



Escuela
Politécnica
Superior

Actuación y control de un exo-traje para la rehabilitación y asistencia de miembro superior



Máster Universitario en Automática y
Robótica

Trabajo Fin de Máster

Autor:

Byron David Bolaños Muñoz

Tutor/es:

Carlos Alberto Jara Bravo

Julio 2023



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Actuación y control de un exo-traje para la rehabilitación y asistencia de miembro superior

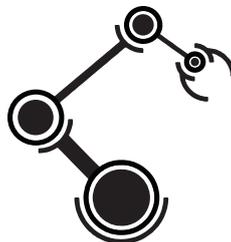
Autor

Byron David Bolaños Muñoz

Tutor/es

Carlos Alberto Jara Bravo

Física, ingeniería de sistemas y teoría de la señal



Máster Universitario en Automática y Robótica



Escuela
Politécnica
Superior



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ALICANTE, Julio 2023

Resumen

En la sociedad actual española, existe un significativo número de personas dependientes debido a discapacidades congénitas y/o adquiridas. Estos pacientes enfrentan dificultades para llevar una vida independiente, ya que carecen de la suficiente autonomía. El accidente cerebro vascular es una de las principales causas de discapacidad física, afectando considerablemente la calidad de vida de los pacientes, por este motivo actualmente existen dispositivos para ayudar al paciente a recuperar/asistir la movilidad y la fuerza del miembro superior, entre estos dispositivos, se destacan las ortesis y los exoesqueletos de miembro superior y dentro de esta gama de dispositivos de rehabilitación similares a los exoesqueletos, se encuentra el exo-traje (exo-suit), dispositivos vestibles capaces de adaptarse a cualquier usuario, también conocido como exoesqueleto portátil suave que se caracteriza por ser más ligeros y versátiles de bajo consumo de energía, que cumple con su objetivo de aumentar la fuerza muscular y asistir en las actividades de la vida diaria. Este dispositivo se presenta como una solución eficiente y práctica para mejorar la movilidad y la autonomía de las pacientes con discapacidad en el miembro superior.

En este proyecto, se busca avanzar en el diseño y desarrollo de un exo-traje para la rehabilitación del miembro superior. Con el cual se espera contribuir al campo de la rehabilitación y asistencia del miembro superior, mejorando la calidad de vida de las personas con discapacidad. Además, se espera que los resultados obtenidos impulsen futuras investigaciones y avances en el diseño de exo-trajes, brindando soluciones aún más efectivas y adaptadas a las necesidades de los pacientes.

Palabras claves: Asistencia y rehabilitación, exo-traje, miembro superior.

Abstract

In today's Spanish society, there is a significant number of dependent individuals due to congenital and/or acquired disabilities. These patients face difficulties in leading an independent life, as they lack sufficient autonomy. Stroke is one of the main causes of physical disability, significantly affecting the quality of life of patients. For this reason, there are currently devices designed to assist patients in recovering and supporting the mobility and strength of the upper limb. Among these devices, orthoses and upper limb exoskeletons stand out. Within this range of rehabilitation devices similar to exoskeletons, there is the exo-suit (also known as wearable exoskeleton), a portable soft exoskeleton that can adapt to any user. It is characterized by being lighter, more versatile, and consuming low energy. Its purpose is to increase muscle strength and assist in activities of daily living. This device presents itself as an efficient and practical solution to improve mobility and autonomy for patients with disabilities in the upper limb.

This project aims to advance in the design and development of an exo-suit for upper limb rehabilitation. The goal is to contribute to the field of upper limb rehabilitation and assistance, ultimately improving the quality of life for people with disabilities. Furthermore, it is expected that the obtained results will drive future research and advancements in exo-suit design, providing even more effective solutions tailored to the needs of patients.

Keywords: Assistance and rehabilitation, exo-suit, upper limb.

Agradecimientos

Deseo expresar un agradecimiento especial a mi madre, quien, aunque ya no está físicamente presente, sigue siendo una fuente inagotable de inspiración y fortaleza en mi vida. Su amor incondicional y su apoyo inquebrantable siempre me han impulsado a seguir adelante en la búsqueda de mis sueños. A mi padre, mi guía y ejemplo de perseverancia, le agradezco de todo corazón por creer en mí y alentarme constantemente a alcanzar mis metas. A mi querida hermana, agradezco su apoyo constante y sus palabras de aliento. Su presencia ha sido fundamental en cada paso que he dado, y su confianza en mis capacidades me ha dado la fuerza necesaria para superar obstáculos y desafíos.

A mi prima, quiero expresar mi sincero agradecimiento por su presencia constante en mi vida. Su disposición para escuchar mis inquietudes y brindarme consejos sabios ha sido de un valor incalculable. Siempre estuvo dispuesta a ofrecerme su apoyo emocional y su perspectiva única, lo cual me ha ayudado a tomar decisiones informadas y mantenerme motivado en todo momento. Igualmente, a mi novia, quiero expresar mi profundo agradecimiento por su paciencia, comprensión y amor incondicional. Su apoyo emocional ha sido fundamental durante los momentos de estrés y presión, y su presencia ha sido mi fuente de fortaleza para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Su constante motivación y su fe en mis capacidades me han impulsado a dar lo mejor de mí en cada paso del camino.

No quiero dejar de agradecer a mi director de tesis, Carlos Jara Bravo, por su invaluable guía, apoyo y valiosas sugerencias a lo largo de todo el proceso de investigación. Sus conocimientos y experiencia fueron fundamentales para el éxito de este proyecto. Asimismo, agradezco a mi compañero, Sergio Arias, por su amistad, honestidad y constante apoyo. Compartimos risas, momentos de celebración, pero siempre estuvo dispuesto a brindar su ayuda y su perspectiva, lo cual enriqueció mi aprendizaje y contribuyó al éxito de este proyecto.

No puedo olvidar mencionar a toda mi familia en Colombia, quienes desde la distancia han brindado su amor, motivación y aliento en cada etapa de mi formación académica. Su apoyo incondicional ha sido un motor fundamental para perseguir mis sueños y alcanzar el éxito.

A todos ellos, les estaré eternamente agradecido por su amor, apoyo y confianza en mí. Han sido pilares fundamentales en mi vida, y su contribución ha sido invaluable en mi desarrollo académico y personal. Desde lo más profundo de mi corazón, quiero expresar mi gratitud y decir ¡gracias!

*Nunca consideres el estudio como una obligación,
sino como una oportunidad para penetrar en el bello
y maravilloso mundo del saber.*

Albert Einstein.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación	1
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Objetivo general	2
1.3.2	Objetivos específicos	2
2	Estado del Arte	5
2.1	Biomecánica del miembro superior	5
2.2	Exoesqueletos de asistencia y rehabilitación	6
2.3	Interacción humano-robot	6
2.4	Exo-trajes	7
2.5	Ortesis	8
2.6	ROS (Sistema Operativo de Robots)	9
3	Descripción del Sistema	11
3.1	Sistema de accionamiento	11
3.2	Diseño CAD	13
3.2.1	Rediseño del conjunto actuador	13
3.3	Configuración y control de moto-reductor	20
3.3.1	Configuración	22
3.3.2	Calibración	22
3.4	Configuración de trayectorias con ROS control	23
3.4.1	Control del motorreductor	23
3.4.2	Ros Control	26
3.4.3	Arquitectura de Control	30
3.4.4	Conexiones	31
4	Resultados	33
4.1	Rediseño mecánico del conjunto actuador	33
4.2	Control del actuador del exo-traje	35
4.3	Pruebas de usabilidad	36
4.4	Ventajas	36
4.5	Desventajas	37
4.6	Trabajos futuros	37
5	Conclusiones	41
	Bibliografía	43

Índice de figuras

2.1	Rango de movimiento normal en el complejo articular del codo	6
2.2	Prototipo conjunto actuador exo-traje	7
2.3	Compensación adaptativa de contragolpe en exoesqueletos	8
2.4	Ortesis	9
3.1	Rango de operación del motor previamente seleccionado	12
3.2	Diseño de pieza de carcasa.	14
3.3	Compensación adaptativa de contragolpe en exoesqueletos	14
3.4	Diseño de pieza de carcasa.	15
3.5	Diseño de pieza de Poleas (a) y (b).	15
3.6	Ensamble de Diseño de Poleas.	16
3.7	Tamaño del reductor	16
3.8	Pieza diseño soporte de motor.	17
3.9	Diseño 3D del sistema de actuación.	18
3.10	pieza carcasa en software PrusaSlicer	19
3.11	Fracturamiento carcasa impresa 3D.	19
3.12	Estudio de de von misses mediante inventor.	20
3.13	Ensamble de Diseño de Poleas en el exo-traje.	20
3.14	: Comparación de la eficiencia de un motor EC, un motor de CA de inducción trifásico, un motor de inducción de CA monofásico	21
3.15	Prueba de calibración del motorreductor	23
3.16	Contenido del nodo	30
3.17	Interfaz ROS para controladores de motor Maxon EPOS	31
3.18	conexión	32
4.1	Conjunto sistema actuador.	33
4.2	Montaje de exo-taje con el usuario.	34
4.3	distribución de los elementos de control en ares_ws	38
.1	Creacion del material PLA en Inventor	45

Índice de tablas

3.1	Datos de la configuración del motor	22
.1	Tabla de las propiedades mecánicas del PLA	45

Índice de Códigos

3.1	Código Python para controlar la posición del motor	24
3.2	Código script .yaml	27
3.3	Código epos_hardware_node.cpp	27
4.1	Código control.py	35

1 Introducción

1.1 Antecedentes

En la sociedad actual, el ritmo de vida sociocultural y tecnológico, ha generado un incremento significativo en el número de enfermedades y padecimientos que afectan las capacidades físico-motrices de las personas. Según datos proporcionados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), las enfermedades cerebro-vasculares se han convertido en una de las principales causas de discapacidad, teniendo un impacto significativo en la calidad de vida de los afectados. El espectro de afectaciones es amplio, abarcando diversas limitaciones y dificultades en la movilidad y funcionalidad de las personas.

En respuesta a este desafío, en los últimos años se ha observado un notable desarrollo en productos y tecnologías diseñados para auxiliar en la recuperación y mejora de la movilidad y fuerza de las extremidades superiores. Entre estos avances, destacan los exoesqueletos, dispositivos robóticos que asisten y rehabilitan mediante una estructura de eslabones rígidos acoplada a la extremidad del paciente.

En la actualidad, existen numerosas empresas que ofrecen exoesqueletos comerciales tanto para la rehabilitación de pacientes como para aumentar la capacidad de fuerza de los usuarios. Sin embargo, la mayoría de estos dispositivos se basan en enfoques que utilizan eslabones rígidos, resultando en estructuras pesadas y poco portables. Afortunadamente, los exoesqueletos están evolucionando hacia versiones más ligeras y adaptables al usuario, con menos eslabones rígidos, mayor seguridad en los movimientos y mayor inteligencia. Estos dispositivos se conocen como exo-trajes (exo-suits). Esta nueva aproximación resulta mucho más ergonómica que la alternativa rígida, aunque su diseño y funcionamiento pueden presentar mayor complejidad al trabajar con múltiples articulaciones.

Este trabajo aspira a contribuir al avance de la tecnología de exo-trajes, proporcionando una solución más liviana y adaptable que pueda mejorar la calidad de vida de las personas que padecen discapacidades o limitaciones físicas en las extremidades superiores. Asimismo, se busca estimular la investigación y el desarrollo en este campo, explorando nuevas posibilidades y aplicaciones para los exo-trajes en el ámbito de la rehabilitación y la asistencia médica.

1.2 Justificación

Las enfermedades cerebrovasculares y sus consecuencias discapacitantes representan un desafío significativo para la sociedad actual. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha identificado estas enfermedades como una de las principales causas de discapacidad, afectando la calidad de vida de un gran número de personas en todo el mundo. Ante este escenario,

es necesario desarrollar soluciones innovadoras que aborden las limitaciones físicas y motoras asociadas con estas enfermedades y mejoren la calidad de vida de los afectados. Los exo-trajes (exo-suits) emergen como una tecnología prometedora para la rehabilitación y asistencia en la movilidad de las extremidades superiores. Aunque los exoesqueletos tradicionales han demostrado su eficacia en ciertos escenarios, su enfoque basado en eslabones rígidos presenta limitaciones en términos de peso, portabilidad y adaptabilidad al usuario. Estas limitaciones dificultan su uso generalizado y su impacto en la rehabilitación y mejora de la funcionalidad.

El avance en la tecnología de exo-trajes no solo implica mejoras en la rehabilitación y asistencia del miembro superior, sino que también abre nuevas posibilidades para la integración de la tecnología robótica en la medicina y la atención sanitaria. Este campo en constante evolución tiene el potencial de revolucionar la forma en que se abordan las limitaciones físicas y motoras, ofreciendo soluciones más eficientes, personalizadas y accesibles para mejorar la calidad de vida de las personas afectadas.

Por lo tanto, resulta evidente la necesidad de desarrollar exo-trajes más livianos, adaptables y ergonómicos, capaces de brindar una asistencia efectiva y segura en la recuperación de la movilidad y fuerza de las extremidades superiores. Al abordar este desafío, nuestro Trabajo Final de Máster (TFM) tiene como objetivo contribuir al avance de la tecnología de asistencia en rehabilitación, con el propósito de mejorar significativamente la calidad de vida de las personas afectadas por enfermedades cerebrovasculares y otras condiciones que limitan su funcionalidad física.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Finalizar el desarrollo de un prototipo de exo-traje para la asistencia y rehabilitación del miembro superior. El proyecto se encuentra en una etapa avanzada, con el exo-traje prácticamente construido y simulado, y el sistema de actuación seleccionado y adquirido. El objetivo principal es completar la parte constructiva del diseño y la parte de control de actuación del motor, con el fin de permitir su utilización en ejercicios de rehabilitación mejorando la movilidad y funcionalidad de los pacientes con discapacidad en el miembro superior, ofreciendo una solución eficiente y práctica para su rehabilitación y autonomía.

1.3.2 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un análisis exhaustivo del estado del arte de la tecnología de exo-trajes en el campo de la rehabilitación y asistencia del miembro superior. Se revisarán los avances más relevantes en el diseño y funcionamiento de exo-trajes, así como su aplicación en la rehabilitación y asistencia de dicha área del cuerpo.
 - Identificar las distintas partes y componentes que componen el exo-traje. Se analizará detalladamente la estructura y funcionalidad de cada componente, que contribuyen a la rehabilitación y asistencia del miembro superior.
-

-
- Reformar el diseño del prototipo de exo-traje, considerando aspectos de ergonomía, ligereza y seguridad en los movimientos. Se buscará crear un diseño que se ajuste cómodamente al usuario y permita una movilidad natural, utilizando materiales livianos pero resistentes para garantizar la comodidad y seguridad durante su uso.
 - Implementar un sistema de control eficiente que permita la activación y coordinación de los motores del exo-traje de manera precisa. Esto implica la programación de algoritmos y la configuración del sistema de actuación, para lograr una respuesta adecuada a los movimientos del usuario y proporcionar la asistencia necesaria durante la rehabilitación.
 - Realizar pruebas de usabilidad con el prototipo de exo-traje para evaluar su funcionamiento y eficacia en situaciones reales de rehabilitación y asistencia del miembro superior. Se llevarán a cabo pruebas, para evaluar la mejora en la movilidad y funcionalidad, así como la comodidad y facilidad de uso del exo-traje.
-

2 Estado del Arte

Los exoesqueletos, a diferencia de los manipuladores robóticos que interactúan con los humanos mediante el efector final, cubren las extremidades de las personas en una o más articulaciones, y se mueve sincrónicamente con ellas. Por lo tanto, los exoesqueletos plantean unos desafíos en el diseño de mecanismos, actuación y sensorización, fabricación y desarrollo del sistema de control, que requieren una comprensión profunda de la anatomía humana, el control motor y la biomecánica del cuerpo humano.

Es importante destacar que los exoesqueletos y exo-trajes han experimentado avances significativos en los últimos años, impulsados por la necesidad de mejorar la calidad de vida de las personas afectadas por enfermedades cerebrovasculares y otras afecciones que afectan las capacidades físico-motrices. Estos dispositivos representan una prometedora solución tecnológica para la rehabilitación y asistencia del miembro superior.

Centrándose en los exoesqueletos de extremidades superiores, se pueden distinguir los dispositivos de asistencia, de rehabilitación y de aumento de fuerza. Para esta sección, se van a describir tanto los exoesqueletos rígidos como los exo-trajes más importantes de la actualidad en las áreas de rehabilitación y asistencia.

2.1 Biomecánica del miembro superior

El estudio de la biomecánica del miembro superior en flexión y extensión es fundamental para comprender los mecanismos de movimiento, las fuerzas involucradas y la función de los músculos y las articulaciones. Esta comprensión es crucial para el diseño y desarrollo de dispositivos como los exoesqueletos y exo-trajes, que buscan asistir y rehabilitar la movilidad del miembro superior. Al tener en cuenta los principios biomecánicos, se puede optimizar la eficacia y la seguridad de estos dispositivos, mejorando así la calidad de vida de las personas con discapacidades o limitaciones en el miembro superior.

- **Flexión:** Involucra una palanca de tercer grado (**A-P-R**), donde el complejo articular del codo actúa como el punto de apoyo (**A**), el bíceps ejerce la fuerza en la tuberosidad bicipital del radio (**P**), y el segmento antebrazo-muñeca-mano es donde se encuentra la resistencia (**R**).
- **Extensión:** Se asocia a una palanca de primer grado (**P-A-R**), donde el tríceps braquial ejerce la fuerza en el olecranon cubital (**P**), mientras que el punto de apoyo es el codo (**A**) y el segmento antebrazo-muñeca-mano es donde se ubica la resistencia (**R**).

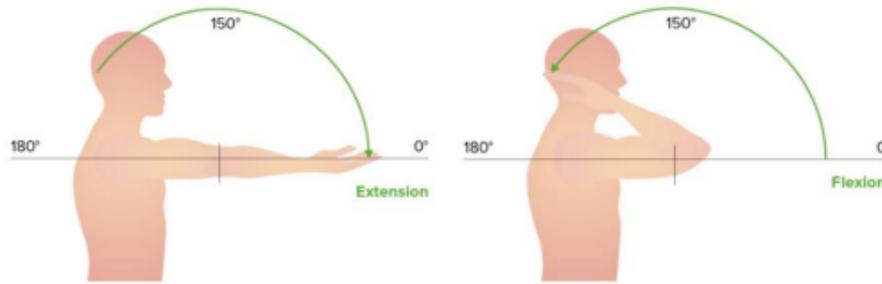


Figura 2.1: Rango de movimiento normal en el complejo articular del codo

Fuente: : Proyecto de Evaluación Final “Diseño y simulación de un dispositivo de rehabilitación de miembro superior” [1]

2.2 Exoesqueletos de asistencia y rehabilitación

Los exoesqueletos para asistencia son los que proporcionan asistencia necesaria al operador humano para realizar actividades de la vida diaria. Como muchos exoesqueletos de miembros inferiores que generalmente proporcionan trayectorias de marcha predefinidas, los sistemas de exoesqueleto de las extremidades superiores para la asistencia ayudan a terminar el resto de las trayectorias si los operadores humanos no son capaces de lograrlas, por ejemplo, extendiendo la mano para tomar una taza de café. Debido a la gran variabilidad de tareas y adecuación del exoesqueleto a las mismas, no se han desarrollado muchos exoesqueletos en esta área, si lo comparamos con los de rehabilitación. Entre ellos, cabe destacar los exoesqueletos HAL[2], ABLE [3] y el MYOPRO [4].

Los exoesqueletos para rehabilitación permiten acelerar el proceso de rehabilitación en pacientes que pierden parte del movimiento y capacidad de su extremidad superior como imposibilidad de levantar los brazos, espasticidad, manipulación y sinergia anormal. Estos dispositivos permiten realizar tareas de rehabilitación de múltiples GDL. Como exoesqueletos para rehabilitación de miembro superior más destacados en los últimos años, se puede incluir a REHABOT [5], ETS-MARSE [6], EXO-UL SERIES [7], ORTE [8] y SMA exoskeleton [9].

2.3 Interacción humano-robot

Se ha desarrollado un enfoque de control basado en señales electromiográficas (EMG) con el objetivo de lograr una interacción fluida y segura entre humanos y robots en tareas físicas colaborativas. Este enfoque se basa en la capacidad de los robots para interpretar y responder a las señales musculares generadas por las personas durante los movimientos de sus miembros superiores, especialmente después de lesiones o enfermedades que han afectado su funcionalidad.

El control cooperativo basado (EMG) ha demostrado ser una solución altamente beneficiosa en diversas aplicaciones, destacando especialmente en la asistencia en tareas de manipulación y la colaboración en entornos de trabajo. Al capturar y analizar las señales (EMG), los

robots pueden adaptar su comportamiento y respuesta de manera inmediata, permitiendo una colaboración fluida y segura con los humanos. Estos avances tecnológicos continúan impulsando la investigación y desarrollo de tecnologías de asistencia y rehabilitación, con el objetivo de mejorar significativamente la calidad de vida de las personas con limitaciones físicas, permitiéndoles controlar de manera intuitiva y natural los dispositivos robóticos que los asisten en sus actividades diarias [10].

2.4 Exo-trajes

Este dispositivo también se conoce como exoesqueleto portátil suave, con un diseño para que sean compatibles tanto los actuadores como la estructura del dispositivo. El exo-traje tiene como ventaja una mayor portabilidad y un bajo consumo de energía, manteniendo el cumplimiento de estos dispositivos: aumentar la fuerza muscular y asistir en las actividades de la vida diaria.

Adicionalmente, al no estar fabricados de metal, estos dispositivos cuentan con la ventaja de brindar mayor elasticidad mecánica en su estructura cinemática, además de conectar de forma más eficiente la extremidad del cuerpo con el sistema de actuación del dispositivo.

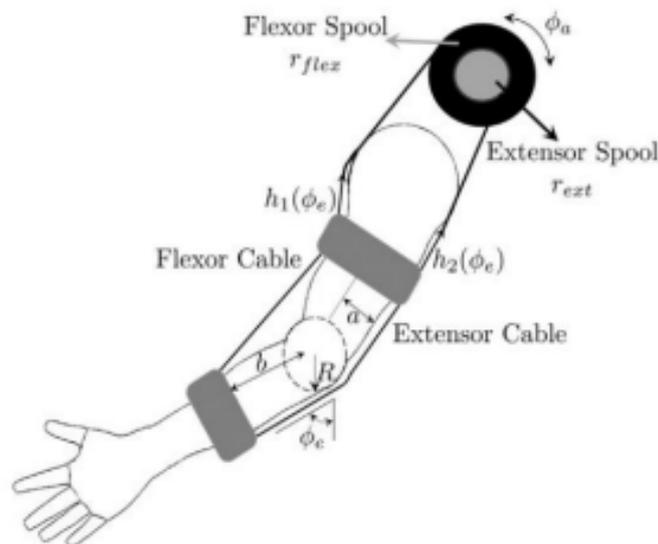


Figura 2.2: Prototipo conjunto actuador exo-traje

Fuente: Adaptive backlash compensation in upper limb soft wearable exoskeletons [11]

Con este dispositivo de rehabilitación, se obtiene un mejor contacto del actuador con el sistema musculo esquelético para que el soporte mecánico esté más sujeto a la demanda de la persona y no tanto al mecanismo de la estructura del exo-traje, lo cual es útil en cuanto a la biomecánica del miembro superior, ya que da un soporte de estructura adecuado y se

necesita del actuador para que se genere una mayor fuerza o torque en las articulaciones [11].

En [12], se muestra el desarrollo de un exo-traje como plataforma para investigación. Este dispositivo, reduce el esfuerzo muscular asociado con la flexión movimientos trabajando en paralelo con los músculos de su usuario mediante una serie de sensores. Este dispositivo ha sido una referencia fundamental del principio de funcionamiento del prototipo desarrollado y descrito en este artículo.

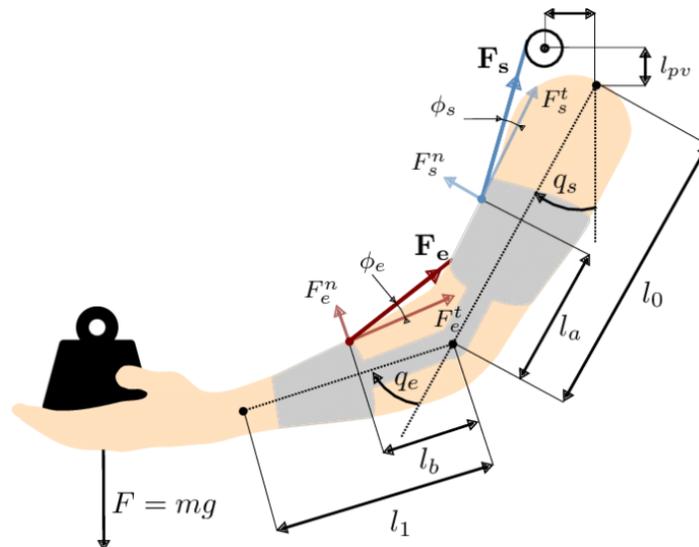


Figura 2.3: Compensación adaptativa de contragolpe en exoesqueletos

Fuente: Design and embedded control of a soft elbow exosuit [12]

2.5 Ortesis

Las ortesis son dispositivos médicos diseñados para proporcionar soporte, estabilidad y/o corrección a una parte del cuerpo afectada por una lesión, enfermedad o discapacidad. Estas ayudas técnicas pueden ser utilizadas tanto en la rehabilitación como en el manejo a largo plazo de diversas condiciones, también desempeñan un papel crucial en la rehabilitación y en la mejora de la funcionalidad de las personas con limitaciones físicas. Se utilizan en una amplia gama de áreas, como la ortopedia, la neurología, la traumatología y la medicina deportiva. Estos dispositivos están diseñados para adaptarse a la anatomía y las necesidades individuales de cada paciente, brindando soporte y permitiendo el movimiento controlado de una articulación o grupo de articulaciones.

Una de las áreas en las que las ortesis han demostrado ser especialmente efectivas es en el tratamiento de los trastornos de las extremidades superiores, como la lesión del codo. En el caso específico de una ortesis de codo, su función principal es proporcionar estabilidad y control en los movimientos de flexión y extensión. En el contexto de la rehabilitación post-

ictus. Mediante un estudio en la PubMed se evaluó la eficacia de las ortesis dinámicas en la rehabilitación de las extremidades superiores en pacientes que habían sufrido un accidente cerebrovascular, se proporciona una información sobre los efectos potencialmente beneficiosos en la mejora de la función motora y la recuperación de la fuerza en la extremidad superior afectada [13].



Figura 2.4: Ortesis

Fuente: Soporte de recuperación de lesiones de ortesis de brazo ajustable.

2.6 ROS (Sistema Operativo de Robots)

Software ampliamente utilizado en la industria robótica para el desarrollo y control de robots. Proporciona un conjunto de herramientas y bibliotecas que facilitan la creación de software para robots y la comunicación entre diferentes componentes del sistema, basándose en un enfoque de arquitectura distribuida, donde los diferentes módulos o nodos pueden comunicarse entre sí a través de mensajes y servicios. Esto permite que los desarrolladores creen sistemas robóticos complejos, integrando sensores, actuadores y algoritmos de control de manera modular [14].

El uso de ROS ofrece numerosas ventajas en el desarrollo de robots, como la reutilización de código, la interoperabilidad entre diferentes plataformas y la posibilidad de compartir recursos y conocimientos en la comunidad de usuarios de ROS. Además, cuenta con una amplia gama de paquetes y herramientas que facilitan tareas comunes en el desarrollo robótico, como la percepción, la planificación de movimientos y creación de trayectorias.

3 Descripción del Sistema

El sistema desarrollado consiste en un prototipo de exo-traje diseñado para la rehabilitación y asistencia de los movimientos del miembro superior. Se ha utilizado una combinación de materiales termoplásticos (PLA) y materiales flexibles para proporcionar un soporte cómodo y adaptable durante el uso del exo-traje, tomando como modelo la anatomía y el movimiento del codo humano [15].

El sistema de accionamiento del exo-traje se compone de un conjunto integrado de componentes que permiten realizar el movimiento del codo, específicamente la flexión y extensión. Para lograr esto, se emplean poleas y cables del tipo Bowden, los cuales se encargan de transmitir el movimiento desde el actuador hasta el brazo del paciente. Este sistema de poleas y cables proporciona la asistencia necesaria durante la rehabilitación y los movimientos del brazo. En cuanto al actuador utilizado en el exo-traje, se ha seleccionado un sistema moto-reductor. Esta elección se ha realizado en base a una serie de simulaciones del sistema, considerando aspectos como la potencia requerida, la velocidad de movimiento y la capacidad de control. El sistema moto-reductor se encarga de generar el movimiento necesario para la flexión y extensión del codo, proporcionando la fuerza adecuada para la asistencia durante la rehabilitación.

En la parte del software, el sistema de accionamiento del exo-traje es controlado mediante ROS Control. ROS Control es una serie de librerías y herramientas proporcionadas por el framework ROS que permiten la integración y control de actuadores en sistemas portables. Estas librerías facilitan la comunicación y control del motor-reductor, permitiendo ajustar parámetros como la velocidad y el torque en tiempo real.

A continuación, se describen cada una de las características para la elaboración del prototipo:

3.1 Sistema de accionamiento

En el desarrollo del prototipo, se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de requisitos y necesidades para asegurar la selección adecuada de componentes y dispositivos. Este análisis tiene como objetivo principal garantizar un rendimiento confiable y óptimo del sistema de actuación del exo-traje. En primer lugar, se ha evaluado detalladamente las necesidades específicas de los pacientes con discapacidad en el miembro superior, considerando aspectos como el rango de movimiento requerido, la fuerza necesaria para realizar determinadas tareas y la comodidad durante el uso del exo-traje.

A partir de esta evaluación, se ha procedido a seleccionar los componentes y dispositivos más apropiados para el sistema de actuación del exo-traje. Se han tenido en cuenta criterios

como la capacidad de generación de fuerza, la precisión en el control del movimiento y la compatibilidad con el diseño y los materiales del exo-traje. Asimismo, se ha realizado una investigación exhaustiva de los diferentes tipos de actuadores disponibles en el mercado, considerando sus características técnicas y funcionales.

Para el diseño y desarrollo del conjunto del exo-traje, se ha realizado un análisis dinámico previo con el objetivo de obtener los pares requeridos por el sistema. Este análisis se ha llevado a cabo utilizando una órtesis previamente diseñada en el marco de un Trabajo de Fin de Máster titulado "Diseño y simulación de accionamiento de un exo-traje para la asistencia-rehabilitación de miembro superior", dirigido por el tutor Carlos Alberto Jara Bravo y su alumno Domingo Miguel Izquierdo (2021), gracias a este proyecto, se han obtenido datos relevantes sobre el par y la velocidad máxima requerida durante los movimientos de flexión y extensión del miembro superior. Estos datos han sido fundamentales para la selección del conjunto motor-reductor del exo-traje.

De acuerdo a la anterior investigación realizada se propone:

- **Motor:** EC 45 flat 43.5 mm, brushless, 50 Watt modelo V1 (with Hall sensors)
- **Reductora:** Planetary Gearhead GP 42 C 42mm, 3.0–15.0 Nm (Part Number 203126)

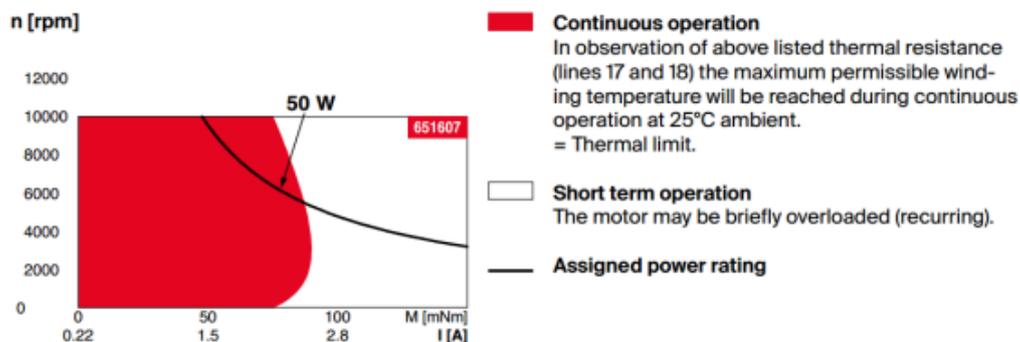


Figura 3.1: Rango de operación del motor previamente seleccionado

Fuente: dathaseet EC 45 flat 43.5 mm, brushless, 50 Watt modelo V1 (with Hall sensors)

La elección del sistema moto-reductor se ha basado en la comparación y evaluación de diferentes opciones disponibles en el mercado. Se ha considerado la eficiencia energética, la compatibilidad con el diseño general y los materiales del exo-traje, también se ha buscado asegurar que el sistema moto-reductor sea capaz de proporcionar el par necesario, velocidad de movimiento y la capacidad de control para asistir en los movimientos de flexión y extensión del miembro superior, garantizando así la efectividad de la rehabilitación y la asistencia al paciente.

3.2 Diseño CAD

Hay muchos programas CAD (Diseño Asistido por Computadora), que consiste en un programa de diseño y dibujo de precisión utilizado en todas las ramas de ingeniería, porque facilita la generación, modificación y optimización de un diseño o una serie de piezas complejas en un modelado 3D. Este proceso se ha llegado a determinar en la elaboración del prototipo que fuera capaz de cumplir eficazmente la recuperación de codo con movimientos pasivos de flexo-extensión y un bosquejo inicial de cada una de las piezas que lo complementan.

El diseño de un prototipo de miembro superior es un proceso completo que requiere de un enfoque sistemático y de herramientas adecuadas. Una de las herramientas más utilizadas en la industria del diseño es el software Inventor, que permite a los diseñadores crear modelos en 3D de alta calidad. Además, incluye una amplia gama de características, como la parametrización, el diseño de piezas, ensamblajes, herramientas de simulación, análisis, y la creación de documentación detallada de los diseños, todo esto garantiza que el diseño mecánico sea óptimo.

El diseño fue tomado como base fundamental del trabajo de investigación previo realizado por el alumno Atlas Alex Barrientos Arellano dirigido por el tutor Carlos Alberto Jara Bravo (2022) en su Trabajo de Fin de Máster (TFM) titulado "diseño, construcción y control de un exo-traje para rehabilitación de miembros superiores y asistencia", Este trabajo proporciona una base sólida de conocimientos, análisis y resultados que sirven como punto de partida para el rediseño. A partir de este trabajo, se identifica áreas de mejora, posibles limitaciones o aspectos que requieran ajustes en el diseño del exo-traje.

En las primeras pruebas de funcionamiento del sistema de flexo-extensión, se identificaron inconsistencias en el enrollado de los cables. Por lo tanto, se decidió analizar y mejorar el sistema de poleas y cables tipo Bowden utilizado en el diseño. Estos elementos desempeñan un papel crucial en la transmisión del movimiento desde el actuador hasta el brazo del paciente.

Los cables Bowden, compuestos por un cable interno flexible y una funda externa resistente, permiten transmitir la fuerza y el movimiento de manera eficiente a lo largo de una distancia determinada. Proporcionan estabilidad y guía al cable interno, evitando que se doble o se desvíe de su recorrido durante la rehabilitación y los movimientos del brazo [12]. A partir de esta investigación se optó por reducir el diámetro de cable a 0.5 mm.

3.2.1 Rediseño del conjunto actuador

Para comenzar el rediseño, es importante recopilar información detallada sobre el sistema de actuación actual, incluyendo sus componentes, funcionamiento y rendimiento. A continuación se describe cada una de las piezas que fueron sometidas a algún cambio:

- **Carcasa:** Se realizaron modificaciones en los diámetros de los pasos por donde pasa el cable de tipo Bowden. Esta modificación fue necesaria debido a que inicialmente el cable utilizado tenía un diámetro de 2 mm, también se diseñó una manera de acople
-

para la funda del cable ya que cuando se realizaba el movimiento de flexión generaba atascos por parte de las fundas.

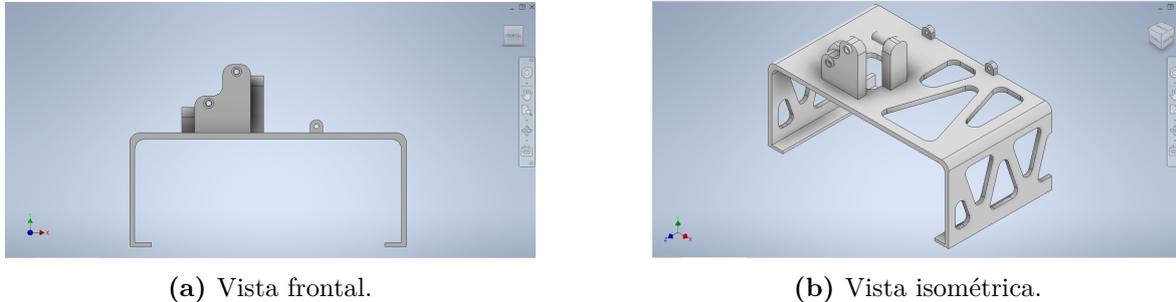


Figura 3.2: Diseño de pieza de carcasa.

Fuente: Propia

La figura 3.3, ilustra los cambios realizados en la carcasa del conjunto actuador, destacando las modificaciones mencionadas anteriormente. Estos cambios reflejan un enfoque en la eficiencia, la funcionalidad y la mejora del rendimiento del exo-traje durante las actividades de rehabilitación.

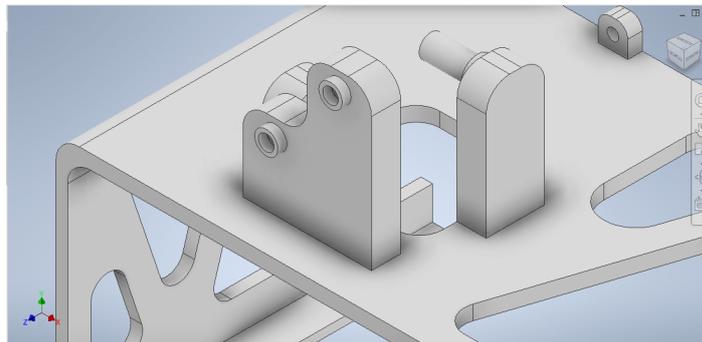


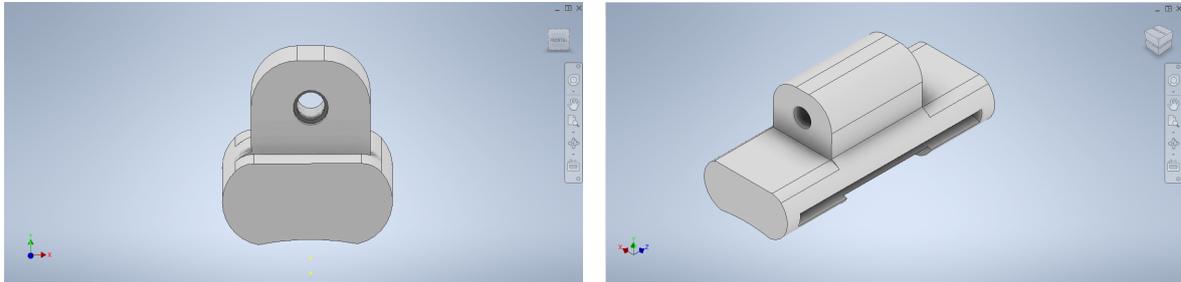
Figura 3.3: Compensación adaptativa de contragolpe en exoesqueletos

Fuente: Propia

- **Agarre cable:** El agarre del cable desempeña un papel fundamental en el sistema, ya que su principal objetivo es mantener el cable en su lugar y garantizar un deslizamiento suave dentro de la funda durante los movimientos del exo-traje. Para lograr esto, es necesario ajustar el diámetro de la pieza de agarre al diámetro de la funda. Este ajuste preciso es esencial para lograr un acoplamiento adecuado entre el cable y la funda, evitando posibles deslizamientos o enganches que podrían afectar negativamente el rendimiento general del sistema.

El correcto funcionamiento del agarre del cable es esencial para asegurar la eficacia y la seguridad del exo-traje durante la rehabilitación y asistencia del miembro superior. Por lo tanto, es importante dedicar atención y cuidado en el diseño y fabricación de

esta pieza para garantizar un desempeño óptimo del sistema en su conjunto.



(a) Vista frontal.

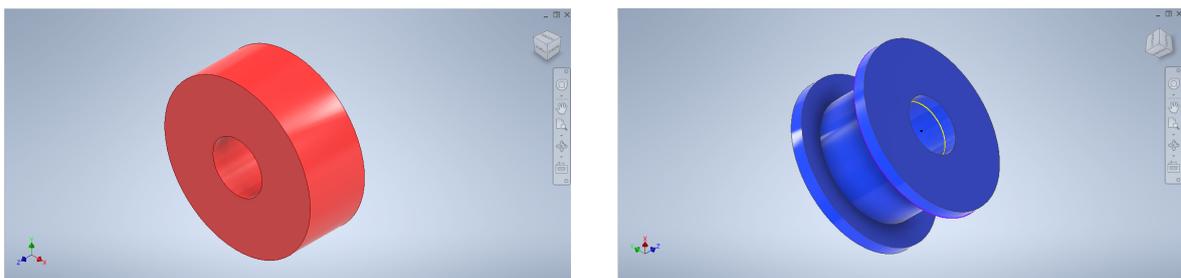
(b) Vista isométrica.

Figura 3.4: Diseño de pieza de carcasa.

Fuente: Propia

En la figura 3.4 (a), ilustra los cambios realizados en la pieza con un diámetro 5.30 mm donde perfectamente coincide con el grosor de la funda además se hace una profundización de 3.5 mm para garantizar mejor la estabilidad de la funda y permita los movimiento de flexo-extensión. Además se modifico otro diámetro que permite el paso del cable a 2.5 mm , donde se han aplicado medidas específicas en el diseño para garantizar que no haya fricción entre la pieza y el cable.

- **Poleas:** Dada la diferencia en el diámetro del cable utilizado anteriormente (2 mm) y el nuevo cable (0.5 mm), es necesario realizar una modificación del diseño actual de las poleas para que se ajusten correctamente al nuevo tamaño del cable, se debe considerar cuidadosamente el diámetro necesario para acomodar el cable de 0.5 mm sin generar holguras excesivas ni un ajuste demasiado apretado. Un ajuste preciso evitará cualquier movimiento no deseado del cable dentro de las poleas y asegurará un funcionamiento fluido del sistema.



(a) Vista isométrica.

(b) Vista isométrica.

Figura 3.5: Diseño de pieza de Poleas (a) y (b).

Fuente: Propia

En el nuevo diseño de las poleas, se debe considerar cuidadosamente el diámetro necesario para acomodar el cable de 0.5 mm sin generar holguras excesivas ni un ajuste

demasiado apretado. Un ajuste preciso evitará cualquier movimiento no deseado del cable dentro de las poleas y asegurará un funcionamiento fluido del sistema. Además del diámetro, es importante tener en cuenta la forma de las poleas. La superficie de contacto debe ser diseñada de manera que proporcione un contacto óptimo con el cable, minimizando cualquier posibilidad de fricción. Esto implica seleccionar un perfil adecuado para la polea que se ajuste al nuevo diámetro del cable y proporcione un deslizamiento suave y sin obstáculos.

A continuación se muestra en la figura 3.6 el ensamble del conjunto de poleas.

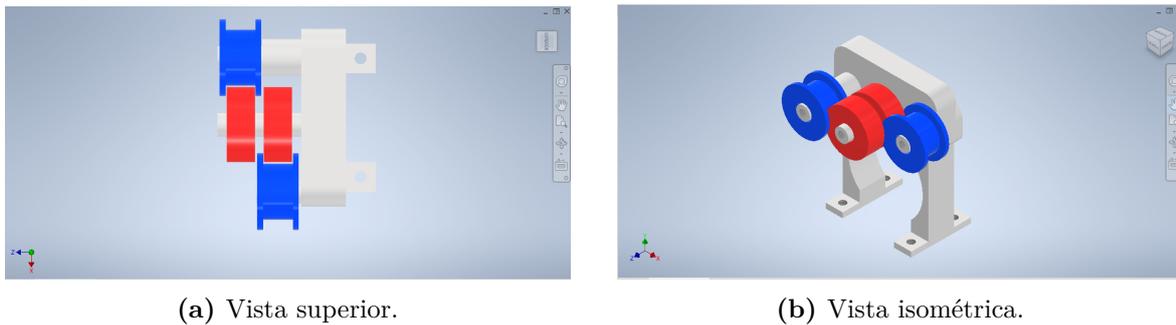


Figura 3.6: Ensamble de Diseño de Poleas.

Fuente: Propia

- **Soporte motor:** Se presenta un problema de atascamiento del soporte motor cuando el paciente se coloca en posición vertical con el exo-traje en la espalda, es necesario realizar modificaciones en el diseño de dicho soporte.

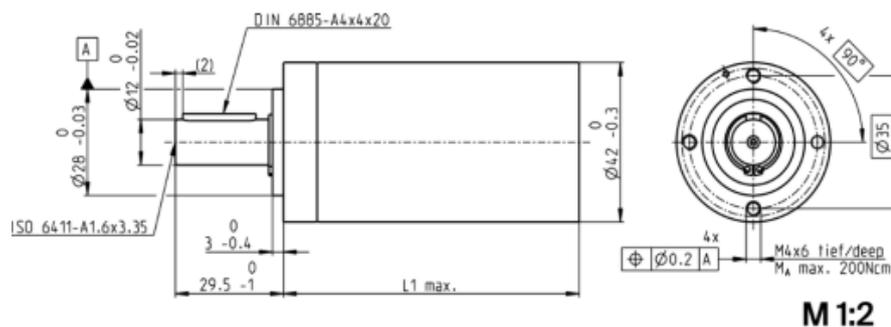


Figura 3.7: Tamaño del reductor

Fuente: Hoja de reductor Maxon A

Para abordar este problema, se ha identificado cada uno de los errores que no permite la movilidad en el diseño del soporte motor. Estas modificaciones se basan en las medidas de la figura 3.7 y medidas físicas del motor-reductor con los acoples de los cables para

garantizar que el soporte motor se deslice sin problemas y sin restricciones, incluso cuando el paciente se encuentre en posición vertical.

En la figura 3.8, se presenta el diseño final del soporte motor con las modificaciones necesarias. Durante el proceso de desarrollo, se identificaron tres áreas que requerían modificaciones para solucionar los problemas de atascamiento en posición vertical. Estas modificaciones son las siguientes:

Reducción del rozamiento del motor: Se implementaron medidas para disminuir el rozamiento del motor, ya que esto afectaba el rendimiento y la eficiencia del sistema. Se utilizó un lubricante de baja fricción en los puntos de contacto del motor y se ajustaron los componentes mecánicos para asegurar un movimiento suave y sin obstáculos.

Mejora en el acople de los cables del motor: Se detectó que el sistema de acople de los cables del motor presentaba problemas de desgaste y deslizamiento irregular. Para solucionar esto, se rediseñaron los acoples utilizando materiales más resistentes al desgaste y se implementaron guías y soportes adicionales para asegurar un acople estable y preciso.

Optimización del punto de apoyo: Se identificó que el punto de apoyo del sistema generaba interferencias cuando el motor estaba en movimiento, lo que afectaba la estabilidad y el equilibrio del exo-traje. Para solucionar esto, se realizó un ajuste en la ubicación del punto de apoyo, asegurando que no interfiriera con el movimiento del motor y permitiendo un funcionamiento más fluido y seguro.

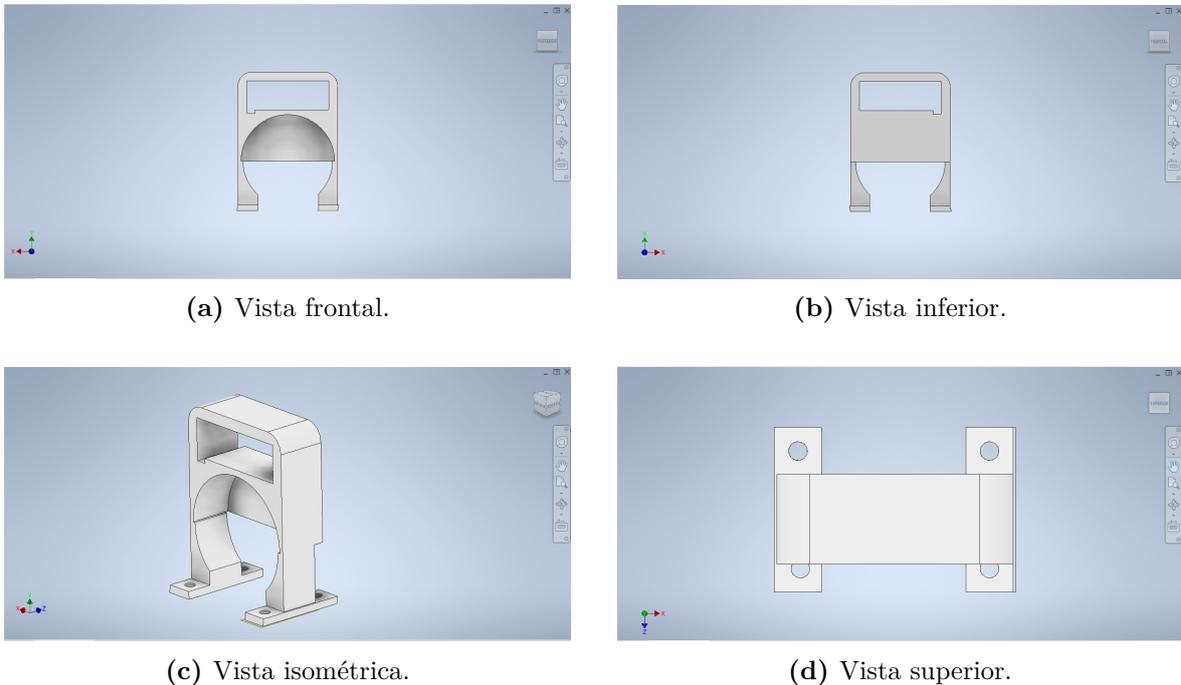
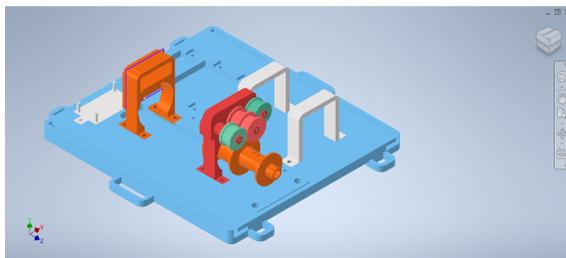


Figura 3.8: Pieza diseño soporte de motor.

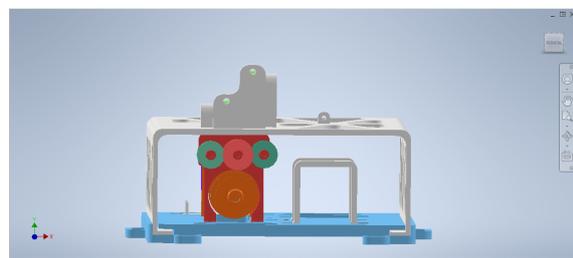
Fuente: Propia

Debido a que esta pieza es una de las más importantes del exo-traje, por que tiene la función de proporcionar el movimiento, y con estas modificaciones ha demostrado resolver los problemas de atascamiento en posición vertical. Se han realizado pruebas exhaustivas para verificar su funcionamiento en diferentes condiciones y se ha obtenido un resultado satisfactorio. El soporte motor ahora permite un deslizamiento suave y sin obstáculos, brindando un mejor rendimiento y una experiencia más cómoda para el paciente.

A continuación, en la Figura 3.9, se presenta el ensamblaje de las piezas del sistema de actuación mediante el uso de Inventor. En esta imagen, se puede apreciar la disposición y conexión de los componentes que conforman el sistema de actuación del exo-traje. El diseño detallado de cada pieza y su ubicación estratégica se ha tenido en cuenta para asegurar un funcionamiento óptimo y seguro del dispositivo.



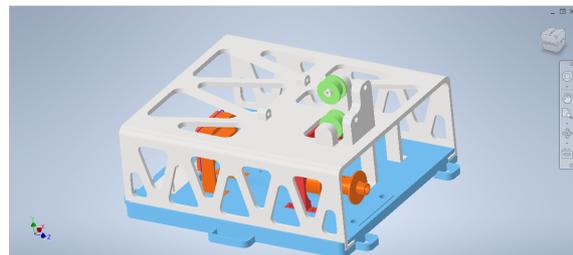
(a) vista isométrica sin carcasa.



(b) Vista frontal.



(c) Vista lateral.



(d) Vista isométrica con carcasa.

Figura 3.9: Diseño 3D del sistema de actuación.

Fuente: Propia

- **Impresión y construcción:** Para este primer prototipo, se han impreso las piezas del sistema de accionamiento mediante la tecnología FDM (Fused Deposition Modeling). Para ello, se han exportado las piezas del modelo CAD a archivos tipo STL, y mediante el software PrusaSlicer se genera el modelo por capas de acuerdo con unas características en la velocidad y calidad de impresión 3D. En la figura 2, se muestra las configuraciones de la impresión 3D por medio del software.

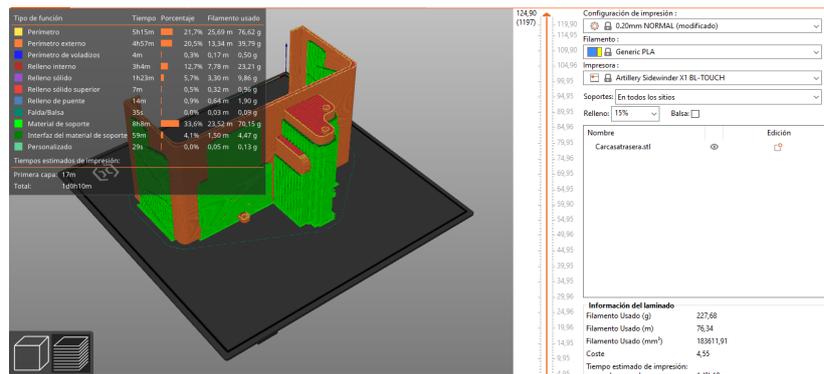
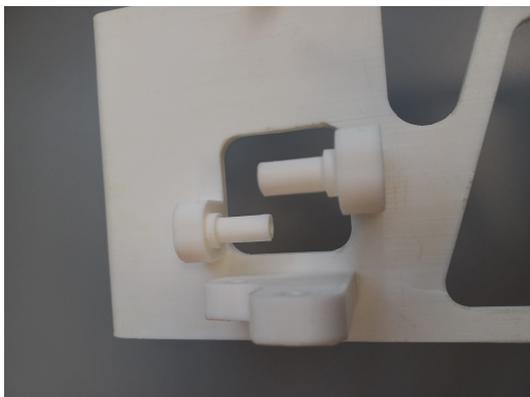


Figura 3.10: pieza carcasa en software PrusaSlicer

Fuente: Propia

- **Primeras pruebas:** En las primeras pruebas del exo-traje debido al torque que ejerce el actuador hubo fracturamiento de la pieza carcasa al momento de flexionar el brazo, opte por agregar el tipo de material PLA con las propiedades físicas de a cada una de las piezas para realizar un estudio mecánico a la pieza o piezas que tengan riesgo de fracturamiento y poder evaluar antes de ser impresa.



(a) Vista superior.



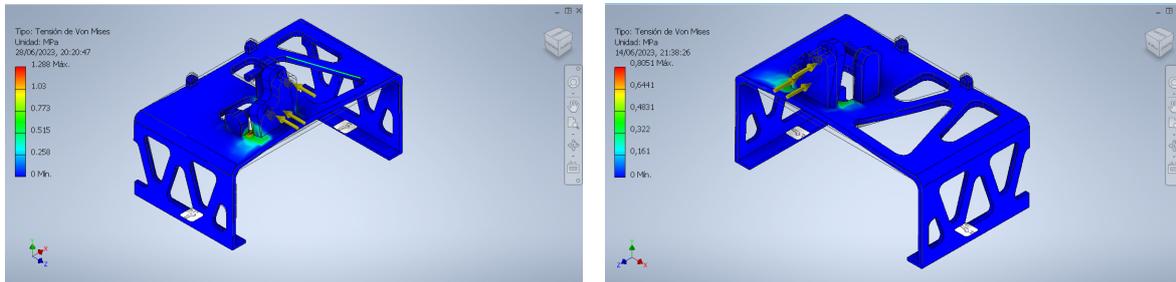
(b) Vista inferior.

Figura 3.11: Fracturamiento carcasa impresa 3D.

Fuente: Propia

- **Estudio de Von Mises:** El estudio de Von Mises es una técnica de análisis de elementos finitos que se utiliza para evaluar la resistencia estructural de una pieza o componente bajo diferentes cargas y tensiones. Proporciona una medida de la resistencia de los materiales a la deformación plástica, lo que permite determinar si una pieza puede soportar las cargas a las que estará expuesta sin sufrir fracturas o fallas. a continuación en la figura 3.11 se puede observar la la pieza sin modificación y modificada evaluada

con el estudio mecánico de von misses [16].



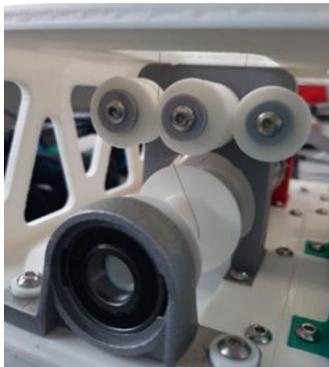
(a) Pieza sin modificación.

(b) Pieza modificada.

Figura 3.12: Estudio de de von misses mediante inventor.

Fuente: Propia

La figura 3.13 muestra un sistema de poleas que utiliza una pieza en forma de eje conectada al moto-reductor. Este sistema se utiliza para enrollar y desenrollar un cable, lo que permite transmitir el movimiento y la fuerza generada por el moto-reductor para permitir el movimiento al exo-traje.



(a) Vista isométrica.



(b) Vista superior 1.



(c) vista superior 2.

Figura 3.13: Ensamble de Diseño de Poleas en el exo-traje.

Fuente: Propia

3.3 Configuración y control de moto-reductor

A partir de los datos obtenidos de par y velocidad máxima de una simulación dinámica en los movimientos de flexión-extensión, se determina que una buena elección de motor es el siguiente:

- **Motor (Maxon Motor):** EC 45 flat 43.5 mm, brushless, 50 Watt modelo V1 (with Hall sensors).

Además, comparado con los motores de CC y CA, los motores EC tienen una mayor eficiencia debido a su control electrónico y que no tienen escobillas, evitando chispas y aumentando la vida útil del motor.

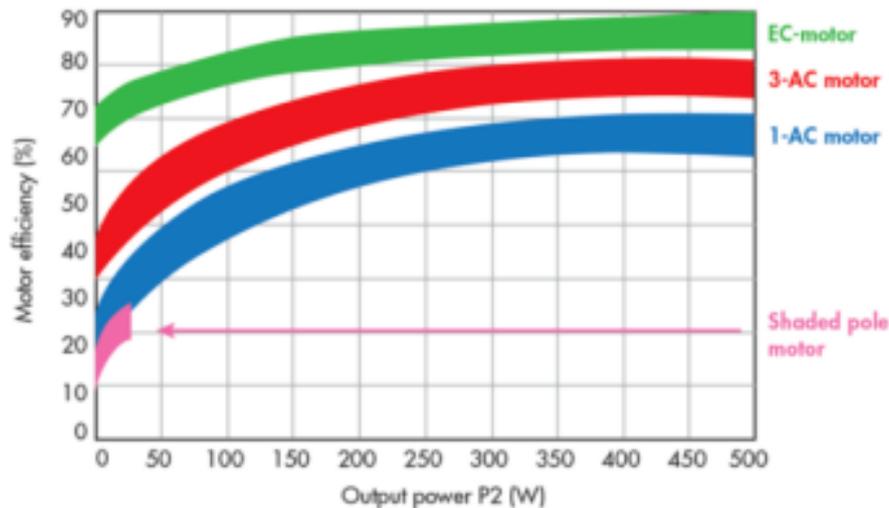


Figura 3.14: Comparación de la eficiencia de un motor EC, un motor de CA de inducción trifásico, un motor de inducción de CA monofásico

Fuente: Proyecto de Evaluación Final “Diseño y simulación de un dispositivo de rehabilitación de miembro superior” [1]

Los motores EC también pueden funcionar a velocidades más altas y tienen una fabricación más automatizada, lo que reduce sus costes. Este modelo es especialmente adecuado para espacios reducidos y está disponible con diferentes opciones de sensores y accesorios como reductores y encoders.

El uso de motores eléctricos para impulsar cargas directamente no siempre es adecuado, ya que giran demasiado rápido y no son capaces de entregar suficiente par por sí solos. Para resolver esto, se utilizan reductores de velocidad que convierten parte de la velocidad en par efectivo, lo que permite que la potencia producida por el motor se utilice de manera eficiente. Existen diferentes tipos de reductores de velocidad con diferentes relaciones y capacidades de par en el mercado, y es esencial seleccionar el adecuado para maximizar el rendimiento y la eficiencia al tiempo que se reduce el costo total.

- **Reductor (Maxon Motor):** Planetary Gearhead GP 42 C 42mm, 3.0–15.0 Nm.

Este modelo ofrece una alta capacidad de torque, alta eficiencia de transmisión de potencia, compacidad y bajo juego, lo que lo hace idóneo para la aplicación dada y cumple con los requisitos mencionados, también proporciona información precisa sobre la posición y el movimiento del motorreductor se ha decidido hacer uso de un encoder MILE 256–2048 ppv con 2 canales y con line driver.

Tabla 3.1: Datos de la configuración del motor

Pestaña	Parámetros
Motor	Motor Type: EC Motor Nominal Current: 1500 mA Torque constant: 36 mNm/A Thermal time constant winding: 28.8s Max speed: 6250 rpm Number of pole pair: 8
Gear	Absolute reduction: 113:1 Direction of rotation: Same Max continuous input speed: 8000 rpm
Sensors	Connector: X5-Encoder (On motor shaft) Nº pulses: 1024 pulses/rev Type: Encoder without index (2-channel) Polarity: maxon
Commutation	Type: Sinusoidal commutation Sensor: X4+X5+Digital Encoder
Regulation	Current: PI Controller Velocity: PI velocity controller Position: PID position controller Main Sensor: X4-Digital Hall sensors
Limits	Max continuous current: 1500 mA Max output current: 2500 mA Max acceleration: 3000 rpm Max profile velocity: 6250 rpm

3.3.1 Configuración

La configuración del motor es una de las etapas más importantes en el proceso de diseño y construcción de un exoesqueleto robótico. Para este proceso se ha utilizado el software EPOS Studio en un ordenador conectado a la EPOS4. En primer lugar, se debe conectar el motor al controlador EPOS4. Para ello, se deben seguir las instrucciones del manual del motor y del controlador para conectar los cables correctamente.

A continuación, se selecciona el tipo de motor y las especificaciones técnicas del mismo, como la tensión nominal, la corriente nominal, la resistencia y la inductancia, que se pueden encontrar en el manual del motor. Después de introducir los datos del motor, se procede a la configuración de los parámetros de control. Estos dependerán del uso específico del motor en el exoesqueleto y deben ser cuidadosamente ajustados para asegurar un rendimiento óptimo.

3.3.2 Calibración

Tras realizar la configuración del motor es necesario proceder con su calibración. Esta calibración permite ajustar los parámetros del motor y del controlador para que el movimiento

del brazo sea preciso y se adapte a las necesidades del usuario. Para realizar la calibración de un motor Maxon con una EPOS4 usando EPOS Studio Software, se debe seleccionar el motor a calibrar en la interfaz del software. El siguiente paso es ejecutar la función de "autoajuste" del motor, que permite al software identificar automáticamente los parámetros del motor y ajustarlos para obtener el mejor rendimiento. Durante el proceso de autoajuste, el motor gira a diferentes velocidades y cargas, y el software mide su respuesta para ajustar los parámetros del controlador.

A continuación, se muestra en la siguiente figura una de las pruebas de control de velocidad en la que se le aplica al motor un perfil trapezoidal que tiene como velocidad objetivo 2000 rpm, una aceleración de 500 rpm/s y una deceleración de 1000 rpm/s.

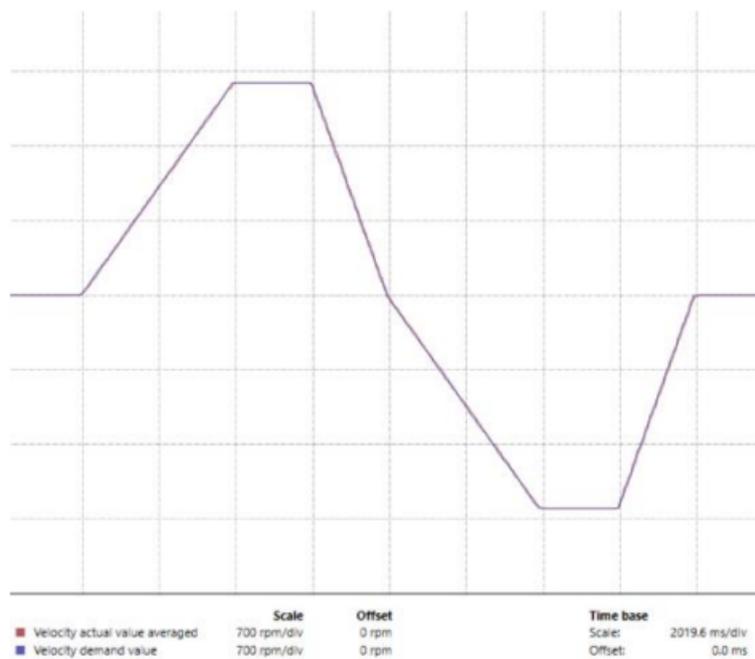


Figura 3.15: Prueba de calibración del motorreductor

Fuente: Propia

Como se puede observar en la figura 3.15, el motorreductor sigue correctamente las velocidades a alcanzar, dando por hecho una correcta calibración.

3.4 Configuración de trayectorias con ROS control

3.4.1 Control del motorreductor

El primer paso para realizar el control del motorreductor es conectar el controlador EPOS4 a ROS. Para este proceso se ha utilizado un paquete llamado "eposx_hardware" [17]. Con este paquete, se pueden enviar comandos de control de posición, velocidad y torque a los mo-

tores y sistemas de accionamiento a través de ROS, lo que permite controlar la velocidad y la posición de los motores de forma precisa y en tiempo real. Además, el paquete proporciona retroalimentación actual sobre el estado de los motores y sistemas de accionamiento, lo que permite monitorear y ajustar el rendimiento de estos.

Una vez conectada la EPOS a ROS se desarrolla un control de velocidad que implementa una trayectoria de movimiento polinómica. Este tipo de trayectorias se utiliza comúnmente en robótica y control de movimiento para mover un objeto desde una posición inicial a una posición final de manera suave y controlada. El programa está escrito en Python y, como se ha comentado anteriormente, utiliza el framework de ROS (Robot Operating System) enviando comandos de velocidad mediante topics a al controlador del motor EPOS4 a través del puerto USB.

La función principal del programa es una función que recibe varios parámetros que definen la posición, velocidad y aceleración inicial y final, así como el tiempo de inicio, finalización de la trayectoria y el step. La función utiliza estos parámetros para calcular los coeficientes de un polinomio de quinto grado que describe la trayectoria de movimiento deseada.

Una vez que se calculan los coeficientes, se utiliza el polinomio para generar una lista de velocidades que se publican a través del canal "velocity controller/command". Esta lista de velocidades se genera en dos partes: la primera parte mueve el motor desde su posición inicial hasta la posición final en una dirección, y la segunda parte mueve el motor desde la posición final hasta la posición inicial en la dirección opuesta. Además, el programa utiliza la biblioteca de Python NumPy para realizar los cálculos matemáticos de la función principal como lo podemos observar a continuación.

Código 3.1: Código Python para controlar la posición del motor

```

1!/usr/bin/env python
2import rospy
3from std_msgs.msg import Float64
4from diagnostic_msgs.msg import DiagnosticArray
5import numpy as np
6import matplotlib.pyplot as plt
7
8def traj_poly(s0,stf,sd0,sdtf,sdd0,sddtf,t0,tf,step=1):
9    #arranging time
10    t = np.arange(t0,tf+step,step)
11
12    #solving for equation
13    coef = np.zeros((6,1)) #we are looking for this
14    param = np.asarray([[s0],[stf],[sd0],[sdtf],[sdd0],[sddtf]])
15    mat = np.asarray([
16        [t0**5,t0**4,t0**3,t0**2,t0,1],
17        [tf**5,tf**4,tf**3,tf**2,tf,1],
18        [5*t0**4,4*t0**3,3*t0**2,2*t0,1,0],
19        [5*tf**4,4*tf**3,3*tf**2,2*tf,1,0],
20        [20*t0**3,12*t0**2,6*t0,2,0,0],

```

```

21     [20*tf**3,12*tf**2,6*tf,2,0,0]
22     ])
23     mat_i = np.linalg.inv(mat) #inverse
24     coef = np.matmul(mat_i,param) #acquiring A B C D E F
25
26     #using equation
27     zeros = np.zeros(t.shape)
28     ones = np.ones(t.shape)
29     twos = ones*2
30     mat = np.asarray([ #the original equation
31         [(t)**5,(t)**4,(t)**3,(t)**2,(t),ones],
32         [5*(t)**4,4*(t)**3,3*(t)**2,2*(t),ones,zeros],
33         [20*(t)**3,12*(t)**2,6*(t),twos,zeros,zeros]
34     ])
35     coef_tensor=(np.repeat(coef,t.size,axis=1))
36     coef_tensor=np.reshape(coef_tensor,(coef_tensor.shape[0],1,coef_tensor. ←
37         ↪ shape[1]))
38
39     res = np.einsum('mnr,ndr->mdr', mat, coef_tensor)
40
41     time = t
42     possi = res[0,0,:]
43     speed = res[1,0,:]
44     accel = res[2,0,:]
45
46     return speed
47
48 def main():
49     # Inicializar el nodo
50     rospy.init_node('motor_controller')
51
52     # Flexion y = traj_poly(0,12.2,0,0,0,0,0,10,0.1)
53     # Extension y = traj_poly(11.8,0,0,0,0,0,0,10,0.1)
54
55     y1 = traj_poly(0,12.2,0,0,0,0,0,10,0.1)
56     y2 = traj_poly(11.8,0,0,0,0,0,0,10,0.1)
57
58     velocity_pub = rospy.Publisher('/velocity_controller/command', Float64, ←
59         ↪ queue_size=10)
60     #rospy.Subscriber("/diagnostics", DiagnosticArray, callback)
61
62     vel = Float64()
63
64     for i in range(0,len(y1)):
65
66         vel.data = y1[i]
67         velocity_pub.publish(vel)
68         rospy.sleep(0.1)
69
70     vel.data = 0
71     velocity_pub.publish(vel)

```

```
70 for i in range(0,len(y2)):  
71     vel.data = y2[i]  
72     velocity_pub.publish(vel)  
73     rospy.sleep(0.1)  
74  
75  
76 vel.data = 0  
77 velocity_pub.publish(vel)  
78  
79 y1 = y1*113  
80 t = np.arange(0,10+0.1,0.1)  
81 fig = plt.figure()  
82 plt.plot(t,y1,'g')  
83 plt.xlabel('Time')  
84 plt.ylabel('rad/s')  
85 plt.title('Speed')  
86 plt.show()  
87  
88  
89 if __name__ == '__main__':  
90     main()
```

3.4.2 Ros Control

ROS es mucho más que un simple middleware. Proporciona un entorno de trabajo completo para el desarrollo de software para robots, ofreciendo servicios estándar de un sistema operativo junto con un conjunto de herramientas, bibliotecas y convenciones diseñadas para simplificar la programación de robots. Además, ROS es un software libre y de código abierto, lo que significa que está disponible para su uso, modificación y distribución por parte de la comunidad de desarrolladores.

El control del exo-traje implica la implementación de un controlador de posición específico para el actuador disponible. En este caso, dado que solo se dispone de un actuador con su correspondiente tarjeta controladora EPOS4, se requiere desarrollar un componente de software que sea capaz de enviar comandos al motor y leer su estado a través de la tarjeta. Este componente de software actuará como una interfaz entre el sistema de control y el actuador del exo-traje. Será responsable de enviar comandos de posición al motor, indicando la posición deseada para el movimiento del exo-traje, y también será capaz de leer el estado del motor, como la posición actual, la velocidad o cualquier otra información relevante para el control.

Los topics son creados y utilizados de manera específica, se ha optado por emplear el conjunto de paquetes proporcionados por el framework ros control en su versión compatible con ROS Melodic. Estos paquetes tienen como objetivo generalizar la tarea de control para cualquier tipo de robot. Para lograr esto, se utilizan como entradas los datos provenientes del encoders asociado al actuador, así como un valor de referencia. Estos datos se utilizan para generar un comportamiento específico a través de un control en lazo cerrado, generalmen-

te implementado mediante un controlador PID. Este controlador calcula la salida deseada (posición, velocidad o esfuerzo), utilizando los mecanismos de publicación y suscripción de ROS, publica los comandos de control en los topics correspondientes. Estos comandos serán recibidos por el controlador adecuado que se encargará de enviar las señales de control al actuador del exo-traje [18].

Toda la funcionalidad del mecanismo del exo-traje ha sido implementada a través de la clase `ExoHardwareInterface` que hereda de `hardware interface::RobotHW`, definida en el paquete `hardware interface`. El código del programa principal, lanzado como un nodo para manejar el exo-traje, sigue el típico esquema definido en `ros_control`, esto es, un lazo que lee el estado, actualiza el controlador y escribe el comando para el motor.

En primer lugar, el archivo contenidos en la carpeta “launch” indican el número de actuadores de los que dispone el exo-traje, en este caso nuestro dispositivo maneja un actuador para controlar la flexo-extensión del brazo.

Código 3.2: Código script .yaml

```
1 joint_state_controller:
2   type: joint_state_controller/JointStateController
3   publish_rate: 50
4 # Posicion Controladores
5 effort_controller:
6   type: effort_controllers/JointEffortController
7   joint: articulacion_brazo_inferior
8
9 velocity_controller:
10  type: velocity_controllers/JointVelocityController
11  joint: articulacion_brazo_inferior
12
13 position_controller:
14  type: position_controllers/JointPositionController
15  joint: articulacion_brazo_inferior
```

Por otro lado, en la carpeta “include”, se encuentra la declaración de las clases `Epos4` y `ExoHardwareInterface`, respectivamente. La primera clase, como se puede deducir de su nombre, incorpora los métodos que posibilitan la comunicación con la tarjeta controladora `Epos4`, siguiendo las instrucciones que proporciona el fabricante. En cuanto a segunda clase, como ya se había mencionado anteriormente en el funcionamiento de `ros_control`, es necesaria la declaración de una clase que hereda de `hardware interface::RobotHW`, de manera que ésta contenga aquellas funcionalidades que sean de interés para el exo-traje.

En cuanto a la carpeta “src”, además de los ficheros donde se definen las clases anteriormente declaradas, existen dos archivos que ejecutan el programa principal, siendo `epos4_hardware_node.cpp` que emplea el framework de `ros control`, que trabaja directamente con la clase `epos4` para controlar el exo-traje.

Código 3.3: Código epos hardware_node.cpp

```
1 #include <string>
2 #include <vector>
3
4 #include <controller_manager/controller_manager.h>
5 #include <eposx hardware/epos hardware.h>
6 #include <ros/console.h>
7 #include <ros/duration.h>
8 #include <ros/init.h>
9 #include <ros/node_handle.h>
10 #include <ros/rate.h>
11 #include <ros/spinner.h>
12 #include <ros/time.h>
13 #include <vector>
14 #include <iostream>
15 #include <ostream>
16
17 int main(int argc, char *argv[]) {
18
19     ros::init(argc, argv, "epos hardware");
20
21     ros::NodeHandle nh;
22     ros::NodeHandle pnh("~");
23
24     std::vector< std::string > motor_names;
25     ros::removeROSArgs(argc, argv, motor_names);
26     motor_names.erase(motor_names.begin()); // remove exec path
27
28     eposx hardware::EposHardware hardware;
29
30     if (!hardware.init(nh, pnh, motor_names)) {
31         ROS_FATAL("Failed to initialize motors");
32         return 1;
33     }
34     ROS_INFO("Motors Initialized");
35
36
37     controller_manager::ControllerManager controllers(&hardware, nh);
38     ros::AsyncSpinner spinner(1);
39     spinner.start();
40
41
42     ros::Rate control_rate(50);
43     ros::Time last(ros::Time::now());
44
45
46     while (ros::ok()) {
47
48         const ros::Time now(ros::Time::now());
49         const ros::Duration period(now - last);
50         hardware.read(now, period);
```

```
51   controllers.update(now, period);
52   hardware.write(now, period);
53   hardware.updateDiagnostics();
54   last = now;
55   control_rate.sleep();
56 }
57 }
```

El nodo que implementa ros control fue diseñado para testear el correcto funcionamiento de las funciones de la clase `eposx hardware` como paso previo a la implementación del mismo. De esta manera, queda garantizada la correcta configuración del motor, la comunicación entre ROS y la tarjeta controladora.

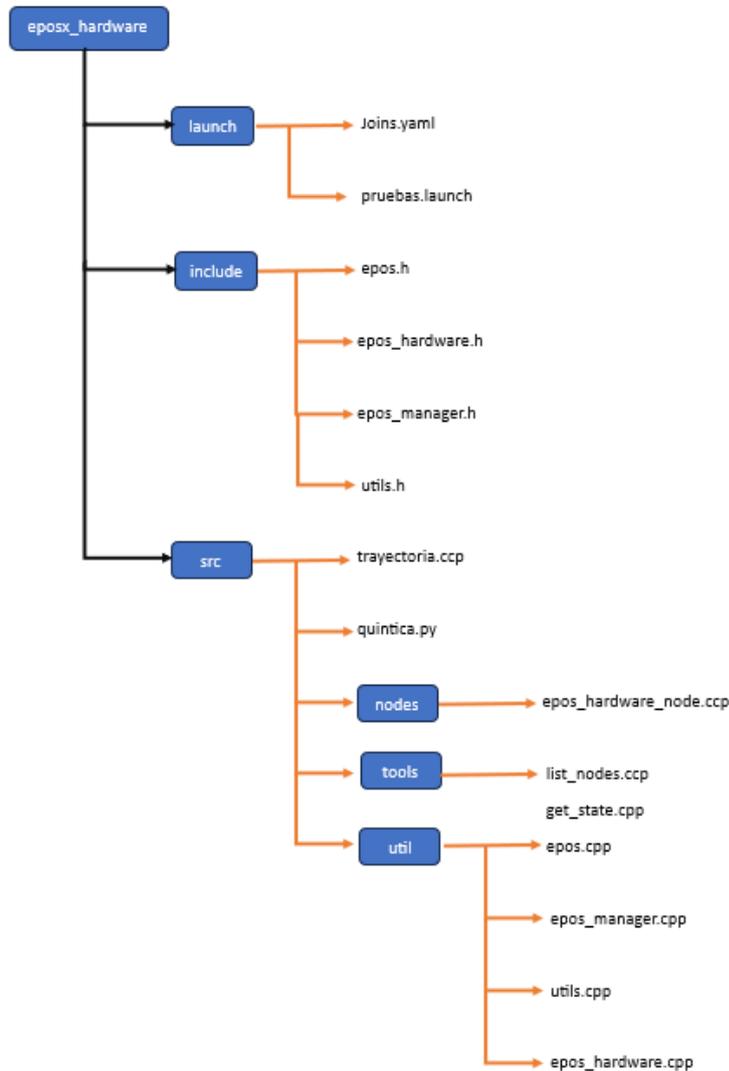


Figura 3.16: Contenido del nodo

Fuente: Propia

3.4.3 Arquitectura de Control

El sistema de actuación del exo-traje puede estar compuesto, por actuador y otros dispositivos que generen el movimiento y la respuesta física del exo-traje. Este actuador puede ser controlados por la Raspberry Pi 4 a través de interfaces como los controladores de motor

Maxon EPOS, utilizando librerías y protocolos específicos, como el `eposx_hardware` en ROS.

Para la retroalimentación del sistema, se puede utilizar un IMU (Unidad de Medición Inercial) para medir variables como la orientación, la velocidad angular y la aceleración. La información proporcionada por el IMU se utiliza para ajustar y corregir las acciones de control, permitiendo un movimiento más preciso y adaptativo del exo-traje.

La arquitectura de control, busca integrar de manera eficiente y coordinada todos los componentes del sistema, desde la Raspberry Pi 4 como controlador central, hasta los actuador y los sensores de retroalimentación. La comunicación y la sincronización adecuadas entre estos componentes son fundamentales para lograr un control efectivo y seguro del exo-traje.

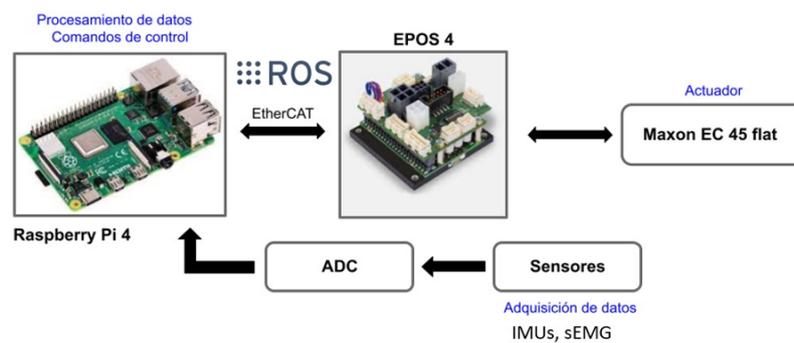


Figura 3.17: Interfaz ROS para controladores de motor Maxon EPOS

Fuente: Propia

Al utilizar esta interfaz, se pueden enviar comandos de control, como velocidades y posiciones deseadas, al motor Maxon EPOS y recibir información de retroalimentación, como las velocidades y posiciones actuales. Además, es posible ajustar los parámetros de los motores y realizar diagnósticos utilizando las funcionalidades proporcionadas por ROS.

3.4.4 Conexiones

El controlador EPOS, como mencionamos anteriormente, es responsable de gestionar y controlar el motor del exoesqueleto. Para su correcto funcionamiento, se requiere una conexión adecuada entre el controlador, la fuente de alimentación y el ordenador. La fuente de alimentación proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del motor y otros componentes del exoesqueleto.

La conexión entre el controlador EPOS y el ordenador, generalmente a través de un cable USB, permite la comunicación bidireccional entre ambos dispositivos. Esto es crucial para la transmisión de comandos y la recepción de datos entre el ordenador y el controlador, lo que permite la programación y control de las trayectorias del exoesqueleto, de manera que fue crucial para el funcionamiento del exo-traje. Esta conexión permitió la transmisión de comandos y datos necesarios para programar y controlar las trayectorias del exo-traje, lo que

aseguró su correcto funcionamiento.

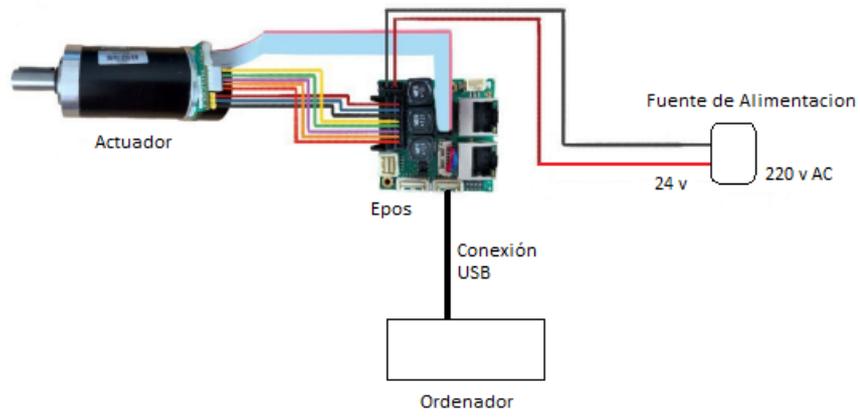


Figura 3.18: conexión

Fuente: Propia

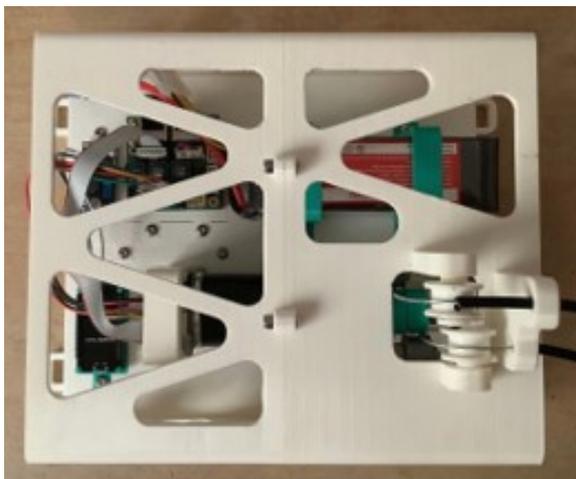
4 Resultados

En esta sección se abordarán los procedimientos realizados para validar el sistema prototipo de exo-traje. Además, se discutirán las ventajas y desventajas de la solución propuesta, con el objetivo de enumerar las mejoras futuras que podrían llevarse a cabo.

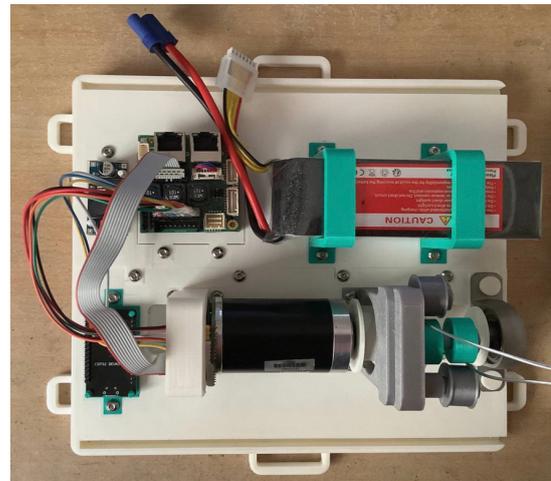
El sistema se apoya sobre dos pilares fundamentales que son la obtención de rediseño del conjunto actuador y el control del actuador del exo-traje. No obstante, antes de comprobar el funcionamiento global será necesario validar independiente cada uno de esos bloques.

4.1 Rediseño mecánico del conjunto actuador

Estos resultados respaldaron la efectividad del diseño del conjunto actuador y confirmaron que las modificaciones realizadas en la carcasa, el agarre del cable, las poleas y el soporte del motor mejoraron su rendimiento y resistencia.



(a) vista frontal con carcasa.



(b) vista frontal sin carcasa.

Figura 4.1: Conjunto sistema actuador.

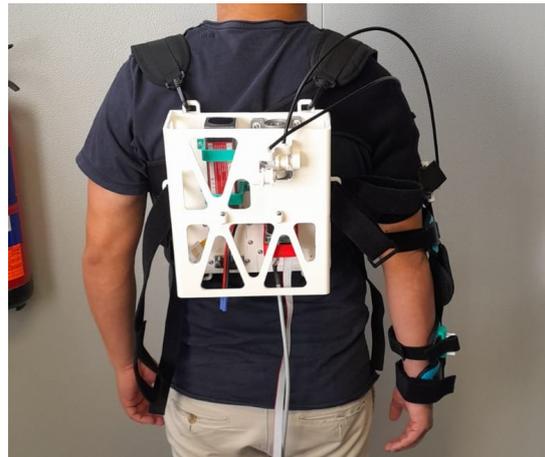
Fuente: Propia

Es importante destacar que las simulaciones son una herramienta fundamental en el proceso de diseño y desarrollo, ya que permiten evaluar el comportamiento de los componentes antes de su fabricación física. Sin embargo, es necesario realizar pruebas físicas adicionales para validar completamente el funcionamiento del sistema en condiciones reales y con usuarios reales. A continuación se muestra el dispositivo de exo-traje en un usuario.

En la imagen 4.2 se puede apreciar el montaje del exo-traje con el usuario, el cual ha sido diseñado con una estructura mecánica ergonómica que envuelve y proporciona soporte a las extremidades del usuario. El exo-traje se adapta perfectamente al cuerpo del usuario mediante el uso de correas y sujeciones, asegurando una conexión segura. Esta configuración permite que las articulaciones del usuario se alineen de manera precisa con las articulaciones mecánicas del exo-traje, lo que favorece un movimiento fluido y coordinado durante su uso. Este montaje, fruto de un diseño detallado y preciso, busca garantizar una interacción cómoda y eficiente entre el usuario y el dispositivo.



(a) Vista frontal.



(b) Vista inferior.



(c) Vista lateral derecha.

Figura 4.2: Montaje de exo-taje con el usuario.

Fuente: Propia

4.2 Control del actuador del exo-traje

Una vez establecida la conexión física entre el motor y el controlador EPOS4, se procedió a implementar el control mediante ROS (Robot Operating System) utilizando la funcionalidad de ROS Control. Esta plataforma permitió enviar comandos de control de posición, velocidad y torque al motor y al sistema de accionamiento del exo-traje de forma precisa y en tiempo real.

Utilizando el paquete "eposx hardware", se estableció la comunicación entre el controlador EPOS4 y ROS. Esto habilitó la capacidad de enviar y recibir comandos y retroalimentación de los motores y sistemas de accionamiento a través de ROS. De esta manera, se logró controlar la velocidad y la posición del motor de manera precisa y monitorear el estado de los motores en tiempo real.

Para implementar el control de velocidad, se desarrolló un código en Python que utilizaba el framework de ROS. Este controlador generaba una trayectoria de movimiento polinómica para el motor, permitiendo un movimiento suave y controlado desde una posición inicial hasta una posición final. Los comandos de velocidad generados por el controlador se publicaron en el canal "velocity controller/command" a través del puerto USB del controlador EPOS4.

A continuación se presenta el código 4.1 que fue la clave fundamental para crear la trayectoria de la posición inicial hasta la final.

Código 4.1: Código control.py

```
1#!/usr/bin/env python
2import rospy
3from std_msgs.msg import Float64
4from diagnostic_msgs.msg import DiagnosticArray
5
6pos_ac = -1
7pos = -1
8centinela = True
9
10def callback(data):
11    pos_ac = data.status[1].values[8].value.split(" ")
12    pos_ac = float(pos_ac[0])
13
14    pos = data.status[1].values[1].value.split(" ")
15    pos = float(pos[0])
16
17def main():
18    # Inicializar el nodo
19    global pos_ac, pos, centinela
20    rospy.init_node('motor_position_controller')
21
22
23    position_pub = rospy.Publisher('/velocity_controller/command', Float64, ↵
```

```
↪ queue_size=10)
24 rospy.Subscriber("/diagnostics", DiagnosticArray, callback)
25 try:
26     while True:
27         desired_position = input("Introduce la posicion deseada: ")
28
29
30         if(desired_position != 'q'):
31             desired_position = float(desired_position)
32             position_msg = Float64()
33             position_msg.data = desired_position
34             position_pub.publish(position_msg)
35         else:
36             break
37
38         rospy.sleep(1)
39 except KeyboardInterrupt:
40     pass
41
42 if __name__ == '__main__':
43     main()
```

4.3 Pruebas de usabilidad

El control mediante ROS Control permitió una integración efectiva del exo-traje con otros componentes del sistema, brindando un control flexible y preciso sobre el motor y el sistema de accionamiento. Esta funcionalidad resultó fundamental para lograr un control óptimo del exo-traje y una interacción fluida con el usuario.

A lo largo del desarrollo del prototipo, se llevaron a cabo una serie de pruebas experimentales tanto en el hardware como en el software, lo que permitió un constante perfeccionamiento de ambos componentes. Durante las pruebas de uso, se analizó a un usuario sano, que interactuaba con el dispositivo, donde se evaluaron aspectos como la comodidad, la ergonomía y la estabilidad del exo-traje. También se evaluaron los tiempos de respuesta del sistema, la precisión de los movimientos y la adaptación del dispositivo a las necesidades y características del usuario.

Las pruebas experimentales permitieron identificar posibles fallos o limitaciones del prototipo, así como áreas de mejora. Estos hallazgos fueron fundamentales para realizar ajustes y modificaciones en el hardware y el software, con el objetivo de optimizar el rendimiento y garantizar una experiencia óptima para el usuario.

4.4 Ventajas

- El diseño del exo-traje, se partió de un diseño inicial construido, que sirvió como punto de partida para su desarrollo. Este diseño inicial proporcionó una base sólida en tér-
-

minos de concepto y estructura, lo que permitió realizar verificaciones y evaluaciones iniciales de las piezas y componentes involucrados. A partir de estas verificaciones, se identificaron áreas de mejora y se llevaron a cabo rediseños específicos para garantizar el correcto funcionamiento del exo-traje.

- Trabajar en conjunto con Sergio Arias (estudiante de último año en Ingeniería Robótica) permitió aprovechar su experiencia y habilidades complementarias, lo que contribuyó en gran medida a la eficiencia y efectividad de la implementación del control del exo-traje. Su conocimiento en ROS y su dominio en el campo del control de sistemas robóticos fueron valiosos para abordar los desafíos que presentaba el exo-traje.
- Se logró un continuo perfeccionamiento del prototipo, obteniendo mejoras significativas en su funcionamiento y usabilidad. Los resultados obtenidos proporcionaron una base sólida para la toma de decisiones y el avance en el desarrollo del exo-traje, allanando el camino hacia futuras mejoras y refinamientos del dispositivo.

4.5 Desventajas

- El prototipo del exo-traje necesita ser validado con pacientes reales bajo la supervisión y el control de profesionales. Aunque se han realizado pruebas y ajustes en el diseño y funcionamiento del exo-traje, es crucial llevar a cabo una evaluación exhaustiva con pacientes que presenten las condiciones y características específicas para las cuales se diseñó el dispositivo.
- Debido a limitaciones de tiempo, no se logró realizar el control completo en lazo cerrado mediante realimentación por sensores IMU (Unidad de Medición Inercial). El control en lazo cerrado con sensores IMU proporciona información en tiempo real sobre la orientación y los movimientos del usuario, lo que permite ajustar y adaptar el exo-traje de manera más precisa y dinámica.
- Falta la integración de Raspberry Pi 4 en el exo-traje permitiría realizar tareas de procesamiento de datos, control y comunicación de forma autónoma. Esto incluiría la capacidad de adquirir datos de los sensores del exo-traje, ejecutar algoritmos de control y tomar decisiones en tiempo real, sin la necesidad de una conexión permanente a un ordenador o sistema externo.

4.6 Trabajos futuros

En cuanto a los trabajos futuros, se plantean una serie de tareas que llevarán al proyecto a un nivel más avanzado.

- **Implementación de la autonomía:** En primer lugar, se debe llevar a cabo la implementación completa de la Raspberry Pi 4 y su integración con el sistema existente. Esto implica configurar el sistema operativo Raspberry Pi OS con desktop y asegurar su compatibilidad con ROS Melodic. En este proceso se logró, instalar el sistema operativo con en version Debian ya que rasbian no se encuentra disponible en la pagina oficial
-

de Raspberry pi, se realizó una investigación donde explican paso a paso como se debe instalar Ros Melodic [19].

La Raspberry pi 4 destinada para este proyecto se encuentra funcionalidad con el sistema operativo y su compatibilidad para trabajar en Ros Melodic, es conectar mediante hdmi a una pantalla y su respectivo teclado y raton. La contraseña de acceso es: 1234

- **Desarrollo del sensor IMU:** Es necesario continuar con el desarrollo y perfeccionamiento de las librerías de la IMU (Unidad de Medición Inercial). Estas librerías son fundamentales para obtener datos precisos y confiables sobre la orientación y los movimientos del exoesqueleto. Se deben realizar pruebas rigurosas para validar y optimizar el rendimiento de las librerías, asegurando una adecuada integración con el sistema y una alta precisión en la captura de datos. Los archivos de la imu se encuentran en la carpeta ares_ws y un código de prueba, pero no se logro realizar las respectivas pruebas.

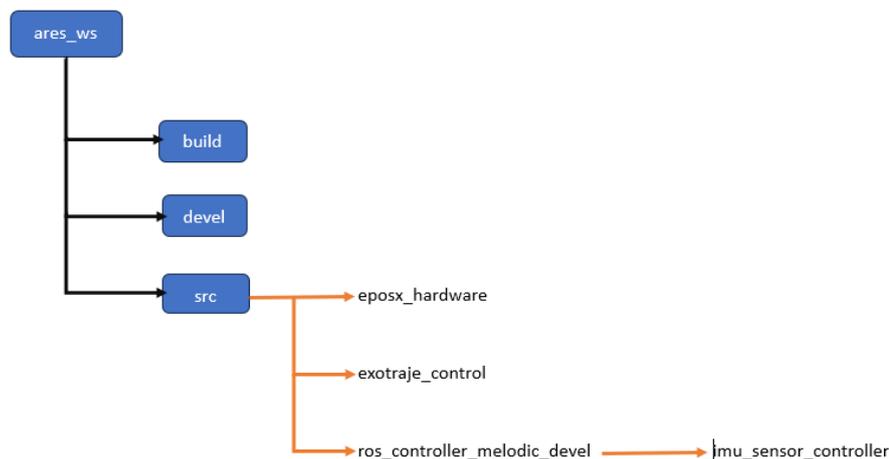


Figura 4.3: distribución de los elementos de control en ares_ws

Fuente: Propia

- **Optimización del control en lazo cerrado mediante realimentación por sensores IMU:** Se debe implementar la arquitectura de control sobre el exoesqueleto en lazo cerrado mediante la realimentación de los sensores IMU. Esto permitirá una mayor precisión y estabilidad en los movimientos del exoesqueleto, adaptándose de manera más efectiva a las necesidades del usuario. Es necesario investigar y desarrollar algoritmos de control adecuados, así como realizar pruebas y ajustes para garantizar un control óptimo del exoesqueleto.
- **Diseño y desarrollo de los circuitos electrónicos:** Se requiere diseñar y desarrollar los circuitos electrónicos necesarios para el correcto funcionamiento del exoesqueleto. Esto implica definir la distribución de los componentes eléctricos, las conexiones y los circuitos necesarios para garantizar un rendimiento óptimo y seguro. La conexión me-

diante la Raspberry Pi 4, el controlador EPOS4 y los sensores IMU son elementos clave en esta configuración, permitiendo la comunicación y control eficiente de los motores y la adquisición de datos precisos para el control y retroalimentación del exoesqueleto.

- **Validación con pacientes reales:** Para evaluar el rendimiento y la eficacia del exoesqueleto, es fundamental llevar a cabo pruebas y validaciones con pacientes reales. Esto implica colaborar con profesionales de la salud y expertos en rehabilitación para realizar una evaluación exhaustiva del exoesqueleto en condiciones reales de uso. Se deben recopilar datos y retroalimentación de los pacientes para identificar áreas de mejora y realizar ajustes necesarios en el diseño y funcionamiento del exoesqueleto.

Cabe destacar que los resultados obtenidos en este proyecto han sido reconocidos y compartidos a través de la publicación del artículo titulado "Desarrollo de un exo-traje para la rehabilitación de miembro superior" en la XIII Jornadas Nacionales de Robótica y el XIV Simposio CEA de Bioingeniería. Este evento tuvo lugar en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, durante los días 14 al 16 de junio de 2023. [Enlace ActasJornadasNacionalesDeRoboticaYBioingenieria2023](#)

Además, es importante mencionar la participación del proyecto en los Premios Impulso 2023, un reconocido evento que se llevó a cabo el día 15 de julio de este año. Durante esta competencia, el exo-traje desarrollado obtuvo un resultado destacado al recibir el premio de accesibilidad.

5 Conclusiones

El desarrollo del exo-traje para la rehabilitación y asistencia del miembro superior ha sido un proyecto ambicioso y de gran importancia. A lo largo de este trabajo, se han logrado avances significativos en el diseño, implementación y evaluación del exo-traje, demostrando su potencial para mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidades en sus extremidades superiores.

La elección de ROS como framework para el sistema del exo-traje ha demostrado ser una decisión acertada. Su enfoque en la programación y el control de robots, así como su comunidad activa y su amplio conjunto de herramientas, han proporcionado una base sólida para el desarrollo y la evolución continua de este proyecto.

La participación en las Jornadas de robótica y bioingeniería y el premio de accesibilidad obtenido en los Premios Impulso 2023 representan un reconocimiento importante y una validación externa del valor y la utilidad del exo-traje. Este logro destaca la relevancia del proyecto y su capacidad para generar un impacto positivo en la vida de las personas, fortaleciendo el compromiso del equipo de continuar trabajando en la mejora y difusión de esta innovadora tecnología de rehabilitación.

Este Trabajo de Fin de Máster ha sentado las bases para la construcción y desarrollo de un exo-traje para la rehabilitación de miembros superiores. A través de la utilización de tecnologías avanzadas, como ROS y componentes electrónicos de vanguardia, se ha logrado diseñar y probar un prototipo funcional. Aunque existen áreas de mejora y oportunidades para futuras investigaciones, el potencial impacto positivo de este proyecto en la vida de las personas con discapacidad es innegable. El exo-traje representa una herramienta prometedora para la rehabilitación y la mejora de la calidad de vida, y su desarrollo continuo y refinamiento contribuirá al avance de la ciencia y la tecnología en este campo.

Bibliografía

- Benjamin, E., Blaha, M., Chiuve, S., Cushman, M., y et al. (2017). Heart disease and stroke statistics-2017 update. *Circulation*, 135. ([4])
- Blasco García, J. D. (2019). *Sistema de control de un exoesqueleto robótico usando ros* (Trabajo Fin de Grado). Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. ([18])
- Chen, D. (s.f.). *ROS Melodic on Raspbian Buster*. En línea. Descargado de <https://blog.danielchen.cc/2020/01/14/ROS-melodic-on-Raspbian-Buster/> ([19])
- Chiaradia, D., Xiloyannis, M., Antuvan, C., Frisoli, A., y Masia, L. (2018). Design and embedded control of a soft elbow exosuit. En *Ieee international conference on soft robotics (robosoft)* (p. 565-571). ([12])
- Copaci, D., Cano, E., Moreno, L., y Blanco, D. (2017). New design of a soft robotics wearable elbow exoskeleton based on shape memory alloy wire actuators. *Applied Bionics and Biomechanics*. ([9])
- Cyberdyne Inc., H.A.L. (s.f.). *H.A.L.* En línea. Descargado de <https://www.cyberdyne.jp/english/> ([2])
- Doe, J., Smith, A., y Johnson, R. (2020). Mechanical analysis of forces using the von mises criterion: A case study. *Journal of Mechanical Engineering*, 42(3), 120-135. ([16])
- Epos Hardware*. (s.f.). En línea. Descargado de https://github.com/yoshiton-students/eposx_hardware ([17])
- Espinoza, R., y et al. (2017). ORTE-Sistema Robotizado para la rehabilitación del miembro superior. En *Jornadas nacionales de robótica*. ([8])
- Garrec, P., Friconneau, J., Measson, Y., y Perrot, Y. (2008). Able, an innovative transparent exoskeleton for the upper-limb. En *Ieee/rsj international conference on intelligent robotics and systems (iros)* (p. 1483-1488). ([3])
- Girma Pérez, D. L., Moncada Madrazo, S. I., Izquierdo, D. M., Angulo Sherman, I. N., y Jara Bravo, C. A. (2021). Diseño y simulación del sistema de actuación de un exotraje para la rehabilitación y asistencia del miembro superior. En *Xi congreso iberoamericano de tecnologías de apoyo a la discapacidad*. ([1])
- Gonzalez-Bernal, J., de la Fuente-Anuncibay, R., Gonzalez-Santos, J., Cuesta-Gomez, J., y Cubo, E. (2017). Eficacia de la ortesis dinámica del miembro superior en la fase crónica del ictus. estudio longitudinal [efficacy of a dynamic orthosis on the upper limbs in the chronic phase of strokes. a longitudinal study]. *Rev Neurol*, 65, 209-215. ((13))

-
- Hu, J., Lim, Y., Ding, Y., Paluska, D., Solocheck, D., y et al. (2011). An advanced rehabilitation robotic system for augmenting healthcare. En *International conference on ieeec engineering medicine and biology society (embs)* (p. 2073-2076). ([5])
- Lessard, S., Pansodtee, P., Robbins, A., Trombadore, J. M., Kurniawan, S., y Teodorescu, M. (2018). A soft exosuit for flexible upper-extremity rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29, 834-842. ([15])
- Liu, H., Tao, J., Lyu, P., y Tian, F. (2020). Human-robot cooperative control based on semg for the upper limb exoskeleton robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 125, 103350. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889020307857> ([10])
- Masia, L., Hussain, I., Xiloyannis, M., Pacchierotti, C., Cappello, L., Malvezzi, M., y Pratti-chizzo, D. (2018). Soft wearable assistive robotics: exosuits and supernumerary limbs. ([11])
- Rahman, M., Rahman, M., Cristobal, O., Saad, M., Kenné, J., y Archambault, P. (2015). Development of a whole arm wearable robotic exoskeleton for rehabilitation and to assist upper limb movements. *Robotica*, 33, 19-39. ([6])
- ROS (robot operating system)*. (s.f.). En línea. Descargado de <https://www.ros.org/> ([14])
- Shen, Y., y Rosen, J. (2019). EXO-UL upper limb exoskeleton system. En *Wearable robotics: Systems and applications*. Elsevier. ([7])
-

Anexos

Se exponen las propiedades mecánicas del PLA. De las cuales, el límite elástico es fundamental para confirmar la aptitud del material.

Característica	Valor
Módulo de Young	(3,3 - 3,6) GPa
Coefficiente de Poisson	(0,38 - 0,4)
Límite elástico	(55 - 72) MPa
Resistencia a tracción	(47 - 70) MPa
Resistencia a compresión	(66 - 86) MPa
Elongación	(3 - 6) %
Tenacidad a fractura	(3 - 5) MPa·m ^{0.5}

Tabla .1: Tabla de las propiedades mecánicas del PLA

A continuación en la siguiente figura se muestra la creación del material en software Inventor para la simulación de esfuerzo y resistencia del material.

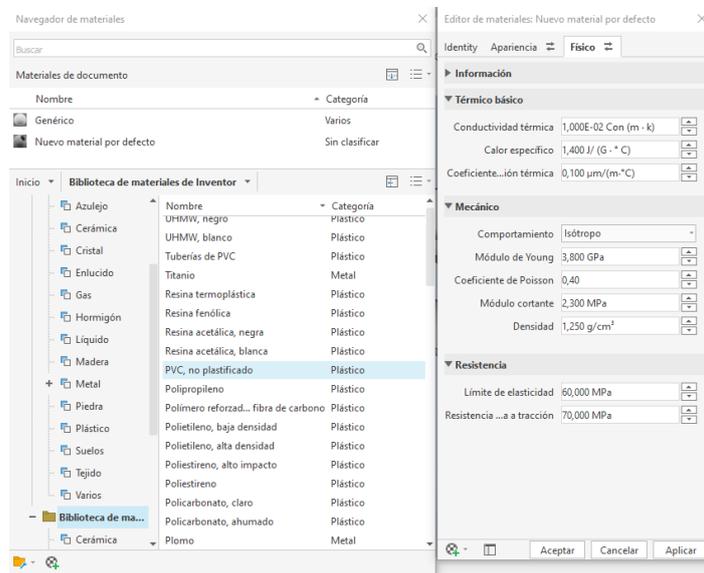
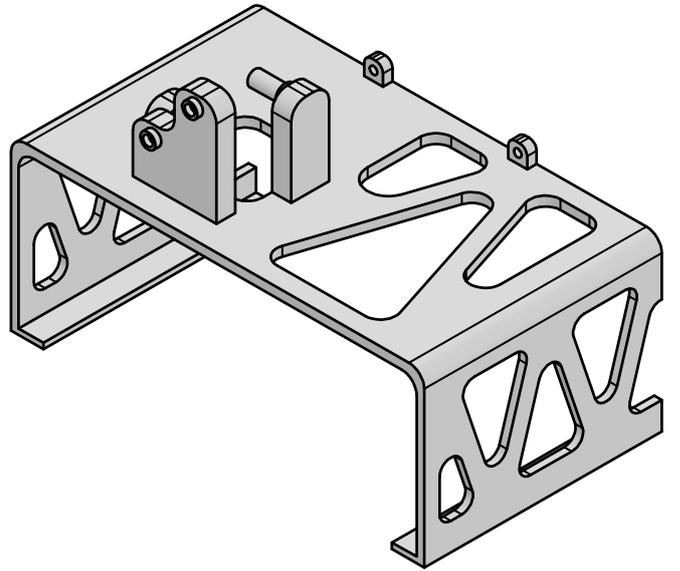
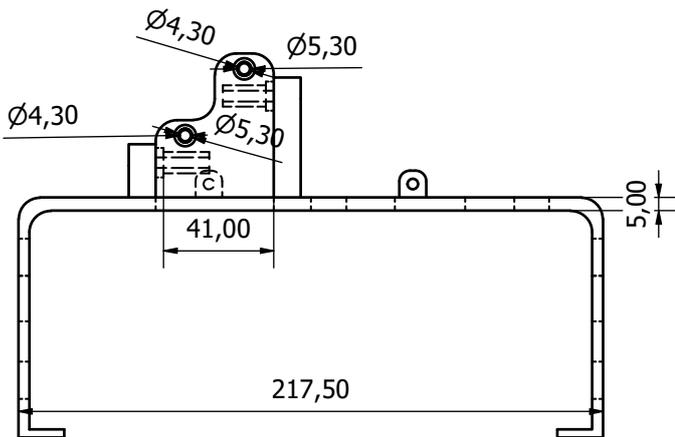
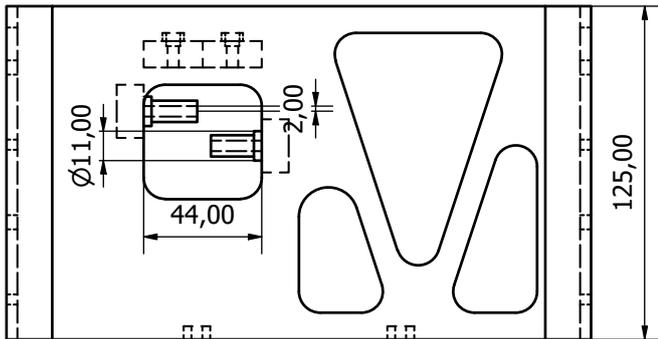
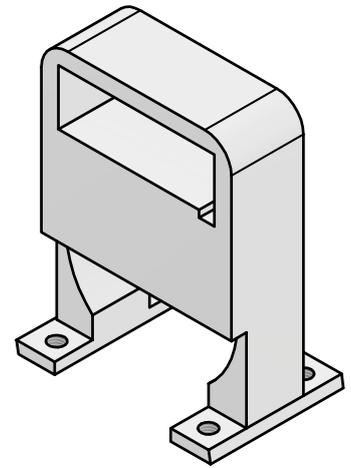
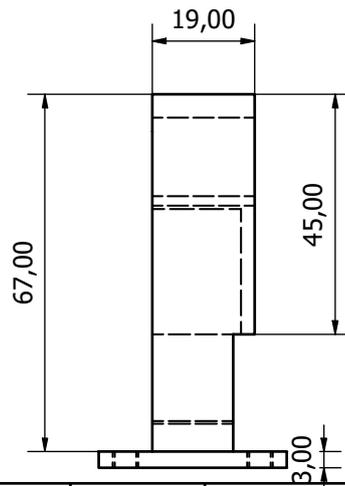
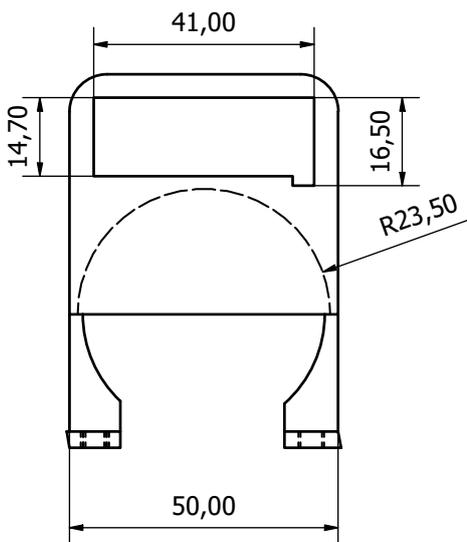
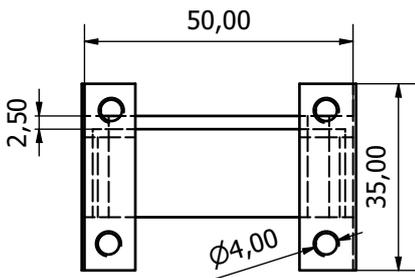


Figura .1: Creacion del material PLA en Inventor

Fuente: Propia



Diseño de BYRON	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 03/07/2023	
				Edición	Hoja 1 / 1



Diseño de BYRON	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 03/07/2023	
			Edición	Hoja 1 / 1	

ROS melodic en Raspbian Buster

Guía de instalación para Raspberry pi 4

Abre una terminal en tu Raspberry Pi.

Ejecuta el comando para actualizar el sistema e instale un software común

```
1 sudo apt update && sudo apt -y dist-upgrade && sudo apt -y upgrade
2 sudo apt install -y vim curl wget git tmux unzip
```

Reinicie después de realizar la instalación

```
1 sudo reboot
```

Instalar ROS Melodic

Repositorio de configuración ROS

```
sudo sh -c 'echo "deb http://packages.ros.org/ros/ubuntu $(lsb_release -sc)
1 main" &gt; /etc/apt/sources.list.d/ros-latest.list'
2 sudo apt-key adv --keyserver hkp://ha.pool.sks-keyservers.net:80 --recv-key
3 C1CF6E31E6BADE8868B172B4F42ED6FBAB17C654
sudo apt-get update && sudo apt-get -y upgrade
```

Instalar dependencias

```
1 sudo apt-get install -y python-rosdep python-rosinstall-generator python-
wstool python-rosinstall build-essential cmake
```

Inicializar rosdep

```
1 sudo rosdep init
2 rosdep update
```

Compilar ROS melódico del código fuente

Si desea probar la instalación previa a la compilación, omite esto y vaya a la siguiente sección.

```
1 mkdir -p ~/ros_catkin_ws
2 cd ~/ros_catkin_ws
```

OBTENER CÓDIGO FUENTE POR WSTOOL

El paquete “ros_comm” que incluye libs básicos de comunicación ROS sin herramientas GUI como rqt, rviz. Si desea instalar herramientas GUI, cambie “ros_comm” a “desktop”. O puede encontrar más variantes de ROS

NOTA

Si wstool init fue interrumpido, puede reanudar el proceso de descarga por wstool update -j4 -t src

```
1 rosinstall_generator ros_comm --rostdistro melodic --deps --wet-only --tar &gt;
2 melodic-ros_comm-wet.rosinstall
wstool init src melodic-ros_comm-wet.rosinstall
```

RESOLVER DEPENDENCIAS CON ROSDEP

```
1 rosdep install -y --from-paths src --ignore-src --rostdistro melodic -r --
os=debian:buster
```

CONSTRUYE E INSTALA ROS

```
1 sudo ./src/catkin/bin/catkin_make_isolated --install -
DCMAKE_BUILD_TYPE=Release --install-space /opt/ros/melodic
```

AGREGA ROS A TU BASHRC

```
1 echo "source /opt/ros/melodic/setup.bash" >> ~/.bashrc
```

Ahora tienes ROS Melodic instalado en tu Raspberry Pi 4 usando el código fuente en Raspbian Buster. Puedes comenzar a usar ROS y explorar sus funcionalidades.