

Prototipo preliminar de un biotraje ortésico de bajo costo

Design and implementation of a low-cost advanced orthotic biosuit

Fraire Hernández, M. F.^{1*}, Girón Carrillo, J.¹, Dávila Ochoa, E.J.¹, Flores Chaires, L.A.¹, Fraire Frausto, D.T.¹, Delgadillo Escobedo, G.¹, Domínguez Pérez, E.¹, Rodríguez González, B.¹, Alberto-Ayala A.¹

¹Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica. Universidad Autónoma de Zacatecas. Jdn. Juárez #147, 98000 Zacatecas, Zac.

*Corresponding Author: miguelfraire@hotmail.com

Recibido: 14 de enero de 2025

Aceptado: 7 de agosto de 2025

Resumen

La nueva revolución tecnológica aparece aproximadamente en el año 2011, y trae consigo una nueva tendencia en avances tecnológicos, abarcando amplios campos como la inteligencia artificial, robótica, vehículos autónomos, impresión 3D, biotecnología, ciencia de los materiales y almacenamiento de energía, la computación cuántica, por nombrar algunos. Esta revolución industrial trae consigo también cambios importantes en el campo de la medicina. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es desarrollar un prototipo preliminar de un biotraje ortésico de bajo costo. Para lo cual, se realiza en una primera etapa un análisis en el desarrollo de la estructura de la órtesis; dicha estructura esta enfocada a pacientes que padezcan lesiones traumáticas agudas, afecciones crónicas o para brindar un soporte a las articulaciones. Este trabajo tiene la finalidad de brindar una neuro-rehabilitación que conlleve a la mejora de estos padecimientos. La ciencia indica que la biomimética tiene como función imitar los patrones y estrategias de la naturaleza; en base a esto se buscó crear una herramienta capaz de emular los patrones de movimiento de una marcha o caminata. Este trabajo se fundamenta en los avances en materia de sensores, los cuales permiten a los robots comprender y responder de mejor manera a su entorno y dedicarse a una variedad más amplia de tareas. Entre los resultados importantes de este trabajo se encontro que en comparación con exoesqueletos comerciales y sistemas reportados en la literatura, el prototipo T.O.A. (traje ortésico avanzado) ofrece una solución accesible y modular, con un enfoque en la integración de materiales económicos y tecnología abierta. Si bien su rendimiento en términos de torque y precisión es menor que dispositivos industriales avanzados, cumple con los requerimientos básicos para rehabilitación funcional. Las pruebas mostraron que la latencia y precisión se encuentran dentro de rangos aceptables para este tipo de aplicaciones, lo que posiciona al T.O.A. como una alternativa viable para entornos con limitaciones presupuestales.

Palabras clave: Biotraje ortésico; Arduino; Articulaciones.

Abstract

The new technological revolution emerged around 2011, bringing a new wave of technological advancements across broad fields such as artificial intelligence, robotics, autonomous vehicles, 3D printing, biotechnology, materials science, energy storage, and quantum computing, to name a few. This industrial revolution also brought important changes to the field of medicine. Specifically, the objective of this work is to develop a preliminary prototype of a low-cost orthotic biosuit. To this end, an initial analysis is carried out during the development of the orthosis structure; this structure is focused on patients with acute traumatic injuries, chronic conditions, or those requiring joint support. This work aims to provide neurorehabilitation that improves these conditions. Science indicates that biomimicry imitates the patterns and strategies of nature; based on this, the goal was to create a tool capable of emulating the movement patterns of a gait. This work is based on advances in sensor technology, which enable robots to understand better and respond to their environment and perform a wider variety of tasks. Among the key results of this work was the finding that, compared to commercial exoskeletons and systems reported in the literature, the T.O.A. (advanced orthotic suit) prototype offers an affordable, modular solution, with a focus on integrating inexpensive materials and open technology. While its torque and precision are lower than those of advanced industrial devices, it meets the basic requirements for functional rehabilitation. Tests showed that latency and precision are within acceptable ranges for this type of application, positioning the T.O.A. as a viable alternative for budget-constrained environments.

Keywords: Orthotic Biosuit; Arduino; Joints.

INTRODUCCIÓN

La implementación de distintos sistemas electrónicos para órtesis es ampliamente utilizado, debido a la necesidad imperante de la sociedad (Albornoz et al., 2019; García Cabezas, 2018). Además del rápido aumento poblacional de la tercera edad se ha observado un incremento en las consultas de traumatología y ortopedia por desgaste articular, ha derivado en un deterioro motriz y disminución del autocuidado, creando una necesidad de recurrir a nuevas tecnologías para solucionar estas deficiencias de salud. Estos dispositivos presentan costos elevados, por lo que pueden llegar a ser inaccesibles a la mayoría de este sector poblacional. Actualmente, existe una cantidad limitada de estudios al respecto de estos dispositivos, debido a su precio excesivo y al poco apoyo que se le brindan a este tipo de investigaciones, además de que su desarrollo es desafiante, por los problemas que surgen durante su integración.

Por otro lado, la neuro-rehabilitación es un proceso esencial para pacientes que han sufrido deterioro en su capacidad motriz, ya sea por envejecimiento, desgaste articular debido a actividades físicas intensas o como consecuencia de accidentes de tránsito. Sin embargo, muchos tratamientos actuales requieren supervisión constante y son costosos, lo que limita su accesibilidad. Ante esta necesidad, se propone el diseño de un dispositivo automatizado que, mediante ejercicios de repetición programados, contribuya a la rehabilitación física del paciente. Este tipo de tecnología permitiría mejorar la continuidad del tratamiento en el hogar, reducir la carga del personal médico y aumentar la eficacia del proceso de neuro-rehabilitación. De esta manera, se busca contribuir al desarrollo de soluciones accesibles, eficientes y adaptables para mejorar la calidad de vida de los pacientes (Solbeygen Agudelo et al., 2015; García Ríos et al., 2015).

Este tipo de dispositivos son conocidos como órtesis, y sirven de apoyo y soporte para el sistema neuromusculoesquelético. Estos son capaces de corregir algún movimiento anormal o brindar soporte a alguna extremidad después de alguna deformación, disfunción o presencia de dolor dentro del sistema locomotor. Una Órtesis Robótica tiene como núcleo: actuadores, sensores y controladores. Formando un dispositivo mecatrónico externo diseñado para asistir, apoyar o corregir funciones

biomecánicas del cuerpo humano. Combinando la mecánica, electrónica y el control automático son los principales fundamentos de la ciencia Biónica. También es importante tomar en cuenta la marcha humana, la cual es una función motora compleja que permite el desplazamiento bípedo coordinado, sustentada en la interacción dinámica entre el sistema nervioso, muscular y esquelético. Comprender sus bases anatómicas y biomecánicas es esencial para el diseño de órtesis robóticas, ya que estas deben integrarse funcionalmente con el patrón de movimiento natural del cuerpo humano (Quinzaños Fresnedo et al., 2015; Barrera Sánchez et al., 2024)

Cabe mencionar que durante el ciclo de marcha, el cuerpo humano emplea de manera sinérgica una red de estructuras osteomusculares distribuidas en varios segmentos clave. La biomecánica de la marcha se enfoca en cómo los músculos, huesos y fuerzas externas interactúan para permitir una locomoción eficiente. El cuerpo humano emplea un sistema de palancas anatómicas para convertir la fuerza muscular en movimiento, lo que permite un desplazamiento eficaz con un gasto energético mínimo (Fajardo Zapata, 2015; Lelis et al., 2012).

También es necesario el concepto de palanca, la cual es una estructura rígida que rota alrededor de un punto fijo (fulcro) cuando sobre ella se aplica una fuerza interna (potencia) para vencer una resistencia. En términos funcionales, según la mecánica clásica. El análisis de la marcha se apoya en tres tipos de parámetros principales: (1) Cinemáticos: Describen el movimiento (ángulos articulares, velocidad, longitud del paso y cadencia). Esto claro sin considerar las fuerzas involucradas. (2) Cinéticos: Evalúan las fuerzas implicadas, como la reacción del suelo, la gravedad y los torques articulares.

Se refieren a las fuerzas externas involucradas para la generación del movimiento. (3) Electromiográficos (EMG): Registran la activación muscular en cada fase del Ciclo de marcha (Iravani et al., 2018). Permitiendo evaluar su sincronización y magnitud en las distintas fases del ciclo.

El avance biotecnológico ha impulsado significativamente la mejora en la calidad de vida de los seres humanos. La colaboración interdisciplinaria entre la medicina y la ingeniería ha permitido el desarrollo de

instrumentos cada vez más precisos (Bautista Bautista et al., 2024; Castillo González et al., 2022), no solo para diagnósticos médicos, sino también como herramientas complementarias en tratamientos y procesos de rehabilitación. El desarrollo de exotrajes robóticos tiene sus raíces en la mitad del siglo XX, específicamente durante la década de 1960. Una de las primeras iniciativas comerciales fue el proyecto Hardiman, desarrollado por la empresa estadounidense General Electric.

Este exotraje de cuerpo completo fue diseñado para incrementar la fuerza del usuario, permitiéndole levantar objetos pesados. Paralelamente, a finales de los años 60 y principios de los 70, instituciones como el Instituto Mihajlo Pupin en Serbia y la Universidad de Madison-Wisconsin en Estados Unidos exploraron la integración de esta tecnología para asistir a usuarios con distintas discapacidades motoras. Sin embargo, las limitaciones tecnológicas y la falta de experiencia en ese entonces impidieron la concreción exitosa de estos proyectos, hasta que, con la madurez tecnológica alcanzada en el nuevo milenio, se retomaron estos desarrollos con mayor viabilidad. Inicialmente, el principal objetivo en la fabricación de exotrajes fue su aplicación industrial, con la intención de compensar la fatiga y aumentar la fuerza física de los trabajadores para optimizar procesos productivos. Aunque estos objetivos industriales no se alcanzaron plenamente, sentaron un precedente importante que sirvió como punto de partida para orientar el desarrollo de esta tecnología hacia aplicaciones ortopédicas y de asistencia humana en el siglo XXI. Con la entrada en el nuevo milenio, los exotrajes comenzaron a posicionarse como productos accesibles para usuarios con necesidades específicas. Uno de los primeros dispositivos en este sentido fue el Lokomat, desarrollado y distribuido por la empresa Hocoma AG. Este exoesqueleto fue diseñado para la rehabilitación de la marcha en pacientes con lesiones de la médula espinal o que sufrieron accidentes cerebrovasculares. Desde 2001, el Lokomat se ha utilizado en hospitales y centros de rehabilitación a nivel mundial, evidenciando un avance significativo en la aplicación clínica de esta tecnología.

Durante la primera década del siglo XXI, el desarrollo tecnológico propició la aparición de múltiples laboratorios de investigación y compañías dedicadas a la innovación en este campo. A partir de 2010, surgieron

diversos prototipos con aplicaciones militares cuyo objetivo era aumentar la fuerza y resistencia de los soldados, conceptualizando la idea de “soldados mecanizados” que transforman el campo de batalla y abren nuevos horizontes tecnológicos. Entre estos prototipos destacan el Raytheon XOS y el Lockheed Martin HULC (Human Universal Load Carrier). El Raytheon XOS 1.0, financiado por DARPA y desarrollado por Sarcos, es un exotraje corporal completo capaz de aumentar la fuerza y resistencia del usuario, aunque su operación depende de un “cordón umbilical”, es decir, un cable conectado a una fuente de energía externa que limita su portabilidad.

Por otro lado, el HULC, originalmente desarrollado por Berkeley Bionics (actualmente Ekso Bionics) y adquirido posteriormente por Lockheed Martin, está diseñado para soldados que operan en terrenos montañosos o accidentados. Este exotraje hidráulico-robótico de tercera generación permite cargar pesos superiores a 90 kg, distribuyendo la carga al suelo mediante sus calzados especiales. A diferencia del Raytheon, el HULC es portátil y modular, pudiendo ser ensamblado o desmontado en aproximadamente 30 segundos, lo que le confiere mayor flexibilidad para su uso en campo. Gracias a estos avances tecnológicos, desde la década de 2000 se han desarrollado exotrajes específicamente orientados a la rehabilitación y asistencia humana, con sistemas portátiles y eficientes. La mayoría de estos dispositivos están dirigidos a usuarios con paraplejía, facilitándoles abandonar la silla de ruedas y recuperar la capacidad de caminar. Ejemplos destacados son el exoesqueleto ReWalk de ReWalk Robotics y el Indego de Parker Hannifin, basados en investigaciones realizadas en la Universidad Vanderbilt. Dentro de esta línea surgieron los exoesqueletos pasivos, sistemas que no requieren actuadores o motores para su funcionamiento (Ayala-Lozano et al., 2011; López et al., 2014). Su estructura se basa en mecanismos mecánicos (como resortes o elementos de soporte) que distribuyen el peso o carga útil, aliviando el esfuerzo físico del usuario. Estas órtesis robóticas se integran a través de arneses o estructuras ligeras que permiten al trabajador manipular herramientas o materiales pesados de forma más ergonómica, eficiente y segura. Su bajo costo, ligereza y simplicidad operativa los han convertido en una opción viable para múltiples industrias.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es desarrollar un prototipo preliminar de un biotraje ortésico de bajo costo para extremidades inferiores que busca asistir la marcha a bajas velocidades controlado por un sensor EMG (sensor de electromiografía).

MATERIALES Y MÉTODOS

El exoesqueleto desarrollado, denominado T.O.A. (Traje Ortésico Avanzado), constituye un dispositivo mecatrónico orientado a brindar soporte, asistencia y rehabilitación a usuarios con afecciones motoras en los miembros inferiores. Este prototipo parte de una reinterpretación funcional y estética de diseños previos, integrando principios actuales de automatización, control robótico y ergonomía. La estructura está construida mediante un núcleo de madera reforzado con armazones de PLA, buscando un equilibrio entre estabilidad estructural y bajo costo de fabricación. Esta selección responde a la necesidad de generar soluciones accesibles para entornos de salud pública de tercer nivel, donde los dispositivos comerciales suelen estar fuera del alcance presupuestal. Se privilegia así la funcionalidad sin sacrificar viabilidad económica.

El enfoque de diseño responde a una filosofía híbrida, combinando funcionalidades de los tres tipos principales de exoesqueletos para miembros inferiores: rehabilitación de la marcha, asistencia funcional y aumento de fuerza. Esto permite su aplicación en contextos terapéuticos y en tareas que requieren soporte ortésico continuo, adaptándose a las necesidades del usuario.

Selección de materiales

Con base en los principios establecidos en el diseño general, se procedió a seleccionar los materiales y componentes que formarían parte del prototipo. Esta etapa implicó una evaluación técnica considerando criterios como resistencia mecánica, bajo peso, facilidad de manufactura, costo, compatibilidad con procesos de fabricación aditiva y capacidad de integración con sistemas de control.

Durante la etapa de prototipo se utilizó madera como base estructural, debido a su alta disponibilidad, facilidad de manipulación y bajo costo. Aunque no es

común en órtesis finales, resulta adecuada para validar conceptos mecánicos durante fases preliminares de diseño. Complementariamente, se empleó ácido poliláctico (PLA), un polímero biodegradable utilizado en impresión 3D, para la fabricación de uniones, soportes y alojamientos. El PLA presenta buenas propiedades mecánicas y alta fidelidad dimensional, facilitando la integración rápida de diseños complejos sin recurrir a procesos industriales.

Se integraron dos rodamientos de bolas (baleros) en las articulaciones, seleccionados por su capacidad de reducir fricción y distribuir cargas, mejorando la eficiencia cinemática del conjunto. Para el accionamiento activo se utilizaron dos actuadores eléctricos lineales, capaces de convertir movimiento rotativo en desplazamiento lineal con suficiente fuerza para asistir la articulación de la rodilla. También se emplearon motores DC de 12 V y 20 RPM, acoplados a engranajes planetarios diseñados específicamente para el proyecto e impresos en PLA.

Sistema de control y adquisición

El sistema se controla mediante una plataforma Arduino UNO R3, suficiente para lectura de sensores, generación de señales PWM y ejecución de rutinas básicas. Dos drivers L298 permiten el control bidireccional de los motores DC. La detección de intención de movimiento se logró con sensores electromiográficos (EMG) comerciales, capaces de adquirir señales musculares de superficie, procesarlas e integrarlas en esquemas de control bio-inspirado. Adicionalmente, Se utilizó una faja elástica ergonómica para mantener alineado el sistema al torso, tirantes y un cinturón de Kevlar para fijar la estructura a las piernas. Estos materiales fueron elegidos por su resistencia, bajo peso y flexibilidad.

Modelado CAD del sistema

El modelo tridimensional del sistema (Figura 1, 2) fue desarrollado en software de diseño asistido por computadora (CAD), considerando un enfoque modular para facilitar tanto su impresión como su montaje. El diseño contempla una estructura femoral y tibial conectadas mediante un eje rotacional, con alojamientos específicos para motores, transmisiones y sensores. Las

uniones mecánicas fueron diseñadas para garantizar rigidez estructural sin comprometer la movilidad.

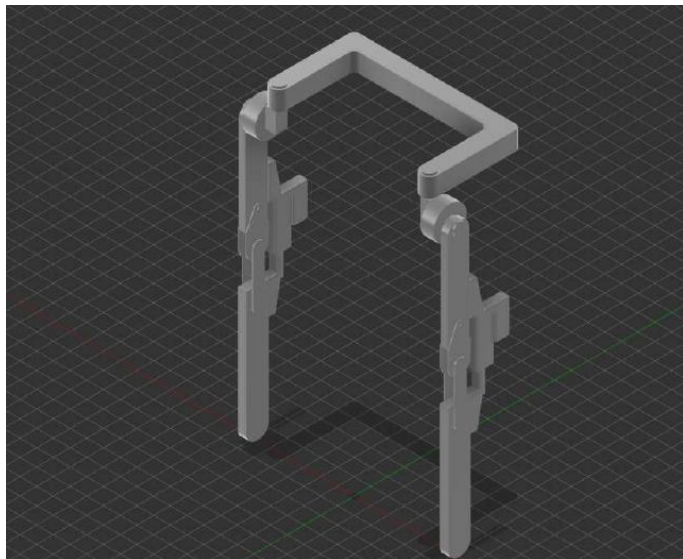


Figura 1. Vista isométrica del modelo CAD completo del T.O.A., mostrando la configuración general del sistema estructural y sus articulaciones.

se integran mecánicamente mediante alojamientos personalizados diseñados en CAD y fabricados en PLA. Estos mecanismos están dispuestos de forma alineada al eje articular, permitiendo la transmisión de torque sin desvíos significativos ni pérdidas mecánicas apreciables. El diseño CAD fue optimizado para fabricación mediante impresión 3D FDM (Modelado por Deposición Fundida), lo que implicó segmentar algunas piezas mayores y diseñar unions mecánicas tipo enclavamiento (dovetail) o ajuste por pernos. Las tolerancias se ajustaron a las limitaciones de impresión del PLA, considerando contracciones térmicas y posibles rebabas de material.

Arquitectura general del sistema

El sistema electrónico fue concebido bajo una arquitectura distribuida en arduino (Figura 3), el cual es ampliamente utilizado (Guzmán-Fernández et al., 2021), en la cual un microcontrolador central coordina la lectura de sensores y el control de los actuadores a través de subsistemas conectados por buses de señal. Esta estructura permite una expansión modular, facilitando la incorporación de nuevos sensores o funciones sin rediseñar completamente la placa base.

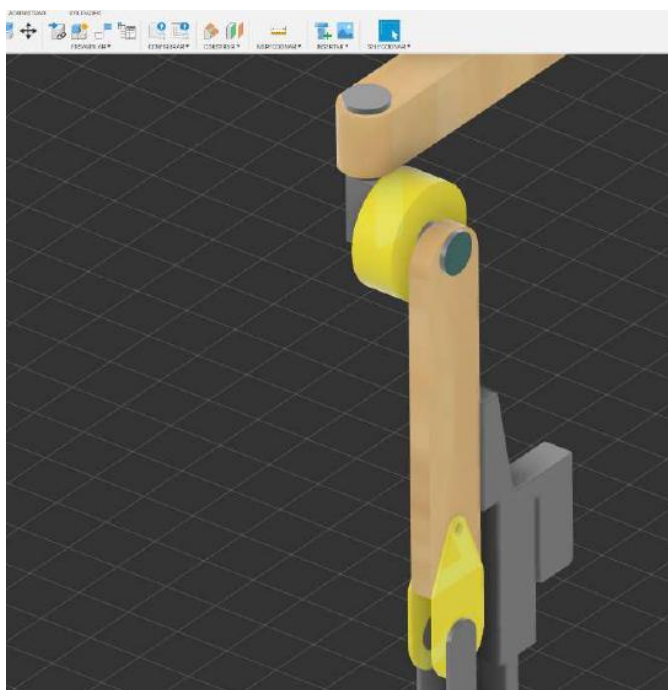


Figura 2. Vista lateral del diseño CAD, con detalle del actuador lineal integrado en la estructura y su orientación respecto al eje de flexión de la rodilla.

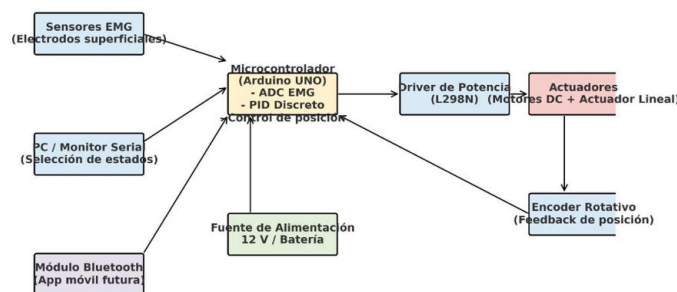


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema electrónico del T.O.A., mostrando la Interacción entre el microcontrolador, sensores EMG, drivers de potencia, actuadores y Fuente de alimentación

Selección del microcontrolador

Se utilizó una placa Arduino UNO R3, basada en el microcontrolador ATmega328P, seleccionada por su facilidad de programación, amplia documentación y número suficiente de pines digitales y analógicos para las necesidades del prototipo. Esta plataforma también permite una integración directa con módulos como sensores EMG y drivers de motores sin requerir interfaces

El sistema de actuación incluye motores DC acoplados (Figura 2) a engranajes planetarios, los cuales

complejas. Las principales ventajas de esta selección fueron: (1) Compatibilidad con sensores analógicos (EMG) y señales PWM para control de motores. (2) Bajo consumo energético y alimentación sencilla mediante fuente de 12V. (3) Entorno de desarrollo accesible y flexible (Arduino IDE).

Conexiones eléctricas y distribución de señales

El diseño del cableado (Figura 4) se realizó siguiendo principios de orden y protección eléctrica. Las señales analógicas provenientes de los sensores EMG fueron conectadas a los pines A0 y A1 del Arduino, mientras que las señales de salida PWM para los motores se asignaron a los pines digitales D9 y D10.

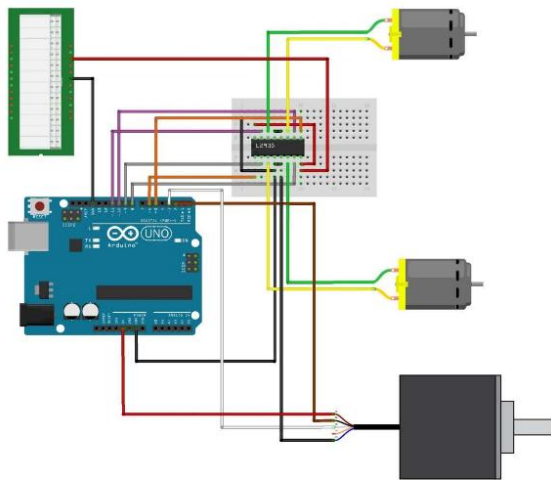


Figura 4. Esquema eléctrico simplificado del sistema, incluyendo conexiones entre Arduino, sensores EMG, drivers L298 y actuadores.

Los actuadores DC fueron controlados mediante dos módulos L298N, los cuales permiten el control bidireccional (hacia adelante y reversa) de motores de corriente directa. Además, se incorpora la protección térmica y contra sobre corrientes. Cada driver se conecta a un motor mediante un par de salidas H-Bridge, y recibe las señales PWM desde el Arduino para regular velocidad y dirección.

Placas y montaje electrónico

Todos los componentes fueron montados sobre una base de acrílico aislante, ubicada en la parte trasera del exoesqueleto, a fin de mantenerlos protegidos y accesibles para mantenimiento. Se utilizaron zócalos para los

módulos electrónicos, permitiendo su reemplazo sin necesidad de soldadura. Para el prototipo se emplearon placas de pruebas tipo protoboard, pero se dejó planificado el diseño de un PCB personalizado en etapas futuras, con rutas optimizadas y reducción de tamaño (Figura 5).

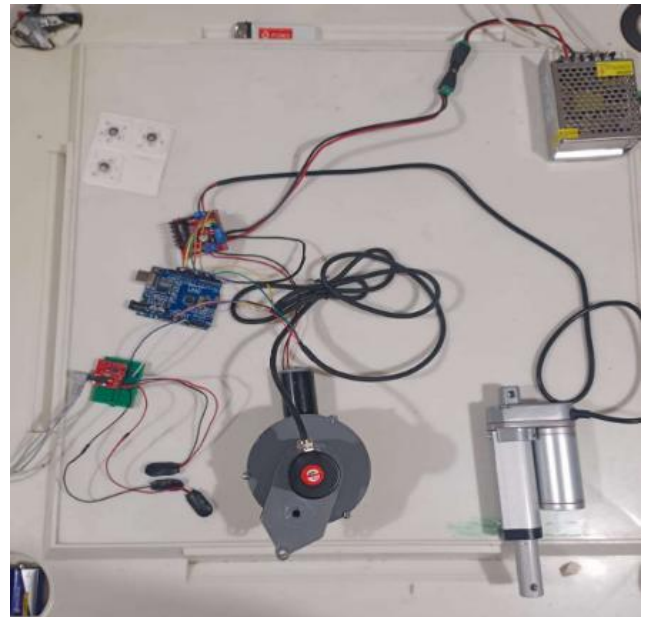


Figura 5. Fotografía del montaje electrónico del prototipo, mostrando la distribución de placas y cableado.

Durante el diseño se consideraron aspectos de protección eléctrica para garantizar la seguridad del usuario: Se incluyó un interruptor general para corte de energía rápida. Todos los módulos están alimentados por una fuente regulada y aislada del cuerpo del usuario. Se aseguraron todos los cables con canaletas, termofit y amarres para evitar tirones accidentales.

Algoritmo de Control

El algoritmo de control fue desarrollado íntegramente en el entorno Arduino, sin uso de librerías externas, permitiendo una programación personalizada y adaptada a las necesidades del proyecto. El núcleo del algoritmo es el controlador PID, que opera a partir de una señal de referencia de posición, definida inicialmente de forma manual desde el puerto serial para pruebas y calibración.

Posteriormente, esta señal fue sustituida por valores dinámicos derivados de la activación muscular (EMG), mapeando el nivel de contracción a un ángulo

objetivo de rotación para el motor. La estructura del algoritmo incluye: Lectura de la posición actual mediante el encoder rotativo. Cálculo del error entre la posición deseada y la real. Aplicación de la ecuación en diferencias del controlador PID. Generación de señal PWM hacia los drivers L298 para accionar los motores DC en una u otra dirección. Limitación de movimiento entre -20° y 40° , simulando el ciclo de marcha. Mapeo del valor EMG a posiciones angulares deseadas, adaptando el movimiento a la intención del usuario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fabricación del prototipo del T.O.A. (biotraje ortésico avanzado) se llevó a cabo siguiendo los lineamientos estructurales definidos en la fase de diseño. La estructura principal del exoesqueleto se construyó utilizando madera como núcleo, representando los segmentos correspondientes a la pelvis, fémur y tibia. Este material fue seleccionado por su disponibilidad, bajo costo, facilidad de mecanizado y adecuada resistencia para una etapa de validación prototípica (Figura 6).



Figura 6. Ensamble del T.O.A., mostrando estructura que simula la pelvis y las extremidades inferiores.

Cada componente fue fijado mediante tornillos de 1/4 de pulgada, los cuales garantizan una conexión segura y desmontable. La disposición de estos elementos permitió

el armado de una pierna completa (fémur y tibia) por cada lado del cuerpo, alineando las piezas de PLA con los elementos de madera en un sistema modular. El sistema planetario, ubicado distalmente en los motores DC, permite generar el movimiento pendular necesario para simular la oscilación de la marcha hacia adelante y hacia atrás. Este conjunto fue diseñado para trabajar en conjunto con el sistema de control, otorgando estabilidad y precisión durante las fases del ciclo de marcha asistida. Esta configuración permite una reproducción eficiente del patrón de marcha, replicando el movimiento natural de la pierna durante la fase de impulso y extensión.

Para el resultado final del prototipo, el sistema operó en modalidad de cordón umbilical, es decir, mediante una fuente externa de 12 V DC conectada a la red eléctrica. Para mejorar la seguridad del usuario, se integró un interruptor de encendido/apagado accesible, que permitiera desactivar rápidamente el sistema en caso de emergencia o malfuncionamiento.

Programación y puesta en marcha

La programación del sistema central del T.O.A. (biotraje Ortésico Avanzado) está basado en la metodología estructurada de diseño previo de una Máquina de Estados Finita (FSM, por sus siglas en inglés). Esta fue primero planteada manualmente, permitiendo visualizar los distintos modos operativos del sistema, sus condiciones de transición y las limitaciones impuestas por el hardware disponible. Durante el proceso de puesta en marcha, se realizaron pruebas individuales para cada componente. En primer lugar, se programaron rutinas específicas para los actuadores lineales, evaluando su comportamiento bajo diferentes patrones de activación. Posteriormente, se integró el sensor electromiográfico (EMG), sincronizándolo con los motores para validar su respuesta a la contracción muscular. Finalmente, se ensambló el código principal, el cual integró la lógica de la FSM y coordinó todos los elementos del sistema: sensores, actuadores, motores y señales de control.

La máquina de estados finitos (Figura 7) contempla cuatro estados principales, los cuales se seleccionan mediante la interfaz serial de la computadora. Aunque se prevé migrar esta funcionalidad a una aplicación móvil vía Bluetooth, se optó por la comunicación por cable durante las primeras pruebas, para

evitar pérdidas de señal y garantizar la precisión del sistema.

Estado 0 – Inicial/Sentado: Corresponde al punto de partida del sistema. El fémur se encuentra a 90° y los actuadores completamente retraídos, emulando la posición de estar sentado. Esta configuración facilita la colocación del exoesqueleto en el usuario sin riesgos de movimiento inesperado.

Estado 1 – Levantamiento/Reposo activo: Este estado asiste al usuario en la acción de levantarse, posicionando al exoesqueleto en modo bipedestación. Dado que el T.O.A. es una órtesis de asistencia parcial, se recomienda que esta transición sea supervisada por un profesional ortopeda o fisioterapeuta, especialmente durante las primeras fases de la rehabilitación.

Estado 2 – Modo Automático (Entrenamiento): En este estado, el sistema ejecuta de forma autónoma una rutina de marcha previamente programada. La finalidad es fomentar la memoria muscular del paciente, permitiéndole familiarizarse con el patrón de movimiento. Esta rutina fue desarrollada en conjunto con especialistas médicos.

Estado 3 – Modo Manual (Asistencia activa): Este estado es accesible únicamente bajo autorización de un especialista. Una vez alcanzado un nivel funcional adecuado, el usuario toma control activo del sistema a través de Señales EMG. Esta fase representa el desprendimiento progresivo del soporte ortésico, permitiendo que el usuario fortalezca sus capacidades motoras naturales y retome la marcha de forma autónoma.

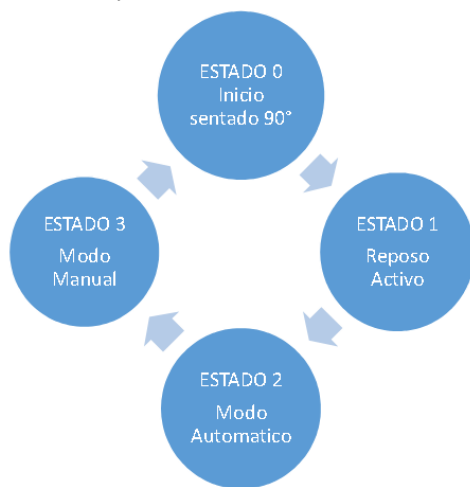


Figura 7. Diagrama de Máquina de Estados Finita EXO (FSM EXO).

La evaluación funcional del prototipo T.O.A. se realizó mediante una serie de Pruebas controladas, tanto en banco como en usuario simulado. Se validó la capacidad del sistema para asistir la marcha humana replicando los movimientos articulares previstos, con especial atención en la articulación de la rodilla. Durante las pruebas se verificó la correcta interacción entre los actuadores eléctricos, sensores EMG y el sistema de control, comprobando que el exoesqueleto respondiera adecuadamente a las señales mioeléctricas.

Respuesta del sistema

El sistema mostró una respuesta consistente y en tiempo real a las señales de activación muscular. La sincronización entre la detección de la intención de movimiento y la acción mecánica fue evaluada mediante la observación directa y registros de datos, destacando un retardo promedio entre la activación EMG y la acción motora inferior a 200 ms, acorde con los objetivos planteados. Esta respuesta permitió al usuario iniciar y mantener el patrón de marcha con asistencia del dispositivo, logrando transiciones suaves y sin interrupciones abruptas.

Precisión y tiempo de reacción del control mioeléctrico

El algoritmo de control implementado, basado en un controlador PID con ajuste mediante el método de Ziegler-Nichols y ecuaciones en diferencias, permitió controlar la posición angular de los motores DC con un margen de error inferior a 0.5°. La integración del encoder rotativo de alta resolución resultó fundamental para lograr esta precisión. El tiempo de reacción del sistema, medido desde la detección de la señal EMG hasta la respuesta motora, fue satisfactorio para aplicaciones en rehabilitación, confirmando la viabilidad del sistema para asistir movimientos dinámicos y coordinados.

Comparación con estándares o sistemas similares

En comparación con exoesqueletos comerciales y sistemas reportados en la literatura, el prototipo T.O.A. ofrece una solución accesible y modular, con un enfoque en la integración de materiales económicos y tecnología abierta. Si bien su rendimiento en términos de torque y precisión es menor que dispositivos industriales

avanzados, cumple con los requerimientos básicos para rehabilitación funcional. Las pruebas mostraron que la latencia y precisión se encuentran dentro de rangos aceptables para este tipo de aplicaciones, lo que posiciona al T.O.A. como una alternativa viable para entornos con limitaciones presupuestales.

Limitaciones

Durante el desarrollo y evaluación se identificaron las siguientes limitaciones: (1) Dependencia de una fuente de alimentación externa (modo “cordón umbilical”), limitando la movilidad autónoma del usuario. (2) Necesidad de ajustes finos en la sensibilidad del sensor EMG comercial para distintos usuarios, aunque menor para pacientes comunes, requiere atención en escenarios clínicos diversos. No fue necesario implementar ningún tipo de filtro ya que se optó por el uso de un componente comercial, por lo que ya cuenta con una caracterización o funcionamiento preestablecido por el fabricante, por lo que también puede influir en algunas variaciones que realmente no son relevantes para el funcionamiento de este prototipo. (3) Limitaciones mecánicas derivadas del uso de materiales accesibles, como la madera y PLA, que restringen la durabilidad y robustez en usos prolongados. (4) La ausencia de un sistema inalámbrico definitivo para la comunicación, relegando el control a la interfaz por computadora mediante conexión serial. Estas limitaciones marcan áreas claras para futuras mejoras y desarrollo.

Los resultados obtenidos demuestran que el diseño y desarrollo del T.O.A. cumplen con los objetivos iniciales, logrando un prototipo funcional capaz de asistir la marcha a través de control mioeléctrico y actuadores eléctricos con alta precisión. La respuesta dinámica y sincronía con la intención de movimiento evidencian un adecuado diseño del sistema de control y adquisición de señales EMG. Sin embargo, la integración limitada de movilidad autónoma y aspectos ergonómicos deberá ser abordada en etapas posteriores para consolidar un producto competitivo y clínicamente viable. La versatilidad y el bajo costo del prototipo representan una contribución importante para la democratización de tecnologías de asistencia robótica en contextos con recursos limitados, alineándose con la filosofía de accesibilidad planteada desde el inicio del proyecto.

Finalmente, los resultados sugieren que, con ajustes y mejoras en hardware y software, el T.O.A. podría servir como base para futuros desarrollos en rehabilitación y asistencia motora. Los resultados expuestos permiten concluir que el exoesqueleto T.O.A. cumple con su propósito funcional: asistir de manera precisa y segura la marcha del usuario a partir de señales mioeléctricas, mediante un sistema de control robusto y adaptable. Si bien se identificaron limitaciones propias del estado de prototipo, la arquitectura modular, la implementación de control PID optimizado y el uso de materiales accesibles demuestran el potencial del T.O.A. para escalar hacia soluciones de mayor impacto clínico. La integración de conceptos como diseño centrado en el usuario, adaptabilidad y control bio-inspirado confirman que el desarrollo de tecnologías asistidas no está reservado exclusivamente a grandes laboratorios o industrias, sino que también puede surgir de la innovación académica aplicada. Este trabajo representa un paso firme hacia esa dirección.

CONCLUSIÓN

El desarrollo del prototipo T.O.A. (Traje Ortésico Avanzado) representó un esfuerzo integral por diseñar, construir y validar una órtesis robótica accesible, funcional y adaptativa, orientada a usuarios con afectaciones motoras en miembros inferiores. En este trabajo se presentó un dispositivo que, mediante la combinación de técnicas de control electromiográfico, estructuras híbridas impresas y un sistema mecatrónico inteligente, demuestra la viabilidad de generar soluciones tecnológicas de asistencia con bajo costo y alto impacto. La elección de materiales accesibles como la madera y el PLA, la implementación de sistemas de control PID con alta precisión angular, y la integración de sensores EMG, permitió comprobar la funcionalidad del prototipo a nivel experimental. El sistema respondió adecuadamente a las señales mioeléctricas del usuario, traduciéndolas en movimientos de asistencia que replican la marcha humana de forma simétrica, segura y adaptable. Asimismo, el enfoque modular del diseño, la filosofía híbrida de control y la estética reflexiva del exoesqueleto brindan no solo una herramienta rehabilitadora, sino también una plataforma de exploración futura en campos como la ortopedia robótica, la cibernética asistencial y la

interacción humano-máquina.

El T.O.A. no solo cumple una función prototípica, sino que constituye una base sólida para futuras aplicaciones clínicas. Su modularidad, capacidad de adaptación a diferentes usuarios y respuesta a señales mioeléctricas lo proyectan como una solución viable en:

(1) Programas de rehabilitación neuromuscular, donde el paciente requiere asistencia parcial durante fases específicas de la marcha. (2) Clínicas de fisioterapia, como herramienta de entrenamiento muscular pasivo-activo, con posibilidad de registrar progresos. (3) Ámbitos de inclusión y accesibilidad, donde usuarios con lesiones medulares incompletas o debilidad muscular podrían beneficiarse de una órtesis inteligente. En conclusión, el T.O.A. representa una propuesta innovadora en el campo de las órtesis robóticas, combinando inteligencia artificial, control adaptable y diseño económico. A través de mejoras futuras, su escalamiento a escenarios clínicos reales es altamente probable, aportando soluciones concretas a necesidades médicas urgentes con una visión tecnológica humanista.

REFERENCIAS

Albornoz, X., Flores, J., Guamán, J., Malla, L., Zhindón, R. y Mola, E. (2019). Órtesis robótica para rehabilitación bilateral de mano izquierda para pacientes con hemiplejía. *Revista Investigación, Tecnología y Ciencia*. ISSN 1909-5775. pp 11-15.

Ayala-Lozano, J., Urriolagoitia-Sosa, G., Romero-Angeles, B., Torres-San Miguel, C., Aguilar-Pérez, L. y Urriolagoitia-Calderón, G. (2015). Diseño mecánico de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior. *Rev. Colomb. Biotecnol.* 1(17). pp. 79-90. <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.44188>

Barrera Sánchez, A., Azcaray Rivera, H., Blanco Ortega, A., Campos Amezcua, R., Abúndez Pliego, R. y Godoy, J. (2024). Simulación de un prototipo virtual de órtesis robótica para rodilla. *Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT)*. Universidad Autónoma de Baja California ISSN 2594-1925. 7(4): <https://doi.org/10.37636/recit.v7n4e374>

Bautista Bautista, I., Mondragón Medina, J. y Chávez Mora, O. (2024). Diseño de un Sistema de Adquisición de Datos

y su Interfaz Gráfica para Monitorear un Dispositivo Servo Actuado. Publicación semestral, Vol. 10, No. pp. 18-23. *Boletín Científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca*. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/investigium/issue/archive>

Castillo González, S., Pulido Talero, W. y Castañeda Jerez, C. (2022). Diseño e impresión 3D de órtesis para tratamiento de ligamento cruzado posterior/anterior como herramienta de aplicación en la industria 4.0. *Revista Avances: Investigación en Ingeniería*. ISSN 1794-4953. <https://doi.org/10.18041/17944953/avances.2.8547>

De Luca, C. J. (2006). Electromyography. *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*. <https://doi.org/10.1002/0471732877.emd036>

Dollar, A. M., & Herr, H. (2008). Lower extremity exoskeletons and active orthoses: challenges and state-of-the-art. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 144–158. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.915453>

Farina, D., & Aszmann, O. C. (2014). Bionic limbs: clinical reality and academic promises. *Science Translational Medicine*, 6(257), 257ps12. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3008930>

Fajardo Zapata, A. (2015). Trastornos osteomusculares en auxiliares de enfermería en la unidad de cuidados intensivos. *Cienc Trab.* 17(53). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-24492015000200009>

García Cabezas, E. F. (2018). Sistema de rehabilitación de codo basado en una órtesis robótica controlada por una interfaz gráfica desarrollada en Python. *3C TIC: Cuadernos de desarrollo aplicadas a las TIC*. 7(2), 104-123. <http://dx.doi.org/10.17993/3ctic.2018.60.104-123>

García Ríos, N., Sánchez Moriones, D. y Montoya Hurtado, O. (2015). Estrategias de intervención de fisioterapia en neurorehabilitación utilizadas en Colombia: revisión bibliográfica. *Revista Movimiento Científico*. 9(1): 60-66. ISSN: 2011-7191. <https://revmovimientocientifico.iber.edu.co/article/view/857>

Guzmán-Fernández, M., Zambrano de la Torre, M., Ortega-Sigala, J. (2021). Arduino: a Novel Solution to the Problem of High cost Experimental Equipment in

- Higher Education. *Experimental Techniques*. 46(4).
<https://doi.org/10.1007/s40799-021-00449-1>
- Iravani Rad, M., Mokhtarian, A., Taghi Karimi, M. (2018). Design and Fabrication of an Active Knee Orthosis for Rehabilitation of Lower Limbs. 6(3). *Journal of Rehabilitation Sciences and Research*.
https://jrsl.sums.ac.ir/article_44855_21a11f92f9628ffde1cfc5539d6059bb.pdf
- Lelis, C., Brazil Battaues, M., Taubert de Freitas, F., Rossi Rocha, F., Palucci Marziale, M. y Carmo Cruz Robazzi, M. (2012). Distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho em profissionais de enfermagem: revisão integrativa da literatura. *Artigos de Revisão • Acta paul. enferm.* 25 (3).
<https://www.scielo.br/j/ape/a/8xhyfp9zL73LfmKN5cKSLgj/?format=html&lang=pt>
- López, R., Aguilera, H., Salazar, S., Lozano, R. y Torres, J. (2014). Modelado y Control de un Exoesqueleto para la Rehabilitación de Extremidad Inferior con dos grados de libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. 11. pp. 304–314.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2014.02.008>
- Marchal-Crespo, L., & Reinkensmeyer, D. J. (2009). Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 6(1), 20. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-20>
- Quinzaños Fresnedo, J., Sahagún Olmos, R., León Hernández, S., Pérez Zavala, R., Quiñones Uriostegui, I., Solano Salazar, C., Cruz Lira, R. y Tinajero Santana, M. (2015). Efectos a corto plazo del entrenamiento de la marcha en una órtesis robótica (Lokomat®) con retroalimentación auditiva en pacientes con lesión medular incompleta crónica. *Rehabilitación*. 49(1), 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.rh.2014.10.002>
- Solbeygen Agudelo, L., Nieto, M., Montero, J. y Montoya, L. (2015). Referentes teóricos de fisioterapia en neurorrehabilitación, una revisión sistemática exploratoria. *Revista Movimiento Científico*. 9(1): 67-72. ISSN: 2011-7191.
<https://revmovimientocientifico.ibero.edu.co/article/view/858>