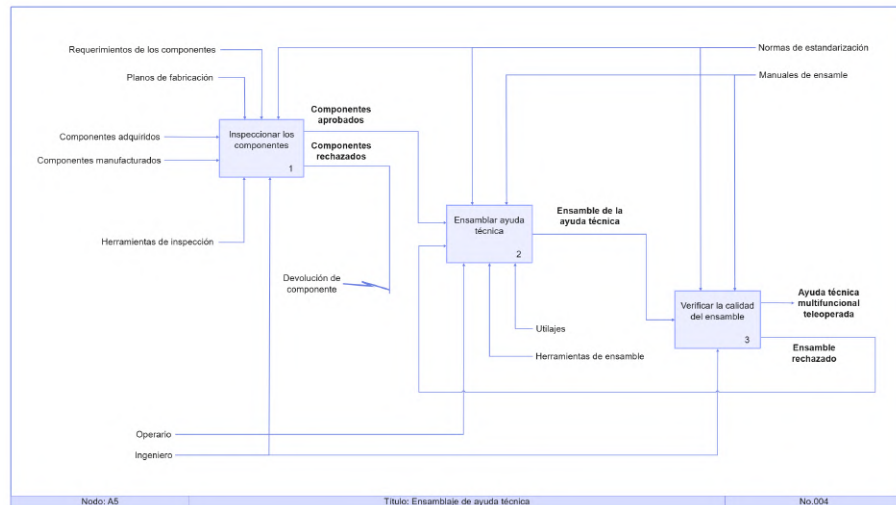


Figura 5.57: Representación en diagrama de flujo para el proceso detallado de la fase de ensamblaje de la ayuda técnica en el nodo A3 del modelo IDEF0 de la construcción de la ayuda técnica.

5.2. Paso a paso del ensamble de la ayuda técnica

Con el análisis de la estrategia más óptima para el desarrollo del ensamble de la ayuda técnica multifuncional teleoperada, se diseñó un manual de ensamble para guiar el proceso en la planta de fabricación. Este manual se diseñó con las vistas explosionadas del software de diseño Autodesk Inventor y todo el manejo gráfico de las características visuales de este se realizaron en el software Canva. Inicialmente, en la Figura 5.58, se presenta la portada y presentación de este manual con los datos esenciales para su identificación, como lo son, título del manual, autor y directos, descripción del libro y logos de las instituciones vinculadas al desarrollo del mismo.

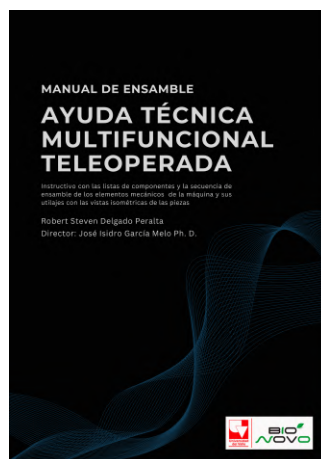


Figura 5.58: Portada del manual de ensamble de la ayuda técnica diseñado con el software Canva.

Como introducción al manual, se disponen para el lector tres elementos fundamentales, la tabla de contenido del manual, las convenciones para el entendimiento de este y las listas de elementos con una identificación especial que se utiliza a lo largo del manual. El primero de estos, Figura 5.59a muestra la tabla de contenido del manual, que ubica al lector a lo largo del documento facilitando el desplazamiento a unidades específicas de este y permitiendo dar cuenta superficialmente de todos los procesos que se realizan durante el armado.

En la Figura 5.59b se establecen las convenciones de comprensión del manual. Inicialmente se retrata un vista de explosión de uno de los pasos del ensamble, en este se identifica el modelo alámbrico de las piezas, la identificación numérica del paso, una tabla de las piezas requeridas en esa etapa identificadas con la nomenclatura establecida en las listas de elementos y la cantidad de cada una para ese paso en particular y con una nota para pasos que precisen una aclaración verbal que complemente el elemento gráfico de dicho paso de armado. Finalmente, en la Figura 5.59c, se muestra la representación de una de las tablas de listas de elementos de los componentes de la ayuda técnica, en este se encuentran, en la columna uno, el identificador establecido para dicho elemento en todo el manual, en la columna dos, el nombre de la pieza y en la columna tres la cantidad de unidades de dicho elemento para todo el ensamble.

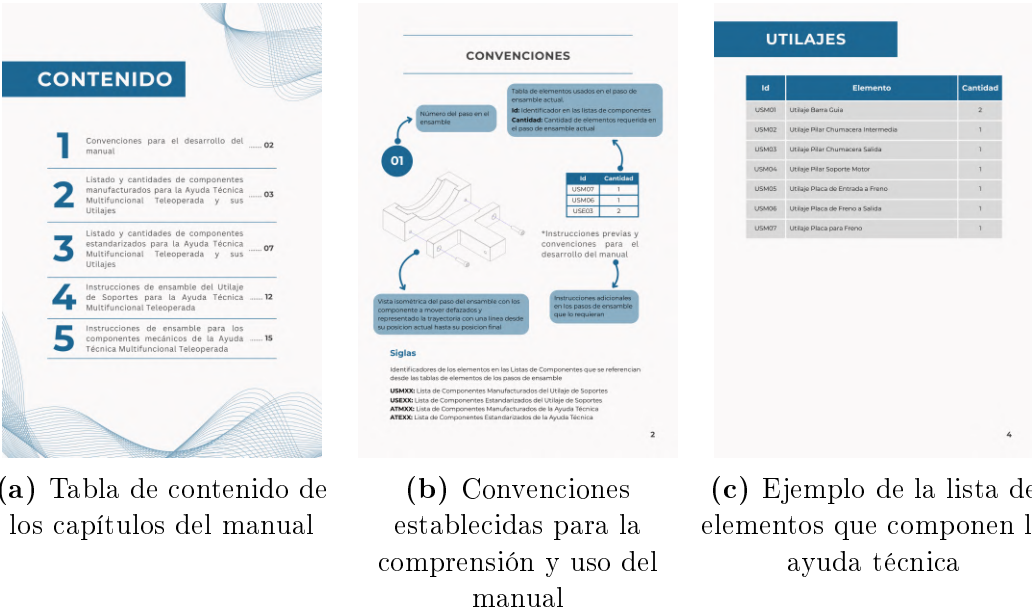
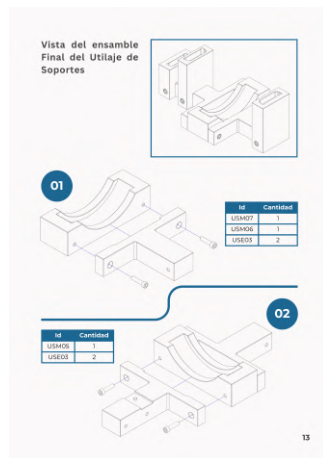
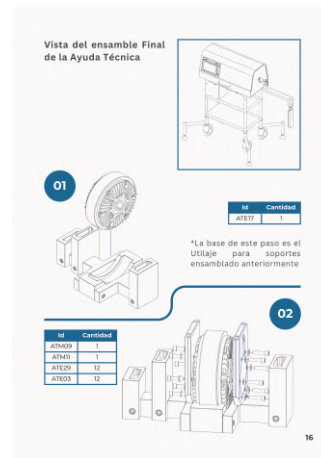


Figura 5.59: Paginas introductorias del manual de ensamble de la ayuda técnica.

A lo largo de los dos ensambles del manual, ensamble de utilaje de soportes, Figura 5.60a, y ensamble de la ayuda técnica, Figura 5.60b, se presentan múltiples pasos de acuerdo con el proceso de armado más eficiente seleccionado. En estas secciones del manual, las más extensas de este, se guía al lector por cada una de las etapas necesarias para lograr un correcto ensamble, indicando tanto las piezas añadidas en ese paso, como su ubicación, movimientos del conjunto y posibles notas aclaratorias que refuercen la claridad sobre la correcta ejecución de dicho paso.



(a) Ejemplo del paso a paso del ensamble del utilaje de soportes



(b) Ejemplo del paso a paso del ensamble de la ayuda técnica

Figura 5.60: Representaciones gráficas para el contenido del paso a paso de los ensambles del utilaje y la ayuda técnica multifuncional teleoperada.

En la Figura 5.61 se presenta el final del manual que, luego de ejecutar correctamente todos los pasos anteriormente descritos a lo largo de la dimensión del documento, daría como resultado una unidad de la ayuda técnica multifuncional teleoperada correctamente ensamblada y funcional.

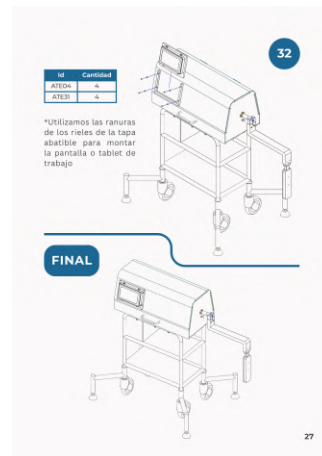


Figura 5.61: Representación del esquema final del ensamble de la ayuda técnica con una imagen alámbrica generada con el software Autodesk Inventor.

El manual de ensamble de la ayuda técnica se puede consultar en el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1pTrK3mHTGrf2b1T_T9a_bbaQ16JiMKYu?usp=sharing

5.3. Renderizado del ensamble de la ayuda técnica

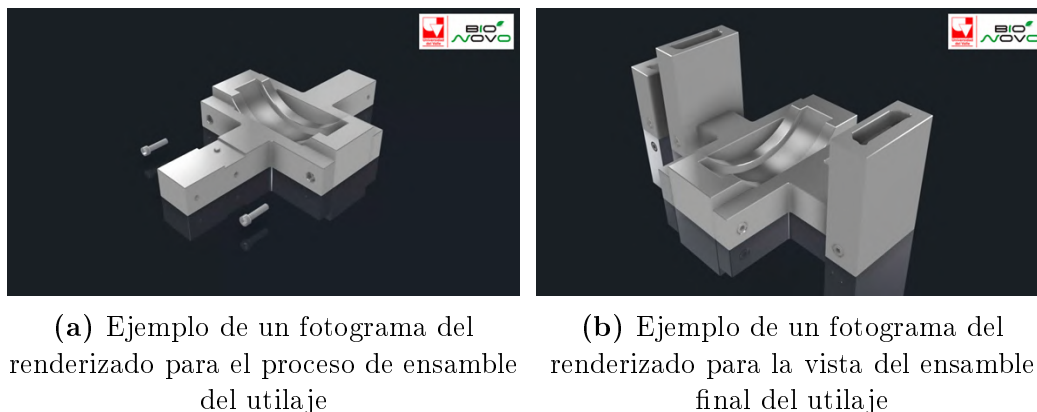
Una vez culminado el manual, se procedió a realizar el renderizado del ensamble de la ayuda técnica. Este procedimiento dio como resultado un video ilustrativo que represento el armado con los componentes solidos y en una perspectiva realista del software Autodesk Inventor. Primera-

mente, en la Figura 5.62 se presenta la introducción al video con la identificación del mismo, el autor y director y las instituciones involucradas en el desarrollo de este.



Figura 5.62: Portada del video renderizado del ensamble de la ayuda técnica diseñado con el software Canva.

El renderizado del video inicia con el ensamble del utilaje de soportes, En la Figura 5.63a se muestra un fotograma de uno de los pasos del ensamble del utilaje, como este, todas las etapas de armado se representaron moviendo cada uno de los elementos desde una posición inicial supuesta en el espacio hasta su posición final en el conjunto. En la Figura 5.63b se muestra un fotograma del resultado final del resultado del renderizado del utilaje de soportes.



(a) Ejemplo de un fotograma del renderizado para el proceso de ensamble del utilaje

(b) Ejemplo de un fotograma del renderizado para la vista del ensamble final del utilaje

Figura 5.63: Representaciones a través de fotogramas del renderizado de ensamble del utilaje de soportes en software Autodesk Inventor.

A lo largo del renderizado del video que sucede al anterior, se presentan vistas de ensamble de subconjuntos particulares que se realizan en espacios aislados del conjunto principal. En la Figura 5.64 se aprecia un ejemplo de dichos subconjuntos, desde esta perspectiva se realizan todos los movimientos de las piezas desde una ubicación espacial aleatoria hasta su final en el subconjunto. Posterior al armado del subconjunto este viaja completo a su ubicación final dentro del conjunto actuador de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.

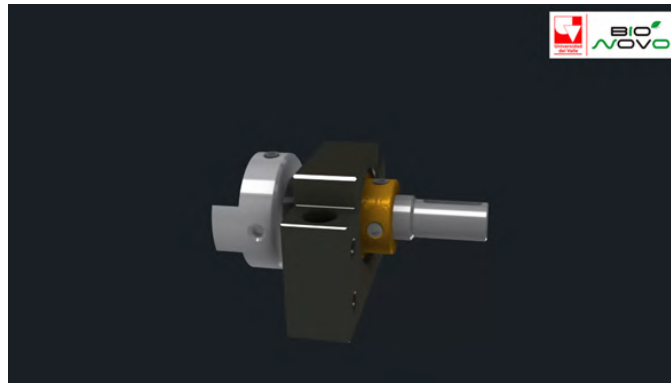
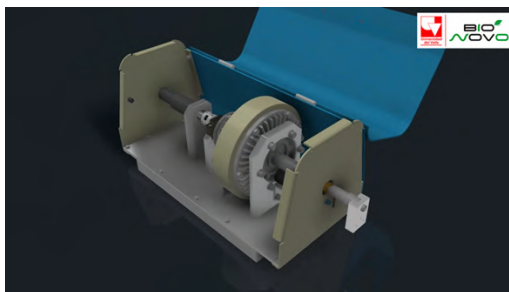
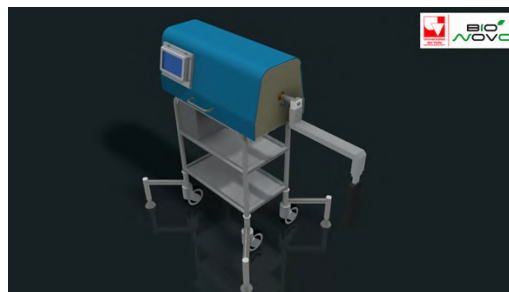


Figura 5.64: Representación de un fotograma del renderizado para procesos de ensamble aislado de los subconjuntos de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.

El renderizado continua con el ensamble de la ayuda técnica, En la Figura 5.65a se muestra un fotograma de uno de los pasos del ensamble de la máquina, como este, todas las etapas de armado se representaron moviendo cada uno de los elementos desde una posición inicial supuesta en el espacio hasta su posición final en el conjunto. En la Figura 5.65b se muestra un fotograma del resultado final del resultado del renderizado de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.



(a) Ejemplo de un fotograma del renderizado para el proceso de ensamble de la ayuda técnica



(b) Ejemplo de un fotograma del renderizado para la vista del ensamble final de la ayuda técnica

Figura 5.65: Representaciones a través de fotogramas del renderizado de ensamble de la ayuda técnica multifuncional teleoperada en software Autodesk Inventor.

El video del renderizado de la ayuda técnica se puede consultar en el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1pTrK3mHTGrf2b1T_T9a_bbaQ16JiMKYu?usp=sharing

6. Proyecto ALFI, evolución de la carcasa

Habiendo terminado y fortalecido el mecanismo funcional en la etapa anterior que da cumplimiento a los objetivos planteados en el presente proyecto, se integró un equipo multidisciplinario con el enfoque de lograr los activos necesarios para desarrollar un prototipo con orientación a la comercialización y la puesta en campo de la ayuda técnica de rehabilitación. Todo lo anterior teniendo en cuenta los símiles propuestos en el estado del arte y como lograr obtener un factor diferenciador sobre ellos que permita ocupar un espacio en el mercado donde dicho diferencial se transformará en preferencia para el consumidor. Así las cosas, el apartado seleccionado para realizar la evolución de la ayuda técnica, y teniendo en cuenta que el conjunto actuador cumple las funciones para las que fue diseñado, fue el conjunto de la carcasa y el carro de desplazamiento. A continuación, se presenta la evolución de la ayuda técnica y, en la Figura 6.66, se presenta una imagen renderizada con el objetivo de contextualizar al lector y generar un apoyo que ayude en la comprensión de las explicaciones subsecuentes.



Figura 6.66: Renderizado del prototipo comercial de la ayuda técnica multifuncional teleoperada bajo el proyecto ALFI en un ambiente de procedimientos para terapias.

Los objetivos de la evolución tienen la intención de comprender que, aunque el objetivo fundamental del proyecto es brindar acceso a servicios particulares de salud a poblaciones cuyas condiciones geográficas y socioeconómicas restringen esta necesidad básica del ser, no se puede desconocer que un factor comercial diferenciador en el mercado es clave para lograr cumplir también dicho objetivo. En este orden de ideas, y entendiendo que los objetivos a ser alineados pasan por diferentes áreas del conocimiento, el equipo multidisciplinario unió esfuerzos para tratar dichos frentes de la evolución de forma particular mientras se preparaba la convergencia en el resultado final, teniendo en cuenta factores como, respeto del crisol de funcionamiento de la ayuda técnica, diseño enfocado a productos, ergonomía y confort, estética, emprendimiento, trascendencia en mercados de consumo, humanidad y respeto a la vida.

6.1. El aporte de la conformación de equipos multidisciplinarios

El Proyecto ALFI adopto como cuna para el desarrollo de la evolución de la ayuda técnica la integración de saberes y la visión holística del diseño con énfasis en un producto competitivo para el mercado. Así las cosas, el equipo inicio el desarrollo de múltiples propuestas a través de las cuales dio forma a la arquitectura final de la carcasa ALFI. En este proceso, se crearon iniciativas con enfoques diferenciales que mediaban entre los factores anteriormente mencionados con el objetivo de encontrar la propuesta mejor ponderada entre todos los parámetros. Estas propuestas fueron registradas en las memorias del diseño donde, en el paso final de selección, se realizo una matriz de decisión que recogía los valores cuantitativos asignados a cada parámetro y marcaba la decisión final de la propuesta.

En la Figura 6.67 se presenta el plano de conjunto y el listado de piezas de la propuesta de diseño seleccionada para ALFI, Figuras 6.67a y 6.67b respectivamente. Este diseño englobo de mejor manera todos los factores tenidos en cuenta para elaborar las propuestas: portabilidad eficiente y segura, diseño estético y de vanguardia teniendo en cuenta su enfoque en el sector salud, baja complejidad de ensamble, robustez de conjunto y conservación del funcionamiento. La propuesta presenta un cambio radical respecto al prototipo anterior al unir dos elementos que previamente se consideraron como individuales, la carcasa del conjunto actuador o unidad de potencia y el carro de desplazamiento. Esta presento significativas mejoras para cada una, desde la perspectiva de la carcasa anterior, evidencia una mejora sustancial en el apartado estético, siendo este modelo un prototipo más artístico y competitivo en el mercado ya que plantea un impacto visual mucho más atractivo y, desde la perspectiva del carro de desplazamiento, aporta una ventaja de utilidad valiosa al, no solamente cumplir con los requisitos de desplazamiento y superación de obstáculos en el plano del piso, sino también permitiendo regular la altura a través de la incorporación de un pistón hidráulico que permite elevar el conjunto actuador.

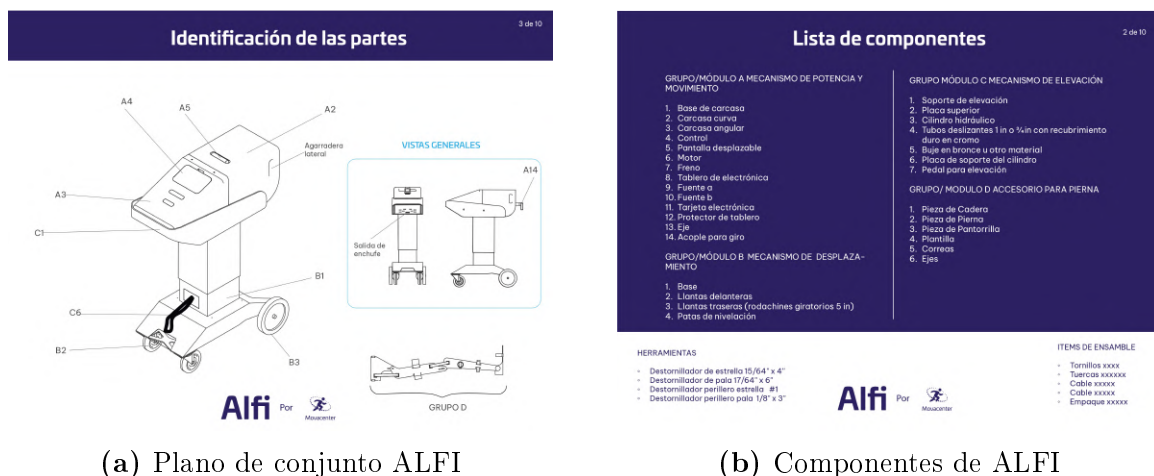


Figura 6.67: Representación del conjunto de la evolución de la carcasa del Proyecto ALFI y los elementos que la componen en el manual de ensamble.

Luego de la elaboración de los planos de fabricación de la propuesta del Proyecto ALFI, se procedió a enviar los mismos a un centro de mecanizado para su manufactura y los elementos componentes del ensamble estandarizados en el mercado se adquirieron personalmente. Una vez

obtenidos todas las piezas, se procedió a realizar el ensamble de todos los componentes. En la Figura 6.68a, se muestra la preparación del conjunto actuador previamente ensamblado para el primer prototipo y la base de ALFI de igual manera ensamblada con antelación. Posterior al alistamiento se realiza el montaje del conjunto actuador a la base de ALFI y se protege con la tapa superior posterior, Figuras 6.68b y 6.68c respectivamente. Luego, se realizaron las conexiones de los componentes electrónicos internos, Figura 6.68d, y, al finalizar dicho proceso, se termino de ensamblar la tapa superior frontal de ALFI para terminar con la construcción de la misma, Figura 6.68e. En la Figura 6.68f se presenta un registro fotográfico de el ensamble total de la propuesta de evolución de la ayuda técnica multifuncional teleoperada en su prototipo ALFI haciendo falta únicamente la pantalla de control pues no se contaba con ella en el momento del registro fotográfico.



(a) Preparación de la carcasa y el conjunto actuador



(b) Montaje del conjunto actuador



(c) Montaje de la tapa superior trasera



(d) Montaje de los componentes electrónicos



(e) Montaje de la tapa superior delantera



(f) Ensamble final del prototipo ALFI

Figura 6.68: Ensamble del prototipo de evolución de la ayuda técnica multifuncional teleoperada, Proyecto ALFI.

Posterior a la materialización de la carcasa de ALFI, y continuando con la idea de evolución constante, se realizo un trabajo por parte del grupo interdisciplinario para modernizar el accesorio de acople a la extremidad del paciente objeto de la terapia. En la Figura 6.69 se muestra el plano de conjunto de la propuesta de la evolución del accesorio, que en este caso es el particular para la pierna y la terapia de rehabilitación de rodilla. Este presenta un extensión que va desde la cadera hasta la región plantar del pie, con articulaciones coincidentes a las del paciente y elementos de sujeción a los músculos del muslo y las pantorrillas. El listado de piezas de este conjunto se

encuentra en la Figura 6.67b junto con la presentación del conjunto de la carcasa de ALFI.

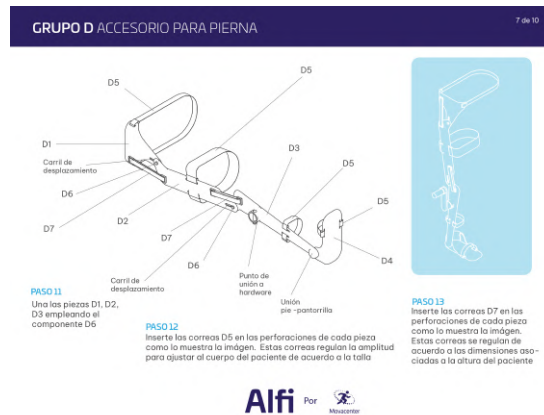


Figura 6.69: Representación del accesorio para terapia de rodilla de la evolución del Proyecto ALFI en el manual de ensamblaje.

6.2. Un proyecto con propósito

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los justificantes de este proyecto es brindar acceso digno y de calidad a terapias de rehabilitación a poblaciones con vulnerabilidad geográfica y socioeconómica. En este sentido, el profesor José Isidro García a liderado múltiples proyectos, etapas de desarrollo e iniciativas de evolución constante, entre las cuales se destaca la iniciativa del Spin-Off MovaCenter, Figura 6.70, la cual ha alcanzado un nivel de maduración tecnológica TRL-7 y alcanzo el hito de participar en el evento Innovación a tu Alcance, realizado por Créame incubadora de negocios y MinCiencias en Bogotá. Este logro se alcanzo gracias a la participación en la convocatoria para creación de empresas de base tecnológica tipo Spin-Off, realizada por MinCiencias. El nivel de maduración se alcanzó gracias a la realización de una prueba en un entorno cercano a la realidad de operación.



Figura 6.70: Imagen corporativa del Spin-Off de MovaCenter.

Para complementar el desarrollo del prototipo realizado, se crearon tanto los manuales de ensamblaje de el conjunto actuado como de el prototipo ALFI, Figura 5.60 y 6.67 respectivamente.

La redacción de estos documentos se realizó con el objetivo de producir un soporte para la distribución comercial de la ayuda técnica, en este sentido, se contemplaron parámetros como una estética agradable y de vanguardia, una fácil comprensión y seguimiento del paso a paso y una estandarización de la imprenta para su replicabilidad. Por otra parte, se preparó un video con el fin de exponer el prototipo y la justificación de este para darlo a conocer en el mercado en un trabajo conjunto entre el Spin-Off MovaCenter y la Universidad del Valle a través de la OTRI. En la Figura 6.71 se presentan dos fotogramas del video en el cual, se precisa una contextualización del problema a resolver con el proyecto, se explica de forma breve el desarrollo logrado y se informa al receptor de los logros alcanzados por la misma.



Figura 6.71: Video elaborado para la presentación de la evolución del proyecto ALFI en la Spin-Off de MovaCenter.

Finalmente, se concluyó la primera de las justificaciones de este proyecto de grado, la cual hace referencia a la formación personal, al realizar un trabajo que integro los conocimientos adquiridos en el programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle y que, adicionalmente, permitió integrar dos grupos interdisciplinarios que enriquecieron los conocimientos previos y fomentaron el desarrollo e interés por adquirir conocimientos en diversas ramas del saber teórico y de aplicación. Por todo lo anterior, se presenta un registro fotográfico de la última versión en la que se participó, la cual hace referencia a la propuesta de mejora del conjunto actuador y la evolución de la carcasa en su versión ALFI, Figura 6.72.



Figura 6.72: Conjunto ensamblado de la propuesta de evolución de la carcasa del Proyecto ALFI y la propuesta de mejora del conjunto actuador.

7. Conclusiones

- Basado en lo presentado anteriormente, se puede expresar que el abordaje metodológico planteado permitió alcanzar el objetivo propuesto, toda vez que fue presentado un prototipo funcional de la ayuda técnica soportado a través del cumplimiento de los requerimientos obtenidos de un proceso de ingeniería inversa que partió de la versión anterior con la que se inició este proyecto. En consecuencia, el establecimiento de dichos requerimientos permitió generar un diagrama de flujo de tipo IDEF0 que modelo el proceso de elaboración de la propuesta brindando claridad en los procesos realizados y mejorando la comunicación del flujo de trabajo a los grupos multidisciplinarios. De la misma forma, los resultados obtenidos en el análisis estático de la estructura, donde se obtuvieron factores de seguridad de hasta 4,06 para los ejes y 16,35 en los soportes, brindan un valor agregado de confianza por parte de los potenciales usuarios de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.
- La interacción con los procesos de manufactura permitió complementar los trabajos de diseño y simulación al posibilitar la adquisición de información de buenas prácticas de modelado en consideración a los procesos de maquinado que desarrollaran el sólido, consideraciones que de otra manera se terminarían por obviar dando como resultado simulaciones validas en el software, pero con una manufactura inviable y en algunos casos, incluso, imposible. En este sentido, la combinación del proceso teórico con la experiencia práctica concluyo en un enriquecimiento de la propuesta de rediseño para la ayuda técnica que optimizo procesos, permitió la validación de la construcción de los elementos y genero información valiosa de cara a la implementación de un modelo de ensamble optimo y escalable a la producción en serie de la ayuda técnica multifuncional teleoperada.
- El enfoque productivo que se tuvo desde el inicio de la concepción del proyecto permite que la arquitectura planteada sea escalable y replicable para cumplir su función principal. Además, este enfoque, caracterizado principalmente por la implementación de modelos estandarizados, es viable para la expansión de funciones a través de el acoplamiento de nuevos elementos que tomen las funciones preestablecidas y produzcan nuevos resultados. Así las cosas, el diseño con un enfoque que busca generar prototipos replicables, deriva en la elaboración de diagramas de flujo bien definidos y activos de valor que sientan las bases para, bien sea el refinamiento de las propuestas actuales o así también, la transferencia de conocimiento para continuar con un trabajo constantemente evolutivo.
- El desarrollo de proyectos con el soporte de equipos multidisciplinarios permite la elaboración de propuestas con la capacidad de abordar problemáticas desde diferentes áreas del conocimiento en la cuales se puede desplegar un desarrollo mejor fundamentado y duradero en el tiempo, teniendo siempre la responsabilidad de lograr la convergencia de todas las

perspectivas en un único resultado viable. En conclusión, la integración de equipos multidisciplinarios permitió dar solución a las problemáticas abordadas de una manera más holística que resultó en un prototipo funcional que alcanzo un alto rendimiento no solo en su función si no también en aspectos a considerar como lo son, la estética, la ergonomía y, como es otro de los factores fundamentales de la ayuda técnica, en un sólido desarrollo de la propuesta de teleoperación a través de la integración de la mecánica, la electrónica y el desarrollo de sistemas de información SaaS (Software as a Service).

- La maduración del proyecto a través de constantes propuestas de mejora en todos y cada uno de los aspectos que rigen la arquitectura física y de software de la ayuda técnica ha devenido en hitos como lo es la creación de una Spin-Off con el objetivo de brindar acceso digno y de calidad a servicios de salud especializados en la rehabilitación de la movilidad en extremidades. En este sentido, se concluye que el diseño de propuestas y la creación de productos o bases de conocimiento son procesos de evolución constante, desarrollos que requieren de constante investigación y experimentación para lograr el asentamiento de principios que permitan transmitir el conocimiento para su florecer en el progreso y enriquecimiento del mismo, tal como lo es este proyecto que procuro el desarrollo personal y colectivo de todos aquellos que, desde su área del conocimiento, nutrieron su existencia y consolidación.

7.1. Trabajos futuros

- Para desarrollos futuros, desde el área del diseño mecánico, se pueden elaborar accesorios de acople a diferentes extremidades como pueden ser los hombros, codos, cadera y tobillos de forma tal que, la ayuda técnica alcance una amplia multifuncionalidad y con ello se incremente la oferta de terapias para las diferentes afectaciones a la movilidad.
- En consecuencia con lo anterior, se requerirá una parametrización de la electrónica y software que funcionan actualmente en la ayuda técnica con el objetivo de poder desempeñar estas nuevas terapias.
- Así también, desde el enfoque de sistemas, se puede elaborar un sistema de monitoreo constante soportado en Inteligencia Artificial que analice datos generados por la ayuda técnica en tiempo real para brindarle mejor información al médico y que también tenga la capacidad de modificar su funcionamiento a través del software y la electrónica en pro de mejorar la calidad inmediata de la atención.

Referencias

- [1] DANE, *¿Dónde estamos?* 2018. dirección: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/donde-estamos> (visitado 13-10-2023).
- [2] G. Busso, «Vulnerabilidad social: nociones e implicancias de políticas para Latinoamérica a inicios del siglo XXI,» *Seminario Internacional, las diferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y el Caribe, Santiago de Chile*, 2001.
- [3] D. P. Betancourt, R. G. Carvajal, E. J. A. Santander, J. L. S. Mesa, A. B. P. Viana y B. E. C. Acosta, *Política Nacional de Prestación de Servicios de Salud*. Arte Laser Publicidad Ltda., Bogotá D.C., Colombia, 2005.
- [4] M. de Salud y Protección Social, *Registro Especial de Prestadores de Servicios de Salud - REPS*, 2023. dirección: <https://prestadores.minsalud.gov.co/habilitacion/> (visitado 13-10-2023).
- [5] DANE, *Salud - Discapacidad*, 2010. dirección: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/discapacidad> (visitado 13-10-2023).
- [6] T. G. Izquierdo, *Bases teóricas y fundamentos de la fisioterapia*. Médica Panamericana, Madrid, España, 2007.
- [7] D. M. R. Ayuso y P. M. Miralles, *Terapia ocupacional, teoría y técnicas*. Massom S.A., Barcelona, España, 2003.
- [8] R. Medical, *Knee CPM Continuous Passive Motion Machines-LKJ01*, 2023. dirección: <https://www.rehabmedicalequipments.com/product-detail/knee-cpm-continuous-passive-motion-machines-lkj01/> (visitado 28-10-2023).
- [9] Kinetec, *Prima Advance. Máquina de rodilla*, 2023. dirección: https://www.primphysio.es/productos/kinetec_prima-advance_cpm_maquina_de_rodilla/ (visitado 28-10-2023).
- [10] E. Hospital, *Ejercitador de movimiento pasivo continuo para miembros inferiores Ortomed 4060*, 2023. dirección: <https://www.elhospital.com/es/noticias/ejercitador-de-movimiento-pasivo-continuo-para-miembros-inferiores-ortomed-4060> (visitado 28-10-2023).
- [11] Chattanooga, *Chattanooga Active-K*, 2023. dirección: <https://international.chattgroup.com/es/productos/chattanooga-active-k> (visitado 31-10-2023).
- [12] Kinetec, *Kinetec Kinevia*, 2023. dirección: <https://www.kinetec.fr/marques/kinevia/appareils-kinevia/kinetec-kinevia> (visitado 31-10-2023).
- [13] E. Interferenciales, *MOTOmed muvi*, 2023. dirección: <https://interferenciales.com.mx/collections/motomed/products/motomed-muvi> (visitado 31-10-2023).

- [14] C. D. C. Rodríguez, *Propuesta de una arquitectura con orientación a servicios aplicada a sistemas tele-operados de rehabilitación para población en condición de vulnerabilidad geográfica*. Universidad del Valle, Facultad de Ingenierías, Vicedecanatura de Investigaciones, Programa de Doctorado en Ingeniería, Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia, 2017.
- [15] A. M. V. Restrepo, *Diseño e implementación de un sistema de gestión de la operación de una ayuda técnica multifuncional, pasiva-activa, teleoperada vía internet: caso piloto rodilla*. Escuela de ingeniería Mecánica, Facultad de ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia, 2017.
- [16] R. Gonzalez, *Rehabilitación médica*. Masson S.A., Barcelona, España, 1997.
- [17] W. E. Prentice, *Técnicas de rehabilitación en medicina deportiva*. Paidotribo, Barcelona, España, 2001.
- [18] E. N. Ortega y L. B. Villaluenga, *Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2004.
- [19] A. D. Deutschman, W. J. Michels y C. E. Wilson, *Machine Design: Theory and Practice*. Macmillan Publishing CO, 1975.
- [20] J. E. Shigley y C. R. Mischke, *Mechanical Engineering Design*. McGraw Hill, 1989.
- [21] C. E. Wilson, *Computer Integrated Machine Design*. Prentice Hall International, 1997.
- [22] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna: Materiales procesos y sistemas*. Prentice Hall International, 1996.
- [23] J. P. G. Sabater, *Líneas de Producción: Nota técnica*. Universitat Politècnica de València, Valencia, 2020.
- [24] ASME, *Operation and flow process charts*. University of Michigan Libraries, New York, EE. UU, 1947.
- [25] J. C. C. Velarde, *Una mirada estratégica y gerencial de la implementación de los programas sociales*. Instituto Interamericano de Desarrollo Social (INDES) del Banco Interamericano de Desarrollo, Washington DC, EE. UU, 2005.