

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales



**Diseño de una Arquitectura
Biomimética para el Control de
Sistema Robóticos de Rehabilitación**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Gabriel Alfonso Delgado Oleas

Máster en Automática y Robótica

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
MADRID
Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Industriales

Doctorado en Automática y Robótica

**Diseño de una Arquitectura
Biomimética para el Control de
Sistema Robóticos de Rehabilitación**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Gabriel Alfonso Delgado Oleas

Máster en Automática y Robótica

Bajo la dirección de:

Dr. Eduardo Rocon de Lima (Director)

Madrid, 2024

Título: Diseño de una Arquitectura Biomimética para el Control de Sistema Robóticos de Rehabilitación.

Autor: Gabriel Alfonso Delgado Oleas.

Programa de Doctorado: Doctorado en Automática y Robótica.

Dirección de tesis:

Dr. Eduardo Rocon de Lima (Director)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

A mis Padres.

A mi hija Valentina y a mi esposa Paola por ser parte de este recorrido.

Agradecimientos

Esta tesis no habría sido posible sin el apoyo incondicional de mi familia, en especial de mis padres, por su amor infinito y constante aliento. A mi amada esposa Paola, quiero expresar mi más profundo agradecimiento por ser mi pilar durante este largo camino. Tu paciencia, comprensión y apoyo incondicional han sido fundamentales para culminar esta tesis. Gracias por cada palabra de aliento, por cada gesto de amor y por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba. A mi hija Valentina, mi más profundo agradecimiento por ser mi mayor fuente de inspiración y por su participación activa como sujeto de pruebas en el desarrollo de esta tesis.

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a mi tutor de tesis, Eduardo Rocon. Su confianza en mis capacidades, su constante apoyo y su disposición para escuchar y valorar mis ideas han sido fundamentales en mi crecimiento como investigador. Su guía experta y sus valiosos consejos han sido pilares en la realización de este trabajo.

Extiendo mi gratitud a mi gran amigo y compañero de investigación, Pablo Romero, con quien he compartido el camino de esta tesis y cuyo apoyo, colaboración y entusiasmo han sido pilares fundamentales (esta tesis es tanto mía como tuya). Agradezco a Julio Lora por prestar siempre un oído atento a mis inquietudes y por sus palabras de aliento en los momentos más desafiantes. A Álvaro Gutiérrez, por su constante apoyo y por creer en mis ideas. A África, por su amistad y apoyo incondicional. A Clara, por alegrar mis días con su cálida bienvenida y su "Buenos días".

Finalmente, agradezco a la Universidad del Azuay por el apoyo brindado a lo largo de este proceso, a la SENESCYT por la beca otorgada en su programa de 2019, al personal del Centro de Automática y Robótica y al personal del grupo de investigación BioRobotics, al cual pertenezco, por brindarme un ambiente de trabajo tan agradable y propicio para la investigación, y a todos los estudiantes de TFG y TFM que han pasado por mi vida durante estos años, por su contribución a mi formación como doctor. A todas aquellas personas que, de una u otra forma, han contribuido a la realización de esta tesis, mi más sincero agradecimiento. Su apoyo ha sido invaluable.

Abstract

Cerebral palsy (CP) is the leading cause of motor disability in childhood, significantly affecting children's motor and postural development. Traditional therapies, although valuable, often fail to promote natural motor development and can be invasive or restrictive. Robotic technology, particularly exoskeletons, emerges as a promising alternative, offering personalized and adaptive assistance in gait. However, current exoskeletons are often rigid and poorly adaptable, limiting their use in the early stages of development. Early intervention is crucial to maximize neuroplasticity and minimize secondary impairments.

The Discover2Walk (D2W) project presents an innovative solution to address these limitations. The project aims to create a flexible and adaptable robotic exoskeleton, along with a control framework, that can be used from an early age to promote natural motor development and improve the quality of life of children with CP.

The main objective of this thesis is to develop a robotic exoskeleton and a comprehensive control framework that improve gait rehabilitation in children with CP. The specific objectives include the design and development of an adaptable exoskeleton, a comprehensive and bio-inspired control framework, and the design and implementation of a modular electronic architecture.

The thesis reviews the state of the art in robotic exoskeletons, exploring the biomechanics of human gait and the neurophysiological mechanisms that control it. This thesis analyzes the diversity of control architectures and communication systems used in current exoskeletons, emphasizing the need for standardization and modularity.

This thesis presents a comprehensive and bio-inspired control framework for lower limb exoskeletons, based on a three-level hierarchical structure: perception and intention, central pattern generation, and execution. Each level is detailed, including its objectives, requirements, and operating methods. I adopted ROS2 as a middleware to facilitate communication between levels.

The implementation of the control framework is carried out on the D2W robotic system. The thesis describes the system architecture, which includes the pelvis, ankle, and traction modules, along with the navigation and new modular systems. The validation tests that demonstrate the effective

synchronization, modularity, and scalability of the system are detailed. The thesis concludes by highlighting the main contributions, including innovation in robotic rehabilitation, system modularity and scalability, integration of advanced technologies, and robustness of the communication system. The results obtained are discussed, and the potential impact of the exoskeleton and the control framework on gait rehabilitation in children with CP is evaluated. Future research perspectives are presented, including possible improvements and new clinical applications.

Resumen

La parálisis cerebral (PC) es la principal causa de discapacidad motora en la infancia, afectando el desarrollo motor y postural de los niños. Las terapias tradicionales, aunque valiosas, a menudo no logran promover un desarrollo motor natural y pueden ser invasivas o restrictivas. La tecnología robótica, especialmente los exoesqueletos, emerge como una alternativa prometedora, ofreciendo asistencia personalizada y adaptativa en la marcha. Sin embargo, los exoesqueletos actuales suelen ser rígidos y poco adaptables, limitando su uso en etapas tempranas del desarrollo. La intervención temprana es sustancial para maximizar la neuroplasticidad y minimizar las deficiencias secundarias.

En este contexto, el proyecto Discover2Walk (D2W) se presenta como una respuesta a la necesidad de una solución innovadora que aborde estas limitaciones. El proyecto se centra en la creación de un exoesqueleto robótico flexible y adaptable, junto con un marco de control, que pueda ser utilizado desde una edad temprana para promover el desarrollo motor natural y mejorar la calidad de vida de los niños con PC.

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar un exoesqueleto robótico y un marco de control integral que mejoren la rehabilitación de la marcha en niños con PC. Los objetivos específicos incluyen el diseño y desarrollo de un exoesqueleto adaptable, el desarrollo de un marco de control integral y bioinspirado, y el diseño e implementación de una arquitectura electrónica modular.

La tesis revisa el estado del arte en exoesqueletos robóticos, explorando la biomecánica de la marcha humana y los mecanismos neurofisiológicos que la controlan. Se analiza la diversidad de arquitecturas de control y sistemas de comunicación utilizados en exoesqueletos actuales, destacando la necesidad de estandarización y modularidad.

También, se presenta un marco de control integral y bioinspirado para exoesqueletos de miembros inferiores, basado en una estructura jerárquica de tres niveles: percepción e intención, generación de patrones centrales y ejecución. Se detalla cada nivel, incluyendo sus objetivos, requisitos y métodos de funcionamiento. Se introduce ROS2 como middleware para la comunicación entre los niveles.

La implementación del marco de control se realiza en el sistema robótico D2W. Se describe la arquitectura del sistema, incluyendo cada uno de los módulos que lo conforman (pelvis, tobillos y tracción), así como los sistemas de navegación y nuevos sistemas modulares. Se detallan las pruebas de validación que demuestran la sincronización efectiva, la modularidad y la escalabilidad del sistema.

La tesis concluye destacando las principales contribuciones, incluyendo la innovación en rehabilitación robótica, la modularidad y escalabilidad del sistema, la integración de tecnologías avanzadas y la robustez del sistema de comunicaciones. Se discuten los resultados obtenidos y se evalúa el impacto potencial del exoesqueleto y el marco de control en la rehabilitación de la marcha en niños con PC. Se presentan perspectivas futuras de investigación, incluyendo posibles mejoras y nuevas aplicaciones clínicas.

Contenido

Agradecimientos	iii
Abstract	v
Resumen	vii
Contenido.....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tablas	xv
Motivación.	1
Objetivos.	3
Organización del Libro.....	5
Capítulo 1	7
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	7
1.1. Introducción.	7
1.2. La Marcha Humana	8
1.2.1. Fases de la Marcha Humana	9
1.3. Control Nervioso de la Marcha	11
1.3.1. Niveles Jerárquicos de la Marcha.....	13
1.4. Control de la marcha en sistemas robóticos de rehabilitación	15
1.4.1. HAL (Hybrid Assistive Limb)	16
1.4.2. AAFO.	17
1.4.3. MINDWALKER.....	18
1.4.4. RoboKnee	19
1.4.5. Ortesis de miembro inferior motorizada.	20
1.4.6. CPWALKER	21
1.4.7. Exoesqueleto de extremidades inferiores pediátrico.....	21
1.4.8. ExRoLEG.	22
1.4.9. Symbitron.	23
1.4.10. AGoRA.....	24
1.4.11. EXOVIS.....	25

1.4.12.	H3.	26
1.4.13.	LOPES II.	26
1.4.14.	WAKE-up.	27
1.4.15.	ATLAS 2020.	28
1.4.16.	P-LEGS.	29
1.4.17.	P.REX.	30
1.5.	Comparación entre las arquitectura adoptadas en los principales exoesqueletos.	31
1.5.1.	Diversidad de Microcontroladores	33
1.5.2.	Comunicaciones	33
1.6.	Desafíos y oportunidades.	34
1.6.1.	Propuesta de Desarrollo.	35
1.6.2.	Impacto a Largo Plazo.	35
Capítulo 2.	37
MARCO INTEGRAL PARA EL CONTROL DE SISTEMAS ROBÓTICOS DE REHABILITACIÓN		
37		
2.1.	Marco Generalizado de la Arquitectura Electrónica.	37
2.2.	Definición del marco de control.	39
2.2.1.	Nivel Alto (Percepción e Intención):	39
2.2.2.	Nivel Medio (Generador de Patrones Centrales):	42
2.2.3.	Nivel Bajo (Ejecución)	45
2.3.	Comunicación y Sincronización:	48
2.3.1.	ROS2 (Robot Operating System 2):	51
2.4.	Marco Propuesto.	53
2.5.	Conclusiones	55
Capítulo 3	59
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO..		
59		
3.1.	Plataforma Robótica Discover2Walk (D2W).....	59
3.1.1.	Componentes y Funcionalidades.	60
3.1.2.	Arquitectura de control	67

3.2.	Implementación de la propuesta en la plataforma Discover2Walk.	68
3.3.	Arquitectura Electrónica.....	70
3.4.	Diseño e Implementación de la Arquitectura de Red y el Sistema de Comunicaciones.....	72
3.5.	Validación Técnica.....	78
3.5.1.	Sincronización.....	79
3.5.2.	Modularidad.....	84
3.5.3.	Escalabilidad.....	85
3.6.	Conclusiones.....	90
Capítulo 4	93
CONCLUSIONES	93
4.1.	Trabajo Futuro.....	96
4.2.	Futuras Líneas de Investigación.....	98
4.3.	Publicaciones.....	100
4.3.1.	Revistas.....	100
4.3.2.	Conferencias.....	100
4.4.	Colaboración en líneas de investigación.....	101
4.4.1.	Revistas.....	101
4.4.2.	Conferencias.....	102
4.4.3.	Patentes.....	103
Bibliografía	104

Lista de Figuras

Figura 1. Fases de la Marcha.	10
Figura 2. Sistema Nervioso Central. Tomado de Enciclopedia Británica.	12
Figura 3. Representación de la marcha huamana como un sistema jerárquico. (Adaptado de Nakazawa).....	13
Figura 4. Niveles Jerárquicos de Control de la Marcha Humana.	38
Figura 5. Analogía del middleware y su funcionamiento con diversos sistemas.....	48
Figura 6. Marco generalizado para la conceptualización de la arquitectura. A la izquierda, se observan los tres niveles jerárquicos estudiados en la marcha humana. A la derecha, el marco conceptual propuesto.	54
Figura 7. Propuesta Marco Arquitectura Electrónica.	55
Figura 8. Renderizado del Sistema Robótico Discover2Walk (versión preliminar).	60
Figura 9. Estructura de aluminio del sistema D2W fabricado con perfiles BOSCH.	61
Figura 10. Componentes del Módulo de Pelvis. (vista en perspectiva)	62
Figura 11. Componentes del módulo de la pelvis (vista superior).	63
Figura 12. Componentes del sistema motorizado de la pelvis.	63
Figura 13. Sistema completo del módulo de los Tobillos.....	64
Figura 14. Sistema de anclaje a los tobillos.....	64
Figura 15. Componentes del sistema motorizado del modulo de los tobillos.	65
Figura 16. Componentes del módulo de tracción.....	66
Figura 17. Componentes del módulo de navegación.	67
Figura 18. Definición de la arquitectura del sistema robótico.....	69
Figura 19. Arquitectura Electrónica del sistema robótico Discover2Walk. .	71
Figura 20. Infraestructura de la red del Discover2Walk.	73
Figura 21. Definición de la topología ROS2 para el sistema robótico D2W. .	74
Figura 22. Captura de Pantalla - Interfaz Gráfica D2W.	75

Figura 23. Mensaje personalizado que emite el nodo del Generador de Patrones. Se aprecia el tipo de mensaje estándar que se utiliza.	77
Figura 24. Tiempos de respuesta de los mensajes ROS2 entre los niveles Alto, Medio y Bajo.....	83
Figura 25. Modificación del sistema de tracción a una cinta de correr.	84
Figura 26. Exoesqueleto flexible montado sobre un “ <i>dummy</i> ” en el D2W. ..	86
Figura 27. Adición del nodo ExoSMA_Node que se utiliza para gestionar el exoesqueleto flexible.	87
Figura 28. Ejemplo de escenario de realidad virtual. Se observa un camino por el cual el usuario debe desplazarse y recolectar monedas.	87
Figura 29. sistema de reconstrucción tridimensional de la postura de la persona sobre el D2W.	89

Lista de Tablas

Tabla 1. Comparación de tecnologías empleadas en diversas implementaciones de exoesqueletos, según electrónica y comunicaciones...	32
Tabla 2. Comparativa de middlewares.	50
Tabla 3. Distribución de actuadores y sensores por cada sistema del Discover2Walk.	68
Tabla 4. Clasificación de los Sistemas según su nivel jerárquico.....	69
Tabla 5. Medición de latencias entre sistemas interconectados.	80
Tabla 6. Evaluación de los Nodos ROS2 y comparación con las frecuencias de control.....	82

Motivación.

La parálisis cerebral (PC) es la principal causa de discapacidad motora en la infancia, afectando a 2-4 de cada 1000 niños en Europa y Estados Unidos. Esta condición neurológica, que se origina en el cerebro en desarrollo, afecta el desarrollo motor y postural del niño, limitando su capacidad para caminar y explorar su entorno de manera independiente. Las consecuencias de la PC no se limitan a lo físico, ya que la falta de movilidad temprana puede afectar negativamente el desarrollo cognitivo y emocional, impidiendo que los niños interactúen plenamente con su mundo y desarrollen habilidades cruciales para su crecimiento. La PC también puede manifestarse con alteraciones sensoriales, de percepción, comunicación y comportamiento, así como epilepsia y problemas musculares secundarios. Adicionalmente, la salud mental de los niños y sus familias se ve afectada por el dolor crónico, el aislamiento social y la pérdida de independencia que a menudo acompañan a esta condición.

A pesar de los avances en las terapias tradicionales para la PC, como la fisioterapia, el uso de ortesis y la medicación, estas suelen centrarse en el manejo de los síntomas y la mejora de la función motora existente. Aunque son herramientas valiosas, a menudo no logran promover un desarrollo motor natural y pueden ser invasivas o restrictivas, especialmente para bebés y niños pequeños. Estas intervenciones tradicionales se dirigen principalmente a las articulaciones y músculos afectados, pero no están diseñadas para fomentar un desarrollo motor normal a nivel central. Por lo tanto, no aprovechan plenamente la neuroplasticidad, la capacidad del cerebro para reorganizarse y formar nuevas conexiones, que es especialmente alta en los primeros años de vida.

La tecnología robótica ha emergido como una alternativa prometedora para abordar estas limitaciones. Los exoesqueletos robóticos, en particular, ofrecen asistencia personalizada y adaptativa en la marcha, lo que podría mejorar significativamente la calidad de vida de los niños con PC. Estos dispositivos pueden ayudar a los niños a experimentar la sensación de caminar, fortalecer sus músculos y desarrollar patrones de movimiento más naturales. Además, la robótica ofrece la posibilidad de crear entornos de rehabilitación más interactivos y motivadores, aprovechando la neuroplasticidad para promover

un desarrollo motor más efectivo. Sin embargo, los exoesqueletos actuales a menudo son rígidos, pesados y poco adaptables a las necesidades individuales de los niños, especialmente de los bebés y niños pequeños, lo que limita su aplicación en etapas tempranas del desarrollo.

La intervención temprana es esencial para maximizar la neuroplasticidad y minimizar las deficiencias secundarias en niños con PC. La detección temprana y el movimiento activo temprano son muy importantes para prevenir la pérdida de conexiones neuronales y promover un desarrollo motor y cognitivo óptimo. Los exoesqueletos robóticos flexibles y adaptables, diseñados específicamente para bebés y niños pequeños, podrían desempeñar un papel fundamental en la intervención temprana, brindando a los niños la oportunidad de experimentar la marcha y explorar su entorno desde una edad temprana.

En este contexto, el proyecto Discover2Walk, en el marco del cual se desarrolla esta tesis, se presenta como una respuesta a la necesidad urgente de desarrollar una solución innovadora que aborde estas limitaciones y aproveche el potencial de la tecnología robótica para mejorar la rehabilitación de la marcha en niños con PC. El proyecto se centra en la creación de un exoesqueleto robótico flexible y adaptable, junto con un marco de control inteligente, que pueda ser utilizado desde una edad temprana para promover el desarrollo motor natural y mejorar la calidad de vida de los niños con PC. Este enfoque innovador busca no solo asistir en la marcha, sino también estimular la neuroplasticidad y fomentar un desarrollo integral en estos niños.

Objetivos.

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar un exoesqueleto robótico innovador y un marco de control integral que mejore la rehabilitación de la marcha en niños con parálisis cerebral (PC). Este objetivo principal se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

Diseño y Desarrollo de un Exoesqueleto Robótico Adaptable: El objetivo primordial es crear un exoesqueleto robótico que sea modular y altamente personalizable, capaz de adaptarse al crecimiento y las necesidades individuales de cada niño con PC. Este exoesqueleto debe ser ligero, cómodo y seguro, y debe proporcionar asistencia dinámica y coordinada en el movimiento de las piernas, simulando un patrón de marcha natural. La adaptabilidad es clave para asegurar que el sistema sea efectivo en diferentes etapas del desarrollo del niño y en una variedad de condiciones de PC. Además, se busca que el exoesqueleto sea intuitivo y fácil de usar, tanto para los niños como para los terapeutas, lo que facilitaría su integración en entornos clínicos.

Desarrollo de un Marco de Control Integral: Se busca diseñar e implementar un marco de control innovador que sea jerárquico y bioinspirado, basado en la comprensión de la biomecánica y neurología de la marcha humana. Este marco debe permitir una interacción fluida y natural entre el niño y el exoesqueleto, interpretando las intenciones del usuario y adaptándose a sus movimientos en tiempo real. Se explorará la integración de tecnologías avanzadas de percepción, como interfaces de posicionamiento automático (SLAM) y sensores inerciales (IMU), para mejorar la capacidad del exoesqueleto para interpretar las intenciones del usuario y proporcionar una asistencia más personalizada.

Diseño e Implementación de una Arquitectura Electrónica Modular: El objetivo es crear una arquitectura electrónica que sea modular, escalable y fácilmente adaptable a diferentes configuraciones y necesidades del usuario. Esto implica desarrollar una estructura de hardware y software que permita la integración de nuevos sensores, actuadores y algoritmos de control de manera sencilla y eficiente. La modularidad también facilitará el mantenimiento y la actualización del sistema, lo que es un punto importante para su sostenibilidad a largo plazo. Se explorará el uso de tecnologías de

comunicación avanzadas, como ROS2, para garantizar una comunicación fluida y en tiempo real entre los diferentes componentes del sistema, lo que es esencial para la sincronización precisa de los movimientos y la seguridad del usuario.

La consecución de estos objetivos específicos contribuirá al logro del objetivo principal de mejorar la rehabilitación de la marcha en niños con PC. Además, se espera que este trabajo tenga un impacto significativo en el campo de la robótica de rehabilitación, proporcionando una plataforma tecnológica innovadora y un marco de control adaptable que puedan ser utilizados para el desarrollo de futuros exoesqueletos y terapias de rehabilitación.

Organización del Libro.

Esta tesis doctoral está estructurada en cuatro capítulos, cada uno de los cuales aborda un aspecto fundamental del desarrollo y la evaluación de un exoesqueleto robótico para la rehabilitación de la marcha en niños con parálisis cerebral. La organización del libro sigue una secuencia lógica, comenzando con una revisión del estado del arte y culminando con las conclusiones y perspectivas futuras.

Marco Teórico y Estado del Arte: Este capítulo proporciona una base sólida para la investigación al revisar los conceptos clave relacionados con la marcha humana, el control nervioso y la robótica de rehabilitación. Se realiza un análisis exhaustivo de los exoesqueletos existentes, destacando sus fortalezas, debilidades y áreas de mejora. Este análisis sirve como punto de partida para identificar los desafíos y oportunidades en el campo y para justificar la necesidad de un nuevo enfoque en el diseño y control de exoesqueletos.

Marco Integral para el Control de Sistemas Robóticos de Rehabilitación: En este capítulo se presenta el núcleo de la propuesta de esta tesis: un marco de control integral y bioinspirado para exoesqueletos de miembros inferiores. Se describe en detalle la arquitectura jerárquica del marco, que se divide en tres niveles: percepción e intención, generación de patrones centrales y ejecución. Se detallan los objetivos, requisitos y métodos de funcionamiento de cada nivel, así como las tecnologías necesarias para su implementación.

Implementación en la plataforma robótica Discover2Walk: Este capítulo se centra en la implementación práctica del marco de control propuesto en un sistema robótico real. Se describe la plataforma robótica Discover2Walk, diseñada específicamente para la rehabilitación de niños con parálisis cerebral. Se detallan los componentes tecnológicos, los algoritmos de control y las pruebas realizadas para validar la eficacia y seguridad del sistema.

Conclusiones: Este capítulo final resume los principales hallazgos y contribuciones de la tesis. Se discuten los resultados obtenidos en la validación experimental del sistema y se evalúa el impacto potencial del exoesqueleto robótico y el marco de control en la rehabilitación de la marcha en niños con PC. Además, se presentan las perspectivas futuras de la investigación, incluyendo posibles mejoras en el diseño y control del sistema, así como nuevas aplicaciones clínicas y terapéuticas.

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.

Este capítulo presenta una revisión exhaustiva del estado del arte en exoesqueletos robóticos para la rehabilitación de la marcha, con énfasis en su aplicación para niños con parálisis cerebral. Se explora la biomecánica de la marcha humana y los mecanismos neurofisiológicos que la controlan, estableciendo una base sólida para el diseño de sistemas robóticos bioinspirados. El análisis abarca desde los fundamentos de la marcha hasta las arquitecturas de control más avanzadas en exoesqueletos actuales, identificando tendencias, desafíos y oportunidades en el campo. Se destaca la importancia de desarrollar sistemas modulares, adaptables y personalizables que puedan ajustarse a las necesidades individuales de los pacientes pediátricos. El capítulo también aborda la necesidad de estandarización en el diseño de exoesqueletos, proponiendo un enfoque que integre tecnologías emergentes y considere la escalabilidad futura. Esta revisión crítica sienta las bases para el desarrollo de una nueva generación de exoesqueletos más eficaces, seguros y centrados en el usuario, con el potencial de transformar significativamente la rehabilitación de la marcha en niños con discapacidades motoras.

1.1. Introducción.

La rehabilitación de la marcha en individuos con discapacidades motoras, como resultado de lesiones neurológicas o musculoesqueléticas, representa un desafío significativo en el campo de la ingeniería biomédica. Los exoesqueletos robóticos han surgido como una herramienta prometedora para asistir y mejorar la movilidad de estas personas, ofreciendo el potencial de restaurar la independencia funcional y mejorar la calidad de vida (Dollar & Herr, 2008). Sin embargo, el diseño de sistemas de control efectivos para exoesqueletos presenta una serie de retos complejos que deben abordarse para lograr una rehabilitación exitosa.

Uno de los desafíos fundamentales radica en lograr una interacción fluida y natural entre el exoesqueleto y el usuario (Young & Ferris, 2017). Los sistemas de control deben ser capaces de interpretar las intenciones del

usuario a través de señales biológicas, como la actividad muscular o cerebral, y traducirlas en movimientos precisos y coordinados del exoesqueleto. Esto requiere el desarrollo de algoritmos de control avanzados que puedan adaptarse a las variaciones en la marcha, a las características individuales de cada usuario, y a las diferentes condiciones del entorno.

La seguridad y la estabilidad son aspectos importantes en el control de exoesqueletos (Ronsse et al., 2011). Los sistemas de control deben ser capaces de detectar y corregir posibles desequilibrios o errores en la marcha, evitando caídas y lesiones. Esto implica la integración de sensores de alta precisión, como unidades de medición inercial (IMU) y sensores de fuerza, junto con algoritmos de control robustos que puedan responder de manera rápida y eficiente a cualquier perturbación.

Además, los exoesqueletos deben ser reactivos y adaptables para hacer frente a los cambios en el entorno y a las demandas de la tarea (Farris et al., 2011). Por ejemplo, un exoesqueleto utilizado para la rehabilitación de la marcha debe ser capaz de ajustar su nivel de asistencia en función de la fase de la marcha, el terreno, y la velocidad de movimiento del usuario. Esto requiere la implementación de estrategias de control adaptativo que puedan modificar los parámetros del controlador en tiempo real para optimizar el rendimiento y la seguridad del sistema.

Los avances en estas áreas están impulsando el desarrollo de exoesqueletos más sofisticados, seguros y efectivos, que tienen el potencial de revolucionar la rehabilitación de la marcha y mejorar significativamente la calidad de vida de las personas con discapacidades motoras.

1.2. La Marcha Humana

La marcha es una de las habilidades motoras más fundamentales y distintivas del ser humano. Aunque puede parecer simple a primera vista, es el resultado de una compleja interacción entre sistemas neuromusculares, biomecánicos y sensoriales. Su estudio y comprensión se han convertido en un pilar en campos tan variados como la neurología, la fisioterapia, la robótica y la biomecánica, (Perry, 1992) .

Desde una perspectiva técnica, la marcha se define como la forma de locomoción en la que un organismo se mueve por sus propios medios, alternando el apoyo de las extremidades. En los seres humanos, esto significa

moverse alternando nuestros dos pies. Cada paso que damos es el resultado de una serie de contracciones y relajaciones musculares coordinadas que mueven nuestras articulaciones en patrones específicos. Este proceso está optimizado para minimizar el gasto energético y maximizar la eficiencia (Whittle, 2007; Winter, 2009).

Entender la biomecánica de la marcha es esencial para evaluar y tratar afecciones que inciden en la capacidad de una persona para caminar (Rose & Gamble, 2006). Además, juega un papel fundamental en áreas como la medicina deportiva, la ortopedia y la rehabilitación (Vaughan et al., 1999).

1.2.1. Fases de la Marcha Humana

La marcha humana se divide en dos fases principales: la fase de apoyo (*stance phase*) y la fase de oscilación (*swing phase*) (Whittle, 2007). Esta división es fundamental en el análisis biomecánico, ya que permite un estudio detallado de cómo las fuerzas se distribuyen a través del pie y cómo se generan y controlan los movimientos durante la locomoción (Kirtley, 2006; Perry, 1992). Cada fase se compone de eventos específicos que marcan puntos clave en la interacción del pie con el suelo y en la preparación para el siguiente paso (Perry, 1992).

La división en dos fases principales se justifica por las diferencias fundamentales en la función y los requerimientos biomecánicos de cada fase (Winter, 2009). Durante la fase de apoyo, el pie está en contacto con el suelo, soportando el peso del cuerpo y proporcionando estabilidad. En contraste, durante la fase de oscilación, el pie está en el aire, moviéndose hacia adelante para preparar el siguiente paso. Esta distinción permite analizar por separado los mecanismos de soporte de peso, generación de fuerza y control del equilibrio en cada fase, (Figura 1).

Para comprender aún más en profundidad los mecanismos biomecánicos y neuromusculares involucrados en cada fase, estas se dividen a su vez en eventos específicos (Kirtley, 2006). Estos eventos representan momentos clave en la interacción del pie con el suelo y en la transición entre las diferentes etapas de la marcha. Al analizar cada evento por separado, se

puede obtener una visión más detallada de los cambios en la cinemática, la cinética y la actividad muscular a lo largo del ciclo de marcha (Whittle, 2007).

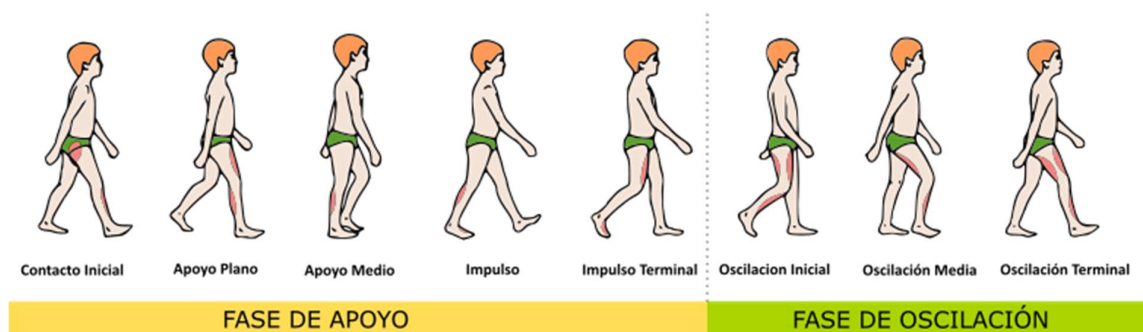


Figura 1. Fases de la Marcha.

1.2.1.1. Fase de Apoyo

La fase de apoyo, que constituye aproximadamente el 60% del ciclo de marcha, es el período en el que el pie está en contacto con el suelo, soportando el peso del cuerpo y generando la fuerza necesaria para la propulsión (Perry, 1992). Esta fase se subdivide en cinco eventos principales:

1. Contacto inicial (*Heel Strike*): El talón toca el suelo, iniciando la fase de apoyo y absorbiendo el impacto. La rodilla está extendida y el tobillo en posición neutra (Kirtley, 2006).
2. Apoyo plano (*Foot Flat*): El pie se aplana para distribuir el peso corporal de manera uniforme. La rodilla comienza a flexionarse para absorber el impacto y el tobillo se mueve hacia la dorsiflexión (Kirtley, 2006).
3. Apoyo medio (*Midstance*): El pie soporta la mayor parte del peso del cuerpo, siendo muy necesario el equilibrio y la estabilidad. La rodilla alcanza su máxima flexión y el tobillo se encuentra en posición neutra (Kirtley, 2006).
4. Impulso (*Heel Off*): El talón se eleva y el antepié se prepara para despegar. La rodilla se extiende y el tobillo comienza a moverse hacia la flexión plantar (Kirtley, 2006).
5. Impulso terminal (*Toe Off*): Los dedos se despegan del suelo, dando el impulso final para la fase de oscilación. La rodilla está extendida y el tobillo alcanza su máxima flexión plantar (Kirtley, 2006).

Esta subdivisión en eventos permite un análisis detallado de cómo el pie interactúa con el suelo, cómo se transfiere el peso del cuerpo a lo largo del pie y cómo se generan las fuerzas de propulsión necesarias para avanzar.

1.2.1.2. Fase de Oscilación:

La fase de oscilación, que representa aproximadamente el 40% del ciclo de marcha, es el período en el que el pie se encuentra en el aire, moviéndose hacia adelante para prepararse para el siguiente contacto inicial (Perry, 1992). Esta fase es esencial para mantener la continuidad y fluidez de la marcha. Se divide en tres eventos principales:

1. Oscilación inicial (*Early Swing*): El pie se levanta del suelo y comienza a moverse hacia adelante. La rodilla y la cadera se flexionan para permitir el despegue del pie (Kirtley, 2006).
2. Oscilación media (*Midswing*): El pie avanza en el aire, alcanzando su punto más alto. La rodilla se extiende y el tobillo se dorsiflexiona para evitar que el pie arrastre por el suelo (Kirtley, 2006).
3. Oscilación terminal (*Late Swing*): El pie se desacelera y se prepara para el siguiente contacto inicial con el suelo. La rodilla se extiende completamente y el tobillo se mantiene en posición neutra (Kirtley, 2006).

La correcta coordinación y activación de los músculos durante esta fase es muy importante para una marcha eficiente y sin lesiones.

1.3. Control Nervioso de la Marcha

El sistema nervioso es el responsable de coordinar la marcha. Los patrones básicos de movimiento son generados por redes neuronales en la médula espinal llamadas generadores de patrones centrales (GPC) (Brown, 1914; Sherrington, 1910). Estas redes generan ritmos automáticos que dirigen la actividad muscular necesaria para caminar. Sin embargo, la marcha adaptativa y versátil que exhibimos los humanos es posible gracias a niveles superiores del sistema nervioso, como el cerebro y el cerebelo, que ajustan estos patrones básicos en función de la información sensorial y los objetivos motores (Takakusaki, 2013).

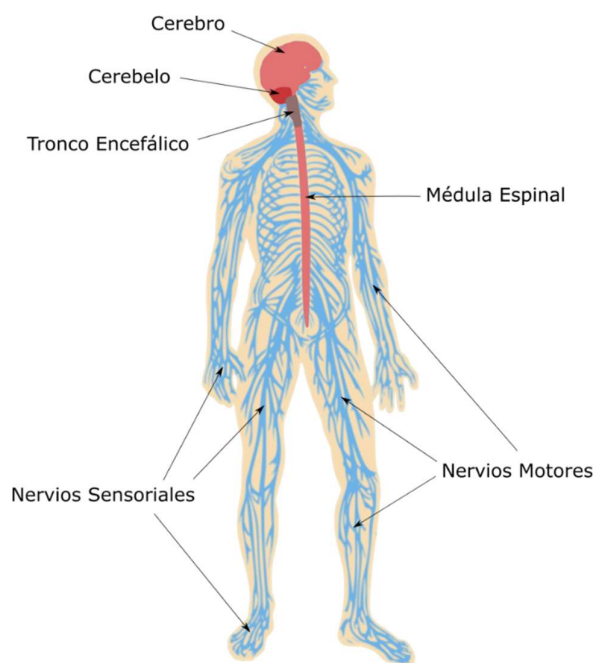


Figura 2. Sistema Nervioso Central. Tomado de Enciclopedia Británica.

El cerebro, en particular la corteza motora y las áreas de asociación, desempeña un papel clave en la planificación, iniciación y control de la marcha. Procesa información sensorial del entorno, como la visión y la propiocepción, y genera señales motoras que se transmiten a la médula espinal para modular la actividad de los GPCs (Lemon, 2008). El cerebelo es esencial para la coordinación, el equilibrio y el ajuste fino de los movimientos durante la marcha (Morton & Bastian, 2004). Recibe información sensorial de los músculos, las articulaciones y el sistema vestibular, y la utiliza para ajustar la actividad muscular y mantener una marcha suave y coordinada.

El sistema nervioso central (SNC) (ver Figura 2), es la principal infraestructura de control y procesamiento del cuerpo (Purves et al., 2001). La marcha se inicia con la planificación y activación en el cerebro, donde se generan las órdenes motoras que se transmiten a la médula espinal a través de las vías corticoespinales. Los nervios sensoriales, que transmiten información desde los receptores sensoriales en los músculos, las articulaciones y la piel, comunican al cerebro las modificaciones necesarias en la marcha, asegurando una adaptación fluida y precisa a cualquier cambio requerido (Takakusaki, 2013).

1.3.1. Niveles Jerárquicos de la Marcha

La representación jerárquica de la marcha humana propuesta por Nakazawa, (Figura 3) proporciona una visión integral de cómo el sistema nervioso central organiza y controla este complejo proceso motor. Cada nivel de la jerarquía desempeña un papel específico, desde la planificación y el control voluntario en el nivel superior, hasta la generación de patrones rítmicos en el nivel medio y la ejecución precisa de los movimientos en el nivel inferior, (Nakazawa et al., 2012). La interacción dinámica entre estos niveles, junto con la retroalimentación sensorial constante, permite que la marcha humana sea una acción adaptable, eficiente y robusta, capaz de responder a las demandas cambiantes del entorno y garantizar una locomoción segura y efectiva en diversas circunstancias.

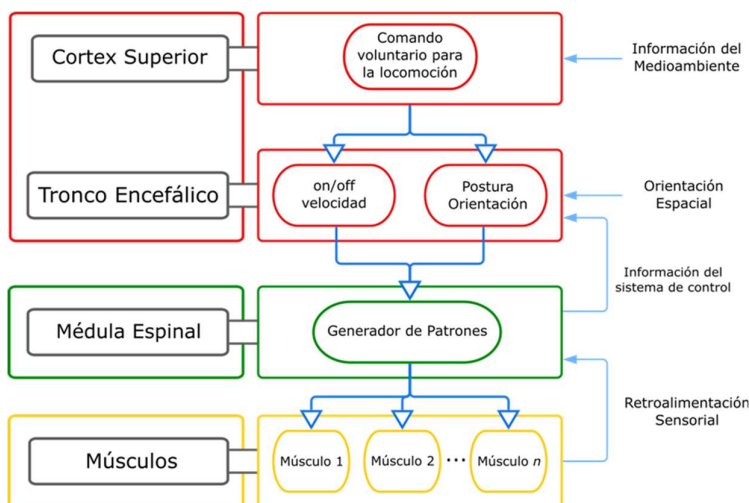


Figura 3. Representación de la marcha huamana como un sistema jerárquico. (Adaptado de Nakazawa)

En la Figura 3, Nakazawa ilustra cómo se activan los componentes principales del sistema nervioso durante el acto de caminar, identificando tres niveles jerárquicos:

Nivel alto (Cortex Superior y Tronco Encefálico):

El cerebro, en particular el córtex superior, actúa como el centro de control de la marcha. Aquí se origina la intención de caminar y se planifica la velocidad, dirección y adaptación al entorno. El área motora suplementaria y la corteza premotora son factores importantes en esta etapa de planificación y toma de

decisiones (Dimitrijevic & Larsson, 1981). La corteza motora primaria envía señales a través de las vías corticoespinales hacia la médula espinal, iniciando así el movimiento, (Lemon, 2008). Estas señales contienen información detallada sobre la secuencia y la intensidad de las contracciones musculares necesarias para cada paso.

Simultáneamente, el cerebelo, ubicado en la parte posterior del encéfalo, recibe información sensorial y motora, y realiza ajustes en tiempo real para garantizar la coordinación, el equilibrio y la precisión de los movimientos, (Morton & Bastian, 2004). Los ganglios basales también contribuyen a la fluidez y a la amplitud adecuada de los pasos, modulando la iniciación y terminación de los movimientos, (Wichmann & DeLong, 2003). El tronco encefálico, que conecta el cerebro con la médula espinal, regula la postura y la orientación espacial del cuerpo, asegurando que nos mantengamos erguidos y en la dirección deseada, (Takakusaki, 2017).

Nivel medio (Médula Espinal):

Las señales motoras generadas en el córtex superior descienden por el tronco encefálico y llegan a la médula espinal. Aquí residen los generadores de patrones centrales (GPC), redes neuronales que actúan como "centros de control automático" de la marcha (Brown, 1914; Sherrington, 1910). Los GPC generan los patrones rítmicos de actividad muscular que impulsan la marcha, activando e inhibiendo alternativamente las neuronas motoras que controlan los músculos flexores y extensores de las piernas. Este proceso produce el movimiento cíclico de la marcha, (Guertin, 2009; Marder & Bucher, 2001).

La médula espinal no solo ejecuta las órdenes del cerebro, sino que también recibe información sensorial de los receptores en los músculos, las articulaciones y la piel. Esta retroalimentación sensorial es un factor muy importante para ajustar la marcha en tiempo real y responder a cambios en el terreno o a perturbaciones inesperadas (Dietz, 2003; Prochazka & Ellaway, 2012).

Nivel bajo (Músculos):

Las señales generadas por los GPC en la médula espinal se transmiten a través de las neuronas motoras hacia los músculos de las piernas y el tronco (Nakazawa et al., 2012). Cada neurona motora inerva un grupo de fibras

musculares, formando una unidad motora, (Kandel et al., 2012; Purves et al., 2001). La activación de las unidades motoras provoca la contracción de los músculos, lo que genera la fuerza necesaria para impulsar el cuerpo hacia adelante y mantener el equilibrio. La coordinación precisa de la activación de múltiples unidades motoras en diferentes músculos es esencial para lograr una marcha suave y eficiente. Los receptores sensoriales en los músculos y las articulaciones envían información de vuelta a la médula espinal, lo que permite un ajuste continuo de la marcha en respuesta a las condiciones cambiantes (Pearson, 2000; Prochazka & Ellaway, 2012).

Durante todo el proceso de la marcha, el sistema nervioso central recibe un flujo constante de retroalimentación sensorial proveniente de diversas fuentes, como los husos musculares, los órganos tendinosos de Golgi y los receptores cutáneos (Orlovsky et al., 1999; Pearson, 2000; Takakusaki, 2017). Esta información es elemental para ajustar el movimiento en tiempo real, permitiendo mantener el equilibrio, adaptarse a cambios en el terreno y responder a las intenciones del individuo (Frigon & Rossignol, 2006).

1.4. Control de la marcha en sistemas robóticos de rehabilitación

En el campo de la ingeniería biomédica, los exoesqueletos son sistemas robóticos complejos que integran una multitud de sensores y actuadores electromecánicos, (Young & Ferris, 2017) . Su objetivo principal es interactuar con el cuerpo humano, no solo a nivel físico, proporcionando asistencia y soporte, sino también a nivel cognitivo, interpretando las intenciones del usuario y respondiendo de manera adecuada (Wang et al., 2015).

La arquitectura electrónica y de control juega un papel fundamental en la integración y coordinación de todos estos sistemas (Pratt et al., 2004a). Es el cerebro del exoesqueleto, el que permite la sincronización precisa de los mecanismos electromecánicos para lograr una rehabilitación efectiva. Esta arquitectura debe ser capaz de procesar la información proveniente de los sensores, interpretar las intenciones del usuario, y generar las señales de

control adecuadas para los actuadores, todo en tiempo real (G. Chen et al., 2013).

Los algoritmos de control avanzados, junto con la inteligencia artificial, son herramientas clave para lograr esta sincronización y adaptabilidad (Blaya & Herr, 2004a). Estos algoritmos permiten que el exoesqueleto responda de manera intuitiva a los movimientos del usuario, adaptándose a su ritmo y necesidades. Además, la inteligencia artificial puede ser utilizada para aprender y mejorar el rendimiento del exoesqueleto a lo largo del tiempo, personalizando la terapia de rehabilitación, (Zhang et al., 2017).

El futuro de los exoesqueletos en la rehabilitación reside en el desarrollo de arquitecturas electrónicas y de control más sofisticadas, junto con algoritmos de control e inteligencia artificial más avanzados. Estas innovaciones permitirán crear exoesqueletos más inteligentes, intuitivos y efectivos, capaces de mejorar significativamente la calidad de vida de las personas con discapacidades motoras, (Young & Ferris, 2017).

A continuación presentaré una revisión del estado del arte que analiza las arquitectura de control más recientes en exoesqueletos de miembro inferior, buscando aquellos que destacan por su innovación y sofisticación técnica, con una descripción detallada de sus componentes y funcionamiento. Los exoesqueletos seleccionados, como MINDWALKER (Wang et al., 2015), Symbitron (Meijneke et al., 2021a), Exo-H3 con EXOVIS (Akkawutvanich & Manoonpong, 2023a), WAKE-up (Patané et al., 2017a) y CPWalker (Bayón et al., 2017) sobresalen por sus características únicas, como la integración de interfaces cerebro-máquina (BCI), actuadores elásticos, sistemas de control adaptativo y arquitecturas modulares. Estas innovaciones permiten una interacción más natural y personalizada entre el usuario y el exoesqueleto, abriendo nuevas posibilidades para la rehabilitación y asistencia de la marcha, adaptándose a las necesidades individuales de cada usuario y mejorando su autonomía e independencia.

1.4.1. HAL (Hybrid Assistive Limb)

El primer estudio que se considera en este estado del arte es el exoesqueleto HAL (Hybrid Assistive Limb) de una sola pierna (Kawamoto et al., 2009a), enfocado específicamente en su aplicación para asistir a personas con hemiplejía. Este dispositivo innovador, que combina la robótica con la

biomecánica, representa un avance significativo en la asistencia motora. El diseño del HAL se caracteriza por sus articulaciones activas, que se acoplan al usuario mediante un sistema de correas, permitiendo una integración ergonómica y segura.

En el corazón del sistema del HAL, se encuentra un conjunto de sensores bioeléctricos y un controlador principal. Los sensores bioeléctricos son fundamentales para detectar las señales musculares del usuario, que son clave para el funcionamiento del exoesqueleto. Estas señales, una vez capturadas, son procesadas por el controlador principal, un PC equipado con Linux RTOS. Este controlador no solo interpreta las señales musculares, sino que también acciona los mecanismos del exoesqueleto para generar movimientos asistidos. Estos movimientos se basan en patrones de marcha de personas sin discapacidades, lo que permite al exoesqueleto adaptar su asistencia de manera más natural y eficiente.

Una característica destacada del HAL es su capacidad para proporcionar asistencia de torque, especialmente en la flexión de la rodilla. Esta asistencia es significativa para mejorar la marcha, ya que la flexión adecuada de la rodilla es un componente esencial para una caminata eficiente y equilibrada. Los ensayos clínicos realizados con el HAL han mostrado resultados prometedores. Los pacientes con hemiplejía que utilizaron el exoesqueleto experimentaron mejoras significativas en su capacidad de caminar, evidenciadas en una mayor longitud de zancada y una velocidad de marcha incrementada. Estos avances indican no solo una mejora en la funcionalidad física sino también en la calidad de vida de los usuarios.

Sin embargo, el artículo también resalta ciertos desafíos que aún deben superarse. Entre ellos, la necesidad de reducir el peso del exoesqueleto para facilitar su uso prolongado y la mejora del sistema de ajuste para adaptarse cómodamente a diferentes usuarios. Estos aspectos son primordiales para la integración del exoesqueleto HAL en la vida diaria de las personas con hemiplejía, permitiéndoles una mayor independencia y movilidad.

1.4.2. AAFO.

Por otra parte, el artículo (Blaya & Herr, 2004a) aborda el desarrollo de una ortesis de tobillo-pie activo (AAFO), diseñado específicamente para mejorar la marcha en casos de pie caído. Este dispositivo se destaca por su capacidad para modular la impedancia de la articulación ortopédica durante el ciclo de

caminata. Tal característica permite mitigar el problema del “*foot slap*” y facilita una mayor flexión plantar motorizada, logrando una marcha durante la fase de oscilación más similar a la de individuos sin afecciones.

Este sistema incorpora un actuador elástico en serie, un componente clave que permite el control preciso de la rigidez y el amortiguamiento en las rotaciones de plantar flexión y dorsiflexión del tobillo. Además, el dispositivo está equipado con sensores avanzados que miden tanto el ángulo del tobillo como las fuerzas de reacción del suelo. Estos sensores se integran con un sistema de control adaptativo, basado en una PC con Debian Linux y una tarjeta de adquisición de datos IO, para optimizar la respuesta de la ortesis de acuerdo con las necesidades específicas del usuario.

Este exoesqueleto, al poseer un control de impedancia variable, representa un avance significativo en el tratamiento del pie caído, ofreciendo una solución más natural y adaptativa en comparación con los dispositivos ortésicos convencionales. No obstante, el estudio señala que para su aplicación práctica y uso extendido, es necesario realizar mejoras en la ergonomía y en la funcionalidad del sistema de control. Entre las limitaciones identificadas, se encuentra la transición prematura al estado de oscilación causada por la falta de resolución en los sensores de fuerza del antepié, lo que puede restringir los movimientos de flexión plantar durante la fase de apoyo tardío. Adicionalmente, los usuarios del estudio mencionaron el peso y el volumen como desventajas, aspectos que necesitan ser abordados en futuras iteraciones del dispositivo.

1.4.3. MINDWALKER

El siguiente estudio introduce el MINDWALKER (Wang et al., 2013a, 2015), un exoesqueleto innovador que integra interfaces cerebro-máquina (BCI) con mecanismos de actuación elásticos, destinado a mejorar la movilidad en individuos con parálisis. Su principal avance es el enfoque integrado que combina el control de la marcha y el balance dinámico para proporcionar movilidad bípeda asistida.

El MINDWALKER se distingue por su arquitectura de control jerárquica. En el nivel superior, se encuentra la BCI junto con un sistema avanzado de control de balance. La comunicación entre los actuadores elásticos en serie (SEA) en cada articulación motora y un PC-Matlab se realiza mediante la tecnología EtherCAT. La máquina de estados finitos que controla estos

actuadores se basa en el desplazamiento del Centro de Masa (CoM) del usuario. A nivel electrónico, el exoesqueleto utiliza una combinación de sensores y algoritmos para interpretar la intención del usuario y ajustar el movimiento del exoesqueleto en tiempo real. Este proceso se complementa con una retroalimentación cuidadosamente diseñada para asegurar la seguridad y comodidad del usuario.

Los experimentos realizados demostraron la capacidad del MINDWALKER para adaptar la marcha en tiempo real y responder adecuadamente a las intenciones del usuario detectadas a través de la BCI. Se resaltó la eficacia del algoritmo para ajustar el ancho de paso y mantener el equilibrio, aunque se observó que la marcha estable sin soporte externo se logró únicamente en individuos sanos y no en aquellos sujetos con alguna patología.

A pesar de sus avances, el estudio identificó ciertas limitaciones en el MINDWALKER, incluyendo el peso y la portabilidad del exoesqueleto. Además, la falta de actuación en ciertos grados de libertad limita movimientos como giros activos, lo que puede restringir su funcionalidad en entornos cotidianos. Estos aspectos destacan áreas de mejora necesarias para la futura evolución de esta tecnología.

1.4.4. RoboKnee

Por otra parte, otro estudio examina el RoboKnee (Pratt et al., 2004a), un exoesqueleto innovador de un solo grado de libertad diseñado para fortalecer la fuerza y resistencia durante la marcha. Este dispositivo permite a los músculos cuádriceps del usuario relajarse, aplicando un par de fuerzas en la rodilla. Utiliza Actuadores Elásticos en Serie (SEA) para lograr una interfaz de baja impedancia y una interacción más natural y fluida.

El diseño del RoboKnee se centra en la implementación de los SEAs, garantizando una interacción intuitiva y eficiente. La electrónica del sistema incorpora sensores de fuerza y posición, claves para medir la dinámica del movimiento de la rodilla y las interacciones con el suelo. Estos sensores son esenciales para estimar la intención del usuario y adaptar la respuesta del exoesqueleto. El control del RoboKnee se lleva a cabo mediante un sistema en tiempo real, basado en una placa PC-104 con capacidades de Java nativo. Esta configuración permite procesar las señales sensoriales y controlar la fuerza del actuador a través de una interfaz de controlador PD analógico, ofreciendo una respuesta adaptativa y precisa durante las diferentes fases de la marcha.

Los resultados del estudio demuestran que el RoboKnee permite a los usuarios realizar tareas que requieren fuerza y resistencia adicionales, como subir escaleras o realizar sentadillas profundas con cargas pesadas. Se observó una mejora notable en la capacidad de los usuarios para trabajar contra la gravedad sin fatigar los cuádriceps.

Sin embargo, el estudio también señala limitaciones del RoboKnee, como la duración reducida de la batería entre cargas y la dificultad para ponerse y quitarse el dispositivo. Además, el peso y tamaño del exoesqueleto pueden limitar la libertad de movimiento del usuario y restringir ciertas actividades, aspectos que son decisivos para considerar en el desarrollo futuro de estos dispositivos.

1.4.5. Ortesis de miembro inferior motorizada.

El siguiente artículo analizado en este estado del arte (Laubscher et al., 2017a) destaca un avance importante en la tecnología de asistencia para la movilidad infantil, el desarrollo de una ortesis de miembro inferior motorizada, especialmente diseñada para niños con afecciones como parálisis cerebral y espina bífida. Lo más notable de esta ortesis es su diseño ligero y su capacidad para proporcionar asistencia adecuada en el plano sagital, especialmente en las caderas y rodillas, facilitando tanto la marcha como la rehabilitación.

El diseño de la ortesis fue desarrollado desde un enfoque de ingeniería detallado, que tuvo en cuenta los requisitos biomecánicos específicos de los usuarios pediátricos. Se puso especial énfasis en las limitaciones de tamaño y peso para maximizar la comodidad y seguridad. Para ello, se desarrollaron actuadores específicos que empleaban motores de corriente continua sin escobillas. Estos actuadores se integraron en una estructura ortopédica ajustable, capaz de adaptarse al crecimiento de los niños, una característica sustancial en equipos pediátricos.

La ortesis está equipada con un sistema de control descentralizado (Dspace MicroLabBox), que asegura movimientos fluidos y naturales. Las pruebas preliminares con maniqués, tanto sin carga adicional como con peso que simula el de un niño, mostraron que la ortesis podía seguir con éxito las trayectorias de marcha deseadas. Estos resultados son indicativos de la capacidad del dispositivo para adaptarse a diferentes pesos y movimientos, un aspecto esencial para su aplicación en terapias de rehabilitación. Sin

embargo, el artículo también señala que hay áreas que requieren más trabajo, como la optimización del sistema de control y la personalización del dispositivo para adaptarse mejor a las necesidades individuales de los usuarios.

1.4.6. CPWALKER

El siguiente artículo aborda el CPWalker (Bayon et al., 2016a), una innovadora plataforma robótica diseñada para la rehabilitación de la marcha en pacientes con parálisis cerebral. La principal innovación radica en la incorporación de una interfaz cerebro-máquina (BCI), que mejora la autonomía del usuario durante la terapia de marcha, representando un enfoque personalizado y novedoso en la rehabilitación robótica. El diseño del CPWalker es el resultado de un enfoque multidisciplinario que combina un andador inteligente con sistemas activos de soporte de peso, adaptación de altura de cadera y control de movimiento de las articulaciones. Los componentes electrónicos, fundamentales en este diseño, incluyen motores de corriente continua sin escobillas y encoders para el control de velocidad. Además, un conjunto de sensores, como potenciómetros y sensores de fuerza, captura la interacción del usuario con el dispositivo. Estos componentes se comunican con una unidad de control central (PC-104) a través de una red CAN, asegurando una integración eficiente y una respuesta precisa.

La eficacia de la plataforma se evidenció en su capacidad para asistir la marcha adaptándose a las necesidades específicas de cada usuario. Los resultados preliminares son prometedores, mostrando que los pacientes pueden utilizar la BCI para iniciar la terapia y ajustar la marcha en tiempo real. Esta capacidad sugiere una integración exitosa de los componentes electrónicos y mecánicos, proporcionando una experiencia de rehabilitación más intuitiva y efectiva.

A pesar de su potencial, se identificaron desafíos en el CPWalker, como la necesidad de una evaluación clínica más exhaustiva y mejoras en la portabilidad y el peso del dispositivo, aspectos clave para su uso práctico en entornos cotidianos.

1.4.7. Exoesqueleto de extremidades inferiores pediátrico.

Por otro lado, el estudio de (Lerner et al., 2017a) introduce un exoesqueleto de extremidades inferiores innovador, diseñado específicamente para mejorar

la extensión de la rodilla en niños con patrones de marcha en cuclillas debido a la parálisis cerebral. La principal innovación del dispositivo es su capacidad para alterar dinámicamente la postura del usuario, proporcionando asistencia a la extensión de la rodilla en momentos clave del ciclo de marcha. El exoesqueleto se basa en un controlador proporcional-integral-derivativo (PID), que juega un papel fundamental en la compensación de torque en respuesta a la fricción y la inercia, asegurando así la precisión en la salida de torque. Entre los componentes electrónicos clave se incluyen motores de corriente continua sin escobillas, encoders para el control de velocidad y sensores de fuerza. Estos elementos, en conjunto con un microcontrolador Teensy 3.6, permiten una retroalimentación en tiempo real y ajustes personalizados del dispositivo al usuario.

Los resultados del estudio son alentadores, mostrando que el exoesqueleto puede reducir significativamente los patrones de marcha en cuclillas en niños, logrando mejoras en la extensión de la rodilla comparables a las obtenidas con cirugías ortopédicas invasivas. Además, se observó que los niños se adaptaban bien a la asistencia robótica, manteniendo la actividad muscular extensora de la rodilla.

Este estudio demuestra el potencial y la eficacia de los exoesqueletos en el tratamiento de problemas de marcha en niños con parálisis cerebral. Aunque se han logrado avances significativos, la personalización y la facilidad de uso en diferentes entornos son aspectos que requieren mayor desarrollo en futuras investigaciones.

1.4.8. ExRoLEG.

El siguiente estudio aborda el desarrollo del ExRoLEG (Mohd Adib et al., 2019a), un exoesqueleto robótico innovador diseñado para mejorar la función de la pierna en niños con parálisis cerebral. Este dispositivo se centra en fortalecer el patrón y la postura de la marcha, con el objetivo de facilitar una independencia en la caminata a una edad más temprana en comparación con los métodos tradicionales de rehabilitación.

El diseño del ExRoLEG se realizó utilizando SolidWorks, permitiendo una simulación precisa de las dimensiones y la mecánica del producto final. Fabricado principalmente con materiales metálicos, el exoesqueleto se controla mediante un microcontrolador Atmel Mega 2560, programado para replicar el movimiento humano al caminar. Entre los componentes clave del

dispositivo se incluyen actuadores lineales eléctricos para el control del movimiento, motores de ventanilla de coche de potencia en las articulaciones de la rodilla y, opcionalmente, sensores EMG o interruptores de límite para las entradas de control.

Los resultados del estudio indican que el ExRoLEG puede reproducir con éxito los movimientos deseados de la marcha, demostrando que el diseño mecánico y electrónico es suficientemente adaptable para ajustarse al crecimiento de los niños y a diferentes pesos. El dispositivo se destacó como una solución de bajo costo y efectiva para asistir en la rehabilitación de la marcha.

El ExRoLEG representa un paso significativo en la tecnología de exoesqueletos para niños, ofreciendo un enfoque innovador en la rehabilitación de la marcha para niños con parálisis cerebral. Aunque ha demostrado ser eficaz en alcanzar sus objetivos iniciales, se reconoce la necesidad de más trabajo para perfeccionar su diseño y funcionalidad, con el fin de asegurar su aplicabilidad en una gama más amplia de situaciones clínicas.

1.4.9. Symbitron.

Otro artículo nos presenta el estudio de un exoesqueleto modular llamado Symbitron (Meijneke et al., 2021a), diseñado específicamente para asistir a personas con lesiones completas e incompletas de la médula espinal. La característica más destacada del Symbitron es su alta capacidad de personalización, tanto mecánica como eléctrica, y su sistema de control adaptativo. Estas características permiten que el exoesqueleto se ajuste a las variadas necesidades de los individuos, facilitando tanto estrategias de control de trayectoria libre como basadas en la impedancia.

El diseño modular del Symbitron posibilita su reconfiguración para adaptarse a diferentes requerimientos, ofreciendo hasta ocho articulaciones motorizadas. En cuanto al control, se implementó una estrategia de control neuromuscular (NMC) para usuarios con control de cadera suficiente, y una estrategia combinada de NMC e impedancia para aquellos con lesiones completas. Los componentes electrónicos clave incluyen actuadores elásticos en serie (SEA), motores sin escobillas, encoders, y una unidad central de control que facilita la comunicación a través de redes como CAN y EtherCAT.

Los resultados preliminares son prometedores, los individuos con lesiones incompletas demostraron la capacidad de variar naturalmente su velocidad y longitud de paso, mostrando una marcha más rápida en comparación con su desempeño sin el dispositivo. Por otro lado, aquellos con lesiones completas lograron caminar utilizando muletas y un botón integrado para iniciar el paso.

El Symbitron representa un avance notable y altamente personalizable en la tecnología de exoesqueletos para la rehabilitación de la marcha en personas con lesiones de la médula espinal. Sin embargo, el estudio también destaca la necesidad de mejoras continuas en el diseño y el control del exoesqueleto para optimizar su utilidad y eficacia en aplicaciones clínicas.

1.4.10. AGoRA

Por otro lado un nuevo estudio analiza el exoesqueleto para miembro inferior unilateral AGoRA (Mayag et al., 2022a), diseñado específicamente para la rehabilitación de pacientes con hemiparesia. Una de sus principales innovaciones es la incorporación de dos estrategias de control para la Interacción Física Humano-Robot (pHRI), las cuales fueron probadas en un estudio piloto con un usuario sano. Estas estrategias incluyen un modo de asistencia basado en la detección de la fase de la marcha y un modo de transparencia para simular la resistencia del dispositivo.

El diseño del AGoRA se estructura en tres niveles de control: un controlador de bajo nivel encargado del control de velocidad y torque, un controlador de nivel medio que implementa controladores de admisión e impedancia, y un controlador de alto nivel que utiliza los anteriores para facilitar la actividad de la marcha. Los componentes electrónicos del AGoRA incluyen motores eléctricos sin escobillas DC y encoders magnéticos para estimar la posición angular, junto con una Raspberry Pi para el procesamiento y control.

Los resultados del estudio piloto son prometedores: el usuario pudo moverse sin restricciones en el modo de transparencia, y los torques generados en el modo de asistencia fueron adecuados para completar el ciclo de la marcha. Estos hallazgos indican que el AGoRA es eficaz en su objetivo de rehabilitar la marcha en pacientes con hemiparesia.

El exoesqueleto AGoRA representa un enfoque innovador y altamente adaptable en la rehabilitación de la marcha, especialmente diseñado para

pacientes con hemiparesia. Aunque ha demostrado ser eficaz en sus objetivos iniciales, se requiere más trabajo para perfeccionar su diseño y funcionalidad, asegurando su aplicabilidad en una gama más amplia de escenarios clínicos.

1.4.11. EXOVIS.

Asimismo, un nuevo estudio introduce "EXOVIS" (Akkawutvanich & Manoonpong, 2023a), una metodología innovadora para la generación de marchas personalizadas, tanto simétricas como asimétricas, en exoesqueletos de miembro inferior. Esta metodología se distingue por su control adaptable y capacidad de aprendizaje en línea, utilizando generadores de patrones centrales (CPG) con plasticidad sináptica basada en Hebb y redes de posprocesamiento CPG que se ajustan mediante aprendizaje basado en errores.

EXOVIS adopta un enfoque bioinspirado que elimina la necesidad de un modelo específico del sistema controlado, lo que mejora su capacidad para adaptarse a perturbaciones. Emplea osciladores neuronales desacoplados con plasticidad sináptica para generar y modificar patrones de marcha. Los componentes esenciales de esta metodología incluyen redes de función de base radial (RBF) y mecanismos de aprendizaje basados en errores, que permiten adaptar la marcha a las características individuales del usuario. Esta tecnología se implementa en un exoesqueleto Exo-H3, utilizando un PC tipo NUCi7 como controlador principal y el controlador de bajo nivel del exoesqueleto (Technaid Controller).

Los resultados del estudio son significativos, demostrando que EXOVIS puede aprender de forma autónoma y generar marchas personalizadas que no habían sido posibles con otros enfoques hasta ahora. Esta capacidad sugiere una integración exitosa de los componentes electrónicos y mecánicos, proporcionando una experiencia de rehabilitación intuitiva y efectiva.

El exoesqueleto que utiliza EXOVIS representa un avance importante en la tecnología de asistencia para la marcha, destacando por su adaptabilidad en tiempo real a las necesidades específicas de los usuarios. No obstante, la complejidad del sistema y la necesidad de ajustes rápidos y precisos son desafíos que deben abordarse para su aplicación práctica y generalizada en entornos clínicos.

1.4.12. H3.

Por otra parte, un nuevo estudio se centra en el desarrollo y evaluación del exoesqueleto robótico H3 (Bortole et al., 2015a), diseñado específicamente para la rehabilitación de la marcha en personas que han sufrido un derrame cerebral. El H3 es un exoesqueleto de extremidad inferior que se destaca por sus seis articulaciones activadas, incluyendo cadera, rodilla y tobillo, permitiendo un entrenamiento intensivo en suelo y no limitado a una cinta de caminar.

Este dispositivo bípedo y portátil cuenta con un diseño ergonómico, es ligero y está construido con una estructura de aluminio. Funciona con motores de corriente continua sin escobillas y utiliza un algoritmo de control de asistencia avanzado. Este algoritmo crea un campo de fuerza a lo largo de una trayectoria de marcha deseada, asistiendo al usuario solo cuando se desvía del patrón de movimiento establecido.

El H3 incluye una variedad de sensores como potenciómetros, sensores Hall, galgas extensiométricas e interruptores de pie, que miden la posición angular, velocidad, fuerza y torque de interacción. El control del dispositivo está basado en un microcontrolador ARM que procesa la información de los sensores y envía comandos a un controlador de nivel bajo para manejar los actuadores, con una comunicación efectiva a través de un bus CAN. Además, cuenta con una aplicación para smartphones que permite comandar y configurar el exoesqueleto de forma remota.

El estudio concluye que el H3 es seguro y fácil de usar, con pacientes mostrando mejoras significativas en su capacidad de marcha y la habilidad para caminar mayores distancias. A diferencia de otros dispositivos de rehabilitación, el H3 proporciona un enfoque de rehabilitación más personalizado y flexible, adecuado para condiciones de marcha reales.

A pesar de sus ventajas, el H3 enfrenta desafíos relacionados con la necesidad de personalización continua y adaptabilidad para diferentes pacientes.

1.4.13. LOPES II.

Otro artículo se centra en el desarrollo del LOPES II (Meuleman et al., 2016a), un robot de entrenamiento de marcha avanzado, que se destaca por su enfoque controlado por admitancia. La innovación principal de LOPES II reside en su capacidad para ajustar el nivel de asistencia durante el

entrenamiento de marcha, lo que permite una terapia personalizada y específica para la tarea.

LOPES II es un exoesqueleto bípedo con ocho grados de libertad motorizados, que incluyen flexión/extensión de la cadera, abducción/aducción, flexión/extensión de la rodilla y movimientos pélvicos. Su diseño se basa en un enfoque de actuación de extremo con actuación paralela y utiliza un número mínimo de abrazaderas para mayor comodidad del usuario. Equipado con actuadores “Moog Control Loading”, el sistema también incorpora potenciómetros, sensores Hall y galgas extensiométricas para medir con precisión la posición angular, velocidad, fuerza y torque de interacción. El control del LOPES II se divide en tres niveles jerárquicos: un nivel alto con un PC y una interfaz gráfica para configurar el robot, un nivel medio con “xPC Target” para generar y controlar trayectorias, y un nivel bajo con “RT-Linux” para el control de admitancia de cada actuador.

Los resultados del estudio indican que el LOPES II es eficaz en proporcionar soporte adaptativo y específico, permitiendo a pacientes con distintos niveles de discapacidad participar activamente en el entrenamiento de marcha. Los usuarios pudieron ajustar su marcha en tiempo real, lo que sugiere que LOPES II es adecuado para una amplia gama de necesidades de rehabilitación.

El exoesqueleto LOPES II representa un avance significativo en dispositivos para la rehabilitación de la marcha, con su notable flexibilidad y adaptabilidad para satisfacer las necesidades de diversos pacientes. No obstante, para facilitar su uso más amplio en la práctica clínica, es esencial abordar desafíos como la optimización del tiempo de colocación y la adaptación a las variadas condiciones de los pacientes.

1.4.14. WAKE-up.

WAKE-up (Wearable Ankle Knee Exoskeleton) (Patané et al., 2017a), es un exoesqueleto de extremidad inferior multiarticulado y adaptable, diseñado específicamente para la rehabilitación de niños con enfermedades neurológicas como la parálisis cerebral. WAKE-up, que actúa como una ortesis de pie-tobillo-rodilla (KAFO), se caracteriza por su control de posición avanzado y la capacidad de operar de manera sincrónica y sinérgica con el sistema musculoesquelético humano.

El diseño del WAKE-up incluye un Actuador Elástico en Serie Rotativo (RSEA), un servomotor con controlador PID integrado, y un muelle de torsión sensorizado con un codificador magnético absoluto. También cuenta con un sistema de cinturón/polea para la transmisión y plantillas de zapato equipadas con sensores de presión. La arquitectura maestro-esclavo del exoesqueleto emplea un maestro (NI-MyRio) y varios sistemas esclavos (microcontroladores), distribuyendo así el cálculo y control entre los sistemas esclavos para una mayor modularidad y escalabilidad.

Los resultados indican que el WAKE-up es efectivo en proporcionar asistencia de torque en concordancia con los movimientos voluntarios del usuario, especialmente en la mejora del aterrizaje correcto del pie al inicio del ciclo de marcha. Se demostró que asiste a los pacientes en la recuperación de patrones de marcha fisiológicos, particularmente en la articulación del tobillo.

Sin embargo, se identificaron limitaciones, como la incapacidad del módulo de la rodilla para corregir completamente los patrones articulares. Esto sugiere la posible necesidad de agregar un motor adicional a nivel del muslo para aumentar el torque en la articulación de la rodilla. Además, se reconoce la necesidad de mejorar la robustez del sistema de sensores.

WAKE-up representa un avance significativo en la tecnología de exoesqueletos para rehabilitación pediátrica, destacando por su arquitectura modular, escalable y distribuida, y mostrando un gran potencial para aplicaciones futuras.

1.4.15. ATLAS 2020.

Un novedoso artículo se enfoca en el desarrollo de ATLAS 2020 (Sanz-merodio et al., 2020a), un exoesqueleto activo de miembro inferior diseñado para mejorar la rehabilitación de niños con Atrofia Muscular Espinal (AME). Este dispositivo se destaca por su potencial para mejorar la calidad de vida y la independencia funcional de los niños, así como por su capacidad para retrasar las complicaciones asociadas con la enfermedad.

ATLAS 2020 se presenta como una ortesis activa de tronco-cadera-rodilla-tobillo-pie (THKAFO), con una interfaz física no invasiva y un chasis ajustable. Cada pierna del dispositivo cuenta con seis grados de libertad, que incluyen movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción en la cadera,

flexión-extensión en la rodilla, y flexión-extensión junto con eversión-inversión en el tobillo.

El exoesqueleto utiliza actuadores basados en el diseño ARES (Ajustable-Rigidez y Sensor Embebido) y motores de corriente continua sin escobillas. Está equipado con sensores magnéticos para medir la posición de las articulaciones, sensores de presión en las plantillas y una unidad de medición inercial (IMU) en la pelvis para un seguimiento preciso del movimiento.

ATLAS 2020 cuenta con subsistemas de control de alto y bajo nivel, así como un subsistema de potencia. Para el control de alto nivel, utiliza una placa National Instruments con procesador en tiempo real y FPGA Xilinx, mientras que el control de bajo nivel se lleva a cabo mediante microcontroladores ATMEL. El artículo resalta la efectividad del exoesqueleto en asistir la marcha, ofreciendo modos operativos como el control de fuerza cero, control de posición y un control integrado de posición y fuerza. Estos modos permiten una adaptación eficiente a las necesidades y capacidades del usuario, maximizando la fuerza residual del paciente.

El exoesqueleto ATLAS 2020 representa un avance significativo en la rehabilitación de niños con AME, destacando por su adaptabilidad individualizada y su enfoque en terapias personalizadas y multimodales. Sin embargo, es necesario continuar trabajando para optimizar su implementación y uso en entornos clínicos.

1.4.16. P-LEGS.

A su vez, se estudia el desarrollo del exoesqueleto P-LEGS (Eguren et al., 2019a), un sistema diseñado específicamente para niños con discapacidades de las extremidades inferiores, como la parálisis cerebral, espina bífida y lesiones de la médula espinal. Este exoesqueleto se caracteriza por ser modular, liviano y personalizable, y está enfocado en proporcionar soporte para la caminata y la rehabilitación del andar.

P-LEGS funciona como una ortesis activa de cadera-rodilla-tobillo-pie (THKAFO) y cuenta con seis grados de libertad activos en cada pierna. El diseño incorpora módulos de control de articulaciones que incluyen actuadores, controladores de motor, sensores de torque y unidades de medición inercial (IMU), así como sensores adicionales para monitorear el rendimiento del sistema.

El sistema utiliza motores Maxon de 24V y codificadores rotativos en cada articulación para el control preciso de la posición. Los sensores de torque, basados en puentes de Wheatstone, miden las fuerzas de interacción durante el uso. P-LEGS presenta una arquitectura de control jerárquica dividida en dos niveles: un nivel alto con interfaz gráfica para la configuración y almacenamiento de datos del sistema completo, y un nivel bajo que procesa los datos de los sensores de la articulación (ángulo, torque de interacción y corriente) y acciona el actuador según las trayectorias dictadas por el controlador de alto nivel.

Los resultados del estudio indican que P-LEGS puede seguir con precisión las trayectorias de referencia de las articulaciones, incluso en presencia de fuerzas de interacción, demostrando su eficacia para asistir en la caminata y la rehabilitación de los usuarios. Este desarrollo representa un avance importante en la tecnología de ortesis para niños, ofreciendo un enfoque innovador en la asistencia y rehabilitación de la marcha. A pesar de su potencial, se reconoce la necesidad de trabajar en la optimización del control y la personalización del dispositivo para su efectiva implementación en entornos clínicos.

1.4.17. P.REX.

Por último se presenta un estudio que introduce el exoesqueleto pediátrico P.REX (J. Chen et al., 2021a), un dispositivo con un sistema de control adaptativo en tiempo real diseñado para mejorar la marcha en niños con parálisis cerebral. El P.REX está específicamente orientado a niños que presentan una marcha agachada o una flexión persistente de rodilla, común en ciertas formas de parálisis cerebral.

El diseño mecatrónico del P.REX integra un ensamblaje de actuación personalizado junto con un sofisticado sistema de control electrónico. El dispositivo está equipado con sensores que miden el ángulo de la rodilla, la velocidad angular y la resistencia al torque. Para el control en tiempo real, se ha utilizado un motor Maxon, un sensor de torque en línea y un sistema basado en microcontroladores ARM.

Se desarrollaron tres modos de control para el P.REX con el fin de proporcionar asistencia específica a la extensión de la rodilla: asistencia basada en estado, seguimiento de trayectoria basado en impedancia y control

adaptativo en tiempo real. Estos modos de control permiten una adaptación precisa a las necesidades individuales de cada usuario.

Los resultados del estudio demostraron que el exoesqueleto P.REX es efectivo en proporcionar asistencia de torque personalizada, lo que resulta en mejoras significativas en la extensión de la rodilla durante la marcha, en comparación con la marcha sin asistencia.

El exoesqueleto P.REX representa un avance significativo en la tecnología de exoesqueletos para niños, especialmente por su capacidad de adaptarse a las necesidades individuales de los niños con parálisis cerebral. No obstante, es necesario continuar trabajando en la optimización de su implementación y uso tanto en entornos clínicos como domésticos para maximizar su efectividad y accesibilidad.

1.5. Comparación entre las arquitectura adoptadas en los principales exoesqueletos.

Tras una revisión del estado actual de varios exoesqueletos, donde se evaluaron sus sistemas electrónicos, métodos de control, y limitaciones inherentes, se ha elaborado una tabla comparativa, Tabla 1. Esta tabla destaca los componentes electrónicos y las estrategias de comunicación de cada sistema, permitiéndonos analizar en profundidad la electrónica empleada en cada nivel jerárquico y el tipo de comunicaciones utilizadas. La organización de la Tabla 1 subraya que cada exoesqueleto está construido sobre una arquitectura exclusiva, diseñada para cumplir con las exigencias específicas de su aplicación. Esta dedicación a la personalización evidencia la diversidad y la complejidad que caracterizan al ámbito de los exoesqueletos.

Tabla 1. Comparación de tecnologías empleadas en diversas implementaciones de exoesqueletos, según electrónica y comunicaciones.

Exoesqueleto	Electrónica			Comunicaciones
	Nivel Alto	Nivel Medio	Nivel Bajo	
HAL-3 (Kawamoto et al., 2009b)	PC - Linux RTOS			-
N.N* (Blaya & Herr, 2004b)	PC - Debian Linux and CIO-DAS08/JR-AO IO-CARD			-
RoboKnee (Pratt et al., 2004b)	Ajile aJ-PC104			-
MindWalker (Wang et al., 2013b)	PC – MATLAB		Microcontroller Drive	EtherCAT
N.N* (Laubscher et al., 2017b)	Dspace MicroLabBox			-
CP-Walker (Bayon et al., 2016b)	EEG – Laptop		PC-104	CAN
N.N* (Lerner et al., 2017b)	Entrada Manual (Laptop)		Teensy 3.6	Bluetooth (Alto Nivel)
ExRoLEG (Mohd Adib et al., 2019b)	Manual Switch		Atmel Mega 2560	-
Symbitron (Meijneke et al., 2021b)	Intel NUC5i5RYH		Driver Controller	EtherCAT
AGoRA (Mayag et al., 2022b)	Raspberry PI		EPOS 4	I2C (Nivel Bajo) ROS(Nivel Alto)
H3 (Akkawutvanich & Manoonpong, 2023b)	Intel NUC7i7BNH		Controlador Technaid	CAN (Nivel Bajo) ROS (Nivel Alto)
H2 (Bortole et al., 2015b)	Smartphone - Laptop	H2-ARM Board	H2-Joint	CAN
LOPES II (Meuleman et al., 2016b)	Computer	xPC Target	RT -Linux - microcontrolador	TCP - UDP - EtherCAT
WAKE-up (Patané et al., 2017b)	NI MyRio	Mc Pic32	Controlador Dynamixel	RS232
Atlas 2020 (Sanz-merodio et al., 2020b)	PC/Tablet	NI MyRio	Microcontrolador ATMEL	I2C
P-LEGS (Eguren et al., 2019b)	PC/Laptop	SBC	ARM Cortex M4	CAN- Serial
Prex (J. Chen et al., 2021b)	Laptop	Teensy 3.2	Servocontroller	Bluetooth

*N.N : No Name

La diversidad en las plataformas y sistemas operativos utilizados en los exoesqueletos es notablemente amplia, evidenciando la ausencia de un enfoque estándar en la industria. Esta variedad incluye diferentes distribuciones de Linux, como RTOS, Debian y Ubuntu, lo que destaca la flexibilidad en la selección de sistemas operativos adaptados a las necesidades específicas de cada exoesqueleto. Además, se recurre a software especializado, como MATLAB, LabVIEW, para realizar tareas específicas de procesamiento de datos y control, subrayando la importancia de contar con plataformas que puedan manejar cálculos complejos y algoritmos avanzados. Paralelamente, se observa una inclinación hacia soluciones más compactas y eficientes en el uso del espacio, como el uso de Raspberry Pi y sistemas similares, especialmente en exoesqueletos donde el tamaño y el peso constituyen factores críticos.

1.5.1. Diversidad de Microcontroladores

La adopción de microcontroladores, tales como el Atmel Mega 2560, refleja una inclinación hacia soluciones de propósito general que son versátiles y ampliamente disponibles, facilitando así una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, la utilización de controladores especializados, como el Technaid Controlle, H2-ARM Boar o un PIC32, indica que algunos exoesqueletos demandan soluciones a medida diseñadas para cumplir con requisitos de control específicos, subrayando la necesidad de personalización en el desarrollo de estas tecnologías avanzadas.

1.5.2. Comunicaciones

La presencia de EtherCAT, Bluetooth, I2C, RS232 y CAN muestra que las necesidades de comunicación varían ampliamente, desde transmisiones de alta velocidad y baja latencia hasta conexiones inalámbricas y sistemas de comunicación más sencillos. La diversidad en los protocolos de comunicación refleja la adaptabilidad de los exoesqueletos a una variedad de aplicaciones y entornos. Desde la precisión de control en tiempo real hasta la eficiencia y simplicidad en la configuración, cada protocolo aporta características únicas que pueden ser aprovechadas para mejorar el rendimiento y la funcionalidad de los exoesqueletos. Este panorama de comunicaciones subraya la importancia de seleccionar el protocolo adecuado para cada aplicación específica, equilibrando factores como la velocidad, la fiabilidad, la eficiencia

energética y la facilidad de integración. A medida que la tecnología avanza, la elección de protocolos de comunicación se vuelve aún más crítica, dado su impacto directo en la capacidad del exoesqueleto para operar de manera eficiente y responder a las necesidades del usuario.

1.6. Desafíos y oportunidades.

El análisis del estado del arte realizado en este capítulo ilustran la complejidad y la diversificación en el campo de los exoesqueletos. La falta de un enfoque estandarizado en las plataformas de control, microcontroladores y sistemas de comunicación señala tanto la flexibilidad como los retos inherentes en el diseño y la implementación de estos sistemas. Por un lado, esta diversidad permite adaptar los exoesqueletos a una amplia gama de aplicaciones y necesidades específicas del usuario. Por otro, plantea desafíos en términos de interoperabilidad, mantenimiento, y escalabilidad, subrayando la necesidad de un enfoque más estandarizado para futuros desarrollos en el campo.

La necesidad de estandarización en el desarrollo y diseño de exoesqueletos se ha convertido en un aspecto crítico para mejorar su escalabilidad, seguridad, eficacia, y accesibilidad. Actualmente, la diversidad de sistemas y la falta de unificación en los estándares impiden que los exoesqueletos se adapten de manera eficiente a una amplia gama de aplicaciones y usuarios. La implementación de una estandarización efectiva no solo permitiría la integración rápida y económica de nuevas tecnologías y diseños, sino que también mejoraría la viabilidad comercial de estos dispositivos y su accesibilidad para un espectro más amplio de usuarios.

Además, la estandarización de los sistemas de comunicación entre los componentes de los exoesqueletos es vital para garantizar su seguridad y eficacia. Una sincronización precisa y fiable es crítica en aplicaciones que demandan respuestas en tiempo real y alta precisión en el movimiento, aspectos que solo pueden asegurarse mediante la adopción de estándares de comunicación unificados.

Por otro lado, un enfoque hacia la modularidad estandarizada no solo facilitaría la personalización de los exoesqueletos para atender a necesidades específicas, como diferentes tipos de discapacidades o la realización de tareas particulares, sino que también simplificaría el mantenimiento y la reparación

de estos dispositivos. Esto tendría un impacto directo en la reducción de costos y en la mejora de la durabilidad de los exoesqueletos.

1.6.1. Propuesta de Desarrollo.

La propuesta debe abordar las complejidades y oportunidades en el desarrollo de exoesqueletos mediante un enfoque multifacético que busca superar las barreras actuales y maximizar el potencial de estos sistemas. Entre los aspectos centrales de ésta estrategia se incluyen:

- **Enfoque en Arquitectura Modular y Escalable:** Desarrollar una arquitectura que no solo sea modular y personalizable, sino también escalable, permitiendo la integración de nuevas tecnologías y mejoras sin necesidad de rediseñar todo el sistema. Esto incluye la creación de interfaces estándar para componentes y sistemas de comunicación.
- **Adaptabilidad a Diferentes Aplicaciones:** Diseñar arquitecturas de control de exoesqueletos que puedan ser fácilmente adaptados para una variedad de aplicaciones, desde la rehabilitación médica hasta el apoyo en entornos industriales, mejorando así su utilidad y viabilidad económica.
- **Escalabilidad:** Considerar la posibilidad de futuras expansiones y mejoras durante el diseño inicial, para garantizar que los exoesqueletos puedan evolucionar con los avances tecnológicos sin necesidad de cambios fundamentales.
- **Accesibilidad y Versatilidad:** Trabajar hacia la reducción de costos y la mejora de la facilidad de uso para hacer los exoesqueletos más accesibles para un espectro más amplio de usuarios y aplicaciones. Esto incluye simplificar la interfaz de usuario y mejorar la ergonomía del dispositivo.

1.6.2. Impacto a Largo Plazo

Los requisitos identificados apuntan a un futuro en el que los exoesqueletos sean más accesibles, eficientes y personalizables. La estandarización y modularidad no solo facilitarán la innovación y el desarrollo dentro del campo, sino que también harán que estos dispositivos avanzados sean más prácticos y aplicables en una variedad de contextos, desde la asistencia médica hasta

la mejora de la eficiencia en el lugar de trabajo. Este enfoque proactivo y previsor en el diseño y desarrollo de exoesqueletos podría promover avances significativos en la tecnología de asistencia y rehabilitación, mejorando la calidad de vida de los usuarios y ampliando las posibilidades de su uso cotidiano.

Capítulo 2.

MARCO INTEGRAL PARA EL CONTROL DE SISTEMAS ROBÓTICOS DE REHABILITACIÓN

Este capítulo presenta un marco de control integral y bioinspirado para exoesqueletos de miembros inferiores, diseñado para mejorar la rehabilitación de la marcha en niños con parálisis cerebral. El marco propuesto se basa en una estructura jerárquica de tres niveles que emula el control neurológico de la marcha humana: percepción e intención, generación de patrones centrales, y ejecución. Se detalla cada nivel, especificando sus objetivos, requisitos y métodos de funcionamiento, así como las soluciones tecnológicas necesarias para su implementación. El capítulo introduce ROS2 como middleware para la comunicación entre los diferentes niveles, destacando su capacidad para manejar la sincronización y la gestión de mensajes en tiempo real. Se enfatiza la modularidad y escalabilidad del sistema, permitiendo la integración de nuevas tecnologías y la adaptación a diferentes necesidades de rehabilitación. Esta propuesta aborda los desafíos identificados en exoesqueletos actuales, ofreciendo un enfoque más adaptable, personalizable y eficiente para la rehabilitación robótica. El marco presentado sienta las bases para el desarrollo de exoesqueletos más avanzados y efectivos, con el potencial de mejorar significativamente la calidad de vida de los niños con discapacidades motoras.

2.1. Marco Generalizado de la Arquitectura Electrónica.

El artículo de (Tucker et al., 2015) presenta un marco general para el manejo de dispositivos protésicos y ortésicos activos para extremidades inferiores. Este marco, inspirado en el trabajo anterior de (Varol et al., 2010), es aplicable a una diversidad de dispositivos y articulaciones, reflejando las interacciones físicas y los ciclos de retroalimentación en dispositivos asistenciales durante su uso cotidiano. Tucker incorpora una estructura de control jerárquica que toma en cuenta al usuario del dispositivo, el entorno y el propio aparato. Este

enfoque se centra en describir "qué" debería hacer cada componente del controlador, en lugar de especificar "cómo" debería hacerlo.

La propuesta presentada en esta tesis se alinea con el sistema sugerido por (Tucker et al., 2015), enfocado en el "qué" hacer, aspecto ya incluido en nuestro enfoque, pero extendiéndose también para abordar parcialmente el "cómo" realizarlo. Esto resulta en un marco más específico y estandarizado, alineándose con uno de los objetivos principales.

Al igual que (Nakazawa et al., 2012), se conceptualiza la marcha humana en tres niveles jerárquicos (Figura 4). Un Nivel Alto, que se le denomina **Percepción- Intención**, un Nivel Medio en donde se **Generan los Patrones** para la marcha y un Nivel Bajo, en el que se realiza la **Ejecución**, en donde tenemos activación motora (Eferente) y retroalimentación sensorial (Aferente). Cada uno con diferentes requerimientos técnicos para su correcto funcionamiento. Se adopta este enfoque para imitar más de cerca el comportamiento del sistema nervioso humano durante la marcha. El método presentado busca replicar esta complejidad, integrando un entendimiento más profundo tanto de la mecánica como de la neurología implicada en el movimiento humano.

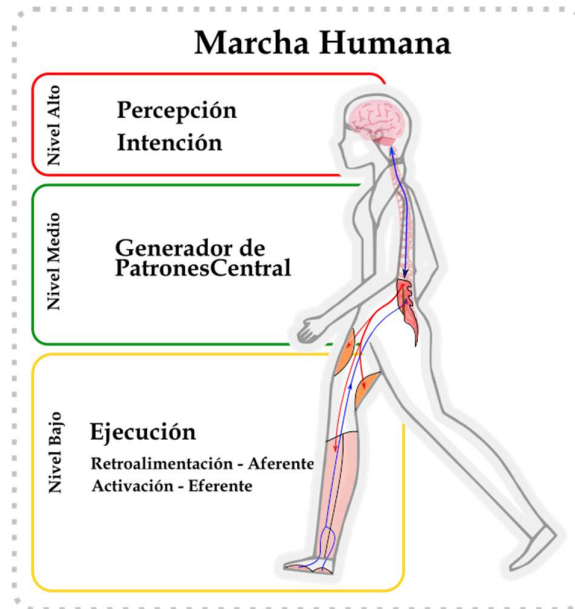


Figura 4. Niveles Jerárquicos de Control de la Marcha Humana.

El marco propuesto busca no solo asistir en la rehabilitación de la marcha, sino también promover una interacción más natural e intuitiva entre el usuario y el exoesqueleto. En las siguientes secciones, detallaremos los objetivos, requisitos y funcionalidades de cada nivel de nuestro marco de control, así como las soluciones tecnológicas que lo hacen posible.

2.2. Definición del marco de control.

En esta sección, se define en detalle cada uno de los tres niveles que componen el marco de control propuesto. Se describen los objetivos, requisitos y métodos de funcionamiento de cada nivel, así como las soluciones electrónicas y tecnológicas necesarias para su implementación. Esta definición detallada proporciona una guía clara y concisa para el diseño y desarrollo de exoesqueletos de rehabilitación.

2.2.1. Nivel Alto (Percepción e Intención):

Este nivel es crucial para interpretar la intención de movimiento del usuario, un aspecto fundamental para la interacción intuitiva con el exoesqueleto. Se enfoca en captar y procesar señales, ya sean físicas o neurofisiológicas, para determinar la acción deseada. Aquí, se emplean interfaces avanzadas y posibles algoritmos de inteligencia artificial para predecir y responder a las intenciones del usuario, permitiendo una operación fluida y natural del exoesqueleto.

Para abordar el concepto de control de Alto Nivel en exoesqueletos, y basándonos en (Baud et al., 2021), podemos dividirlo en tres puntos clave: Objetivos, Requisitos y Métodos para su funcionamiento.

2.2.1.1. Objetivos Nivel Alto

El control del Nivel Alto determina el comportamiento general del exoesqueleto. Estos sistemas suelen permitir cambiar entre varios modos de operación dependiendo del tipo de actividad y el entorno (Baud et al., 2021). Por ejemplo, puede variar entre caminar en terreno plano, subir escaleras y transiciones de sentado a de pie. Estos cambios de modo no suelen ser frecuentes y, generalmente, hay un intervalo de varios segundos entre dos cambios consecutivos, lo que permite al usuario seleccionar el modo deseado.

2.2.1.2. Requisitos Nivel Alto.

El control de Alto Nivel debe ser fiable para la usabilidad práctica de los exoesqueletos en situaciones del mundo real. Existen diferentes métodos de entrada para que el usuario determine el modo de operación del exoesqueleto, como botones, comandos de voz o interfaces cerebro-computadora (BCI). Estos métodos deben ser fáciles de implementar, predecibles y con un bajo riesgo de errores, sin sobrecargar cognitivamente al usuario.

Dentro de los requisitos para el control de Alto Nivel en exoesqueletos, es importante considerar también el tiempo de ejecución del controlador en relación con los tiempos de reacción humana a diferentes estímulos. El tiempo de reacción humana varía según el tipo de estímulo. Para un estímulo auditivo, oscila entre 140-160 ms; para un estímulo visual, entre 180-200 ms; y para el tacto, alrededor de 155 ms, (Kosinski, 2010; Vernon & Mori, 1992; Woods et al., 2015). Estos tiempos de reacción son indicativos de la velocidad con la que un usuario puede responder a estímulos externos, lo que es relevante para la interacción con un exoesqueleto.

En el contexto del control de Alto Nivel, el tiempo de ejecución del controlador no es crítico para la locomoción en sí, pero debe estar alineado con los tiempos de reacción humana. Los algoritmos del sistema electrónico de Alto Nivel deben funcionar en marcos de tiempo entre 140-200 ms, una frecuencia de 7-5 Hz. Esto asegura que la respuesta del exoesqueleto sea oportuna y sincronizada con las reacciones y expectativas naturales del usuario.

Este requerimiento es importante porque una sincronización adecuada entre el tiempo de reacción del usuario y la respuesta del exoesqueleto mejora la naturalidad y eficiencia de la interacción. Un sistema que responde de manera oportuna a los comandos del usuario ya sea a través de entradas manuales, interfaces cerebro-computadora, reconocimiento de movimientos o identificación de terreno, contribuye significativamente a una experiencia de usuario intuitiva y segura. La capacidad del exoesqueleto para adaptarse rápidamente a los cambios en la intención o el entorno del usuario es fundamental para su eficacia en aplicaciones prácticas, especialmente en entornos dinámicos y en situaciones de la vida real.

2.2.1.3. Algoritmos implementados en el Nivel Alto

Los métodos para el control de alto nivel en exoesqueletos incluyen la Entrada Manual del Usuario (MUI), que permite seleccionar modos de operación a través de dispositivos como botones o comandos de voz; la Interfaz Cerebro-Computadora (BCI), que determina el modo de operación mediante la actividad cerebral del usuario, captada por electrodos; el Reconocimiento de Movimientos (MOV), que ajusta el comportamiento del exoesqueleto según los movimientos o intenciones de movimiento del usuario, utilizando datos de sensores articulares y unidades de medición inercial; y la Identificación del Terreno (TER), que utiliza sensores integrados para reconocer el terreno u obstáculos y planificar los movimientos, empleando cámaras de luz visible o 3D, sensores de distancia por infrarrojos, o una combinación de estos con unidades de medición inercial. Cada uno de estos métodos contribuye al funcionamiento adaptativo del exoesqueleto, mejorando la experiencia del usuario y la eficacia del dispositivo en diversos entornos (Tucker et al., 2015).

2.2.1.4. Soluciones Electrónicas y Tecnológicas

Procesadores de Alto Rendimiento

Para garantizar la gestión eficaz de mensajes y el procesamiento en tiempo real, es esencial utilizar microcontroladores y procesadores de alto rendimiento. Estos dispositivos deben ser capaces de ejecutar algoritmos complejos de inteligencia artificial y procesamiento de señales en los marcos de tiempo requeridos (140-200 ms). Chips como ARM Cortex-A series, Intel Series, que ofrecen capacidades de procesamiento potentes y eficientes energéticamente, son ideales para estos propósitos.

Sensores y Dispositivos de Entrada

Para la entrada manual del usuario (MUI), se pueden emplear interfaces táctiles avanzadas y micrófonos para comandos de voz, garantizando una interacción fácil y natural.

En el caso de la interfaz cerebro-computadora (BCI), el uso de electrodos no invasivos con tecnología EEG (electroencefalografía) mejorada para una rápida colocación y señales de alta calidad es crucial. Para el reconocimiento de movimientos (MOV), las unidades de medición inercial (IMU) y sensores

articulares avanzados ofrecen datos precisos del movimiento y la orientación del usuario. En la identificación del terreno (TER), cámaras 3D y sensores LIDAR pueden proporcionar información detallada sobre el entorno, permitiendo al exoesqueleto adaptarse a diferentes condiciones del terreno.

Módulos de Comunicación.

Para permitir una comunicación fluida entre los distintos componentes del exoesqueleto y posiblemente con dispositivos externos, el uso de módulos de comunicación tanto alámbrica (Ethernet) como inalámbrica (Wi-Fi), es esencial. Esto facilita una configuración modular del sistema y permite actualizaciones y personalizaciones sencillas.

Software y Algoritmos.

Desarrollar y optimizar algoritmos para el procesamiento de señales, reconocimiento de patrones, y aprendizaje automático que puedan operar dentro de los límites de tiempo requeridos. Estos algoritmos deben ser capaces de interpretar las señales de entrada de manera eficaz para predecir y responder a las intenciones del usuario en tiempo real.

Plataformas de Desarrollo y Simulación

Utilizar plataformas de desarrollo y simulación, como ROS (Robot Operating System), puede ser beneficioso para diseñar, probar y optimizar los sistemas de control del exoesqueleto. Estas plataformas permiten la simulación de entornos complejos y la interacción con modelos virtuales del exoesqueleto antes de la implementación física.

Interfaz de Usuario y Monitoreo

Proveer interfaces de usuario que permitan la monitorización y ajuste en tiempo real de los parámetros de control, facilitando la interacción entre el usuario y el equipo técnico para optimizar el rendimiento del exoesqueleto.

2.2.2. Nivel Medio (Generador de Patrones Centrales):

Funciona como el núcleo de la arquitectura, traduciendo las intenciones percibidas en patrones de movimiento. Este nivel coordina y genera referencias de control para las articulaciones y sistemas motorizados del

exoesqueleto, asegurando que los movimientos sean seguros, eficientes y en sincronía con las expectativas del usuario. Se integran aquí sistemas de control avanzados que modelan y replican patrones de marcha humana.

2.2.2.1. **Objetivos Nivel Medio.**

El objetivo principal del control de Nivel Medio en exoesqueletos es generar los patrones de movimiento que el dispositivo seguirá. Este nivel actúa sobre los comandos y configuraciones proporcionadas por el nivel superior, convirtiéndolos en patrones específicos de movimiento. Estos patrones pueden incluir variaciones en la marcha, ajustes de velocidad, y modulaciones de posición y torque. Este proceso implica tanto la interpretación de comandos de activación ("*triggers*") como la modulación y configuración detallada de los patrones de marcha, asegurando que el exoesqueleto responda de manera precisa y coherente a las demandas y expectativas del usuario, (Lora-Millan et al., 2022).

2.2.2.2. **Requisitos Nivel Medio.**

Los requisitos del control de Nivel Medio en exoesqueletos son esenciales para garantizar una sincronización y adaptación óptimas con los movimientos humanos. Este nivel requiere:

Adaptación a las Velocidades Nerviosas: Considerando las velocidades de los nervios en las extremidades inferiores (40-45 m/s) (Kosinski, 2010; Letz & Gerr, 1994; Vernon & Mori, 1992; Woods et al., 2015) y la longitud promedio de estos nervios (aproximadamente 70 cm) (Elbarrany & Altaf, 2017), implica que la frecuencia mínima para una interacción correcta con los movimientos humanos debe oscilar entre 57.14 y 64.28 Hz, (≈ 60 Hz).

Coordinación de Múltiples Sistemas: El control de Medio Nivel debe coordinar eficientemente el movimiento de varias articulaciones motorizadas y dispositivos. Esto requiere una integración precisa de señales y patrones para asegurar una respuesta coordinada y fluida.

Capacidad de Procesamiento: Los sistemas deben ser capaces de procesar comandos complejos y realizar cálculos en tiempo real para generar patrones de movimiento precisos, lo que requiere microprocesadores avanzados y sistemas de ejecución multihilo.

Comunicación Efectiva: Se necesitan sistemas de comunicación estándar con baja latencia y alta velocidad para garantizar la sincronización de la información entre los diferentes niveles de control.

2.2.2.3. Algoritmos implementados en el Nivel Medio.

Dentro de los métodos para el funcionamiento del control de Nivel Medio en exoesqueletos, los algoritmos avanzados juegan un papel fundamental. Estos algoritmos son responsables de interpretar y transformar las señales de entrada en patrones de movimiento precisos. Deben adaptarse a las variaciones en la marcha y a las intenciones del usuario, garantizando una reproducción fluida y natural de los movimientos. La complejidad de estos algoritmos permite que el exoesqueleto responda de manera dinámica y precisa a las necesidades específicas del usuario en tiempo real. Entre algunos tipos de controladores comúnmente utilizados tenemos:

Control basado en eventos: Utiliza eventos específicos del ciclo de la marcha para cambiar entre distintos modos de asistencia.

Control de impedancia/admitancia: Ajusta la rigidez o flexibilidad del exoesqueleto para adaptarse a los movimientos del usuario.

Control basado en patrones de movimiento: Emplea patrones predefinidos para guiar la asistencia durante la marcha.

Control predictivo: Anticipa las necesidades del usuario basándose en datos de movimiento y ajusta la asistencia en consecuencia.

Estas estrategias permiten una interacción más dinámica y adaptativa entre el usuario y el exoesqueleto, mejorando la asistencia durante la marcha.

2.2.2.4. Soluciones Electrónicas y Tecnológicas

Microprocesadores y Plataformas de Computación de Alto Rendimiento

Dada la necesidad de procesar comandos complejos y realizar cálculos en tiempo real, el uso de microprocesadores avanzados y plataformas de computación de alto rendimiento es esencial. Procesadores con capacidades de ejecución multihilo, como los basados en la arquitectura ARM Cortex-A o

los chips especializados en IA y procesamiento de señales, pueden manejar eficientemente estas tareas.

Sistemas de Comunicación de Alta Velocidad y Baja Latencia

Utilizar tecnologías de comunicación estándar, como CAN bus para sistemas embebidos o Ethernet para aplicaciones que requieren mayor ancho de banda, garantizando una comunicación efectiva entre los distintos componentes y niveles de control con baja latencia y alta velocidad.

Software de Simulación y Modelado

Emplear software de simulación y modelado para diseñar y probar los algoritmos de control y los patrones de movimiento antes de su implementación física. Herramientas como MATLAB/Simulink o software específico de robótica pueden ser útiles para simular el comportamiento del exoesqueleto y optimizar los algoritmos de control.

2.2.3. Nivel Bajo (Ejecución)

Es el nivel más cercano a la acción física, donde se realiza el control preciso de los actuadores. Este nivel se encarga de seguir las referencias de posición, velocidad y fuerza proporcionadas por el nivel medio. Requiere una alta precisión y rapidez en la respuesta para mantener la estabilidad y la seguridad durante la marcha, destacando la importancia de sensores y actuadores de alta calidad y un control de bucle cerrado eficiente.

2.2.3.1. Objetivos del Nivel Bajo

El objetivo es controlar cada dispositivo actuador para seguir puntos de referencia de posición, velocidad o fuerza. Estas referencias son enviadas por el nivel Medio. El control en este nivel es fundamental para la ejecución precisa de los movimientos del exoesqueleto.

2.2.3.2. Requisitos del Nivel Bajo

Incluyen la necesidad de que cada actuador o grupo de actuadores tenga su propio controlador, el cual debe considerar las propiedades cinemáticas y dinámicas del sistema a comandar. Además, es clave la precisión en la

respuesta de los controles de retroalimentación cerrada en el dominio del tiempo discreto.

2.2.3.3. Algoritmos implementados en el Nivel Bajo

Para asegurar una operación eficiente y segura de los exoesqueletos, es fundamental implementar métodos avanzados en su funcionamiento a nivel bajo. Estos métodos abarcan desde una alta frecuencia de muestreo, hasta técnicas sofisticadas de control que permiten una adaptación en tiempo real a las necesidades del usuario. Este enfoque integrado no solo mejora la interacción entre el usuario y el dispositivo, sino que también asegura un control preciso de los actuadores mediante la utilización de algoritmos de control avanzados y sistemas de adquisición y procesamiento de datos. A continuación, se detallan aspectos clave como la alta frecuencia de muestreo, la adquisición y procesamiento de datos, y los enfoques de control de impedancia y admitancia, esenciales para el desarrollo eficaz de exoesqueletos.

Alta Frecuencia de Muestreo: Esta alta frecuencia es crucial para capturar las dinámicas rápidas del movimiento humano y permite realizar ajustes casi en tiempo real para adaptarse a las necesidades del usuario durante el ciclo de caminata.

Adquisición de Datos: Los sensores integrados en el exoesqueleto (como encoders, giroscopios, acelerómetros, y sensores de fuerza) recogen datos sobre la posición, orientación, y fuerzas aplicadas. Estos datos son esenciales para entender la intención del usuario y el estado actual del exoesqueleto.

Procesamiento de Datos: Los datos recogidos se procesan rápidamente para estimar la dinámica del movimiento y detectar cualquier desviación del comportamiento deseado. Esto puede incluir filtros digitales para suavizar la señal y algoritmos para estimar la posición y velocidad.

Control de Impedancia y Admitancia: La implementación de control de impedancia o admitancia permite que el exoesqueleto se adapte dinámicamente a las interacciones físicas con el usuario y el entorno. Por ejemplo, en un control de impedancia, el sistema puede ajustar la rigidez y amortiguación de los actuadores para emular las características mecánicas naturales de los músculos y articulaciones humanas.

Algoritmos de Control: Los algoritmos específicos (como control PID, control predictivo, o control basado en modelo) se utilizan para ajustar los parámetros de control en tiempo real basándose en los datos de entrada y los objetivos deseados. Estos algoritmos son esenciales para lograr una respuesta rápida y precisa de los actuadores.

El nivel bajo de control en exoesqueletos representa la interfaz directa con el mundo físico, encargándose de la activación precisa de los actuadores para ejecutar los movimientos deseados. Este nivel es crítico para asegurar que el exoesqueleto opere de manera segura, eficiente y en armonía con el usuario. A continuación, se detallan las soluciones electrónicas y tecnológicas diseñadas para cumplir con los objetivos y requisitos de este nivel, garantizando un control efectivo de los actuadores basado en las referencias proporcionadas por el nivel medio.

2.2.3.4. Soluciones Electrónicas y Tecnológicas

Actuadores de Alta Precisión

Emplear actuadores eléctricos (como servomotores) que ofrezcan alta precisión en posición, velocidad y fuerza. Estos actuadores deben ser capaces de realizar ajustes finos y responder rápidamente a las órdenes de control.

Sistemas de Sensores Integrados

Incorporar una variedad de sensores, incluyendo encoders, giroscopios, acelerómetros, y sensores de fuerza y torque, para proporcionar retroalimentación precisa y en tiempo real sobre la posición, orientación y dinámica del exoesqueleto y del usuario.

Controladores Dedicados para Actuadores

Cada actuador o grupo de actuadores deberían estar equipados con su propio controlador, permitiendo una gestión detallada y una respuesta rápida. Estos controladores pueden basarse en microprocesadores, microcontroladores o DSPs (Procesadores de Señal Digital) que soporten procesamiento en tiempo real y alta frecuencia de muestreo.

2.3. Comunicación y Sincronización:

La sincronización en sistemas electrónicos es fundamental para asegurar que las operaciones y procesos se ejecuten de manera coordinada y eficiente. En un entorno con múltiples dispositivos y aplicaciones, mantener todos los componentes sincronizados es un desafío significativo debido a las diferencias en hardware, software. Aquí el middleware juega un papel importante, actuando como intermediario que facilita la comunicación y la sincronización entre sistemas y aplicaciones.

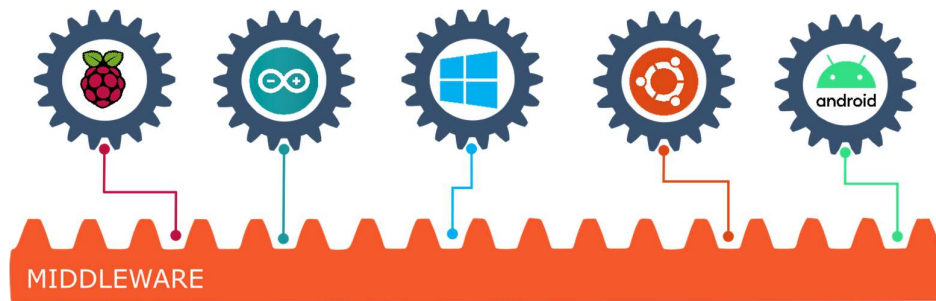


Figura 5. Analogía del middleware y su funcionamiento con diversos sistemas.

Así como la cremallera asegura una interacción fluida y eficiente entre los componentes del piñón, el middleware permite que sistemas y aplicaciones heterogéneos operen en conjunto de manera armoniosa y sin fricciones (Figura 5). En esencia, se encarga de abstraer las diferencias entre sistemas operativos y plataformas de hardware, proporcionando servicios comunes como la gestión de datos, mensajería y autenticación. Esto permite a los desarrolladores centrarse en la lógica de la aplicación, liberándolos de la complejidad de la interoperabilidad entre sistemas y mejorando significativamente la sincronización en entornos electrónicos diversos. El middleware mejora la sincronización de varias maneras:

Gestión de Mensajes: Permite una comunicación eficaz entre componentes distribuidos mediante colas de mensajes, publicación/suscripción y otros patrones de comunicación. Esto asegura que los mensajes se entreguen y procesen de manera ordenada y coherente, manteniendo la sincronización entre procesos.

Servicios de Tiempo: Ofrece mecanismos para sincronizar relojes y gestionar eventos basados en tiempo a través de diferentes sistemas. Esto es crucial

para operaciones que dependen de la precisión temporal, como transacciones financieras, sistemas de control industrial y comunicaciones en tiempo real.

Abstracción de la Heterogeneidad: Al ocultar las diferencias entre sistemas operativos y hardware, el middleware permite la integración y sincronización de dispositivos y aplicaciones diversas, facilitando un ecosistema cohesivo y operativamente sincronizado.

Coordinación de Procesos: Proporciona mecanismos para la coordinación y el control de procesos distribuidos, incluyendo bloqueos, semáforos y monitores. Esto asegura que los recursos compartidos se utilicen de manera eficiente y que las operaciones críticas se realicen en el orden correcto.

Calidad de Servicio (QoS): Ofrece capacidades para gestionar y priorizar el tráfico de red, asegurando que las aplicaciones críticas reciban los recursos necesarios para su correcta sincronización y funcionamiento.

En el ámbito de los sistemas distribuidos, la elección de un middleware de mensajería adecuado es importante para garantizar la comunicación eficaz y confiable entre diferentes componentes de software. Estos sistemas actúan como una capa intermedia que facilita el intercambio de mensajes de manera eficiente, segura y escalable. Cada middleware de mensajería viene con su conjunto único de características y capacidades, haciendo que algunos sean más adecuados para ciertos tipos de aplicaciones que otros. Para ayudar a entender mejor las diferencias y similitudes entre varios middlewares de mensajería, se ha preparado la Tabla 2 comparativa centrada en características clave.

La clasificación de cada middleware en la Tabla 2 se basa en criterios específicos que definen su nivel de desempeño en diferentes categorías:

Gestión de Mensajes: Se evalúa la capacidad para manejar grandes volúmenes de mensajes con baja latencia y garantizar la entrega confiable, incluso bajo alta carga.

Servicios de Tiempo: Se considera la precisión y confiabilidad de la sincronización de reloj en entornos distribuidos, así como el soporte para eventos basados en tiempo.

MARCO INTEGRAL PARA EL CONTROL DE SISTEMAS ROBÓTICOS DE REHABILITACIÓN

Abstracción de la Heterogeneidad: Se mide la capacidad de integrar y operar en diversos sistemas operativos, lenguajes de programación y arquitecturas de hardware.

Coordinación de Procesos: Se valora la variedad y eficacia de los mecanismos para gestionar la concurrencia y sincronización en entornos distribuidos.

Calidad de Servicio (QoS): Se analiza la flexibilidad y amplitud de las opciones de configuración para garantizar la entrega confiable de mensajes y gestionar el tráfico de red.

La calificación "Excelente" indica un desempeño sobresaliente en la categoría, mientras que "Muy Buena" señala un buen rendimiento con posibles limitaciones en escenarios extremos. "Buena" implica una capacidad adecuada para la mayoría de los casos, pero con limitaciones en entornos exigentes. "Moderada" sugiere una funcionalidad básica, y "Baja" denota una capacidad limitada, adecuada solo para escenarios simples.

Tabla 2. Comparativa de middlewares.

Middleware	Gestión de Mensajes	Servicios de Tiempo	Abstracción de la heterogeneidad	Coordinación de Procesos.	Calidad de Servicios (QoS)
<i>RabbitMQ</i> (Ionescu, 2015)	Excelente	Moderada	Alta	Moderada	Alta
<i>Kafka</i> (Kreps et al., 2011)	Excelente	Alta	Moderada	Baja	Alta
<i>ActiveMQ</i> (Ionescu, 2015)	Excelente	Moderada	Alta	Alta	Alta
<i>MQTT</i> (Thangavel et al., 2014)	Muy Buena	Baja	Alta	Baja	Moderada
<i>ZeroMQ</i> (Estrada & Astudillo, 2015)	Buena	Baja	Alta	Moderada	Moderada
<i>NATS</i> (T & K, 2019)	Muy Buena	Baja	Moderada	Baja	Alta
<i>ROS2</i> (Maruyama et al., 2016)	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

La comparación entre diferentes middlewares de mensajería resalta la versatilidad y capacidad de ROS2 frente a alternativas como Kafka, RabbitMQ, y ActiveMQ. ROS2 se distingue por su diseño modular y su capacidad para facilitar la comunicación entre procesos de manera flexible, además de su habilidad para manejar eventos basados en tiempo junto con Kafka, siendo crucial para la sincronización en aplicaciones distribuidas. Sobresale en la integración de dispositivos y sistemas operativos diversos, una ventaja clave para el desarrollo de aplicaciones robóticas complejas, y ofrece mecanismos avanzados para la coordinación de procesos distribuidos, junto con ActiveMQ. La calidad de servicio configurable y detallada es otro punto a favor para ROS2, permitiendo a los desarrolladores especificar los requisitos de comunicación con precisión. Aunque ROS2 se presenta como una herramienta robusta y adaptable para la robótica, su curva de aprendizaje más pronunciada, la necesidad de más recursos de hardware, y el esfuerzo adicional en configuración y mantenimiento pueden ser considerados desafíos, especialmente para nuevos usuarios o proyectos con restricciones de recursos

2.3.1. ROS2 (Robot Operating System 2):

ROS2 es una plataforma de software de código abierto diseñada para mejorar el desarrollo, la construcción y la ejecución de software en sistemas robóticos. Actúa como un middleware, proporcionando un conjunto de herramientas y servicios que facilitan la comunicación y la coordinación entre los diversos componentes de hardware y software de un robot. A diferencia de un sistema operativo tradicional que gestiona los recursos de hardware de un ordenador, ROS2 se centra en la interconexión de código y datos en un sistema robótico complejo (Quigley et al., n.d.). A continuación, se detalla más profundamente cómo funciona ROS2:

En ROS2, la unidad básica de software se llama "nodo". Un nodo puede ser un proceso que realiza una función específica, como controlar un motor, procesar datos de un sensor o ejecutar un algoritmo de planificación. Cada nodo está diseñado para realizar tareas pequeñas y bien definidas, fomentando así un enfoque modular para el desarrollo de software robótico.

Los nodos se comunican entre sí mediante un sistema de mensajería flexible que soporta varios patrones de comunicación:

Publicación/Suscripción: Los nodos pueden publicar mensajes en temas específicos a los que otros nodos se suscriben. Este patrón permite la comunicación asíncrona y uno a muchos.

Servicios: Permiten la comunicación síncrona basada en solicitudes y respuestas entre nodos. Un nodo ofrece un servicio, y otro nodo puede llamar a ese servicio con una solicitud y esperar una respuesta.

Acciones: Son utilizadas para tareas de larga duración que requieren retroalimentación continua durante su ejecución. Permiten a los nodos enviar una meta y recibir actualizaciones y resultados sobre el progreso de la tarea.

ROS2 introduce la configuración de QoS (*Quality of Service*), que permite a los desarrolladores especificar y ajustar cómo se deben manejar los mensajes en términos de fiabilidad, durabilidad, y otros aspectos críticos para la comunicación entre nodos. Esto es esencial para garantizar que las aplicaciones robóticas puedan cumplir con los requisitos específicos de rendimiento y fiabilidad.

ROS2 está diseñado desde el principio para sistemas distribuidos, lo que significa que los nodos pueden ejecutarse en diferentes dispositivos o computadoras y comunicarse a través de la red. Esto es clave para robots compuestos por múltiples subsistemas y sensores distribuidos, (Park et al., 2020).

Además, ROS2 es independiente del sistema operativo, lo que significa que puede ejecutarse en diferentes sistemas operativos como Linux, macOS, Windows, y sistemas embebidos. Esto facilita el desarrollo cruzado y la implementación de sistemas robóticos en una variedad de plataformas de hardware.

Posee además características avanzadas de seguridad, como la comunicación cifrada entre nodos y la autenticación, ROS2 atiende a aplicaciones en entornos donde la seguridad de los datos y la operación segura son críticas.

Funciona como una infraestructura compleja pero altamente flexible que conecta diferentes partes de un sistema robótico, permitiendo una

comunicación eficiente y el manejo de procesos a través de sus características avanzadas de mensajería, QoS, y soporte para sistemas distribuidos y multiplataforma. Su diseño modular y las amplias herramientas de desarrollo disponibles facilitan la creación de aplicaciones robóticas sofisticadas y confiables.

La selección de ROS2 como middleware para la propuesta responde a la necesidad de una plataforma que soporte la sincronización y comunicación en sistemas electrónicos complejos, y también a aprovechar capacidades avanzadas en gestión de mensajes, servicios de tiempo, abstracción de la heterogeneidad, coordinación de procesos y calidad de servicio. Estas características hacen de ROS2 una solución excepcionalmente adecuada para enfrentar los retos presentes en el desarrollo e implementación de sistemas electrónicos avanzados, maximizando su eficiencia, flexibilidad y fiabilidad.

2.4. Marco Propuesto.

La propuesta del marco electrónico de los exoesqueletos de miembros inferiores se desglosa cuidadosamente en tres niveles jerárquicos. Mediante una analogía con la Figura 4, que ilustra los niveles de la marcha humana, se introduce la Figura 6. Esta última expone cada nivel junto con sus funciones específicas y cómo estos se interrelacionan con la marcha humana.

En el Nivel Alto, se pone énfasis en la percepción e intención del usuario. Esta fase involucra la ejecución de algoritmos destinados a adaptar los sistemas a las necesidades individuales de los usuarios, además de activar el impulso inicial para el movimiento o actividad que se llevará a cabo en el nivel subsiguiente. Tecnológicamente, este nivel demanda un sistema que pueda interactuar a través de ROS2 con los otros niveles, asegurando una frecuencia de actualización en la transmisión y recepción de datos superior a 5Hz.

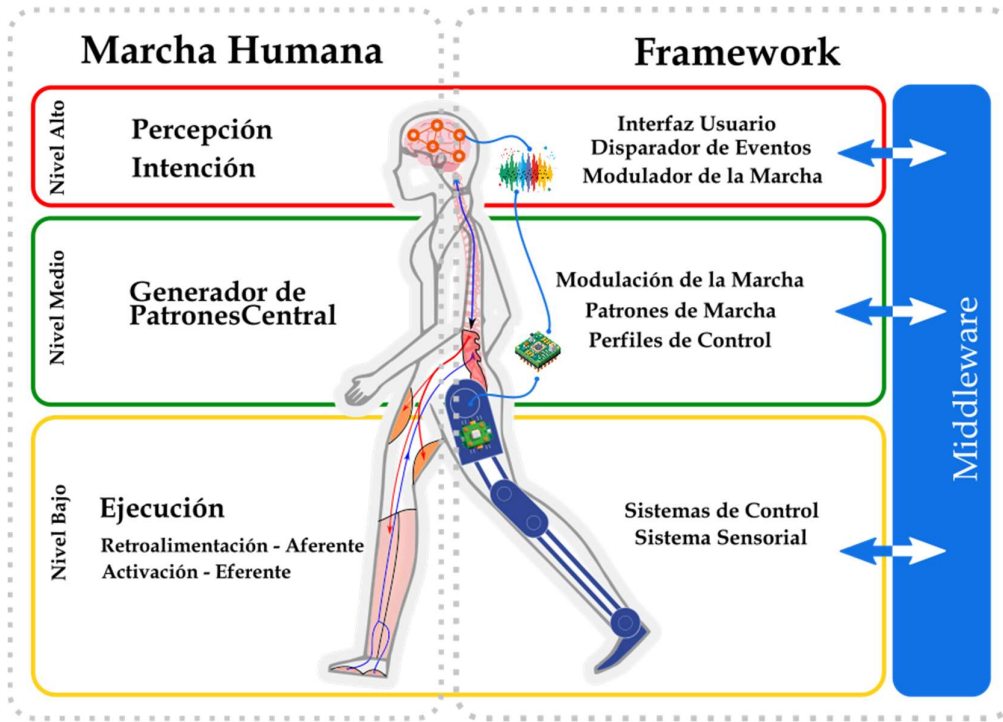


Figura 6. Marco generalizado para la conceptualización de la arquitectura. A la izquierda, se observan los tres niveles jerárquicos estudiados en la marcha humana. A la derecha, el marco conceptual propuesto.

El Nivel Medio está encargado de la creación de patrones de movimiento para el exoesqueleto, determinados por las modulaciones, velocidades y tipos de patrones estipulados por el nivel anterior. En términos tecnológicos, es imprescindible disponer de hardware capaz de facilitar la comunicación mediante ROS2, con una tasa de actualización de los datos enviados (posición, velocidad o torque) al nivel siguiente de al menos 60Hz.

Por último, el Nivel Bajo se encarga de la ejecución física del movimiento. Los datos de posición, velocidad y/o torques provenientes del Nivel Medio deben ser precisamente ejecutados por controladores especializados para cada actuador. Este nivel aloja a los sensores, que deben tener sistemas electrónicos capaces de enviar su información a una red ROS2, con una velocidad de actualización propuesta de 1KHz.

La Figura 7 ilustra un esquema resumido del marco de arquitectura electrónica sugerido para exoesqueletos de miembros inferiores, facilitando una visión clara de la estructura propuesta y su interconexión.

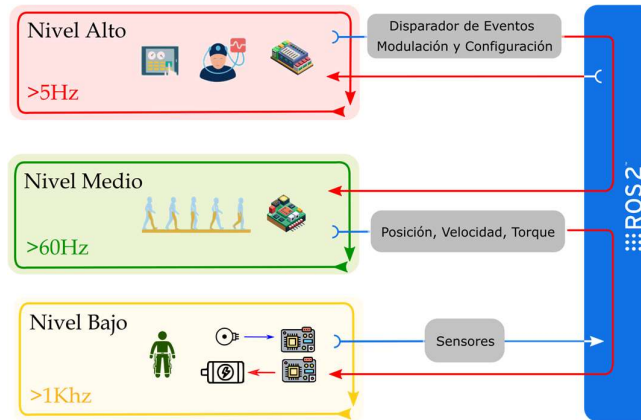


Figura 7. Propuesta Marco Arquitectura Electrónica.

Esta propuesta adopta un enfoque que conceptualiza la marcha humana en tres niveles jerárquicos, buscando replicar la complejidad del sistema nervioso humano durante la marcha. Esto implica un entendimiento más profundo tanto de la mecánica como de la neurología implicada en el movimiento humano.

Además, la propuesta considera la posibilidad de futuras expansiones y mejoras durante el diseño de los exoesqueletos, garantizando así que puedan evolucionar con los avances tecnológicos sin necesidad de cambios fundamentales. Se trabaja hacia la reducción de costos y la mejora de la facilidad de uso para hacer los exoesqueletos más accesibles para un espectro más amplio de usuarios y aplicaciones. En resumen, la propuesta aborda tanto aspectos técnicos como teóricos para desarrollar exoesqueletos más avanzados y versátiles.

2.5. Conclusiones

En este capítulo, se ha presentado un novedoso marco integral para el control de exoesqueletos de miembros inferiores. Esta propuesta se basa en una comprensión de la biomecánica y neurología de la marcha humana, traduciendo este conocimiento en una arquitectura electrónica jerárquica y bioinspirada.

El marco propuesto se divide en tres niveles principales, cada nivel ha sido cuidadosamente diseñado para cumplir funciones específicas, desde la interpretación de las intenciones del usuario hasta la ejecución precisa de los movimientos:

Nivel Alto (Percepción e Intención): Este nivel se centra en la interpretación de las intenciones del usuario y la adaptación del exoesqueleto a sus necesidades individuales. Se emplean interfaces avanzadas y algoritmos de inteligencia artificial para garantizar una interacción intuitiva y fluida.

Nivel Medio (Generador de Patrones Centrales): Actúa como el núcleo del sistema, traduciendo las intenciones del usuario en patrones de movimiento coordinados para las articulaciones y actuadores del exoesqueleto. Se utilizan algoritmos avanzados para generar patrones de marcha precisos y adaptativos.

Nivel Bajo (Ejecución): Este nivel se encarga de la ejecución precisa de los movimientos, controlando los actuadores en tiempo real para seguir las referencias de posición, velocidad y fuerza proporcionadas por el nivel medio. Se utilizan tecnologías de control de alta precisión y sensores integrados para garantizar un movimiento seguro y eficiente.

La comunicación y sincronización entre estos niveles se logra mediante el uso de ROS2, un middleware de robótica de código abierto que facilita la comunicación entre procesos y la gestión de datos en tiempo real.

La propuesta presentada en este capítulo no solo ofrece una solución a las limitaciones identificadas en los exoesqueletos actuales, sino que también establece una base sólida para el desarrollo de sistemas de rehabilitación más avanzados y efectivos. El enfoque en la personalización y la adaptabilidad promete mejorar significativamente la experiencia de rehabilitación para las personas con discapacidades motoras.

Mientras este capítulo ha sentado las bases teóricas y conceptuales del marco tecnológico, el Capítulo 3 se centrará en la implementación práctica y la validación de este sistema en un entorno real. Se explorará cómo el marco propuesto se traduce en un sistema robótico funcional, detallando los componentes tecnológicos específicos, los algoritmos de control implementados y las pruebas realizadas para verificar la eficacia y seguridad

del sistema. Esta transición de la teoría a la práctica permitirá evaluar el verdadero potencial del marco en la mejora de la rehabilitación de la marcha en niños con parálisis cerebral, proporcionando perspectivas valiosas sobre su aplicabilidad clínica y posibles áreas de mejora futura.

Capítulo 3

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO.

Este capítulo presenta la implementación y validación del marco de control integral propuesto en el sistema robótico Discover2Walk (D2W), diseñado para mejorar la rehabilitación de la marcha en niños con parálisis cerebral. Se detalla la arquitectura del sistema, que incluye módulos de pelvis, tobillos y tracción, así como sistemas avanzados de navegación y sensores. El capítulo describe la integración de la arquitectura de control jerárquica, utilizando ROS2 como middleware para la comunicación entre los diferentes niveles del sistema. Se presentan pruebas exhaustivas que demuestran la sincronización efectiva entre componentes, la modularidad del diseño y la escalabilidad del sistema. Se destaca la integración exitosa de tecnologías adicionales, como un exoesqueleto flexible de tobillo y un sistema de realidad virtual, que amplían las capacidades terapéuticas del D2W. Los resultados muestran que el sistema es capaz de proporcionar una asistencia precisa y adaptable en la marcha, mientras mantiene una comunicación robusta y en tiempo real entre sus componentes. Este capítulo valida la efectividad del marco propuesto en un contexto práctico, demostrando su potencial para revolucionar la terapia de rehabilitación en niños con discapacidades motoras.

3.1. Plataforma Robótica Discover2Walk (D2W).

El sistema robótico Discover2Walk (D2W) (Figura 8) es un dispositivo innovador diseñado para transformar la vida de niños con parálisis cerebral. Este exoesqueleto robótico, adaptable y personalizable, se enfoca en facilitar la experiencia de caminar y fomentar la exploración del entorno.

El D2W se distingue por su estructura flexible que se ajusta al crecimiento y desarrollo de cada niño. Mediante una plataforma modular, proporciona asistencia dinámica y coordinada en el movimiento de las piernas, simulando una marcha natural. Su sistema de control preciso sobre la pelvis y los tobillos, asistido por actuadores y sensores, replica los patrones naturales de

la marcha, permitiendo al niño experimentar cómo es caminar de forma saludable.

La adaptabilidad del D2W es clave para su eficacia. No solo se ajusta al desarrollo físico del niño, sino que también se personaliza para satisfacer sus necesidades individuales. Esta capacidad de adaptación asegura que el sistema sea efectivo en diferentes etapas del desarrollo y en una variedad de condiciones de parálisis cerebral.

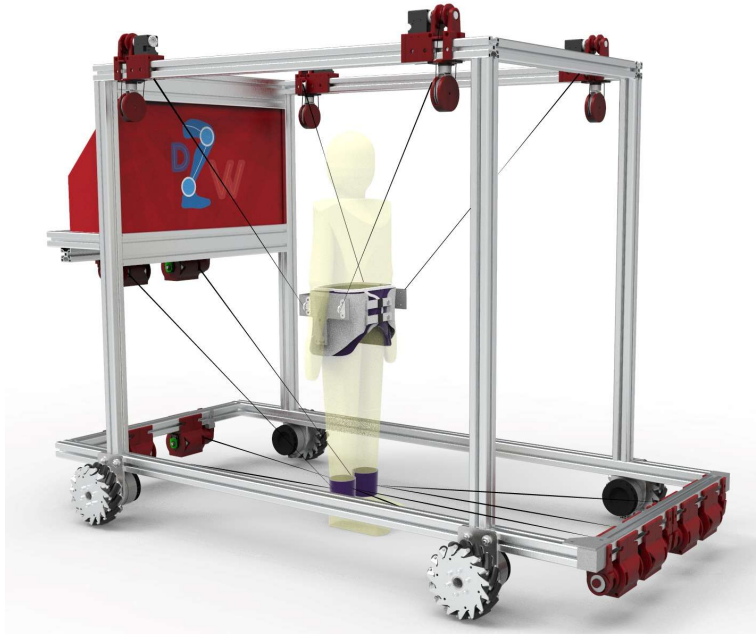


Figura 8. Renderizado del Sistema Robótico Discover2Walk (versión preliminar).

Además, incorpora tecnologías avanzadas como sistemas de navegación, abriendo nuevas posibilidades para terapias cognitivas mediante la interacción con el entorno. Estas innovaciones no solo aumentan la independencia de los usuarios sino que también enriquecen su percepción sensorial, permitiéndoles interactuar de manera segura y significativa con su alrededor. Mediante la interacción con este sistema robótico, los niños no solo progresan en su habilidad para caminar, sino que también desarrollan confianza y autonomía, aspectos fundamentales para su crecimiento.

3.1.1. Componentes y Funcionalidades.

Para lograr su objetivo, Discover2Walk (D2W) emplea una estructura externa que está diseñada y construida a partir de perfiles de aluminio (BOSCH, Alemania) unidos formando un prisma rectangular de 1,5x0,65x1,2m (Figura

9) y presenta los siguientes módulos principales: pélvico, tobillos y módulos de tracción.

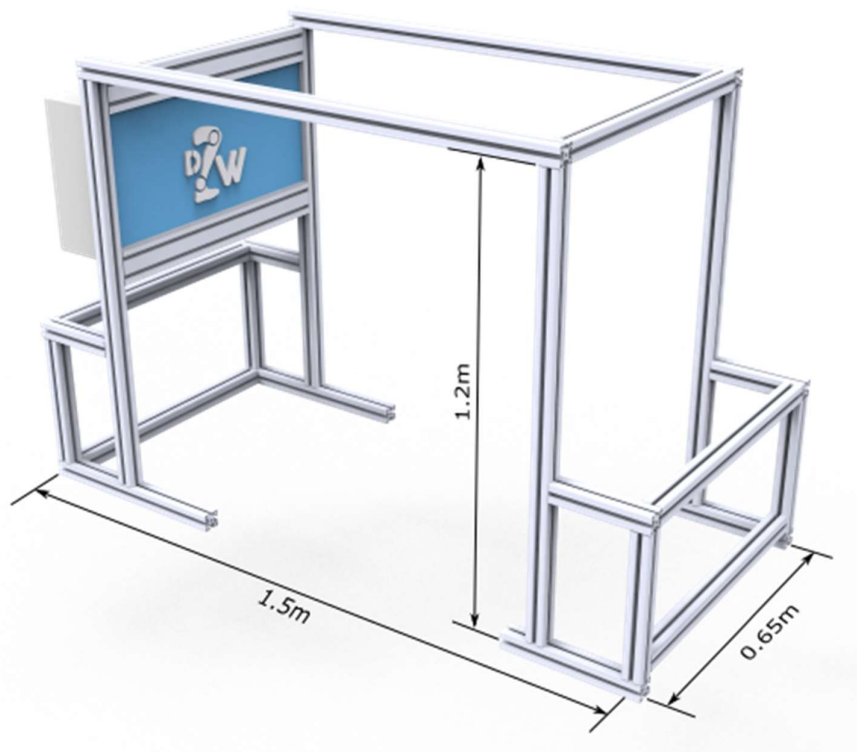


Figura 9. Estructura de aluminio del sistema D2W fabricado con perfiles BOSCH.

Módulo de Pelvis: El módulo de pelvis funciona como un sistema integrado de componentes que trabajan en conjunto para lograr un control preciso y seguro del movimiento y soporte de peso de la pelvis.

En primer lugar, cuatro cables de acero inoxidable de grado marino 7x19 316 (TECNI, Reino Unido), recubiertos de nylon, se conectan a una órtesis de cadera modificada "HIP ABDUCTION ORTHOSIS" (PRIM, España), (Figura 10). Estos cables, seleccionados por su alta resistencia a la tracción (con una carga máxima de rotura de 22 kg) y su reducido tamaño, garantizan la seguridad y durabilidad del sistema, permitiendo el soporte de peso de niños de hasta 30 kg. El recubrimiento de nylon proporciona una capa adicional de protección y resistencia al desgaste.

Esta órtesis, fabricada en un marco rígido de aluminio, asegura una transmisión eficiente de las fuerzas desde los cables hacia la pelvis del usuario, minimizando pérdidas de energía (Figura 11). El ajuste de la

longitud de estos cables, y por ende el control del movimiento pélvico, se logra mediante cuatro servomotores Dynamixel XH540-W150-T. Estos motores, ubicados estratégicamente en las esquinas superiores de la plataforma, son capaces de generar un torque de hasta 7.1Nm, lo que les permite realizar ajustes finos y rápidos en la posición y soporte de peso, incluso en niños de hasta 30 kg.

Para garantizar la seguridad y eficacia del sistema, una serie de sensores monitorean constantemente el estado del módulo. Un IMU BNO055 de 9 ejes registra con precisión el movimiento de la pelvis en términos de posición y orientación, mientras que las celdas de carga DYMH-103, integradas en un sofisticado sistema de poleas, miden la carga soportada en cada momento (Figura 12). Estos datos son vitales para evaluar el rendimiento del sistema y realizar ajustes en tiempo real.

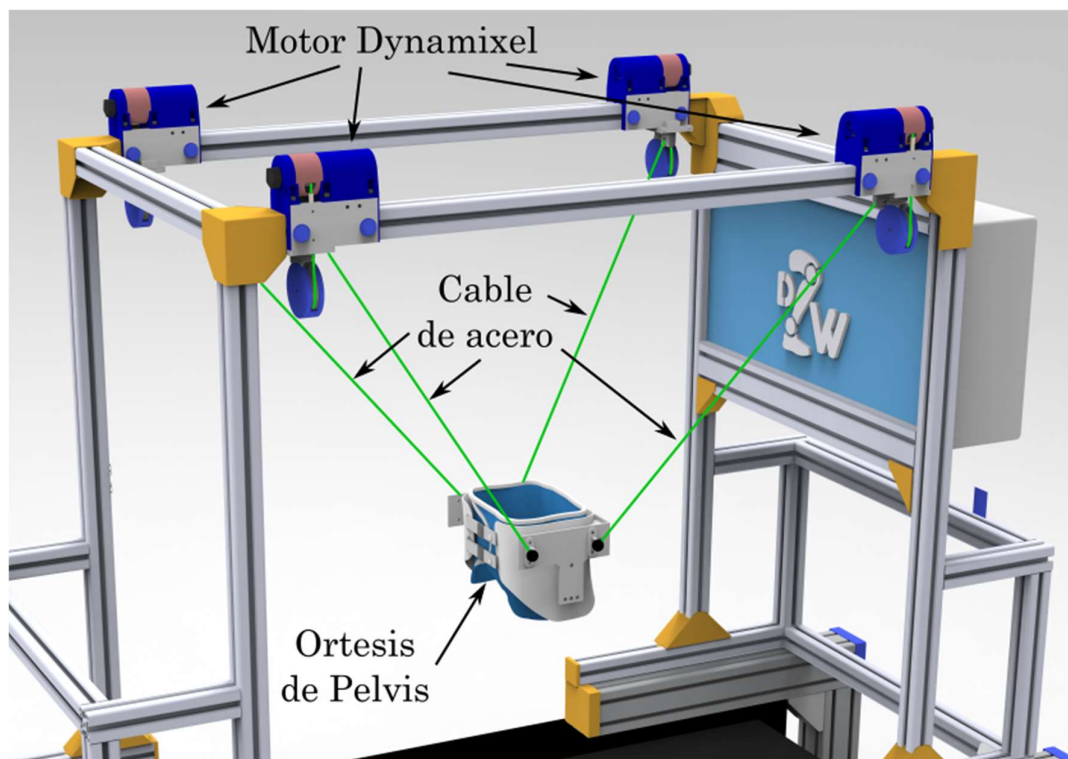


Figura 10. Componentes del Módulo de Pelvis. (vista en perspectiva)

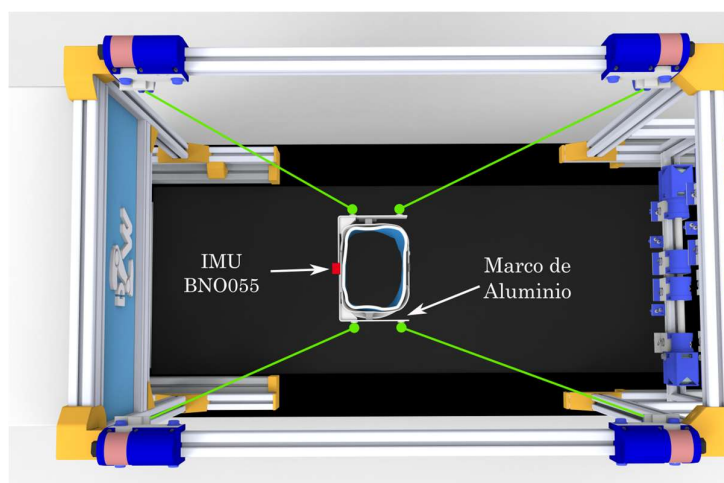


Figura 11. Componentes del módulo de la pelvis (vista superior).

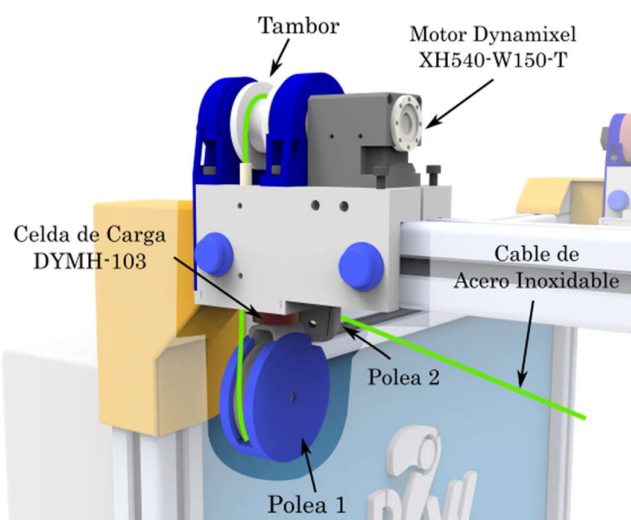


Figura 12. Componentes del sistema motorizado de la pelvis.

Modulo de Tobillos. El módulo de tobillos del sistema D2W es un mecanismo de asistencia muy importante en la rehabilitación de la marcha (Figura 13). Su funcionamiento se basa en un ingenioso sistema de cables y motores que trabajan en sinergia para guiar y apoyar el movimiento de los tobillos del paciente.

En cada tobillo, se conectan cuatro cables de Kevlar 8x trenzados de 0,5 mm de diámetro (SeaKnight®), dos por delante y dos por detrás, mediante correas de pie modificadas (SYL Fitness®) que aseguran una sujeción segura y

cómoda en los tobillos del niño (Figura 14). Estos cables, conocidos por su excepcional resistencia a la tracción de 45,4 kg cada uno, ofrecen una combinación óptima de flexibilidad y durabilidad, garantizando la seguridad y comodidad del paciente durante la terapia.

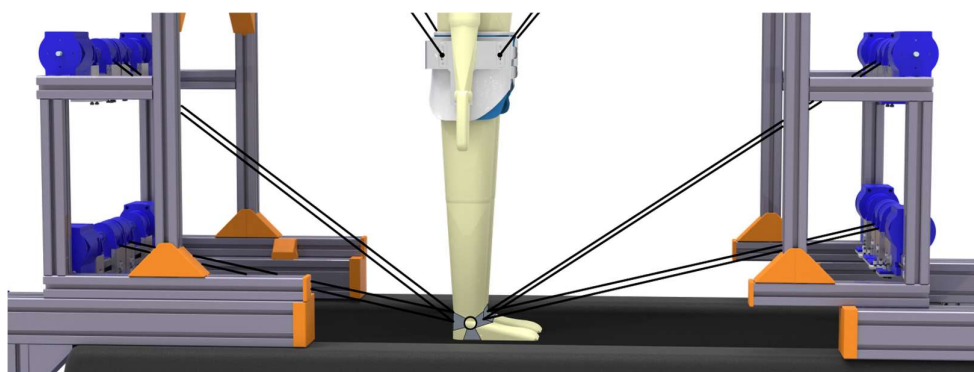


Figura 13. Sistema completo del módulo de los Tobillos.

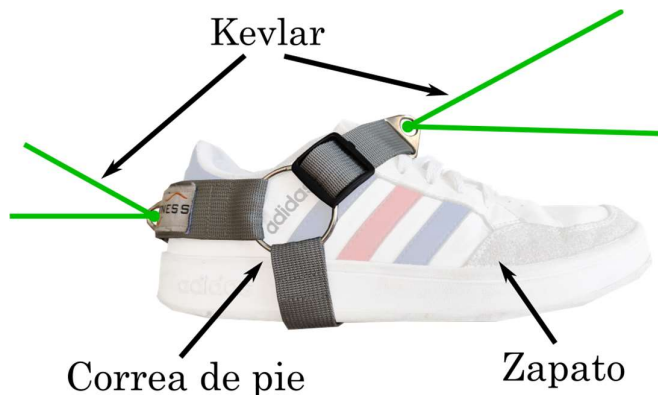


Figura 14. Sistema de anclaje a los tobillos.

Cada uno de estos cables se conecta individualmente a un motor ODRIVE D6374 de 150Kv, equipado con un codificador AMT102-V para un control preciso de la posición (Figura 15). En total, ocho motores trabajan de forma independiente, 4 para cada tobillo, permitiendo un ajuste personalizado de la tensión y el movimiento de cada tobillo. Estos motores, controlados por cuatro controladores ODRIVE 3.6, y equipados con sensores de posición, velocidad y

corriente, ajustan la tensión en cada cable de manera precisa y en tiempo real, permitiendo un control individualizado y adaptativo del movimiento de cada tobillo durante cada fase del ciclo de la marcha. Esta configuración de cables paralelos y motores independientes permite al sistema de control de marcha de D2W guiar los tobillos del paciente a lo largo de las trayectorias de marcha deseadas, proporcionando la cantidad justa de asistencia y adaptándose a las necesidades cambiantes del paciente para optimizar la terapia y lograr los mejores resultados posibles.

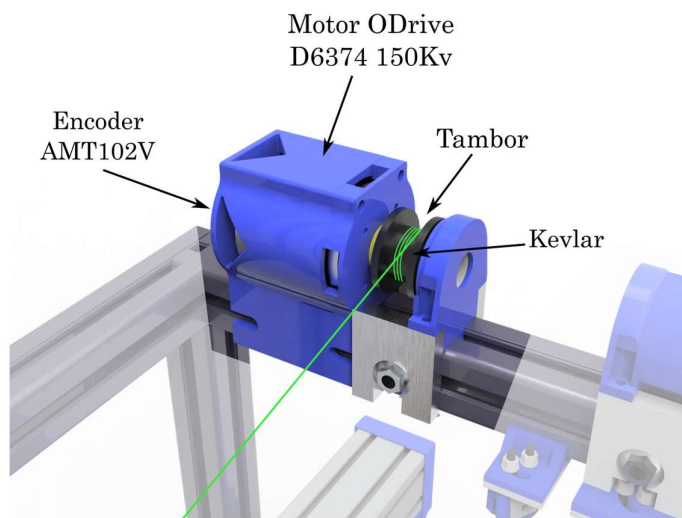


Figura 15. Componentes del sistema motorizado del módulo de los tobillos.

Modulo de Tracción. El módulo de tracción es el corazón de la movilidad de la plataforma D2W, permitiendo que se mueva de forma fluida y precisa en cualquier dirección. Este módulo está compuesto por cuatro ruedas mecanum de aluminio de 254 mm de diámetro, cada una con una capacidad de carga de 40 kg. Estas ruedas especiales, con rodillos dispuestos a 45 grados, son las responsables de la capacidad omnidireccional del sistema, permitiendo movimientos laterales, diagonales y rotaciones sobre su propio eje (Figura 16).

Cada una de estas ruedas mecanum es impulsada por un potente motor MAXON EC 90 Flat de 600 W, controlado por un codificador para un posicionamiento preciso. Estos motores, gestionados por dos controladores ODRIVE 3.6, trabajan en conjunto para sincronizar el movimiento de las ruedas y lograr una traslación suave y una rotación precisa de la plataforma. Esta sección es fundamental para la movilidad de la plataforma, permitiendo

el control de la posición, velocidad y torque de cada rueda para adaptarse a la intención de movimiento del usuario.

Además, un IMU BNO055 y un encoder proporcionan información esencial para el sistema de odometría de la plataforma. Estos sensores miden la orientación, aceleración y el movimiento de la plataforma, permitiendo calcular su posición exacta en todo momento. Esta información es fundamental para la navegación precisa y segura de la plataforma, especialmente en entornos complejos o dinámicos.

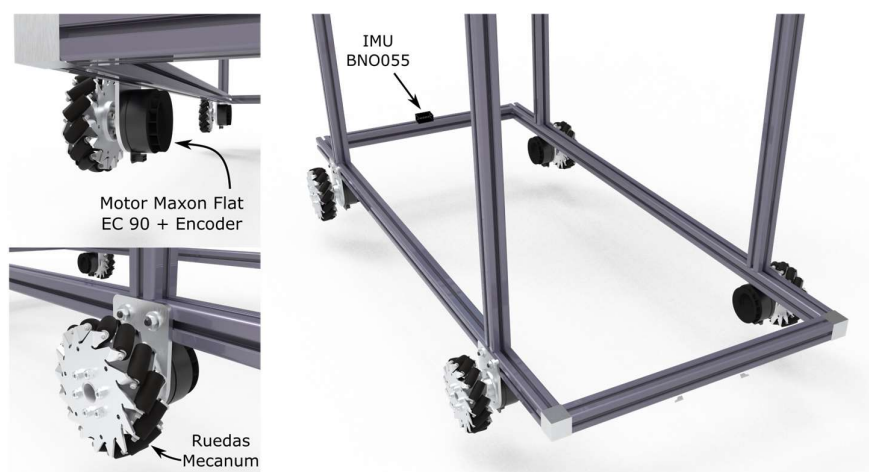


Figura 16. Componentes del módulo de tracción.

Además, D2W integra un avanzado sistema de navegación compuesto por LIDAR URG-04LX-UG01 y una cámara RGBD-Kinect V2 para la generación de mapas de profundidad, (Figura 17), lo que no solo permite al sistema una navegación autónoma por su entorno sino que también sienta las bases para el desarrollo de terapias cognitivas. Esta capacidad de interacción ambiental abre nuevas alternativas en el tratamiento rehabilitador, prometiendo un futuro en el que los niños no solo mejoran su movilidad sino que también enriquecen su comprensión y relación con el espacio que les rodea.

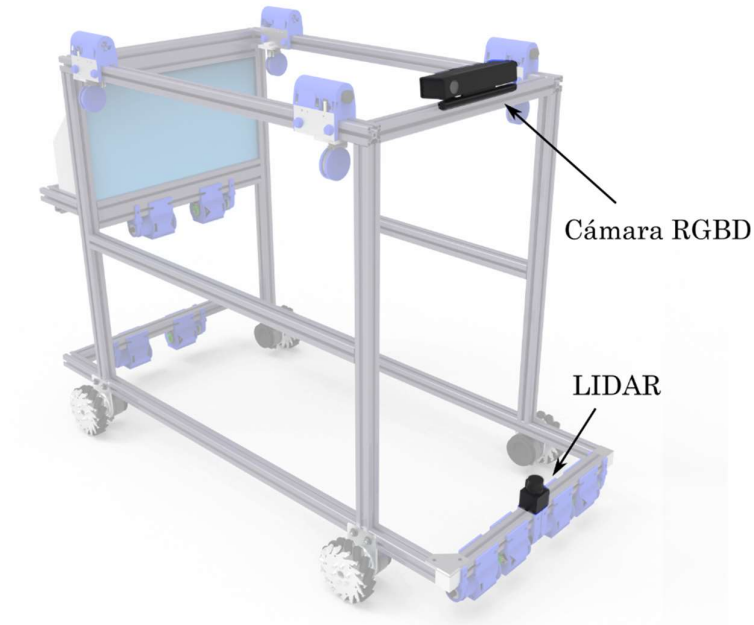


Figura 17. Componentes del módulo de navegación.

3.1.2. Arquitectura de control

El sistema robótico Discover2Walk enfrenta el desafío de sincronizar sus múltiples componentes, un requisito muy significativo por su complejo diseño. La importancia de mantener una comunicación fluida y en tiempo real cobra vital relevancia ante la gestión coordinada de 16 motores y 40 sensores operando simultáneamente (Tabla 3). Lograr una imitación precisa del andar humano depende de la armonización de estos elementos, incluidos motores que impulsan ruedas omnidireccionales y los cables además de sensores que registran la posición, velocidad y torque. Cualquier demora o fallo en las comunicaciones, por mínimo que sea, puede desviar el patrón de caminata establecido, llevando a movimientos erráticos que no solo frenan el avance terapéutico, sino que además representan un riesgo para la seguridad del niño.

Tabla 3. Distribución de actuadores y sensores por cada sistema del Discover2Walk.

Sistema	Actuadores	Sensores
Percepción		RGBD Camera LIDAR
Tracción	DC Motors X4	IMU Encoders X4 Current Sensor X4
Pelvis	DC Motors X4	Load Cells X4 IMU Encoders X4 Current Sensor X4
Tobillos	DC Motors X8.	Encoders X8 Current Sensor X8
TOTAL	16 actuadores	40 sensores

Adicionalmente, el sistema de control por cables del Discover2Walk propone un enfoque único en la forma de manipulación del movimiento infantil. No obstante, mantener la tensión adecuada a los tobillos entre los ocho motores, especialmente durante la dinámica de la marcha, complica aún más el funcionamiento del sistema. Es importante hallar el balance perfecto entre la tensión de los cables y los movimientos naturales del niño para una asistencia efectiva.

Otro desafío importante es la integración de tecnologías como el sistema LIDAR y las cámaras de profundidad, siendo fundamental una fusión perfecta de estos elementos para una navegación eficaz y el desarrollo de futuras terapias cognitivas. Evitar retrasos o incoherencias, provocados por factores externos o ambientales, es sumamente importante. Por tanto, una integración y sincronización exitosa de todos estos componentes en condiciones reales, representan desafíos significativos que se deben superar para maximizar las capacidades del Discover2Walk.

3.2. Implementación de la propuesta en la plataforma Discover2Walk.

Para integrar todo el sistema y mantener una comunicación armónica y sincronizada es necesario definir ciertos parámetros de la arquitectura a partir del marco propuesto en el Capítulo 2, obteniendo los sistemas correspondientes en cada Nivel Jerárquico como se observa en la Figura 18.

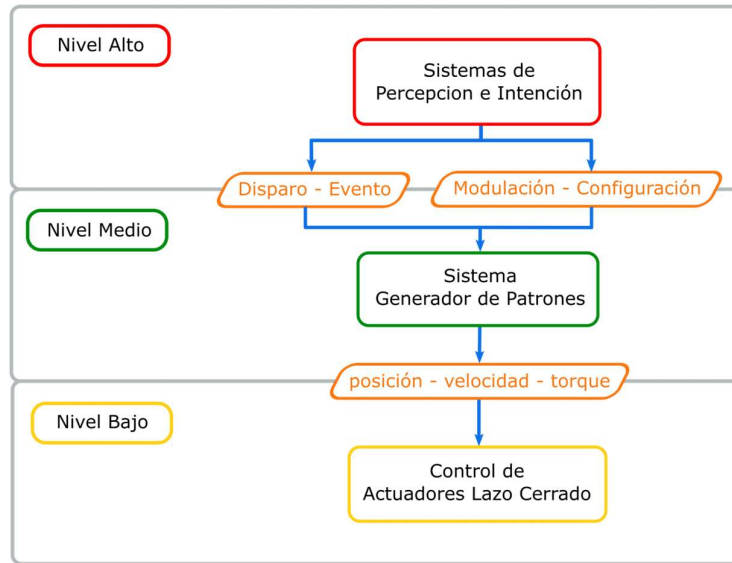


Figura 18. Definición de la arquitectura del sistema robótico.

En la introducción del D2W se presentaron varios sistemas que deberán ser controlados, cada uno de ellos en distintos niveles del control jerárquico a nivel electrónico. En la Tabla 4 expresamos los diferentes sistemas y lo enmarcamos en el nivel del sistema jerárquico que estarían involucrados.

Tabla 4. Clasificación de los Sistemas según su nivel jerárquico.

Sistema	Nivel
Percepción, Intención	Nivel Alto
Tracción	Nivel Bajo
Pelvis	Nivel Bajo
Tobillos	Nivel Bajo

Ahora bien, el Nivel Medio no posee directamente un sistema electrónico a controlar, sino que mas bien es un algoritmo que necesita de recursos para manejar todo lo que se refiere a generar los patrones de la marcha y el movimiento de la plataforma.

3.3. Arquitectura Electrónica.

Para asegurar el correcto funcionamiento de cada uno de los componentes esenciales en el D2W, es primordial utilizar hardware capaz de llevar a cabo las tareas correspondientes a cada nivel. Como resultado, se preparó una representación esquemática de la arquitectura de hardware propuesta (ver Figura 19). En esta figura, se pueden distinguir claramente las divisiones en tres niveles jerárquicos.

En el Nivel Alto, utilizamos una computadora de placa única (SBC), específicamente la Raspberry Pi 4 (Raspberry Pi Foundation, Reino Unido), para albergar el nodo de la Interfaz Clínica. Esta interfaz incluye una base de datos que registra información sobre los pacientes, sus configuraciones personalizadas y las sesiones realizadas. Adicionalmente, la interfaz gráfica integra el sistema de Intención, que facilita el disparo inicial de la marcha. Esto se puede activar a través de un botón visible en la interfaz o mediante el acceso a un servicio preestablecido en ROS2 para la conexión a un sistema externo, en este caso un BCI, lo que permite iniciar la secuencia de caminata de manera eficiente.

Para el sistema de Percepción con cámara de profundidad y sensores LIDAR se usa una Jetson Nano, ya que esta posee procesadores gráficos que facilitan y agilizan la adquisición y procesamiento de este tipo de datos.

El Nivel Medio, que alberga los generadores de marcha, se ha implementado en una SBC LattePanda Delta 2. Esta selección ofrece ventajas considerables en comparación con alternativas como la Raspberry Pi 4, principalmente por su superior capacidad de procesamiento y memoria, esenciales para gestionar algoritmos complejos de generación de marcha tridimensional. A diferencia de la Raspberry Pi 4, la LattePanda Delta 2 destaca por su compatibilidad con Ubuntu y Windows, lo que proporciona una plataforma flexible y poderosa para el desarrollo y ejecución de aplicaciones especializadas. Estas características hacen de la LattePanda Delta 2 una opción robusta y adaptable para el Nivel Medio, garantizando la eficiencia y precisión en la coordinación de las secuencias de rehabilitación.

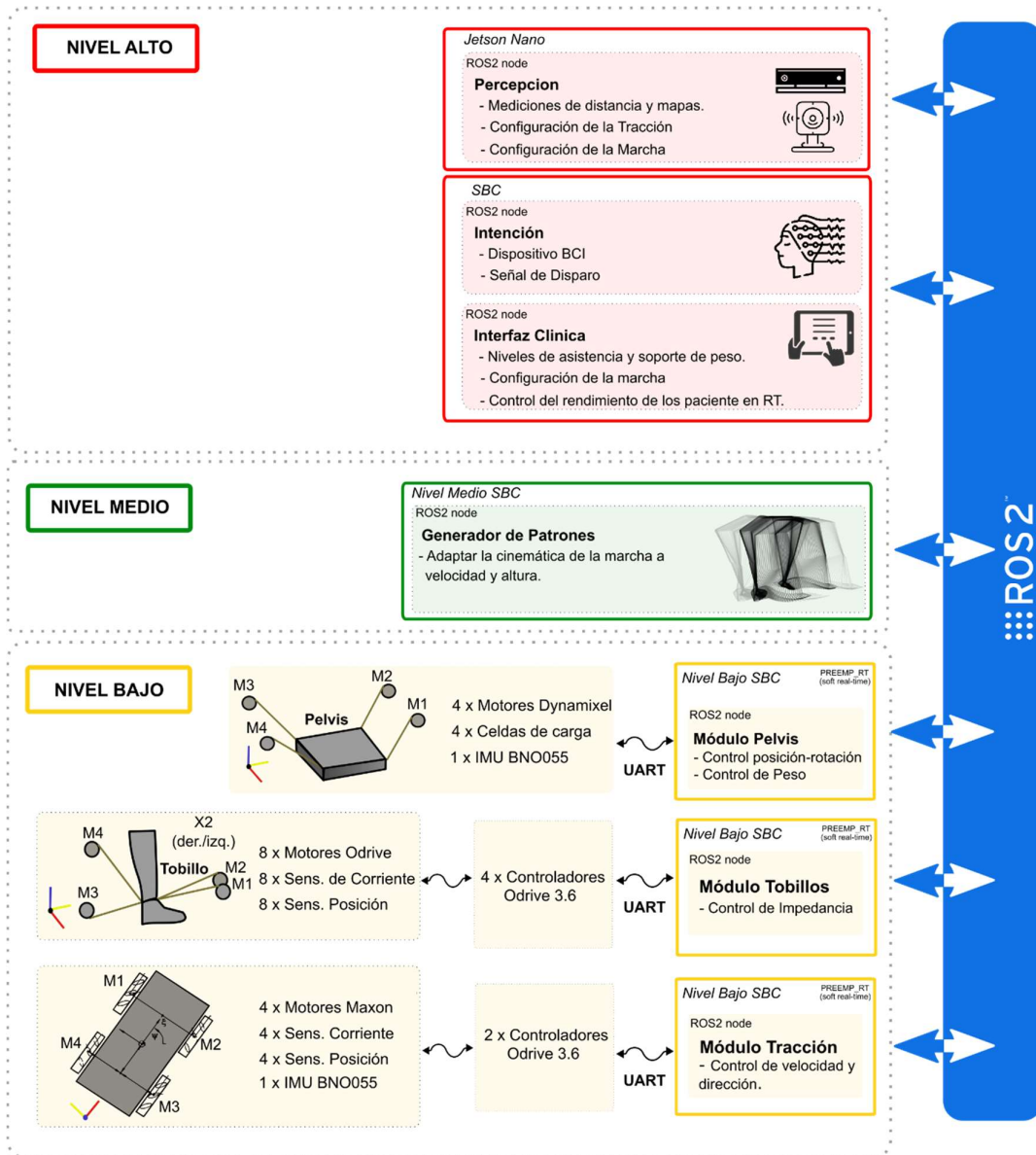


Figura 19. Arquitectura Electrónica del sistema robótico Discover2Walk.

El Nivel Bajo del sistema Discover2Walk se estructura en tres secciones clave: Tracción, Pelvis y Tobillos. Cada sección está diseñada para cumplir funciones específicas, utilizando una combinación de tecnología avanzada para monitorear y controlar el movimiento preciso necesario en cada etapa de la marcha.

Pelvis: Esta sección utiliza cuatro servomotores un IMU y celdas de carga para monitorizar el movimiento y la carga soportada, respectivamente, facilitando la recopilación de datos sobre la posición, orientación, y el esfuerzo

realizado por el usuario. Una Raspberry Pi 4 se encarga de gestionar y controlar estas operaciones, asegurando la recopilación y el procesamiento eficaz de los datos.

Tobillos: En la sección de los tobillos, se emplea un conjunto de cuatro controladores ODRIVE 3.6 para manejar los motores, cada uno con su encoder y sensores de corriente, lo que permite un control preciso de la posición y la fuerza ejercida en los tobillos. Así mismo, una Raspberry Pi 4 se encarga de la gestión y el comando de estos controladores, asegurando una operación coordinada y eficiente.

Tracción: La tracción está controlada por una Raspberry Pi 4 que gestiona dos controladores de motor ODRIVE 3.6, cada uno dirigiendo dos motores (cuatro en total), además de una IMU y encoders que proporcionan datos para el sistema de odometría. Esta sección es fundamental para la movilidad de la plataforma, permitiendo el control de la posición, velocidad y torque de cada rueda para adaptarse a la intención de movimiento del usuario.

Tanto las Raspberry Pi 4 como la LattePanda Delta funcionan con el sistema operativo Ubuntu 20.04, mejorado con el parche PREEMP_RT para permitir un rendimiento en tiempo real. Este parche mejora la capacidad del sistema para gestionar tareas críticas de manera más fluida y precisa, lo cual es esencial para las aplicaciones que requieren una alta fiabilidad y respuestas inmediatas.

3.4. Diseño e Implementación de la Arquitectura de Red y el Sistema de Comunicaciones.

Optar por un switch en lugar de un router se convierte en una estrategia clave para la mejora de la comunicación en sistemas robóticos y automatizados. Mientras que los routers son ideales para conectar múltiples redes, introduciendo una capa adicional de gestión y posible latencia, los switches operan dentro de una sola red, ofreciendo una ruta directa y eficiente para la transmisión de datos entre dispositivos. Esta eficiencia es importante en aplicaciones que dependen de la sincronización e intercambio de datos en

tiempo real, como es el caso del Discover2Walk, donde cualquier retraso en la comunicación puede impactar negativamente en el rendimiento del sistema.

Además, se ha asignado una dirección IP fija a cada sistema (ver Figura 20), lo cual supera las limitaciones de las direcciones IP dinámicas en nuestro contexto específico. Las direcciones IP fijas garantizan que cada dispositivo mantenga siempre la misma dirección dentro de la red, facilitando la configuración de las conexiones y la identificación precisa de cada nodo en el sistema. Esta estrategia de asignación de direcciones IP fijas es fundamental para la eficiencia y estabilidad de la red, permitiendo que todo el sistema se interconecte mediante cables de red sin sacrificar la rapidez ni la fiabilidad de la comunicación. Al evitar la posibilidad de cambio en las direcciones IP, se simplifica la gestión de la red, se mejora la seguridad y se facilita el mantenimiento del sistema, aspectos críticos para el funcionamiento óptimo de aplicaciones robóticas complejas como el Discover2Walk.

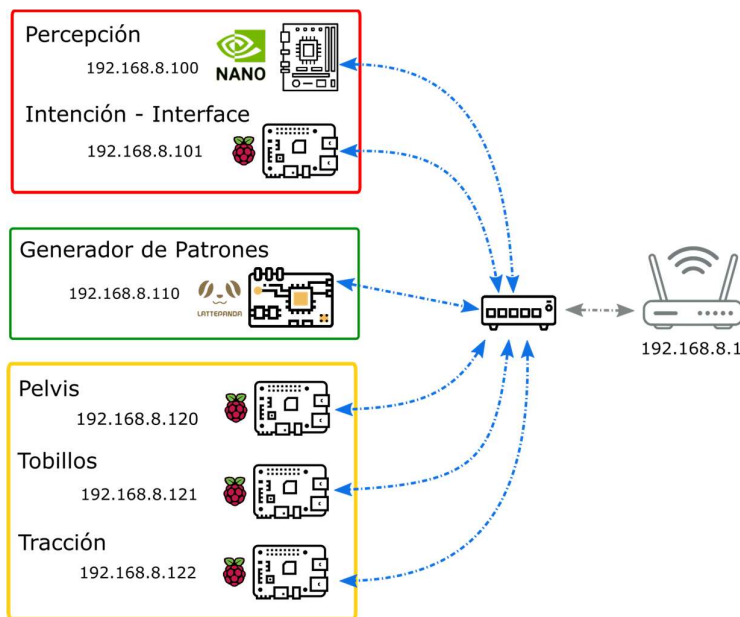


Figura 20. Infraestructura de la red del Discover2Walk.

Una vez identificados y ubicados los sistemas en los respectivos niveles jerárquicos, procedemos a implementar el esquema del sistema de comunicaciones. Este diseño es esencial para mantener la sincronización de todo el sistema y permitir su gestión de manera ordenada y jerárquica. De

acuerdo con la propuesta desarrollada, el sistema de comunicaciones será gestionado mediante ROS2.

En este marco, hemos establecido una estructura de tres niveles jerárquicos, donde cada sistema será controlado por un nodo específico. Cada nodo contará con sus propios suscriptores y publicadores y, según las necesidades, dispondrá de un servicio dedicado a ajustar y modificar las configuraciones necesarias (Figura 21).

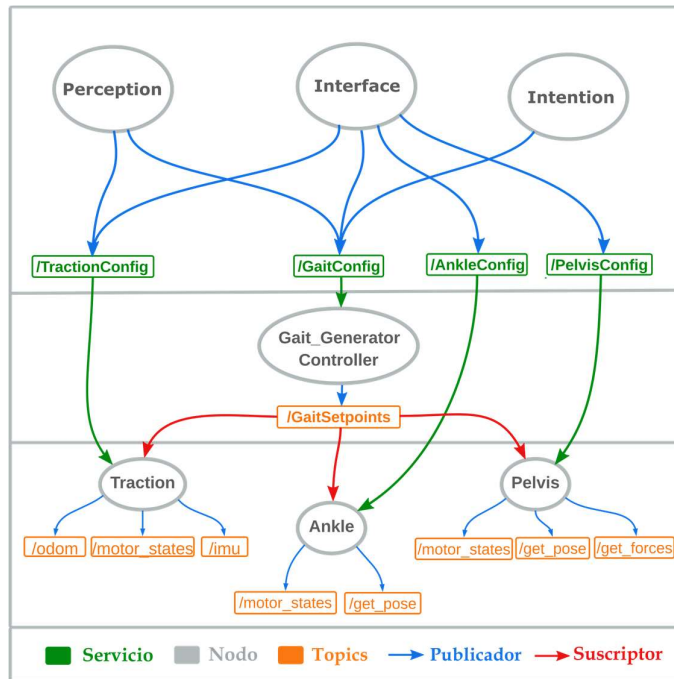


Figura 21. Definición de la topología ROS2 para el sistema robótico D2W.

En el Nivel Alto, contaremos con un nodo dentro del sistema de Percepción, que se encargará de enviar toda la información relacionada con el sistema LIDAR y las cámaras de profundidad. Este nodo también transmitirá datos adicionales necesarios para la integración de estas tecnologías en el sistema, incluyendo las mediciones de distancia y los mapas de profundidad generados. Además, este nodo envía información a los servicios de Configuración de Tracción (`/TractionConfig`) y de Configuración de la Marcha (`/GaitConfig`), permitiendo ajustar el nivel de impedancia según el entorno en el que se encuentre el sistema Discover2Walk. Esto asegura que la adaptación y respuesta del exoesqueleto sean óptimas en diferentes condiciones operativas.

Además, en el nivel alto, se implementó un nodo que genera una interfaz gráfica basada en HTML que se comunica con los niveles inferiores a través de los servicios de ROS2 (Figura 22). Esta interfaz facilita la personalización de la plataforma para atender las necesidades terapéuticas específicas de cada paciente, permitiendo configurar en cada servicio (/TractionConfig, /GaitConfig, /AnkleConfig, /PelvisConfig) ciertos parámetros que permiten:

- Establecer las variables antropomórficas del paciente, como peso y altura.
- Configurar los parámetros de modulación de la caminata, incluyendo los niveles de impedancia y la velocidad que se emplearán durante la terapia.

Además, esta interfaz gráfica permite el monitoreo en tiempo real de los topics publicados en los distintos niveles del sistema, proporcionando una retroalimentación valiosa tanto para el usuario como para el terapeuta.

En esta interfaz podemos visualizar las posiciones de las articulaciones del niño, este sistema proporciona una ventaja notable al habilitar la visualización gráfica. Esta funcionalidad es de gran utilidad, ya que proporciona una representación visual clara y comprensible de los movimientos tridimensionales de las articulaciones. Tanto los usuarios como los desarrolladores pueden observar de manera más intuitiva y detallada cómo se desarrolla y cambia con el tiempo la marcha generada por el generador de patrones. Además, al tener acceso a esta representación gráfica en tiempo real, es posible rastrear de manera precisa la evolución de la marcha, lo que facilita la detección de posibles problemas o anomalías en el proceso. Esto permite realizar ajustes y mejoras de manera más eficiente, ya sea modificando los parámetros del generador de patrones o haciendo ajustes en la configuración de la velocidad de caminata.

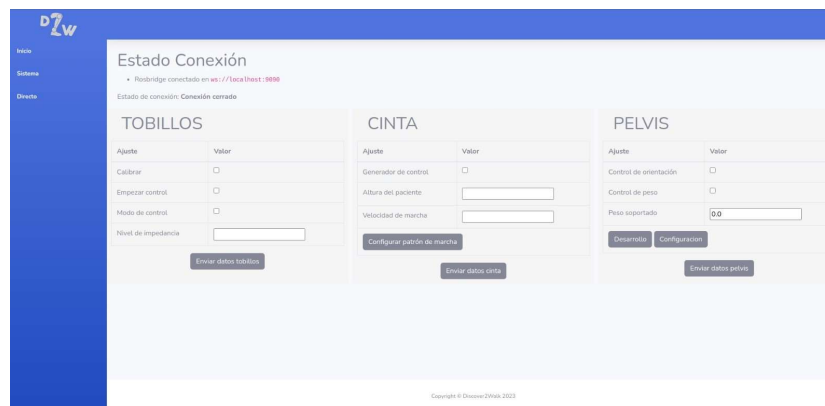


Figura 22. Captura de Pantalla - Interfaz Gráfica D2W.

En el sistema de Intención, se ha desarrollado un mecanismo de disparo de eventos que puede activarse de dos maneras distintas: mediante un botón en la interfaz gráfica o a través de un dispositivo de interfaz cerebro-computadora (BCI) que procesa la actividad cortical mediante algoritmos específicos. Cuando el paciente imagina realizar un movimiento, el dispositivo BCI capta la actividad eléctrica del cerebro, interpreta esta señal como la intención del usuario y transmite una orden al exoesqueleto para ejecutar un movimiento de caminata previamente configurado. Este disparador de eventos es enviado a través de un servicio de ROS2, que activa la marcha configurada en el generador de patrones (/GaitConfig), iniciando así el proceso de caminata en el exoesqueleto.

En el nivel medio, se crea un único nodo: Gait_Generator_Controller. Es responsable de generar los patrones de caminata y de publicar y enviar instrucciones a cada nodo de control ubicado en el nivel bajo. El cálculo de la posición espacial (tridimensional) de cada articulación se realizó utilizando el algoritmo propuesto en (Romero-Sorozábal et al., 2024). Este algoritmo toma como entrada la velocidad de caminata y la altura del usuario, generando diferentes puntos de ajuste que se envían a los controladores en el nivel bajo. Además, es posible ajustar la configuración de la velocidad de caminata en tiempo real, lo que permite modificar trayectorias y crear nuevos puntos de ajuste, que se envían inmediatamente al nivel bajo.

Este nodo de nivel medio, a su vez, utiliza un servicio llamado "GaitConfig", que envía parámetros desde el nivel alto para modular correctamente las fases de la caminata y luego los modifica enviando nuevas instrucciones a los nodos de nivel bajo correspondientes. Al estar encargado de enviar las instrucciones, se crea un único mensaje personalizado para este propósito llamado GaitSetpoints. Este mensaje incluye las instrucciones para los controladores de la pelvis, el tobillo y los subsistemas de tracción. El mensaje GaitSetpoints (Figura 23) se genera y se utiliza para comandar todas las instrucciones en el Nivel Bajo, por lo que se crean varios mensajes internos: posiciones tridimensionales de la pelvis, el tobillo y la tracción, así como la velocidad de caminata.

/GaitSetpoints	
std_msgs/Header	header
std_msgs/Float32	r_gait_percentage
std_msgs/Float32	l_gait_percentage
geometry_msgs/Pose	pelvis_ref
geometry_msgs/Pose	r_hip_ref
geometry_msgs/Pose	l_hip_ref
geometry_msgs/Pose	r_knee_ref
geometry_msgs/Pose	l_knee_ref
geometry_msgs/Pose	r_ankle_ref
geometry_msgs/Pose	l_ankle_ref
geometry_msgs/Twist	vel_ref

Figura 23. Mensaje personalizado que emite el nodo del Generador de Patrones. Se aprecia el tipo de mensaje estándar que se utiliza.

El Nivel Bajo es responsable de gestionar y enviar instrucciones de caminata para cada grupo cinemático. También envía instrucciones definidas (posición, velocidad o torque) a cada motor para lograr el movimiento comandado por los niveles superiores. Por esta razón, cada grupo cinemático se implementa en un nodo ROS2 que ejecuta y realiza el control cinemático, logrando modularidad para cada sistema. Para este propósito, se implementan tres nodos en este nivel:

- **Pelvis_Control_Node:** Este nodo es responsable del control de la posición de la pelvis y de realizar las mediciones para el control del peso del usuario. Utiliza algoritmos cinemáticos para modificar la posición y rotación de la pelvis en el espacio tridimensional y envía instrucciones a los controladores de cada motor. Además, captura y publica las mediciones realizadas por los sensores de cada motor (posición, velocidad y corriente). También utiliza un sistema compuesto por sensores de fuerza para monitorear la tensión aplicada a cada cable del robot para el control del peso y además de un sensor inercial que proporciona las mediciones del movimiento real de la ortesis.
- **Ankles_Control_Node:** Este nodo gestiona la posición de los tobillos en cada momento del ciclo de caminata. Utiliza los algoritmos necesarios para calcular la posición de cada tobillo en el espacio tridimensional y, a su vez, envía instrucciones de control a los motores correspondientes para cada extremidad inferior (4 para cada una). Al igual que los otros nodos, lee y publica los datos obtenidos de los sensores de los motores (posición, velocidad y corriente).
- **Traction_Control_Node:** Este nodo está a cargo de controlar la plataforma móvil omnidireccional; utiliza algoritmos cinemáticos para el movimiento, la

odometría y la lectura de varios sensores para la gestión y control de los motores (posición, velocidad, corriente). Además, utiliza un algoritmo de control que, con una IMU, permite dirigir correctamente la plataforma.

3.5. Validación Técnica.

La arquitectura electrónica biomimética descrita en este capítulo ha sido implementada y puesta a prueba en el sistema robótico Discover2Walk (D2W). Se ha diseñado y llevado a cabo una serie de experimentos planificados para evaluar la efectividad de nuestra propuesta en varios aspectos fundamentales:

A. Sincronización: El primer conjunto de pruebas se centró en la capacidad de la arquitectura para asegurar una sincronización impecable entre los diversos componentes del sistema, siguiendo un enfoque jerárquico. Se evaluaron meticulosamente la precisión en la temporización de mensajes y la eficiencia de las frecuencias en los ciclos de control, elementos clave para garantizar la coordinación armónica de las funciones del robot.

B. Modularidad: Con el fin de poner a prueba la modularidad del sistema, se procedió a reemplazar el sistema de tracción. El objetivo era verificar si el nuevo conjunto electrónico podría integrarse y comunicarse sin problemas con los demás niveles del sistema, sin necesidad de realizar ajustes adicionales. Esta prueba buscaba demostrar la flexibilidad de la arquitectura para adaptarse a cambios o mejoras en sus componentes.

C. Escalabilidad: La última prueba se diseñó para evaluar la escalabilidad del sistema. Incorporamos un nuevo conjunto de actuadores, complementarios a los ya existentes en D2W, y analizamos la capacidad de sincronización de este nuevo sistema con la plataforma existente. Esta prueba era fundamental para determinar si la arquitectura podría manejar la incorporación de nuevos componentes o sistemas de actuación, manteniendo su funcionalidad y eficacia.

La sección siguiente detalla los procedimientos y resultados de estos experimentos, demostrando la versatilidad y robustez de la arquitectura de control propuesta para afrontar estos desafíos.

3.5.1. Sincronización.

La fase de sincronización se centró en evaluar exhaustivamente el sistema robótico bajo condiciones de alta demanda para determinar su rendimiento en términos de gestión de datos.

Para la medición de latencias dentro de nuestra red, se seleccionó el protocolo OWAMP (One-Way Active Measurement Protocol), diseñado para medir las métricas de rendimiento de una red en una sola dirección. Permite evaluar la calidad de la red, midiendo latencias, pérdidas de paquetes y variaciones en el retardo de manera precisa entre dos puntos en la red. A diferencia de otros protocolos de medición que calculan el tiempo de ida y vuelta, OWAMP se enfoca en las mediciones unidireccionales, lo que proporciona una visión más detallada del comportamiento y rendimiento de la red en una sola dirección, (Shalunov et al., 2006).

Este protocolo es especialmente útil en aplicaciones donde es importante conocer el rendimiento exacto de la red en un sentido específico, como en la transmisión de flujos de medios, telecomunicaciones y redes de sensores. OWAMP ofrece la posibilidad de identificar asimetrías en el rendimiento de la red, las cuales pueden no ser evidentes en mediciones bidireccionales. Desarrollado por el IP Performance Metrics (IPPM) Working Group de la Internet Engineering Task Force (IETF), OWAMP proporciona una herramienta estandarizada para los administradores de red y desarrolladores, permitiéndoles diagnosticar problemas de rendimiento y optimizar la configuración de la red basándose en datos concretos y específicos de una dirección.

A través de su implementación, llevamos a cabo un análisis detallado de la red y obtuvimos mediciones de latencia para diferentes métodos de interconexión (ver Tabla 5).

Tabla 5. Medición de latencias entre sistemas interconectados.

Interconexión		
	Ethernet - Ethernet	Ethernet - Wifi
Máximo:	1.086 ms	167.948 ms
Medio:	0.643 ms	48.08ms
Mínimo:	0.0857 ms	1.453 ms

Para asegurar una sincronización en todos los sistemas Linux del sistema robótico Discover2Walk, se implementó Chrony, un software adaptado para manejar variaciones significativas en la latencia de red y para sistemas que se conectan esporádicamente a Internet. Chrony destaca por su habilidad para sincronizar el reloj del sistema con extraordinaria precisión, alcanzando milisegundos o incluso microsegundos bajo diversas condiciones de red y hardware específico .

Chrony se compone de dos elementos: chronyd, un demonio que opera en el fondo llevando a cabo la mayoría de las tareas de sincronización, y chronyc, una interfaz de línea de comandos para ajustar chronyd y monitorear su desempeño. Este software aplica algoritmos avanzados para calibrar el reloj del sistema, considerando las variaciones de temperatura que pueden influir en la exactitud del oscilador del reloj y emplea múltiples fuentes de tiempo, desde servidores NTP hasta señales de GPS y radio, para asegurar la referencia temporal más precisa.

Una ventaja notable de Chrony es su capacidad para efectuar correcciones de tiempo rápidas, vital tras arranques en frío o cuando los sistemas han permanecido desconectados de la red por tiempos prolongados. Su estabilidad temporal es sobresaliente, manteniendo el sistema fiable incluso sin conexión a la red, gracias a su capacidad de aprender y predecir las características del reloj del sistema.

Frente a otras soluciones de sincronización como NTP o PTP, Chrony sobresale por su rapidez y versatilidad para estabilizar el reloj del sistema tras interrupciones, convirtiéndolo en la solución ideal no solo para servidores y sistemas embebidos, sino también para entornos de computación en la nube. Esto lo hace indispensable en el Discover2Walk, donde la cohesión temporal

entre dispositivos es fundamental para la sincronización precisa de eventos y el registro adecuado de datos.

Además de lograr una sincronización integral en la red, hemos utilizado las funcionalidades avanzadas de las cabeceras de mensajes en ROS2, que incluyen información vital sobre las marcas de tiempo. Esta característica permite un seguimiento detallado de los momentos exactos en los que se envían y reciben los mensajes, asegurando una interpretación precisa al llegar a su destino. ROS2 también ofrece opciones y ajustes de calidad de servicio (QoS) específicamente diseñados para enfrentar desafíos de comunicación, como la pérdida de paquetes.

Dentro del conjunto de políticas de QoS que ROS2 proporciona, la política de Fiabilidad es primordial para manejar la pérdida de paquetes. Esta política establece cómo debe actuar el middleware en caso de pérdidas, ofreciendo dos configuraciones: `BEST_EFFORT`, que prescinde de la retransmisión de paquetes perdidos, y `RELIABLE`, que asegura la retransmisión de los paquetes hasta su correcta entrega. Para el sistema robótico Discover2Walk, hemos seleccionado la opción `RELIABLE`, comprometiéndonos con una comunicación sólida y confiable dentro del sistema.

Este enfoque garantiza la comunicación ininterrumpida y fiable, esencial para la coordinación precisa de las operaciones robóticas y el éxito de las intervenciones de rehabilitación en el Discover2Walk. Optimizando las políticas de QoS en ROS2, reforzamos la fiabilidad del sistema, mejorando notablemente su rendimiento en entornos complejos.

Para validar la eficacia de la sincronización y las políticas de Calidad de Servicio (QoS) implementadas en ROS2, se creó un escenario de alta exigencia destinado a poner a prueba el sistema bajo condiciones de estrés. Este proceso de validación implicó realizar mediciones precisas sobre el uso del ancho de banda, la velocidad de transmisión de datos y el tamaño de los mensajes intercambiados en la red, todo ello en el marco del sistema de comunicaciones ROS2. La Tabla 6 ofrece un resumen de estas mediciones, clasificando cada nodo de ROS2 según su nivel jerárquico en el sistema. Se especifica el ancho de banda que cada nodo ocupa, la frecuencia de publicación de los distintos temas en ROS2, así como el volumen de los mensajes, expresado en kilobytes. Se añade, además, información referente a la frecuencia con la que requieren operar los bucles de control de los distintos componentes electrónicos,

brindando así un panorama integral sobre la capacidad y la robustez de las comunicaciones del sistema ante escenarios exigentes.

Tabla 6. Evaluación de los Nodos ROS2 y comparación con las frecuencias de control.

Nivel	Nodo ROS2	Ancho de Banda (KB/s)	Frecuencia ROS2 (Hz)	Tamaño (KB)	Frecuencia Control Lazo Cerrado (Hz)	Requerimiento (Hz)
Alto	Lidar - BCI	0,524	9,99	0,052	-	≥ 7
Medio	Pattern Generator	30,93	62,476	0,49	60	≥ 60
Bajo	Ankle	48,08	58,89	1,02	>1000	≥ 1000
	Pelvis	29,18	66,69	0,44	>1000	≥ 1000
	Traction	30,79	79,165	0,39	>1000	≥ 1000

Los resultados de esta evaluación subrayan la capacidad de ROS2 para gestionar comunicaciones eficientes incluso en escenarios de alta demanda. La sincronización efectiva y las políticas de QoS implementadas permitieron que los nodos críticos operaran a altas frecuencias y transmitieran volúmenes significativos de datos sin comprometer la estabilidad del sistema. Si bien se identificaron áreas de mejora potencial, particularmente en la optimización de nodos de nivel bajo, ROS2 demostró su robustez y versatilidad como middleware de comunicación para aplicaciones robóticas complejas y exigentes.

Ahora bien, para asegurarnos de que los sistemas están implementados correctamente, enfocaremos nuestra evaluación en el flujo y gestión de los mensajes de ROS2, desde su origen hasta su procesamiento final por los actuadores. Este análisis nos proporcionará una visión clara de cómo se maneja la comunicación en ROS2, esencial para la coordinación efectiva y la realización de movimientos en el exoesqueleto. Nuestro objetivo principal es verificar que cada mensaje es procesado adecuadamente, asegurando así la sincronización precisa y el desempeño óptimo del sistema en conjunto.

Como se muestra en la Figura 24, el evento de activación se transmite desde el Nivel Alto al nivel medio. Este último contiene una serie de algoritmos de

generación de patrones de marcha que son esenciales para el funcionamiento óptimo de nuestro exoesqueleto. La frecuencia a la que el nivel medio lee los mensajes transmitidos desde el nivel superior es, en términos generales, de aproximadamente 60 Hz. Sin embargo, tras una observación más detallada y la medición de las marcas de tiempo de todos los mensajes recibidos, determinamos una frecuencia real de 62,5 Hz. Esto significa que cada 16 milisegundos, el nivel medio es capaz de recibir y procesar un mensaje procedente del nivel superior.

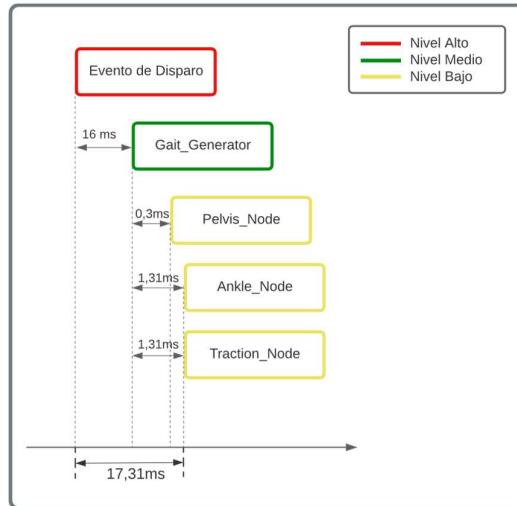


Figura 24. Tiempos de respuesta de los mensajes ROS2 entre los niveles Alto, Medio y Bajo.

Por otro lado, la función del generador de patrones es calcular y enviar nuevas posiciones al nivel Bajo. Este nivel se encarga de controlar cada una de las articulaciones del exoesqueleto. Aquí, el tiempo medio de lectura (RMS) de cada ciclo oscila entre 0,3 y 1,31 milisegundos (Figura 24). Esta variación refleja la existencia de nodos que funcionan a una velocidad rápida de 0,3 ms, mientras que otros lo hacen a un ritmo más lento de 1,31 ms. Este rango asegura una reacción prácticamente inmediata dentro del sistema de control de actuadores, proporcionando así una gestión exacta y efectiva del exoesqueleto. Dicha precisión en la comunicación y el control constituye uno de los pilares clave para el sobresaliente desempeño de nuestro sistema.

3.5.2. Modularidad.

Una característica destacada del sistema propuesto es su modularidad. En los distintos niveles sugeridos, los componentes electrónicos pueden intercambiarse sin afectar a ningún otro nivel. La única constante que debe mantenerse es el protocolo de comunicación y los diferentes tipos de mensajes establecidos en los *topics*, que se basan en ROS2 a través de una red Ethernet.

Durante el proceso de validación técnica se implementó una modificación significativa en el sistema de tracción. El sistema omnidireccional original fue reemplazado por un sistema de cinta de correr (Figura 25). El objetivo principal de este cambio fue realizar pruebas exhaustivas en el generador de patrones y observar directamente los resultados, eliminando el factor de traslación.

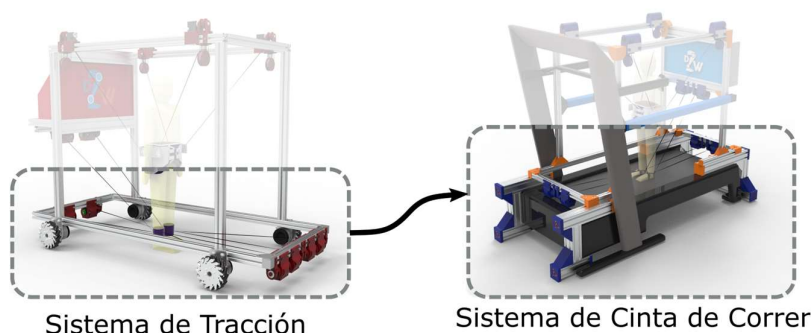


Figura 25. Modificación del sistema de tracción a una cinta de correr.

Este procedimiento involucró conectar el sistema de cinta de correr al mensaje de ROS2 responsable de transmitir la velocidad de caminata. Es pertinente observar que la dirección de la caminata en este sistema no se utilizó, ya que la estructura de la cinta de correr limita tal movimiento, restringiendo la caminata a una dirección predeterminada.

Después de realizar las pruebas pertinentes, el sistema demostró un rendimiento óptimo. La cinta de correr se sincronizó perfectamente con la velocidad de caminata, permitiendo ajustes en tiempo real. Este hecho ilustra claramente la adaptabilidad de la plataforma robótica D2W y su capacidad para integrar y manejar eficientemente diferentes sistemas de tracción, aumentando significativamente su versatilidad y aplicabilidad en diversas

condiciones operativas. El correcto rendimiento del sistema tras estos cambios demuestra la capacidad de nuestra propuesta para adaptarse a diferentes tipos de hardware.

3.5.3. Escalabilidad.

La plataforma robótica D2W está diseñada para ser escalable, una característica que le otorga la capacidad de manejar cargas de trabajo crecientes, incorporar nuevas funcionalidades y adaptarse a un amplio espectro de condiciones operativas. La escalabilidad en términos de hardware se logra gracias a su diseño modular. Cada módulo o componente puede ser modificado, actualizado o reemplazado sin afectar el rendimiento del sistema completo. Esta flexibilidad permite que la plataforma D2W integre componentes electrónicos avanzados y se adapte a futuras mejoras tecnológicas.

En cuanto a la escalabilidad del software, el exoesqueleto D2W, gracias a su middleware basado en ROS2 a través de Ethernet, permite la integración de nuevos nodos o módulos de software a medida que se desarrollan o se hacen necesarios. Asimismo, ROS2 ofrece una gama de interfaces de comunicación estandarizadas y proporciona un alto grado de compatibilidad con diversas plataformas de hardware y lenguajes de programación.

La escalabilidad del robot D2W también se extiende a su sistema de tiempo sincronizado, basado en el Protocolo de Tiempo de Red (NTP). Este sistema asegura que, a medida que se añaden más módulos o componentes al sistema, todas las partes pueden mantener una sincronización precisa del tiempo, una capacidad crítica para el funcionamiento eficiente de un sistema robótico complejo.

Para demostrar la característica de escalabilidad de D2W, se llevó a cabo la integración de un exoesqueleto flexible de tobillo diseñado por la UC3M (Navarro et al., 2024). Este sistema utilizó actuadores construidos con Aleaciones de Memoria de Forma (SMA) con el objetivo de ajustar con precisión el ángulo del tobillo. El proceso de integración para el sistema D2W implicó una serie de pasos técnicos. Primero, el sistema de exoesqueleto fue físicamente conectado al D2W (Figura 26). Posteriormente, se realizaron las configuraciones necesarias a nivel de software para asegurar una interacción

óptima entre los dos sistemas. Esto incluyó la programación de los parámetros específicos del sistema de exoesqueleto en la configuración de D2W.

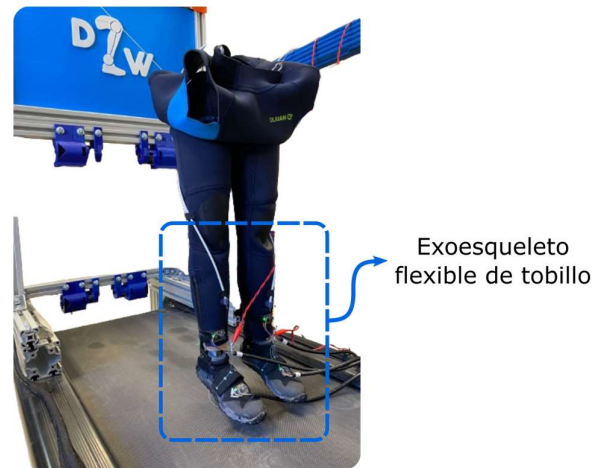


Figura 26. Exoesqueleto flexible montado sobre un “dummy” en el D2W.

Una vez establecida la interconexión física, el sistema de exoesqueleto se vinculó al mensaje de ROS2 que se transmite desde el generador de patrones de marcha de D2W. Esta conexión permitió que la velocidad y el patrón de caminata del D2W influyeran directamente en el ajuste del ángulo del tobillo proporcionado por el exoesqueleto. El resultado fue una modificación en tiempo real del ángulo del tobillo (Figura 27), demostrando efectivamente la escalabilidad y adaptabilidad del D2W. Este logro muestra la capacidad del D2W para incorporar y adaptarse a nuevos módulos, destacando la practicidad de su escalabilidad en aplicaciones robóticas reales.

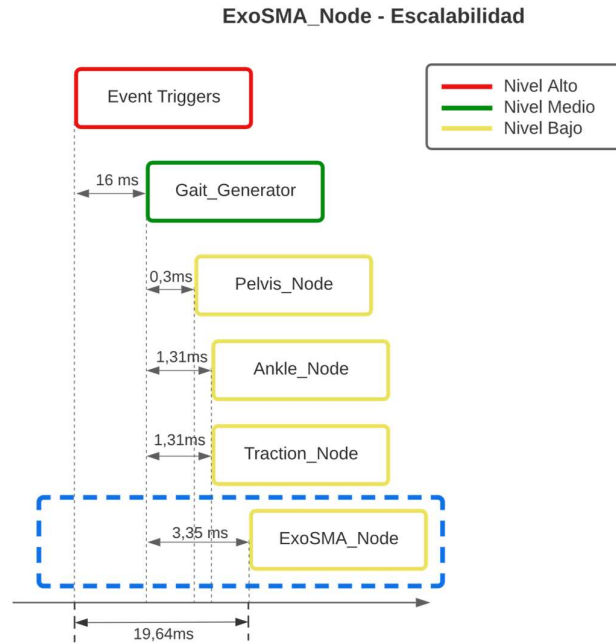


Figura 27. Adición del nodo ExoSMA_Node que se utiliza para gestionar el exoesqueleto flexible.

Poniendo énfasis en la escalabilidad, también se ha incorporado un sistema de Realidad Virtual (RV) al Discover2Walk. Este sistema emplea la tecnología de RV para simular diferentes escenarios de caminata, brindando a los usuarios la sensación de desplazarse por variados entornos sin moverse del sitio (Figura 28). Esta integración se realiza a través de los topics del Discover2Walk en ROS2, facilitando la modificación en tiempo real de variables clave, como la velocidad de caminata, adaptándose de esta manera a las preferencias y necesidades específicas de cada usuario (Gordon Cabello los Cobos et al., 2024).



Figura 28. Ejemplo de escenario de realidad virtual. Se observa un camino por el cual el usuario debe desplazarse y recolectar monedas.

La inclusión de la RV en el Discover2Walk transforma la rehabilitación en una experiencia más atractiva y motivadora. Permite a los usuarios experimentar la caminata en distintos escenarios de manera segura y controlada, lo que favorece su interés y compromiso con el proceso de rehabilitación. Esta metodología innovadora convierte el camino hacia la recuperación en una aventura estimulante, en lugar de en una tarea repetitiva, fomentando así una práctica constante y entusiasta por parte de los pacientes. La RV no solo enriquece el proceso de rehabilitación con entornos seguros y ajustables sino que también ofrece una forma efectiva y divertida de avanzar en la recuperación motora.

Este módulo de Realidad Virtual destaca como un claro ejemplo de la escalabilidad del sistema Discover2Walk. Demuestra la capacidad para incorporar nuevas funcionalidades y tecnologías, ampliando así el espectro de aplicaciones y mejorando la experiencia del usuario. La facilidad con la que este sistema de RV se ha integrado en el marco existente subraya la flexibilidad y el potencial de crecimiento del Discover2Walk, asegurando que pueda adaptarse y evolucionar para satisfacer las demandas emergentes y las innovaciones tecnológicas futuras.

Además, se ha integrado al entorno ROS2 un sistema de reconstrucción tridimensional de la postura, diseñado para complementar el uso del Discover2Walk. Este sistema se vale de dos cámaras y del software de inteligencia artificial MediaPipe, reconocido por su capacidad para reconstruir posturas en 2D. Mediante esta tecnología, transformamos las imágenes captadas en una representación tridimensional gracias a un sistema estéreo con dos cámaras, de la postura del paciente en el Discover2Walk, traduciéndolas a coordenadas reales (Gonzalez-Garcia et al., 2024).

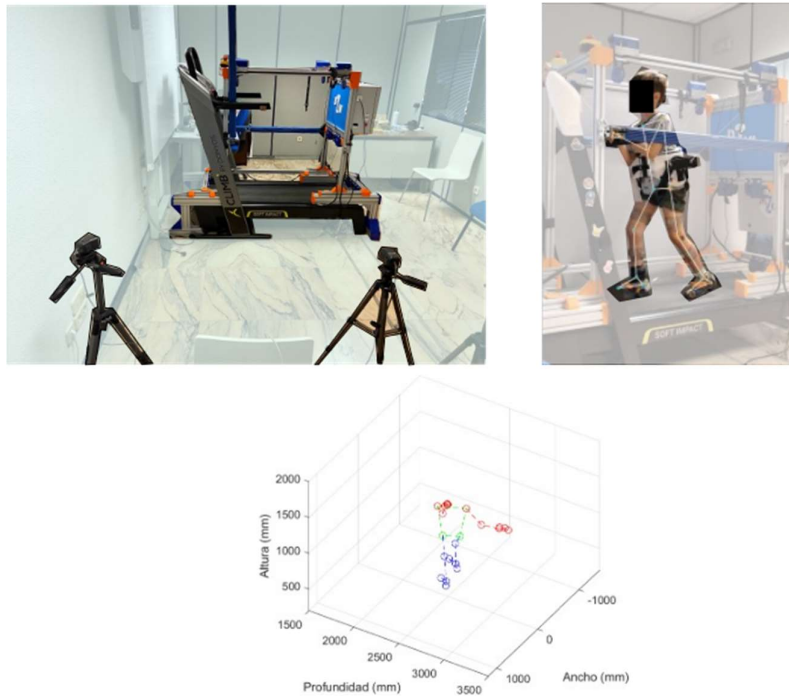


Figura 29. sistema de reconstrucción tridimensional de la postura de la persona sobre el D2W.

Este sistema no solo realiza una reconstrucción 3D de las poses, sino que también lleva a cabo un análisis cinemático en el plano sagital. Este análisis ha demostrado tener una alta correlación, particularmente en lo que respecta a las articulaciones de la cadera y la rodilla, en comparación con Kinovea®, un software previamente establecido en entornos clínicos para tales mediciones.

La información recopilada y procesada por este sistema se comunica a la interfaz gráfica del Discover2Walk mediante un topic en ROS2. Esto permite que los datos del análisis se utilicen como referencia para evaluar el movimiento real que el paciente está realizando dentro del Discover2Walk. De esta manera, se facilita la comparación entre el movimiento esperado y el movimiento real ejecutado por el paciente, permitiendo ajustes más precisos y personalizados en el proceso de rehabilitación. Esta integración enfatiza la capacidad del sistema para proporcionar retroalimentación instantánea y detallada, importante para el avance y la eficacia de la rehabilitación.

A través de la incorporación de sistemas avanzados como la Realidad Virtual y la reconstrucción tridimensional de la postura, el Discover2Walk no solo enriquece la experiencia de rehabilitación, haciéndola más atractiva y motivadora, sino que también demuestra una capacidad única para integrar nuevas funcionalidades de manera fluida y eficiente. La inclusión de estos módulos subraya la flexibilidad del sistema, destacando su aptitud para expandirse y personalizarse, asegurando que el Discover2Walk se mantenga a la vanguardia en la aplicación de soluciones robóticas para la rehabilitación.

3.6. Conclusiones.

Este capítulo ha demostrado la implementación práctica y la validación del marco de control integral propuesto para el sistema robótico Discover2Walk (D2W). Este capítulo ha revelado cómo la arquitectura jerárquica y bioinspirada se traduce en un sistema funcional y efectivo para la rehabilitación de la marcha en niños con parálisis cerebral.

La implementación del D2W, con sus módulos de pelvis, tobillos y tracción, junto con sistemas avanzados de navegación y sensores, ha demostrado la viabilidad de crear un exoesqueleto altamente adaptable y personalizable. La integración exitosa de ROS2 como middleware de comunicación ha permitido una sincronización precisa y una gestión eficiente de datos en tiempo real entre los diferentes niveles del sistema.

Las pruebas de validación han confirmado la robustez del sistema en términos de sincronización, modularidad y escalabilidad. La capacidad del D2W para integrar tecnologías adicionales, como el exoesqueleto flexible de tobillo y el sistema de realidad virtual, subraya su potencial para evolucionar y adaptarse a nuevas necesidades terapéuticas. En conclusión, este capítulo ha presentado un enfoque innovador y comprehensivo para el diseño y desarrollo de exoesqueletos robóticos destinados a la rehabilitación de la marcha en niños con parálisis cerebral. Las principales aportaciones incluyen:

1. Innovación en Rehabilitación Robótica: D2W combina tecnología de punta con un diseño intuitivo y adaptable, ofreciendo una plataforma robusta para la rehabilitación. Su capacidad para imitar una marcha natural y ajustarse a las necesidades individuales del usuario permite una experiencia de rehabilitación personalizada y eficaz, fundamental para el desarrollo físico y cognitivo de los niños.

2. Modularidad y Escalabilidad: Uno de los mayores logros de D2W es su arquitectura modular, que permite la adaptabilidad a nuevas tecnologías y la fácil actualización de sus componentes sin afectar el rendimiento general. La escalabilidad del sistema se ha demostrado a través de la integración exitosa de módulos adicionales como el exoesqueleto de tobillo y la Realidad Virtual, que amplían significativamente sus capacidades y aplicaciones.

3. Integración de Tecnologías Avanzadas: La inclusión de sistemas como la Realidad Virtual y la reconstrucción tridimensional de la postura mediante cámaras y software de inteligencia artificial, como MediaPipe, mejora la interacción del usuario con el sistema. Estas tecnologías no solo proporcionan entornos seguros y controlados para la rehabilitación sino que también ofrecen una plataforma para terapias cognitivas personalizadas, aumentando el compromiso y la motivación del paciente.

4. Robustez del Sistema de Comunicaciones: La implementación de ROS2 y el uso de protocolos como OWAMP para la medición de la latencia han fortalecido la infraestructura de comunicación del D2W, asegurando la sincronización y la eficiencia en la transmisión de datos. Esto es un parámetro importante para el funcionamiento coordinado de los múltiples actuadores y sensores en tiempo real, lo que es fundamental para la precisión del movimiento y la seguridad del usuario.

Estas contribuciones no solo avanzan el campo de la robótica de rehabilitación, sino que también abren nuevas posibilidades para terapias más efectivas y personalizadas.

Capítulo 4

CONCLUSIONES.

El capítulo final de esta tesis destaca la relevancia y los resultados principales de la investigación. Este también proporciona un camino claro para estudios posteriores al detallar ideas para trabajos futuros que podrían continuar o ampliar la investigación actual. Además, se incluye una selección de las publicaciones más relevantes que han surgido de este trabajo académico, demostrando la importante contribución y la excelencia científica de la tesis.

La tesis propone soluciones innovadoras a los problemas identificados en los sistemas de exoesqueletos robóticos, centrandose en las mejoras en tres aspectos cruciales para el avance en el diseño de arquitectura de control biomiméticas: modularidad, escalabilidad y sincronismo. Estas soluciones están diseñadas para mejorar la funcionalidad, la adaptabilidad y la eficacia de los exoesqueletos en diferentes contextos de uso. Para su evaluación, las soluciones propuestas en esta tesis se implementaron en plataforma robótica Discover2Walk. A continuación se detallan las soluciones propuestas, agrupadas por su foco principal:

- Modularidad en el Diseño de Exoesqueletos

La tesis presenta un diseño modular para los exoesqueletos, permitiendo ajustes personalizados que se adaptan a las necesidades específicas de cada usuario. Este enfoque modular facilita la actualización y modificación de los sistemas sin necesidad de rediseños extensivos, optimizando así los costos y tiempos de desarrollo. La modularidad también permite la integración de nuevas tecnologías a medida que estas se desarrollan, manteniendo el sistema al día con los últimos avances en robótica asistiva.

A continuación, se enumeran los principales beneficios del enfoque modular en el diseño de exoesqueletos:

Diseño Modular de Componentes: La arquitectura del sistema D2W es inherentemente modular, lo que permite que cada componente funcione de manera autónoma y pueda ser reemplazado o actualizado sin afectar el resto del sistema. Durante la validación técnica, se demostró que el sistema de

tracción omnidireccional podría ser sustituido por una cinta de correr, manteniendo el rendimiento óptimo del sistema. Esta modularidad es crucial para mantener la flexibilidad y la adaptabilidad del sistema frente a nuevas necesidades o mejoras tecnológicas.

Fácil Actualización y Mantenimiento: La modularidad del sistema facilita las actualizaciones y el mantenimiento. Los desarrolladores pueden actualizar módulos específicos, como los actuadores o los sensores, sin necesidad de rediseñar el sistema completo. Esto reduce los costos y el tiempo de inactividad, asegurando que el sistema pueda evolucionar continuamente con las innovaciones tecnológicas.

Personalización para Usuarios Específicos: La estructura modular permite personalizar el sistema para satisfacer las necesidades individuales de cada usuario. Por ejemplo, los parámetros de modulación de la caminata y las variables antropomórficas del paciente, como peso y altura, pueden ajustarse fácilmente mediante la interfaz gráfica, optimizando la experiencia de rehabilitación para cada usuario.

- Escalabilidad del Marco

Se desarrolla un marco escalable que puede ser aplicado no solo en entornos clínicos para la rehabilitación, sino también en entornos deportivos para entrenamientos de alto nivel. Este enfoque asegura que el sistema pueda expandirse para cubrir un rango más amplio de aplicaciones sin comprometer su eficiencia o necesitar una revisión completa, facilitando así su adaptación a un mercado en crecimiento.

Para demostrar esta funcionalidad, en el marco del sistema Discover2Walk se ha demostrado que el sistema puede integrar un exoesqueleto de tobillo con actuadores de aleación de memoria de forma (SMA), lo que permite ajustes precisos del ángulo del tobillo en tiempo real. Esta capacidad de añadir nuevos componentes destaca la flexibilidad del sistema para adaptarse a nuevas necesidades y avances tecnológicos. Asimismo, se ha integrado un sistema de Realidad Virtual (RV) que simula diferentes escenarios de caminata, proporcionando a los usuarios experiencias inmersivas que pueden personalizarse según sus necesidades terapéuticas. La escalabilidad del software en el sistema D2W permite la inclusión de estas nuevas tecnologías,

ampliando las aplicaciones clínicas y mejorando la motivación y el compromiso de los pacientes durante la rehabilitación.

La arquitectura escalable del sistema ha permitido su uso en una variedad de entornos clínicos y terapéuticos. La integración de nuevas tecnologías y módulos puede ser realizada de manera eficiente, lo que facilita su adopción en distintas configuraciones clínicas y para diversos tipos de pacientes.

- Sincronismo Mejorado en la Coordinación de Componentes

La investigación aborda el desafío de mejorar el sincronismo entre los diversos componentes electrónicos y mecánicos de los exoesqueletos. Se implementan algoritmos avanzados para asegurar que todos los actuadores y sensores operen de manera cohesiva y sincronizada. Este sincronismo es vital para simular de manera precisa la marcha humana, proporcionando un soporte que mejore tanto la seguridad como la experiencia general del usuario.

En la implementación del marco en la plataforma Discover2Walk, he definido un protocolo de sincronización de tiempo (Chrony) y utilizado ROS2, con políticas de Calidad de Servicio (QoS), para asegurar que todos los componentes del sistema funcionen en perfecta armonía. La precisión en la temporización de mensajes y la eficiencia de las frecuencias en los ciclos de control son cruciales para garantizar la coordinación armónica de las funciones del robot. En este estudio, se ha llevado a cabo un análisis detallado de las latencias dentro del sistema utilizando el protocolo OWAMP, lo que permitió medir la latencia y las variaciones en el retardo de manera precisa entre los diferentes componentes del sistema. Estos datos son importantes para ajustar y optimizar la comunicación en tiempo real, asegurando una respuesta rápida y precisa de los actuadores.

La implementación de un middleware como ROS2 ha permitido una comunicación eficiente y sincronizada entre los diferentes niveles jerárquicos del sistema. Durante la validación, se comprobó que la frecuencia de operación de los bucles de control y la gestión de mensajes dentro de ROS2 se mantienen dentro de los parámetros requeridos, garantizando la sincronización en tiempo real de todas las operaciones del sistema.

4.1. Trabajo Futuro

Para continuar avanzando en el desarrollo y perfeccionamiento del sistema Discover2Walk, se plantean las siguientes áreas de trabajo futuro, orientadas específicamente al marco propuesto, la tolerancia a fallas y la evaluación remota:

- Desarrollo de Controladores Inteligentes

Algoritmos Adaptativos de Control: Investigar y desarrollar controladores que utilicen algoritmos adaptativos y aprendizaje automático para ajustar dinámicamente las respuestas del exoesqueleto según las necesidades y el desempeño del usuario.

Implementación de Control Predictivo: Desarrollar controladores predictivos que anticipen las acciones del usuario basándose en patrones de movimiento y datos históricos, mejorando la fluidez y naturalidad de los movimientos asistidos.

- Mejora de la Comunicación y Sincronización

Reducción de Latencia: Continuar optimizando los protocolos de comunicación dentro del marco para reducir la latencia y mejorar la sincronización entre los diferentes componentes. Esto podría incluir la implementación de nuevas tecnologías de red y mejoras en el hardware utilizado.

Monitoreo y Diagnóstico en Tiempo Real: Desarrollar herramientas para el monitoreo y diagnóstico en tiempo real de la comunicación y el rendimiento del sistema, permitiendo detectar y corregir rápidamente cualquier problema de sincronización.

- Desarrollo de Sistemas Tolerantes a Fallas

Implementación de Redundancia: Diseñar y desarrollar sistemas de redundancia que permitan la operación continua del exoesqueleto en caso de fallas de componentes críticos. Esto incluirá la duplicación de cierto hardware, así como la implementación de rutas alternativas de comunicación.

Diagnóstico y Recuperación Automática: Crear algoritmos de diagnóstico que puedan identificar fallas en tiempo real y activar procedimientos de recuperación automática. Estos sistemas deberán ser capaces de reconfigurar el exoesqueleto para mantener su funcionamiento seguro y eficiente, minimizando el impacto de las fallas.

Pruebas de Robustez y Seguridad: Realizar pruebas exhaustivas de robustez y seguridad para asegurar que el sistema pueda manejar situaciones de fallo sin comprometer la seguridad del usuario. Esto incluirá pruebas de estrés y simulaciones de fallas para evaluar la capacidad del sistema para recuperarse de diversos escenarios de fallo.

- Evaluación del Comportamiento del Sistema a Distancia

Pruebas Remotas a través de Internet: Desarrollar una infraestructura que permita realizar pruebas y evaluaciones del sistema desde ubicaciones geográficas distantes a través de Internet. Esto permitirá evaluar el comportamiento del sistema en condiciones reales y variaciones de latencia.

Monitoreo y Ajuste en Tiempo Real: Implementar herramientas que permitan a los ingenieros y terapeutas monitorear y ajustar el sistema en tiempo real desde diferentes puntos geográficos, mejorando la flexibilidad y la capacidad de respuesta del sistema a las necesidades del usuario.

Estudio del Impacto de la Latencia en el Rendimiento: Llevar a cabo estudios detallados sobre cómo diferentes niveles de latencia y condiciones de red afectan el rendimiento del sistema. Esto ayudará a identificar y mitigar los posibles problemas que puedan surgir en un entorno de uso distribuido.

- Aplicación del Marco a Varios Exoesqueletos

Evaluación Comparativa: Aplicar el marco propuesto a diferentes modelos de exoesqueletos y realizar evaluaciones comparativas para determinar su rendimiento y adaptabilidad en distintos contextos de uso. Esto permitirá identificar las fortalezas y debilidades del marco y realizar mejoras basadas en datos empíricos.

Estudios de Caso en Diversos Entornos Clínicos: Implementar y evaluar el marco en diversos entornos clínicos y con diferentes tipos de pacientes,

recopilando datos que permitan ajustar y optimizar el sistema para una variedad más amplia de usuarios y condiciones médicas.

- Desarrollo y Publicación de un Paquete de Modelo ROS2

Creación de un Paquete de Modelo: Desarrollar un paquete de modelo basado en ROS2 que encapsule las mejores prácticas y algoritmos desarrollados durante la investigación. Este paquete facilitará la implementación y adaptación del marco a diferentes proyectos y dispositivos de exoesqueletos.

Publicación y Difusión: Publicar el paquete de modelo en repositorios de código abierto y difundirlo a través de la red de investigación, permitiendo a otros investigadores y desarrolladores analizar, utilizar y mejorar el marco. Esto fomentará la colaboración y acelerará el desarrollo de tecnologías de rehabilitación robótica.

4.2. Futuras Líneas de Investigación

- Ampliación del Marco para Nuevas Aplicaciones

Aplicaciones en Rehabilitación de Otras Condiciones: Explorar cómo el marco puede ser adaptado para la rehabilitación de otras condiciones neurológicas y físicas, incluyendo la creación de módulos específicos para estas nuevas aplicaciones.

Integración con Dispositivos Médicos Complementarios: Investigar la integración del marco con otros dispositivos médicos y de rehabilitación, creando un ecosistema de terapia más completo y eficiente.

- Desarrollo de Materiales y Tecnologías Innovadoras

Nuevos Materiales para Componentes de la plataforma robótica D2W: Investigar el uso de materiales avanzados que mejoren la durabilidad y el rendimiento de los componentes de la plataforma robótica, reduciendo el peso y aumentando la comodidad para el usuario.

Tecnologías de Sensado Avanzado: Desarrollar e integrar sensores avanzados que proporcionen datos más precisos y detallados sobre el estado del usuario y del exoesqueleto, mejorando la capacidad del marco para adaptarse a diferentes situaciones.

- Evaluaciones Clínicas y Retroalimentación

Rehabilitación Multimodal: Investigar cómo el sistema puede ser utilizado no solo para la rehabilitación motora sino también para la rehabilitación cognitiva y emocional, explorando su impacto en la neuroplasticidad y el bienestar general de los usuarios.

Estudios Clínicos a Largo Plazo: Llevar a cabo estudios clínicos longitudinales para evaluar los beneficios a largo plazo del uso del exoesqueleto en diferentes condiciones neurológicas y físicas, proporcionando datos sólidos que respalden su eficacia y seguridad. Además para evaluar el impacto del marco en la rehabilitación, proporcionando datos que permitan mejorar continuamente el diseño y la funcionalidad del sistema.

Incorporación de Retroalimentación del Usuario: Desarrollar métodos para recoger y analizar la retroalimentación de los usuarios sobre su experiencia con el sistema, utilizando esta información para hacer ajustes y mejoras continuas.

- Desarrollo de Ecosistemas de Rehabilitación

Integración con Otros Dispositivos Médicos: Investigar la posibilidad de integrar el exoesqueleto con otros dispositivos médicos y de rehabilitación para crear un ecosistema completo de terapia que ofrezca soluciones más holísticas y eficaces.

Plataformas de Telemedicina: Desarrollar plataformas de telemedicina que permitan a los terapeutas monitorear y ajustar el tratamiento a distancia, mejorando el acceso a la rehabilitación de alta calidad para pacientes en ubicaciones remotas.

Estas propuestas de trabajo futuro y nuevas líneas de investigación tienen como objetivo no solo mejorar la funcionalidad y eficacia del sistema Discover2Walk y su marco subyacente, sino también expandir su aplicabilidad y beneficios a un mayor número de usuarios, contribuyendo al avance del campo de la rehabilitación robótica.

4.3. Publicaciones.

Esta tesis, enfocada en el desarrollo y evaluación de una arquitectura bioinspirada para exoesqueletos de extremidades inferiores, me han permitido trabajar en diversos campos de la robótica. Esto se refleja en las contribuciones científicas realizadas, las cuales son un indicador de la calidad presentada en este libro. A continuación, se enumeran las principales publicaciones generadas, clasificadas según el tipo de difusión.

4.3.1. Revistas

Delgado-Oleas, G., Romero-Sorozabal, P., Lora-Millan, J., Gutierrez, A., & Rocon, E. (2023). Bioinspired Hierarchical Electronic Architecture for Robotic Locomotion Assistance: Application in Exoskeletons. *IEEE Access*, 11, 131610-131622.

Delgado-Oleas, G., Romero-Sorozabal, P., Lora-Millan, J., Gutierrez, A., & Rocon, E. (2023). Diseño y desarrollo de una arquitectura electrónica bioinspirada para el control de sistemas de asistencia a la locomoción. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 20(3), 293-302.

Romero-Sorozábal, P., **Delgado-Oleas, G.**, Laudanski, A. F., Gutiérrez, Á., & Rocon, E. (2024). Novel Methods for Personalized Gait Assistance: Three-Dimensional Trajectory Prediction Based on Regression and LSTM Models. *Biomimetics*, 9(6), 352.

4.3.2. Conferencias.

G. Delgado-Oleas, P. Romero, V. Palomino-Díaz, J. Lora-Millán, A. Gutiérrez, C. Martín, I. Martín and E. Rocon.(2022, May) Diseño conceptual de una Arquitectura Electrónica Bioinspirada para el control de sistemas de asistencia a la Locomoción XIII Simposio CEA de Bioingeniería.

Romero-Sorozabal, P., **Delgado-Oleas, G.**, Gutiérrez, Á., & Rocon, E. (2023, September). Individualized three-dimensional gait pattern generator for lower limbs rehabilitation robots. In 2023 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR) (pp. 1-6). IEEE.

Romero-Sorozábal, P., Delgado-Oleas, G., Gutierrez, Á., & Rocon, E. (2023). Generador de patrones de marcha tridimensionales dependientes de la altura y la velocidad. In XLIV Jornadas de Automática (pp. 105-109). Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións.

Sorozabal, P., Delgado-Oleas, G., Gutiérrez, Á., & Rocon, E. (2022). Generador de patrones de marcha tridimensionales dependientes de la velocidad para el control de exoesqueletos. In XLIII Jornadas de Automática (pp. 128-133). Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións.

Palomino-Díaz, V., Romero-Sorozábal, P., Delgado-Oleas, G., & Martín, C. (2021). Diseño conceptual de una plataforma robótica para ayudar a que los niños con parálisis cerebral descubran como caminar. In XII Simposio CEA de Bioingeniería (pag. 83).

Romero Sorozabal, P., Delgado-Oleas, G., Laudanski, A. F., Gutierrez, A., & Rocon, E. (2024). Discover2Walk: A cable-driven robotic platform to promote gait in pediatric population. *En 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE. [*Aceptado para publicación*].

4.4. Colaboración en líneas de investigación.

A lo largo de mi trayectoria investigativa, he tenido la oportunidad de colaborar en diversos proyectos de investigación. Estas colaboraciones han permitido ampliar el alcance y la profundidad de mis investigaciones en robótica y exoesqueletos. A continuación, se presentan algunas de las publicaciones más destacadas.

4.4.1. Revistas.

Avellar, L., Stefano Filho, C., Delgado-Oleas, G., Frizera, A., Rocon, E., & Leal-Junior, A. (2022). AI-enabled photonic smart garment for movement analysis. *Scientific reports*, 12(1), 4067.

Bayón, C., Delgado-Oleas, G., Avellar, L., Bentivoglio, F., Di Tommaso, F., Tagliamonte, N. L., ... & van Asseldonk, E. H. (2021). Development and evaluation of benchbalance: a system for benchmarking balance capabilities of wearable robots and their users. *Sensors*, 22(1), 119.

Lora-Millan, J. S., **Delgado-Oleas, G.**, Benito-León, J., & Rocon, E. (2021). A review on wearable technologies for tremor suppression. *Frontiers in neurology*, 12, 700600.

Avellar, L., **Delgado-Oleas, G.**, Marques, C., Frizera, A., Leal-Junior, A., & Rocon, E. (2021). Polymer optical fiber-based smart garment for impact identification and balance assessment. *IEEE Sensors Journal*, 21(18), 20078-20085.

Avellar, L., **Delgado-Oleas, G.**, Rocon, E., Marques, C., Frizera, A., & Leal-Junior, A. (2021). Polymer Optical Fiber-Embedded Force Sensor System for Assistive Devices With Dynamic Compensation. *IEEE Sensors Journal*, 21(12), 13255-13262.

Valenzuela-López, L., Moreno-Verdú, M., Alvarez, R., **Delgado-Oleas, G.**, Mesa, L. S., Arroyo-Ferrer, A., ... & Romero, J. P. (2024). AMBER: a device for hand motor and cognitive rehabilitation. Development and Proof of Concept. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*.

4.4.2. Conferencias.

Delgado-Oleas, Gabriel; Munhoz-Avellar, Leticia; Romero-Sorozabal, Pablo; Bayón, Cristina; Bentivoglio, Francesca; Tagliamonte, Nevio; van Asseldonk, Edwin H.F.; Rocon, Eduardo. (2021). Desarrollo de un sistema para la cuantificación de la estabilidad y equilibrio con exoesqueletos de miembro inferior. In XII Simposio CEA de Bioingeniería (pag. 146).

Delgado-Oleas, G., Avellar, L., Stefano Filho, C. A., Neto, A. F., Junior, A. L., & de Lima, E. R. (2022). Análisis de movimiento mediante textil inteligente. In XLIII Jornadas de Automática: libro de actas: 7, 8 y 9 de septiembre de 2022, Logroño (La Rioja) (pp. 66-70). Servicio de Publicacións.

Sorozabal, Pablo; **Delgado-Oleas, Gabriel**; J. Gil-Castillo; J. Pina de Paz; A. del-Ama; J.C. Moreno; Lerma, Sergio; Rocon, Eduardo. (2021). Terapia robótica híbrida para la rehabilitación motora de niños con parálisis cerebral. In XII Simposio CEA de Bioingeniería (pag. 140).

Bayón, C., **Delgado-Oleas, G.**, Tagliamonte, N. L., Asseldonk, E. V., & Rocon, E. (2021). Desarrollo de BenchBalance: un sistema para la evaluación de la

capacidad de equilibrio en exoesqueletos robóticos. In XLII Jornadas de Automática (pp. 99-103). Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións.

Martínez-Sánchez, J.C., **Delgado-Oleas, G.**, Lora-Millan, J., Rocon, E. 2023. Diseño de sensores de fuerza basados en Velostat para medida de la presión plantar Jornadas Nacionales de Robótica y Bioingeniería 2023, 245-250. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.74896>.

Gordon-Cabello de los Cobos, A. R., Lorenzo-Pérez, M., **Delgado-Oleas, G.**, Romero-Sorozabal, P., Ramos, M. C., & de Rocon, E. (2024). Integración de Inteligencia Artificial Generativa en Entornos de Realidad Virtual para la Robótica de Rehabilitación. In Actas del Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador: Badajoz, 29 a 31 de mayo de 2024 (pp. 229-232).

Gonzalez-Garcia, M. Romero-Sorozabal, P., **Delgado-Oleas, G.**, Rocon, E., (2024). Sistema de visión por computador para análisis de la marcha. In Actas del Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador: Badajoz, 29 a 31 de mayo de 2024 (pp. 203-208).

4.4.3. Patentes

Título: “HAND DEVICE FOR EVALUATING AND RECOVERING AFFECTED COGNITIVE AND MOTOR FUNCTIONS.”

Número de Aplicación y Fecha: 300470544 , Diciembre 21, 2022.

Número de Publicación: EP22383249.4

Inventores: Juan Pablo Romero, Roberto Álvarez Fernández, Laura Valenzuela López, Rodrigo Martínez, **Gabriel Alfonso Delgado Oleas.**

Bibliografía

- Akkawutvanich, C., & Manoonpong, P. (2023a). Personalized Symmetrical and Asymmetrical Gait Generation of a Lower-limb Exoskeleton. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *XX(X)*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/tii.2023.3234619>
- Akkawutvanich, C., & Manoonpong, P. (2023b). Personalized Symmetrical and Asymmetrical Gait Generation of a Lower-limb Exoskeleton. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *XX(X)*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/tii.2023.3234619>
- Baud, R., Manzoori, A. R., Ijspeert, A., & Bouri, M. (2021). Review of control strategies for lower-limb exoskeletons to assist gait. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *18(1)*, 1–34. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00906-3>
- Bayon, C., Ramirez, O., Del Castillo, M. D., Serrano, J. I., Raya, R., Belda-Lois, J. M., Poveda, R., Molla, F., Martin, T., Martinez, I., Lerma Lara, S., & Rocon, E. (2016a). CPWalker: Robotic platform for gait rehabilitation in patients with Cerebral Palsy. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016-June*, 3736–3741. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487561>
- Bayon, C., Ramirez, O., Del Castillo, M. D., Serrano, J. I., Raya, R., Belda-Lois, J. M., Poveda, R., Molla, F., Martin, T., Martinez, I., Lerma Lara, S., & Rocon, E. (2016b). CPWalker: Robotic platform for gait rehabilitation in patients with Cerebral Palsy. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016-June*, 3736–3741. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487561>
- Bayón, C., Ramírez, O., Serrano, J. I., Castillo, M. D. D., Pérez-Somarriba, A., Belda-Lois, J. M., Martínez-Caballero, I., Lerma-Lara, S., Cifuentes, C., Frizera, A., & Rocon, E. (2017). Development and evaluation of a novel robotic platform for gait rehabilitation in patients with Cerebral Palsy: CPWalker. *Robotics and Autonomous Systems*, *91*, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.12.015>
- Blaya, J. A., & Herr, H. (2004a). Adaptive Control of a Variable-Impedance Ankle-Foot Orthosis to Assist Drop-Foot Gait. *IEEE Transactions on*

- Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 12(1), 24–31.
<https://doi.org/10.1109/TNSRE.2003.823266>
- Blaya, J. A., & Herr, H. (2004b). Adaptive Control of a Variable-Impedance Ankle-Foot Orthosis to Assist Drop-Foot Gait. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 12(1), 24–31.
<https://doi.org/10.1109/TNSRE.2003.823266>
- Bortole, M., Venkatakrishnan, A., Zhu, F., Moreno, J. C., Francisco, G. E., Pons, J. L., & Contreras-Vidal, J. L. (2015a). The H2 robotic exoskeleton for gait rehabilitation after stroke: Early findings from a clinical study Wearable robotics in clinical testing. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 12(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12984-015-0048-y>
- Bortole, M., Venkatakrishnan, A., Zhu, F., Moreno, J. C., Francisco, G. E., Pons, J. L., & Contreras-Vidal, J. L. (2015b). The H2 robotic exoskeleton for gait rehabilitation after stroke: Early findings from a clinical study Wearable robotics in clinical testing. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 12(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12984-015-0048-y>
- Brown, T. G. (1914). On the nature of the fundamental activity of the nervous centres; together with an analysis of the conditioning of rhythmic activity in progression, and a theory of the evolution of function in the nervous system. *The Journal of Physiology*, 48(1), 18.
<https://doi.org/10.1113/JPHYSIOL.1914.SP001646>
- Chen, G., Chan, C. K., Guo, Z., & Yu, H. (2013). A review of lower extremity assistive robotic exoskeletons in rehabilitation therapy. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 41(4–5), 343–363.
<https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.2014010453>
- Chen, J., Hochstein, J., Kim, C., Tucker, L., Hammel, L. E., Damiano, D. L., & Bulea, T. C. (2021a). A Pediatric Knee Exoskeleton With Real-Time Adaptive Control for Overground Walking in Ambulatory Individuals With Cerebral Palsy. *Frontiers in Robotics and AI*, 8(June), 1–16.
<https://doi.org/10.3389/frobt.2021.702137>
- Chen, J., Hochstein, J., Kim, C., Tucker, L., Hammel, L. E., Damiano, D. L., & Bulea, T. C. (2021b). A Pediatric Knee Exoskeleton With Real-Time Adaptive Control for Overground Walking in Ambulatory Individuals With Cerebral Palsy. *Frontiers in Robotics and AI*, 8(June), 1–16.
<https://doi.org/10.3389/frobt.2021.702137>

- Dietz, V. (2003). Spinal cord pattern generators for locomotion. *Clinical Neurophysiology*, 114(8), 1379–1389. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(03\)00120-2](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(03)00120-2)
- Dimitrijevic, M. R., & Larsson, L. E. (1981). Neural control of gait: clinical neurophysiological aspects. *Applied Neurophysiology*, 44(1–3), 152–159. <https://doi.org/10.1159/000102195>
- Dollar, A. M., & Herr, H. (2008). Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, 24(1). <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.915453>
- Eguren, D., Cestari, M., Luu, T. P., Kilicarslan, A., Steele, A., & Contreras-Vidal, J. L. (2019a). Design of a customizable, modular pediatric exoskeleton for rehabilitation and mobility. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2019-Octob*, 2411–2416. <https://doi.org/10.1109/SMC.2019.8914629>
- Eguren, D., Cestari, M., Luu, T. P., Kilicarslan, A., Steele, A., & Contreras-Vidal, J. L. (2019b). Design of a customizable, modular pediatric exoskeleton for rehabilitation and mobility. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2019-Octob*, 2411–2416. <https://doi.org/10.1109/SMC.2019.8914629>
- Elbarrany, W. G., & Altaf, F. M. (2017). The Tibial Nerve and Its Vasculature: An Anatomical Evaluation. *International Journal of Morphology*, 35(3), 812–819. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022017000300004>
- Estrada, N., & Astudillo, H. (2015). Comparing scalability of message queue system: ZeroMQ vs RabbitMQ. *Proceedings - 2015 41st Latin American Computing Conference, CLEI 2015*. <https://doi.org/10.1109/CLEI.2015.7360036>
- Farris, R. J., Quintero, H. A., & Goldfarb, M. (2011). *Preliminary Evaluation of a Powered Lower Limb Orthosis to Aid Walking in Paraplegic Individuals*. <https://doi.org/10.1109/TNSRE>
- Frigon, A., & Rossignol, S. (2006). Functional plasticity following spinal cord lesions. *Progress in Brain Research*, 157. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(06\)57016-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(06)57016-5)
- Gonzalez-Garcia, M., Romero-Sorozabal, P., Delgado-Oleas, G., & Rocon, E. (2024). Sistema de visión por computador para análisis de la marcha.

- Actas Del Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión Por Computador : Badajoz, 29 a 31 de Mayo de 2024, 2024, ISBN 978-84-9127-262-5, Págs. 203-208, 203–208.*
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9586877>
- Gordon Cabello los Cobos, A. R., Lorenzo Pérez, M., Delgado Oleas, G., Romero Sorozabal, P., Cebrián Ramos, M., & Rocón de Lima, E. (2024). Integración de Inteligencia Artificial Generativa en Entornos de Realidad Virtual para la Robótica de Rehabilitación. *Actas Del Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión Por Computador : Badajoz, 29 a 31 de Mayo de 2024, 2024, ISBN 978-84-9127-262-5, Págs. 229-232, 229–232.*
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9586873>
- Guertin, P. A. (2009). The mammalian central pattern generator for locomotion. *Brain Research Reviews*, 62(1), 45–56.
<https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2009.08.002>
- Ionescu, V. M. (2015). The analysis of the performance of RabbitMQ and ActiveMQ. *2015 14th RoEduNet International Conference - Networking in Education and Research, RoEduNet NER 2015 - Proceedings*, 132–137. <https://doi.org/10.1109/ROEDUNET.2015.7311982>
- Kandel, E., Schwartz, J., Jessell, T., Siegelbaum, S., Hudspeth, A. J., Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., & Siegelbaum, S. A. (2012). Principles of Neural Science, Fifth Edition (Principles of Neural Science (Kandel)). In *Principles of Neural Science*.
- Kawamoto, H., Hayashi, T., Sakurai, T., Eguchi, K., & Sankai, Y. (2009a). Development of single leg version of HAL for hemiplegia. *Proceedings of the 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: Engineering the Future of Biomedicine, EMBC 2009*, 5038–5043. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5333698>
- Kawamoto, H., Hayashi, T., Sakurai, T., Eguchi, K., & Sankai, Y. (2009b). Development of single leg version of HAL for hemiplegia. *Proceedings of the 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: Engineering the Future of Biomedicine, EMBC 2009*, 5038–5043. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5333698>
- Kirtley, C. (2006). Clinical gait analysis: Theory and practice. *Clinical Gait Analysis: Theory and Practice*, 1–316.

- Kosinski, R. J. (2010). A Literature Review on Reaction Time. *Retrieved HttpbiaeclemsonedubpcbpLab110reactionhtm 06042010, 10*(August), 2006. <http://biology.clemson.edu/bpc/bp/Lab/110/reaction.htm>
- Kreps, J., Corp, L., Narkhede, N., & Rao, J. (2011). *Kafka: a Distributed Messaging System for Log Processing*.
- Laubscher, C. A., Farris, R. J., & Sawicki, J. T. (2017a). Design and preliminary evaluation of a powered pediatric lower limb orthosis. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, 5A-2017*, 1–9. <https://doi.org/10.1115/DETC2017-67599>
- Laubscher, C. A., Farris, R. J., & Sawicki, J. T. (2017b). Design and preliminary evaluation of a powered pediatric lower limb orthosis. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, 5A-2017*, 1–9. <https://doi.org/10.1115/DETC2017-67599>
- Lemon, R. N. (2008). Descending pathways in motor control. *Annual Review of Neuroscience*, *31*, 195–218. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.NEURO.31.060407.125547>
- Lerner, Z. F., Damiano, D. L., & Bulea, T. C. (2017a). A lower-extremity exoskeleton improves knee extension in children with crouch gait from cerebral palsy. *Science Translational Medicine*, *9*(404). https://doi.org/10.1126/SCITRANSLMED.AAM9145/SUPPL_FILE/AAM9145_TABLE_S2.ZIP
- Lerner, Z. F., Damiano, D. L., & Bulea, T. C. (2017b). A lower-extremity exoskeleton improves knee extension in children with crouch gait from cerebral palsy. *Science Translational Medicine*, *9*(404). https://doi.org/10.1126/SCITRANSLMED.AAM9145/SUPPL_FILE/AAM9145_TABLE_S2.ZIP
- Letz, R., & Gerr, F. (1994). Covariates of human peripheral nerve function: I. Nerve conduction velocity and amplitude. *Neurotoxicology and Teratology*, *16*(1), 95–104. [https://doi.org/10.1016/0892-0362\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0892-0362(94)90014-0)
- Lora-Millan, J. S., Moreno, J. C., & Rocon, E. (2022). Coordination Between Partial Robotic Exoskeletons and Human Gait: A Comprehensive Review on Control Strategies. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *10*, 819. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2022.842294/BIBTEX>

- Marder, E., & Bucher, D. (2001). Central pattern generators and the control of rhythmic movements. *Current Biology*, *11*(23), R986–R996. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(01\)00581-4](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(01)00581-4)
- Maruyama, Y., Kato, S., & Azumi, T. (2016). Exploring the performance of ROS2. *Proceedings of the 13th International Conference on Embedded Software, EMSOFT 2016*. <https://doi.org/10.1145/2968478.2968502>
- Mayag, L. J. A., Múnera, M., & Cifuentes, C. A. (2022a). Human-in-the-Loop Control for AGoRA Unilateral Lower-Limb Exoskeleton. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, *104*(1). <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01487-y>
- Mayag, L. J. A., Múnera, M., & Cifuentes, C. A. (2022b). Human-in-the-Loop Control for AGoRA Unilateral Lower-Limb Exoskeleton. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, *104*(1). <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01487-y>
- Meijneke, C., Van Oort, G., Sluiter, V., Van Asseldonk, E., Tagliamonte, N. L., Tamburella, F., Pisotta, I., Masciullo, M., Arquilla, M., Molinari, M., Wu, A. R., Dzeladini, F., Ijspeert, A. J., & Van Der Kooij, H. (2021a). Symbitron Exoskeleton: Design, Control, and Evaluation of a Modular Exoskeleton for Incomplete and Complete Spinal Cord Injured Individuals. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *29*, 330–339. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2021.3049960>
- Meijneke, C., Van Oort, G., Sluiter, V., Van Asseldonk, E., Tagliamonte, N. L., Tamburella, F., Pisotta, I., Masciullo, M., Arquilla, M., Molinari, M., Wu, A. R., Dzeladini, F., Ijspeert, A. J., & Van Der Kooij, H. (2021b). Symbitron Exoskeleton: Design, Control, and Evaluation of a Modular Exoskeleton for Incomplete and Complete Spinal Cord Injured Individuals. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *29*, 330–339. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2021.3049960>
- Meuleman, J., Van Asseldonk, E., Van Oort, G., Rietman, H., & Van Der Kooij, H. (2016a). LOPES II - Design and Evaluation of an Admittance Controlled Gait Training Robot with Shadow-Leg Approach. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *24*(3), 352–363. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2015.2511448>
- Meuleman, J., Van Asseldonk, E., Van Oort, G., Rietman, H., & Van Der Kooij, H. (2016b). LOPES II - Design and Evaluation of an Admittance

- Controlled Gait Training Robot with Shadow-Leg Approach. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 24(3), 352–363. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2015.2511448>
- Mohd Adib, M. A. H., Han, S. Y., Ramani, P. R., You, L. J., Yan, L. M., Mat Sahat, I., & Mohd Hasni, N. H. (2019a). Restoration of Kids Leg Function Using Exoskeleton Robotic Leg (ExRoLEG) Device. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 538, 335–342. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3708-6_28
- Mohd Adib, M. A. H., Han, S. Y., Ramani, P. R., You, L. J., Yan, L. M., Mat Sahat, I., & Mohd Hasni, N. H. (2019b). Restoration of Kids Leg Function Using Exoskeleton Robotic Leg (ExRoLEG) Device. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 538, 335–342. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3708-6_28
- Morton, S. M., & Bastian, A. J. (2004). Cerebellar control of balance and locomotion. *The Neuroscientist: A Review Journal Bringing Neurobiology, Neurology and Psychiatry*, 10(3), 247–259. <https://doi.org/10.1177/1073858404263517>
- Nakazawa, K., Obata, H., & Sasagawa, S. (2012). Neural control of human gait and posture. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 1(2), 263–269. <https://doi.org/10.7600/jpfs.1.263>
- Navarro, M., Copaci, P. ;, Rojas, B., & Design, D. (2024). Design and Control of a Soft Knee Exoskeleton for Pediatric Patients at Early Stages of the Walking Learning Process. *Bioengineering 2024, Vol. 11, Page 188, 11(2)*, 188. <https://doi.org/10.3390/BIOENGINEERING11020188>
- Orlovsky, G. N., Deliagina, T., & Grill, S. (1999). Neuronal Control Of Locomotion: From Mollusc To Man (Oxford Neuroscience). *Oxford University Press, Oxford*. <http://isbn.im/download/0198524056.pdf%5Cnpapers3://publication/uuid/CAE3E833-6B0E-4BAD-91E0-F8F973BC6FC8>
- Park, J., Delgado, R., & Choi, B. W. (2020). Real-Time Characteristics of ROS 2.0 in Multiagent Robot Systems: An Empirical Study. *IEEE Access*, 8, 154637–154651. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3018122>
- Patané, F., Rossi, S., Del Sette, F., Taborri, J., & Cappa, P. (2017a). WAKE-Up Exoskeleton to Assist Children With Cerebral Palsy: Design and Preliminary Evaluation in Level Walking. *IEEE Transactions on Neural*

- Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(7), 906–916.
<https://doi.org/10.1109/TNSRE.2017.2651404>
- Patané, F., Rossi, S., Del Sette, F., Taborri, J., & Cappa, P. (2017b). WAKE-Up Exoskeleton to Assist Children With Cerebral Palsy: Design and Preliminary Evaluation in Level Walking. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(7), 906–916.
<https://doi.org/10.1109/TNSRE.2017.2651404>
- Pearson, K. G. (2000). Neural adaptation in the generation of rhythmic behavior. *Annual Review of Physiology*, 62, 723–753.
<https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PHYSIOL.62.1.723>
- Perry, J. (1992). Gait Analysis. In *Handbook of Clinical Neurology*.
- Pratt, J. E., Krupp, B. T., Morse, C. J., & Collins, S. H. (2004a). The RoboKnee: An exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004(3), 2430–2435.
<https://doi.org/10.1109/robot.2004.1307425>
- Pratt, J. E., Krupp, B. T., Morse, C. J., & Collins, S. H. (2004b). The RoboKnee: An exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004(3), 2430–2435.
<https://doi.org/10.1109/robot.2004.1307425>
- Prochazka, A., & Ellaway, P. (2012). Sensory systems in the control of movement. *Comprehensive Physiology*, 2(4), 2615–2627.
<https://doi.org/10.1002/cphy.c100086>
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Katz, L. C., LaMantia, A.-S., McNamara, J. O., & Williams, S. M. (2001). Neuroscience. *Sinauer Associates, Inc.*, 1–2. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10799/>
- Quigley, M., Gerkey, B., Conley, K., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Berger, E., Wheeler, R., & Ng, A. (n.d.). *ROS: an open-source Robot Operating System*. Retrieved October 20, 2022, from <http://stair.stanford.edu>
- Romero-Sorozábal, P., Delgado-Oleas, G., Laudanski, A. F., Gutiérrez, Á., & Rocon, E. (2024). Novel Methods for Personalized Gait Assistance: Three-Dimensional Trajectory Prediction Based on Regression and LSTM

- Models. *Biomimetics* 2024, Vol. 9, Page 352, 9(6), 352.
<https://doi.org/10.3390/BIOMIMETICS9060352>
- Ronsse, R., Vitiello, N., Lenzi, T., Van Den Kieboom, J., Carrozza, M. C., & Ijspeert, A. J. (2011). Human-Robot synchrony: Flexible assistance using adaptive oscillators. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 58(4), 1001–1012. <https://doi.org/10.1109/TBME.2010.2089629>
- Rose, J., & Gamble, J. (2006). Human walking. ed. In *Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins*. <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA75302639>
- Sanz-merodio, D., Sancho, J., & Erez, M. P. (2020a). *of the Atlas 2020 Lower-Limb Active Orthosis*. 860–868.
- Sanz-merodio, D., Sancho, J., & Erez, M. P. (2020b). *of the Atlas 2020 Lower-Limb Active Orthosis*. 860–868.
- Shalunov, S., Teitelbaum, B., Karp, A., Boote, J., & Zekauskas, M. (2006). *A One-way Active Measurement Protocol (OWAMP)*. <https://doi.org/10.17487/RFC4656>
- Sherrington, C. S. (1910). Flexion-reflex of the limb, crossed extension-reflex, and reflex stepping and standing. *The Journal of Physiology*, 40(1–2), 28–121. <https://doi.org/10.1113/JPHYSIOL.1910.SP001362>
- T, S., & K, S. N. (2019). *A study on Modern Messaging Systems- Kafka, RabbitMQ and NATS Streaming*. <https://arxiv.org/abs/1912.03715v1>
- Takakusaki, K. (2013). Neurophysiology of gait: From the spinal cord to the frontal lobe. *Movement Disorders*, 28(11), 1483–1491. <https://doi.org/10.1002/MDS.25669>
- Takakusaki, K. (2017). Functional Neuroanatomy for Posture and Gait Control. *Journal of Movement Disorders*, 10(1), 1–17. <https://doi.org/10.14802/jmd.16062>
- Thangavel, D., Ma, X., Valera, A., Tan, H. X., & Tan, C. K. Y. (2014). Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware. *IEEE ISSNIP 2014 - 2014 IEEE 9th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ISSNIP.2014.6827678>
- Tucker, M. R., Olivier, J., Pagel, A., Bleuler, H., Bouri, M., Lamercy, O., Del Millán, J. R., Riener, R., Vallery, H., & Gassert, R. (2015). Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: A review.

- Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 12(1).
<https://doi.org/10.1186/1743-0003-12-1>
- Varol, H. A., Sup, F., & Goldfarb, M. (2010). Multiclass real-time intent recognition of a powered lower limb prosthesis. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 57(3), 542–551.
<https://doi.org/10.1109/TBME.2009.2034734>
- Vaughan, C. L., Davis, B., & O'Connor, J. (1999). *Dynamics of Human Gait*.
- Vernon, P. A., & Mori, M. (1992). Intelligence, reaction times, and peripheral nerve conduction velocity. *Intelligence*, 16(3–4), 273–288.
[https://doi.org/10.1016/0160-2896\(92\)90010-O](https://doi.org/10.1016/0160-2896(92)90010-O)
- Wang, S., Meijneke, C., & Van Der Kooij, H. (2013a). Modeling, design, and optimization of Mindwalker series elastic joint. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, June.
<https://doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650381>
- Wang, S., Meijneke, C., & Van Der Kooij, H. (2013b). Modeling, design, and optimization of Mindwalker series elastic joint. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, June.
<https://doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650381>
- Wang, S., Wang, L., Meijneke, C., Van Asseldonk, E., Hoellinger, T., Cheron, G., Ivanenko, Y., La Scaleia, V., Sylos-Labini, F., Molinari, M., Tamburella, F., Pisotta, I., Thorsteinsson, F., Ilzkovitz, M., Gancet, J., Nevatia, Y., Hauffe, R., Zanow, F., & Van Der Kooij, H. (2015). Design and Control of the MINDWALKER Exoskeleton. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 23(2), 277–286.
<https://doi.org/10.1109/TNSRE.2014.2365697>
- Whittle, Michael. (2007). Gait Analysis: An introduction. In *Elsevier*.
- Wichmann, T., & DeLong, M. R. (2003). Pathophysiology of Parkinson's disease: the MPTP primate model of the human disorder. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 991, 199–213.
<https://doi.org/10.1111/J.1749-6632.2003.TB07477.X>
- Winter, D. A. (2009). Biomechanics and Motor Control of Human Movement: Fourth Edition. In *Biomechanics and Motor Control of Human Movement: Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1002/9780470549148>

- Woods, D. L., Wyma, J. M., Yund, E. W., Herron, T. J., & Reed, B. (2015). Factors influencing the latency of simple reaction time. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(MAR), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00131>
- Young, A. J., & Ferris, D. P. (2017). State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(2), 171–182. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2521160>
- Zhang, J., Fiers, P., Witte, K. A., Jackson, R. W., Poggensee, K. L., Atkeson, C. G., & Collins, S. H. (2017). Human-in-the-loop optimization of exoskeleton assistance during walking. *Science (New York, N.Y.)*, 356(6344), 1280–1283. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAL5054>