



# **Serie Proyectos de Investigación e Innovación**

Superintendencia de Seguridad Social  
Santiago - Chile

**INFORME FINAL**

## **Desarrollo de un sistema portátil para la valoración cinética y cinemática de la marcha en ambiente hospitalario.**

Dr. Rodrigo Vergara; Investigador Principal  
Dr. Juan José Mariman, Investigador Alterno  
Dr. M.D. Hachi Manzur  
Dr. Joel Álvarez Ruf  
Ms. Joaquín Jill

Universidad Metropolitana de las Ciencias de la Educación  
Hospital del Trabajador – ACHS

2024

Este trabajo fue seleccionado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación e Innovación en Prevención de Accidentes y Enfermedades Profesionales 2022 de la Superintendencia de Seguridad Social (Chile), y fue financiado con recursos del Seguro Social de la Ley N° 16.744 de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales.





## **SUPERINTENDENCIA DE SEGURIDAD SOCIAL SUPERINTENDENCE OF SOCIAL SECURITY**

La serie Proyectos de Investigación e Innovación corresponde a una línea de publicaciones de la Superintendencia de Seguridad Social, que tiene por objetivo divulgar los trabajos de investigación e innovación en Prevención de Accidentes y Enfermedades del Trabajo financiados por los recursos del Seguro Social de la Ley 16.744.

Los trabajos aquí publicados son los informes finales y están disponibles para su conocimiento y uso. Los contenidos, análisis y conclusiones expresados son de exclusiva responsabilidad de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente la opinión de la Superintendencia de Seguridad Social.

Si requiere de mayor información, sobre el estudio o proyecto escriba a: [investigaciones@suseso.cl](mailto:investigaciones@suseso.cl).

Si desea conocer otras publicaciones, artículos de investigación y proyectos de la Superintendencia de Seguridad Social, visite nuestro sitio web: [www.suseso.cl](http://www.suseso.cl).

The Research and Innovation Projects series corresponds to a line of publications of the Superintendence of Social Security, which aims to disseminate the research and innovation work in the Prevention of Occupational Accidents and Illnesses financed by the resources of Law Insurance 16,744.

The papers published here are the final reports and are available for your knowledge and use. The content, analysis and conclusions are solely the responsibility of the author (s), and do not necessarily reflect the opinion of the Superintendence of Social Security.

For further information, please write to: [investigaciones@suseso.cl](mailto:investigaciones@suseso.cl).

For other publications, research papers and projects of the Superintendence of Social Security, please visit our website: [www.suseso.cl](http://www.suseso.cl).

Superintendencia de Seguridad Social  
Huérfanos 1376  
Santiago, Chile.



**Título: Desarrollo de un sistema portátil para la valoración cinética y cinemática de la marcha en ambiente hospitalario.**

ÍNDICE

Agradecimientos .....	3
Resumen .....	4
Introducción y Antecedentes .....	5
Definición del problema y desafío de innovación .....	7
Revisión de la literatura o experiencias relevantes .....	8
Descripción de la metodología o etapas de la innovación.....	11
Resultados.....	14
Hardware .....	14
Algoritmo de análisis de señales de aceleración y EMG .....	16
Desarrollo de <i>Software</i> .....	18
Pruebas de usabilidad en contexto real .....	22
Recomendaciones para Sistema de Seguridad y Salud en el Trabajo .....	29
Conclusiones .....	30
Referencias.....	31

## Agradecimientos

Queremos agradecer el apoyo a este proyecto por parte del equipo de terapia física del Hospital de trabajador. Específicamente a Kigo. Carlos Lehuede, Kigo. Christopher Moya y Kigo. Matías Paillalef, quienes con muy buena voluntad dieron un aporte indispensable para el desarrollo del proyecto. Asimismo, quisiéramos agradecer al equipo de Productos Digitales, quienes apoyaron activamente el desarrollo de un mecanismo para incluir nuestro *Software* en sus sistemas. Por último, quisiéramos agradecer a Sandra Herrera y Víctor Barrientos por su apoyo constante en el desarrollo del proyecto, facilitando procesos y contactos con actores claves para desarrollar un producto que sea de utilidad para la Asociación Chilena de Seguridad.

## Resumen

Los problemas de desplazamiento son altamente frecuentes y relevantes para la reinserción laboral de los trabajadores. Sin embargo, la efectividad de la terapia física en este ámbito es baja, producto de, entre otros factores, la escasa disponibilidad de herramientas de valoración objetiva de la marcha para su utilización en entornos hospitalarios. Una solución a este problema es la implementación de sistemas de valoración instrumentalizada mediante sensores portátiles y *softwares* fáciles de utilizar e interpretar. Dada la disponibilidad de tecnologías de bajo costo, es posible desarrollar soluciones ajustadas al equipo de rehabilitadores y su contexto.

Este proyecto tuvo por objetivo seleccionar un *hardware* comercial y sobre estos desarrollar un *software* que entregara los indicadores de marcha relevantes para la terapia kinésica. Debido a la devaluación del peso chileno, se replanteó la estrategia de *hardware*. En vez de usar equipos comerciales, desarrollamos un equipo *ad hoc* a las necesidades y de bajo costo. El equipo permite el registro de electromiografía y acelerometría para la valoración de marcha, la que es transmitida inalámbricamente a un computador para su posterior procesamiento en el *software* desarrollado. El *software* contiene el algoritmo de análisis de marcha, así como la entrega de marcadores relevantes para la decisión terapéutica. El terapeuta puede seleccionar diferentes secciones del registro y recalcular los indicadores si así lo desea. Tanto terapeutas como pacientes valoraron positivamente la usabilidad del equipo y el *software*. Pese a esto, se ven espacios de mejora para mejorar en el *hardware*.

Palabras Claves: Análisis de la Marcha, Electromiografía, Cinemática.

## Introducción y Antecedentes

Los problemas de desplazamiento, particularmente la marcha, son altamente frecuentes y relevantes para la reinserción laboral de las y los trabajadores, así como para la calidad de vida de quienes los padecen. Según el reporte de accidentabilidad de la SUSESO del año 2019 (Gana, 2022), el 34% de las lesiones en mujeres y el 26 en hombres producto de accidentes de trabajo, afectaron a las extremidades inferiores. Producto de accidentes de trayecto, esta cifra aumentó al 40% y 47% para hombres y mujeres respectivamente. Esto impacta directamente en el desplazamiento de las personas, convirtiendo a las prestaciones de salud destinada a la rehabilitación de marcha una de las principales acciones terapéuticas de los equipos de terapia física.

Se han explorado varios enfoques para mejorar la eficacia de la rehabilitación de la marcha, incluido el uso de dispositivos robóticos de asistencia, *biofeedback*, realidad virtual, entre otros. Dentro de estas opciones Kim y Kaneko (2023) presentan prometedores resultados con intervenciones de rehabilitación de la marcha basadas en realidad virtual para personas con accidente cerebrovascular. También hay evidencia de la efectividad en la rehabilitación de la marcha con ortesis y exoesqueletos robóticos para la rehabilitación de la marcha (Li et al., 2018). Asimismo, existen propuestas que destacan la necesidad de generar procesos de rehabilitación integrales que consideren aspectos físicos y psicológicos (Mikołajczyk et al. 2018). Otras técnicas como la estimulación transcraneal de corriente directa combinada con fisioterapia, para la rehabilitación de la marcha en pacientes con accidente cerebrovascular ha mostrado resultados alentadores (Navarro-López et al., 2021). La creciente cantidad de alternativas terapéuticas dificulta establecer si un tratamiento presentará efectividad dada condiciones específicas de patología y contexto clínico. Por esto es clave poder determinar la efectividad de un tratamiento específico para la rehabilitación de la marcha en un contexto clínico y población de pacientes específico, es necesario poder valorar objetivamente la marcha.

La aproximación más habitual es la utilización de equipos portables, como unidades de medición inercial (IMU) y análisis basados en videos, para evaluar objetivamente las métricas de la marcha (Chakravorty et al., 2019; Hendriks et al., 2022). Estas evaluaciones proporcionan datos cuantitativos sobre los parámetros relacionados con la marcha temporoespacial, incluida la velocidad de la marcha, la longitud de la zancada, el tiempo de postura y los ángulos de las articulaciones (Lee et al., 2021). Además, se han desarrollado herramientas de análisis de la marcha, como la herramienta de evaluación e intervención de la marcha (G.A.I.T.), para medir los componentes coordinados de la marcha y evaluar los déficits de la marcha (Daly et al., 2009). Además, la evaluación observacional de la marcha

(OGA) se utiliza habitualmente en entornos clínicos para evaluar la marcha independiente en pacientes con accidente cerebrovascular y adultos jóvenes con parálisis cerebral (Ju, 2022; Bonnefoy-Mazure et al., 2020). Sin embargo, estos equipos aún son de costo elevado y normalmente están asociados a laboratorios de marcha, limitando su uso portable en contexto clínico.

## Definición del problema y desafío de innovación

En proyecto identificó la necesidad de contar con un sistema portátil de valoración de la marcha adaptado a las condiciones de uso en un ambiente hospitalario, con el fin de complementar las actuales baterías clínicas (test clínicos, observación, reporte del paciente), entregando información objetiva, precisa y válida que permita una mejor valoración del estado del paciente, su evolución y el efecto de las intervenciones terapéuticas.

Objetivo general:

- Desarrollar un sistema portátil para la valoración cinética y cinemática de la marcha en el entorno hospitalario.

Como objetivos específicos identificamos los siguientes:

- Seleccionar *hardwares* para adquirir señales de aceleración y electromiografía.
- Diseñar rutinas de sincronización para el análisis de señales.
- Diseñar un *software* para la integración y reporte de mediciones de la marcha.
- Evaluar la calidad del registro y facilidad de uso por parte del usuario del sistema desarrollado.

## Revisión de la literatura o experiencias relevantes

Las lesiones de extremidad inferior relacionadas al trabajo u ocupación son un problema de salud relevante, dada las consecuencias funcionales que provocan, especialmente el impacto en la autonomía del desplazamiento. Esta situación impacta en la posibilidad de asistir al lugar de trabajo, aumentando el costo económico relacionado a los accidentes y enfermedades laborales. Según una reciente revisión sistemática, en Europa durante el siglo XXI, la prevalencia de lesiones musculo esqueléticas en trabajadores alcanzó en promedio un 29%, siendo la región de rodilla la más afectada (33%), seguida por la pierna (29%), tobillo-pie (17%) y cadera (11%). A su vez, la incidencia de lesiones anuales fue de 121/millón en la industria alimentaria, 49/millón en la industria del plástico y 317/millón en la industria metalúrgica (Govaerts et al., 2021). La situación difiere si analizamos las lesiones de extremidad inferior a causa de accidentes de tránsito, dado que la biomecánica del intercambio de fuerza causa lesiones prevalentes en cadera (fractura acetabular y luxación posterior de cadera) y tobillo-pie (fracturas relacionadas a la mecánica del freno) (Ammori & Abu-Zidan, 2018). Esto explica la incidencia de este tipo de lesiones en diferentes regiones del mundo, siendo factores de riesgo común para este tipo de lesiones el sexo masculino en personas jóvenes motociclistas y peatones (Canonica et al., 2023).

Cuando analizamos los problemas de extremidad inferior de acuerdo a la ocupación de los trabajadores y sus características demográficas, podemos destacar que los problemas de cadera son más prevalentes en personas de mayor edad, sobre 50 años, de sexo femenino y con IMC sobre 30. Además, personas con pie plano presentan mayores síntomas en cadera. Respecto a las características de su ocupación, aquellas personas que caminan más tiempo sobre una superficie blanda, reducen su riesgo de sufrir problemas de cadera (Werner et al., 2011). Cuando se analizan los problemas de tobillo/pie, el perfil demográfico es similar (Werner et al., 2010). En este caso, aquellos trabajadores con mayor prevalencia de disfunciones en tobillo/pie, presentan un perfil de marcha con un aumento de la presión en la región metatarsiana (cabeza). En este caso, un aumento del 10% de tiempo caminando durante su día laboral se asocia con un mayor riesgo de problemas en esta región corporal (20%). Es así como los problemas de extremidad superior tienen una directa relación con problemas en la marcha, siendo esta relación bidireccional.

Alteraciones biomecánicas posteriores a lesiones de la extremidad inferior impactan el perfil cinemático y cinético de la marcha. Un claro ejemplo es el efecto de un acortamiento de una extremidad inferior producto de una fractura de cadera en el perfil cinemático. Es así como una asimetría en el largo de las extremidades inferiores se correlaciona con una disminución de la cadencia y el largo del paso, junto con un aumento del tiempo de doble

apoyo y una asimetría en el apoyo unipodal (Gausden et al., 2018). Cuando analizamos los efectos a largo plazo de una fractura de tibia (más de 2 años de evolución), encontramos un perfil cinemático similar. En específico, pacientes con fractura unilateral de tibia resuelta mediante clavo intramedular, muestran una reducción en la velocidad de la marcha, disminución del largo del paso, de la cadencia y del tiempo de soporte en la extremidad afectada. Además, la activación muscular del cuádriceps de la extremidad afectada se reduce al menos 10%, afectando la potencia desarrollada en las fases de carga y apoyo medio (Canseco et al., 2023). Esto genera una situación propicia para el desarrollo de dolor en rodilla y tobillo permanentemente. Consecuencias similares a las ya descritas pueden ocurrir posterior a una fractura de tobillo (Mirando et al., 2022).

En particular, las alteraciones detectadas en la marcha, como la variabilidad del paso y el perfil de aceleración de tronco, se correlacionan con el riesgo de caída en el largo plazo en pacientes con fractura de cadera (Hsu et al., 2019). Esto destaca la relevancia de contar con instrumentos objetivos, precisos y confiables para valorar la marcha en diferentes estadios de evolución. Tal información permite tomar decisiones clínicas inmediatas, valorar la evolución del paciente y prever eventos futuros como los ya descritos. Experiencias al respecto, mediante el uso de solo un sensor inercial, muestran resultados alentadores en cuanto a la confiabilidad, validez y significancia clínica de la parametrización cinemática de la marcha mediante este tipo de sensores, así como su asociación con test clínicos (Bailo et al., 2024; Ensink et al., 2023; He et al., 2024; Zhang et al., 2023). Por tanto, el uso de este tipo de tecnologías constituye una herramienta de utilidad en la rehabilitación de la marcha.

Para resolver esta necesidad de bio-instrumentación, una alternativa es el uso de sistemas de *hardware* y *software* integrados para la valoración específica de la marcha, en los llamados “laboratorios de marcha”, los cuales permiten un análisis exhaustivo de variables cinéticas (habitualmente implementadas mediante electromiografía) y cinemáticas (mediante videofotometría, plataformas de presión o sensores inerciales, entre otras). Estos laboratorios son de alto costo y no son portátiles, lo que obliga a llevar a los pacientes a ese lugar para ser evaluados. Como alternativa, existen dispositivos comerciales de menor costo basados en tecnología de sensores inerciales, los cuales son portables y de fácil utilización, pero que presentan limitaciones para el acceso directo a la información adquirida, así como restricciones de compatibilidad con otros dispositivos o sistemas informáticos de registro de pacientes.

Ejemplo de estas alternativas son:

- *Noraxon ultium*: este sistema combina sensores de electromiografía y sensores inerciales. Logra una tasa de muestreo de EMG hasta 4000 hz. Genera reportes de

actividad muscular en magnitud, tiempo y coordinación intermuscular. Es un sistema inalámbrico y portátil. Su costo supera los USD\$15.000

- *Mobility lab* APDM: este sistema utiliza múltiples sensores inerciales inalámbrico para evalúa extremidad superior, inferior y tronco. Combina señales para generar métricas de marcha, balance, extremidad superior, y bajo protocolo, pruebas clínicas como Up & Go. Cuenta con respaldo científico de publicaciones. Su costo supera los USD\$15.000 para el set completo de sensores.
- *G-Walk*: este sistema cuenta con un sensor inercial, totalmente portátil. El *software* permite obtener parámetros generales de la marcha, así como reportes de pruebas clínicas. Su costo es menor a los equipos anteriores, alrededor de USD\$4000.

## Descripción de la metodología o etapas de la innovación

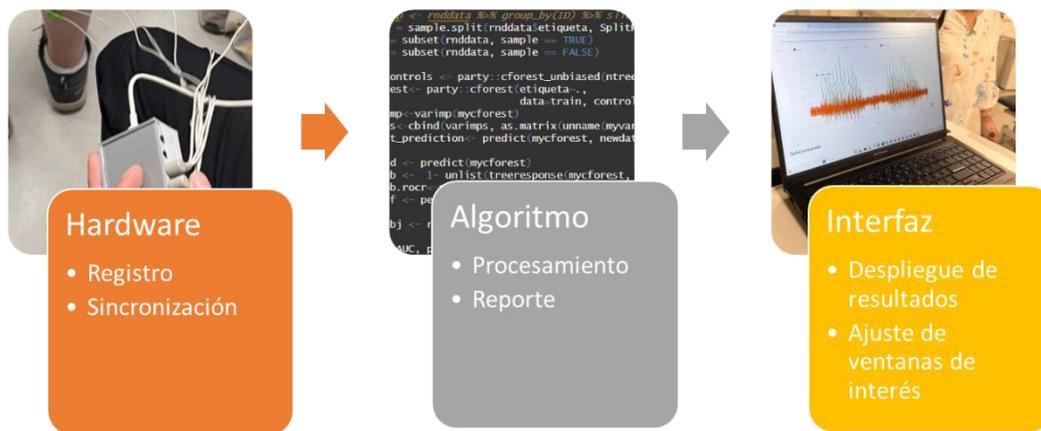
Para cumplir los objetivos propuestos, se estableció una carta Gantt de trabajo que incluyó las siguientes etapas:

- Selección de *hardware* disponibles: se realizó una revisión de los prototipos de placas de electromiografía y sensores inerciales disponibles en el mercado. Se privilegió el uso de microprocesadores compactos y eficientes (Idealmente 32 bits, *dual core*), que permitieran conectividad inalámbrica *Bluetooth* 5.0 y/o wifi, *Frontend* análogo con amplificador de instrumentación (diferencial) con ganancia 1000x, con posibilidad de integrar un filtro pasa banda (1-500 Hz), digitalización de al menos 12 bits, y con una unidad inercial de 6 ejes (3 acelerómetros, 3 giroscopios). Para los acelerómetros se buscó en rango hasta +/-16g y una adquisición a 16 bits.
- Desarrollo de *hardware*: tras analizar la oferta, se decidió desarrollar una alternativa propia que combina 4 circuitos de EGM y un sensor inercial de 6 grados.
- Desarrollo de algoritmo de análisis: se desarrolló una rutina propia de análisis de señales en el lenguaje *Python*.
- Desarrollo de *software* para reporte de métricas de marcha: se desarrolló una interfase web para entregar un reporte gráfico de las señales de EMG y las métricas de marcha general, así como de activación muscular.
- Pilotaje del sistema: al interior de la Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación se llevó a cabo pruebas en jóvenes voluntarios para adquirir señales reales y ajustar los algoritmos de procesamiento. Así mismo, se inició la evaluación de usabilidad, incorporando mejoras al montaje de electrodos y de la placa de registro basado en esta experiencia, lo cual fue incorporado en la evaluación llevada a cabo en el Hospital del Trabajador en Enero 2024.
- Evaluación de usabilidad: En dos sesiones, se realizó el registro de 4 pacientes, quienes portaron el sistema en una prueba de marcha de 10 metros. Dos evaluadores kinesiólogos del recinto asistencial fueron quienes manipularon el sistema, operaron el *software* y recibieron el reporte de marcha.

En paralelo, se ejecutaron 27 reuniones que consideran coordinación al interior del equipo de desarrollo, reuniones de reporte con equipo de gestión de proyectos de la ACHS y reuniones con el equipo de productos digitales de la ACHS para evaluar ciberseguridad y emáquetar de acuerdo a los estándares de la ACHS. Estas reuniones permitieron comunicar avances, detectar nudos críticos y establecer estrategias que permitieran una progresión oportuna del proyecto.

## Descripción del producto desarrollado

La tecnología está compuesta de tres elementos claves. Un *hardware* que registra y sincroniza señales de electromiografía y acelerometría, un algoritmo que procesa estas señales generando indicadores para el reporte de la marcha, y finalmente, una interfaz que permite al terapeuta ver el reporte y ajustar las ventanas de interés de la marcha (Figura 1). Este desarrollo se presenta en etapa inicial de prototipo mínimo viable.



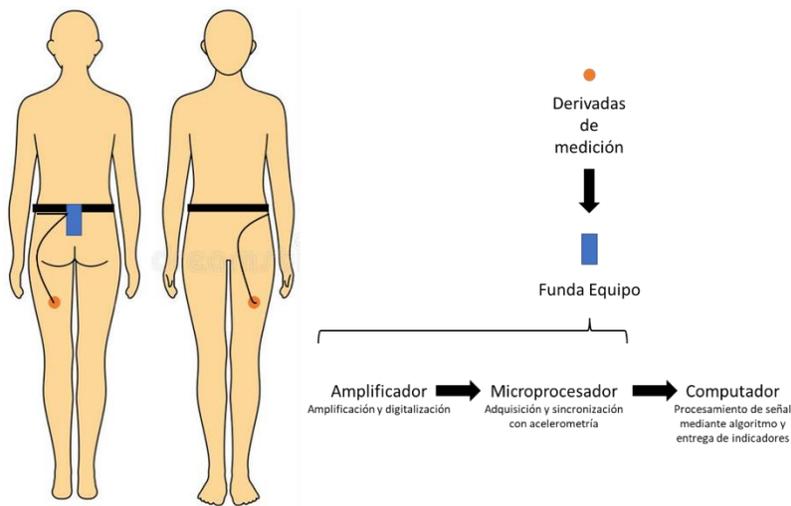
**Figura 1.** Esquemático del producto desarrollado.

El *hardware* consiste en electrodos de registro desechables que se conectan por medio de cables al amplificador. Luego la señal amplificada es digitalizada y enviada vía wifi a un computador. En el computador de destino, con acceso a la intranet de la ACHS, se tiene acceso a un webAPP. Esta webAPP permite ingresar pacientes y almacena los registros de realizados a cada paciente. El terapeuta puede agregar el registro dentro de esta webAPP. Una vez ingresado el registro, este es procesado aplicando el algoritmo desarrollado. El resultado de este procesamiento son los indicadores de marcha y un gráfico desplegado que permite visualizar la señal de acelerómetros y electrodos. Cada señal puede ser vista en conjunto o por separado, siendo posible además ajustar la ventana de interés manualmente por medio de la interfaz gráfica. Si el terapeuta lo requiere, puede solicitar que se recalculen los indicadores en base a la ventana seleccionada.

## Resultados

### Hardware

El sistema desarrollado incorpora 4 sensores de electromiografía y un sensor inercial de 6 grados. Los sensores de electromiografía son bipolares, y se conectan con una tarjeta de adquisición de tamaño pequeño (25 cm<sup>2</sup> aprox). El sensor inercial está acoplado a la tarjeta de adquisición, lo cual facilita su uso. Mediante una chip wifi incorporado a la placa, el sistema se comunica con el computador para transmitir datos de manera inalámbrica. Un algoritmo desarrollado en *Python* permite la comunicación entre el *hardware* y el PC de registro, almacenando la información. Así mismo, este PC levanta el servidor para llevar a cabo el procesamiento y reporte de la prueba de marcha.



**Figura 2.** Esquema de ubicación de sensores y flujo de señal.

El esquema de instalación del dispositivo se ilustra en la Figura 2. Específicamente para registrar acelerometría se ubica la placa de la Figura 2 en la región posterior de la pelvis, a la altura de S2. Los 4 canales de EMG fueron distribuidos para registrar hasta 4 músculos. En la figura 2 se ilustra solo la instalación de 2 sensores, uno anterior (figura humana de la derecha) sobre el músculo vasto lateral, ubicando la derivada en el vientre muscular a la altura media entre la espina iliaca antero superior y el borde superior de la patela. El

segundo sensor se presenta en la región posterior (figura humana de la izquierda) para registrar el bíceps femoral ubicando la derivada sobre el vientre al 50% de la línea que conecta la tuberosidad isquiática y el epicóndilo lateral de la tibia, lo que debería entregar información suficiente para la valoración de la marcha. La placa contiene un chip wifi que genera una red propia a la cual el PC de registro puede conectarse para transmitir y almacenar la información. De esta forma, se obtiene un sistema portátil en su funcionamiento y que opera de manera inalámbrica respecto al PC de adquisición.

La Figura 3 presenta el diagrama técnico del hardware desarrollado, donde se observan 4 canales de amplificación, un sistema de tierra, un sensor de acelerometría y un dispositivo de conversión análogo-digital. Se incluye el módulo wifi, mediante el cual puede comunicarse con el PC.

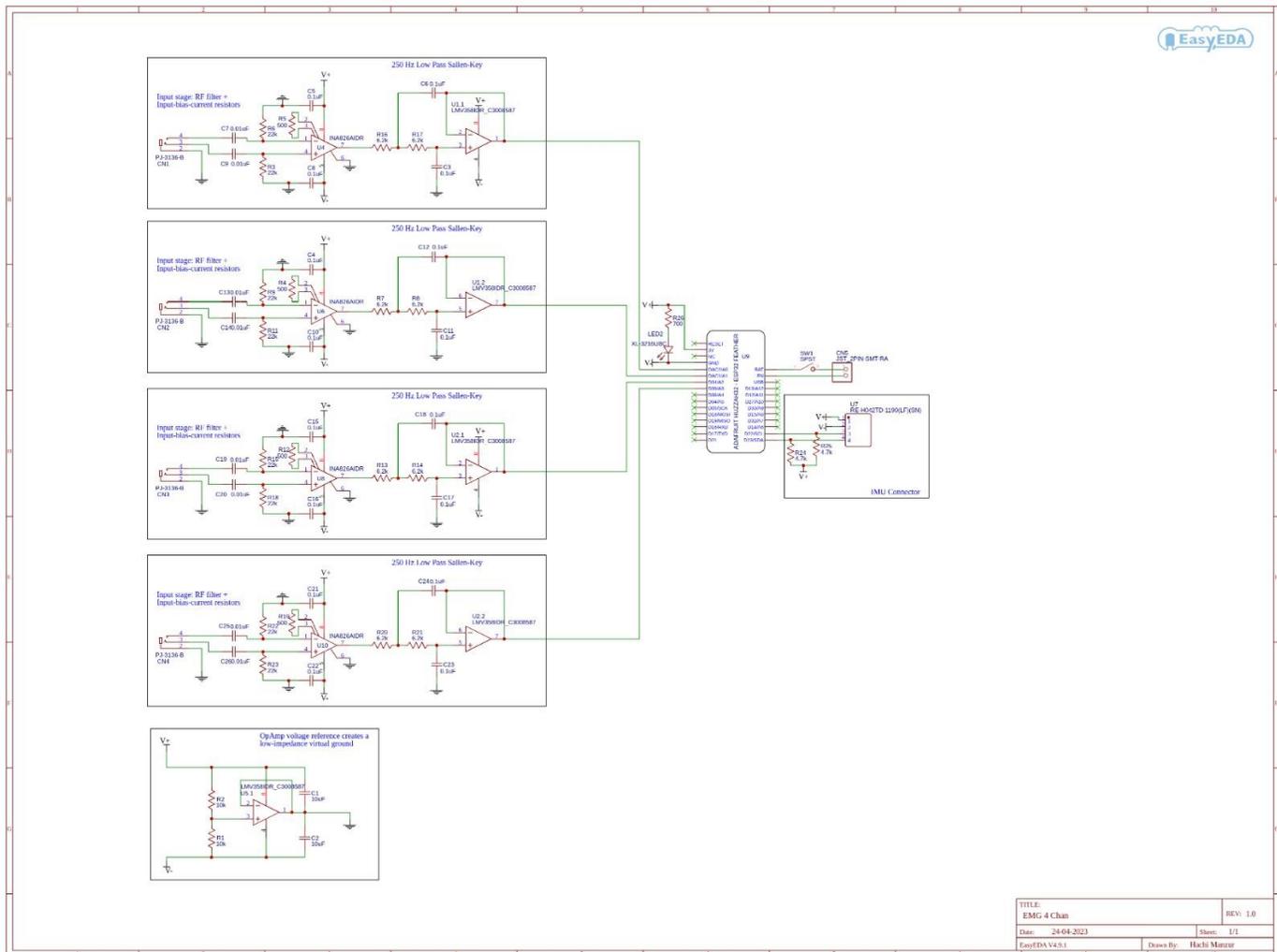


Figura 3. Esquemático del circuito del hardware desarrollado.

## Algoritmo de análisis de señales de aceleración y EMG

Tras una serie de experiencias piloto al interior del Laboratorio de Cognición y comportamiento sensoriomotor de la Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación, desarrollamos algoritmos de análisis de señales de los sensores inerciales y EMG utilizando el lenguaje *Python* y librerías *Pandas*, *Matplotlib*, *Numpy* y *Scipy*. Las fases del algoritmo incluyen:

- Importación de datos y adecuación.
- Filtrado de señales.
- Determinación de umbrales de actividad.
- Determinación de ventanas de análisis, correspondientes a los *peaks* de aceleración en relación al contacto de talón en casa paso.
- Para cada ventana de análisis, se extrae características de aceleración: *peak*, promedio y RMS<sup>1</sup>. Además, se caracteriza la activación muscular respecto a: duración, amplitud, latencia, RMS, poder espectral promedio, poder espectral máximo, frecuencia con el poder promedio y frecuencia con el poder máximo.
- Además, se obtuvieron métricas generales de marcha: duración, velocidad, longitud, número y frecuencia de pasos, cadencia y variabilidad en la duración, así como tiempo de coactivación muscular entre pares de derivadas.

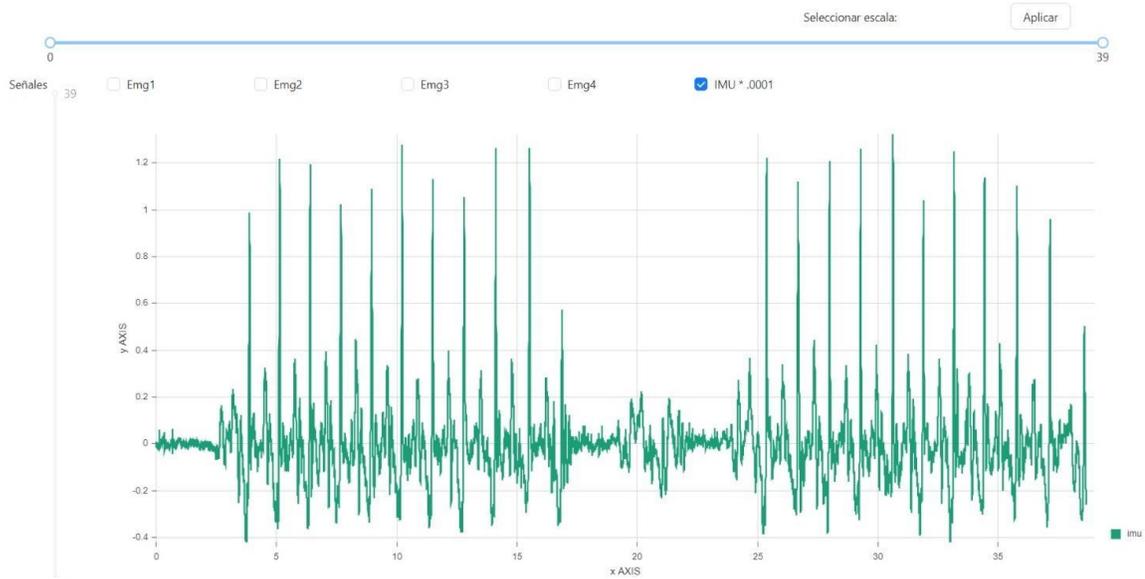
El algoritmo considera la distancia recorrida, la cual debe ser informada. De acuerdo a la duración de pasos, se determinaron los tramos de marcha continua. Por cada tramo se obtuvieron las métricas previamente indicadas.

A continuación se presentan imágenes de las señales adquiridas, tanto para la aceleración en el plano vertical (Y) como para una de las derivadas de EMG obtenidas de las pruebas de campo con paciente.

---

<sup>1</sup> Del inglés Root Mean Square, que corresponde al promedio de la raíz cuadrada del cuadrado del promedio de una señal eléctrica. Esta aproximación es comúnmente utilizada en contextos de corriente cambiante. Por ejemplo, para corriente eléctrica alterna, RMS es igual al valor de la corriente continua constante que produciría la misma disipación de potencia en una carga resistiva. En el caso de señales bioeléctricas, es una de las características usualmente extraídas de la señal con fines de caracterización.

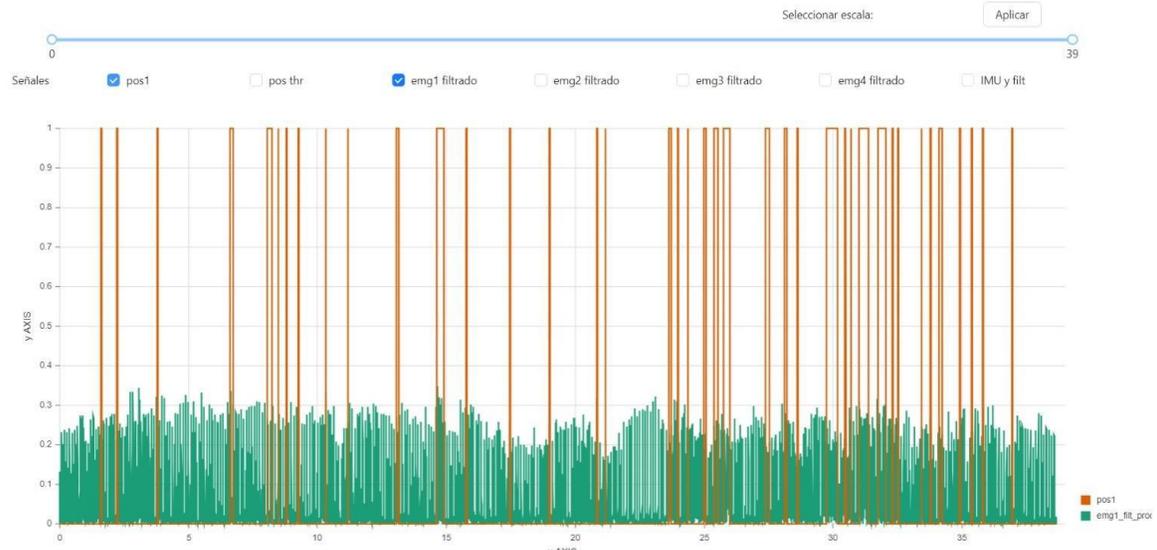
## Señal original



**Figura 4.** Señal original de aceleración en el plano Y.

En la Figura 4 se presenta la señal de aceleración de un registro de marcha. Se observa una secuencia de *peaks* en el trazado, correspondiente al momento en que el talón contacta el suelo. A partir de la detección de estos *peaks*, la señal es dividida en ventanas de interés correspondiente a cada paso. En este registro, el primer tramo corresponde al recorrido de ida (11 *peaks*). Luego la persona giró sobre su eje (señal con ruido), y luego recorrió el camino de vuelta (11 *peaks*).

## Señal procesada



**Figura 5.** Trazado de electromiografía (línea verde) y ventanas de actividad muscular detectada (líneas naranjas).

En la Figura 5 se muestra un registro procesado, donde se ilustran periodos de actividad muscular que cumplieron los criterios para ser considerados como activación real. Estos periodos son breves, demarcados por el trazado naranja.

## Desarrollo de Software

Se implementó una aplicación web que permite procesar archivos CSV que contienen señales almacenadas como texto plano para luego generar diferentes gráficos y tablas con la información solicitada. Específicamente, se implementaron dos componentes principales un servidor *backend* utilizando *Python* en conjunto con la librería *Django REST* y un servidor *frontend* *Typescript* con la librería *React*.

### **Backend**

Este servidor consiste en una API RESTful conectada a una base de datos relacional. Dicha aplicación considera las siguiente funcionalidades:

1. *Endpoints* de autenticación persistente con *Json Web Token*.
2. *Endpoints* de escritura y lectura de archivos CSV.
3. Funciones de procesamiento de señales.

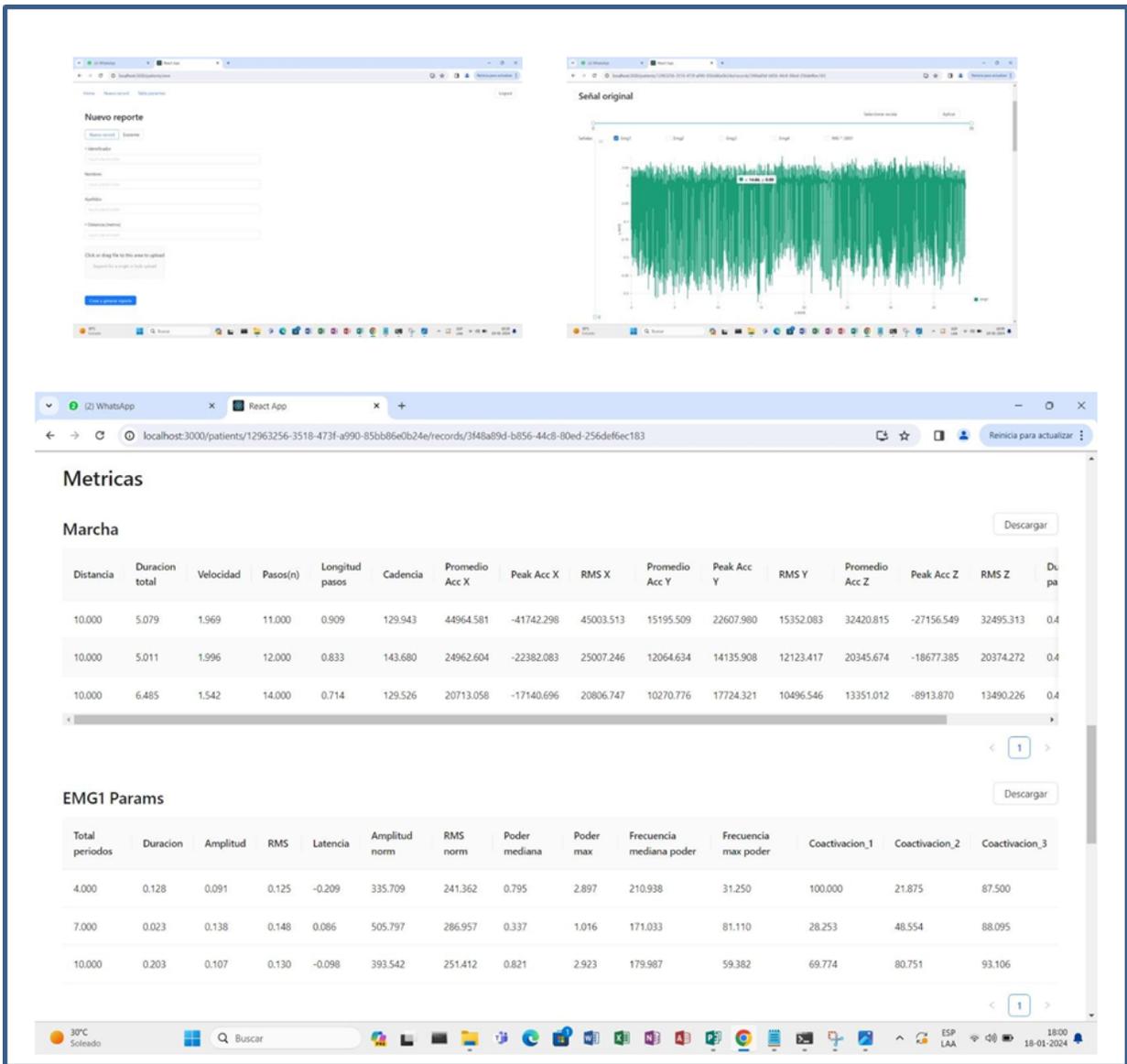
Además, se configuró la plataforma *Admin* de *Django* a la cual solamente pueden acceder usuarios *Super Admin* previamente asignados.

### **Frontend**

Este servidor consiste en una aplicación del tipo *Single Page Application* con la cual interactúa el usuario final. Dentro de las principales funcionalidades encontramos:

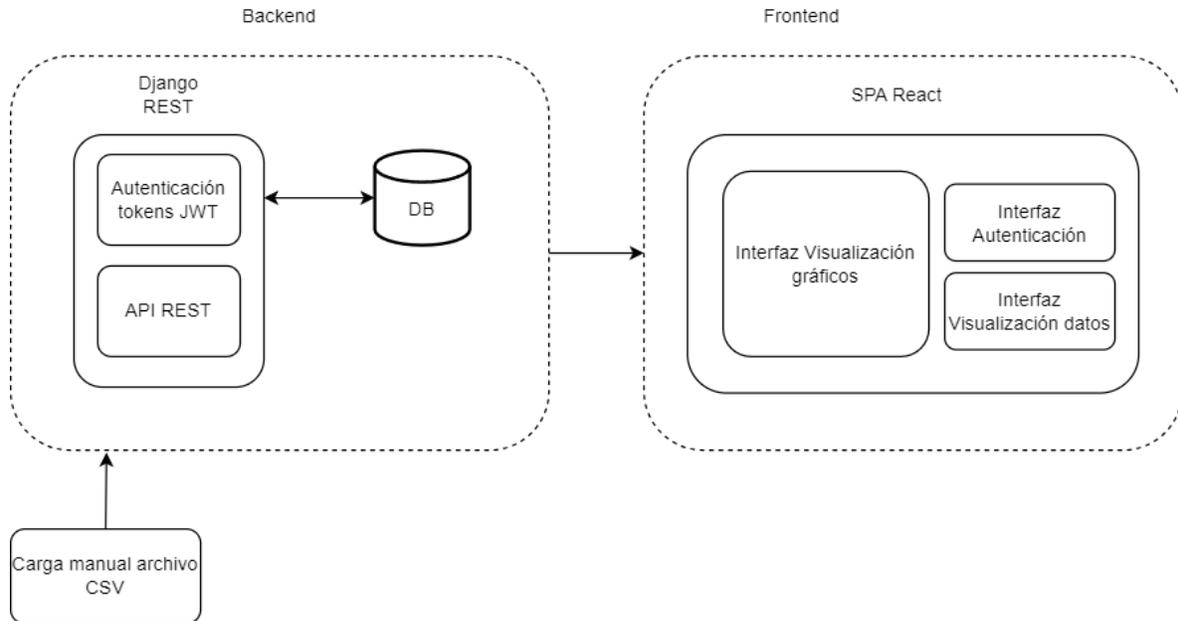
1. Interfaz de *login/logout*.
2. Interfaz de carga de datos pacientes + archivo CSV con señales recopiladas.
3. Interfaz de resultado con gráficos y tablas que entregan información luego de que las señales sean procesadas por el *backend*.
4. Tabla con lista de pacientes con sus respectivos archivos cargados.

En el caso de los gráficos se utilizó la librería *Nivo* con componentes del tipo *Canvas*, de esta manera es posible procesar gráficos de más de 10.000 puntos sin generar algún tipo de latencia que influya en la usabilidad y experiencia final del usuario. La figura 6 muestra imágenes de la aplicación web.



**Figura 6.** Imagen de captura de pantalla que ilustra la aplicación web. La imagen superior izquierda muestra el primer paso de interacción con el usuario, donde puede ejecutarse el análisis de un registro en particular. La imagen superior derecha muestra el señal original importada. La imagen inferior muestra el resultado del análisis, indicando la serie de métricas de marcha. Este resultado puede ser exportado en un archivo de texto mediante el botón “Descargar”.

## Arquitectura solución



**Figura 7.** Diagrama de arquitectura de la web APP desarrollada.

## Tecnologías usadas

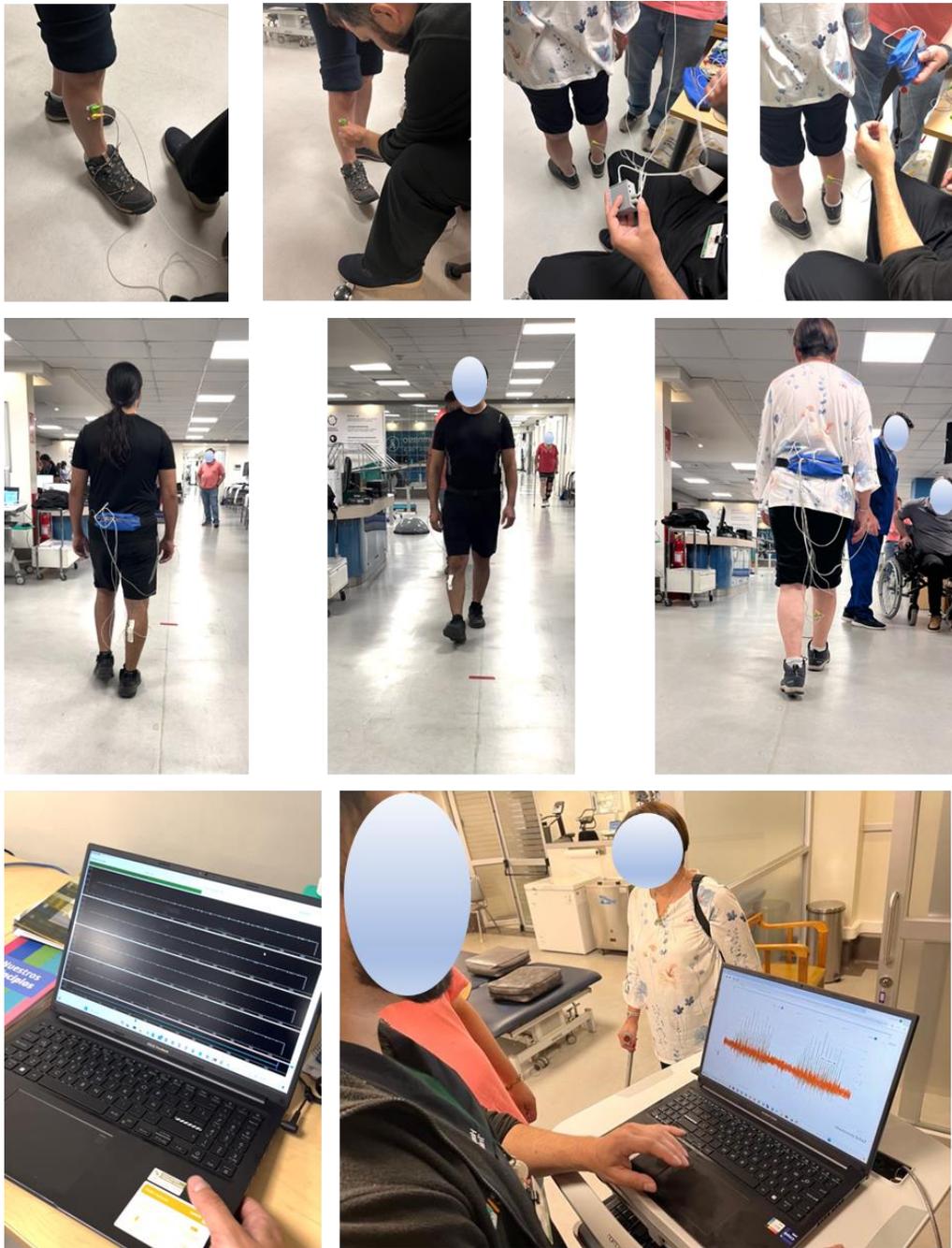
<b>Frontend</b>	<b>Backend</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Python 3.9</li> <li>• Django 4.0</li> <li>• Django Rest Framework</li> <li>• Numpy, Pandas y Scipy</li> <li>• Autenticación con JWT (simple-jwt)</li> <li>• Base datos producción : Postgres</li> <li>• Base datos durante el desarrollo: SQLite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Typescript</li> <li>• Node 18+</li> <li>• React 18.04</li> <li>• Redux + Redux toolkit</li> <li>• Librería de visualización @Nivo</li> <li>• Axios</li> </ul>

## Pruebas de usabilidad en contexto real

Durante Enero de 2024 se realizaron las pruebas de usabilidad en dos sesiones al interior de la unidad de terapia física del Hospital del Trabajador. En estas pruebas participaron dos terapeutas kinesiólogos (uno de ellos es biomecánico en la unidad), junto a 4 pacientes. Todos los involucrados entregaron su consentimiento escrito mediante firma del documento, el cual fue aprobado por el Comité de Ética de Investigación Científica del Hospital del Trabajador el 21 de diciembre de 2022 (Anexo MS1). Cada sesión de registro tomó aproximadamente 45 minutos. En la sesión, el equipo innovador entregó una breve descripción del proyecto, sus objetivos y propósitos. Luego, el sistema fue descrito tanto en su componente de *hardware* como *software*. Para obtener un reporte válido de usabilidad, se solicitó a cada terapeuta que ejecutara la totalidad de las acciones requeridas para utilizar el sistema.

Esto consideró:

- Preparación de la piel del paciente
- Instalación de sensores de electromiografía. Dada las condiciones físicas de los pacientes, simplificamos el registro para capturar solo 2 músculos de fácil acceso. Estos fueron el músculo tibial anterior y el gastrocnemios medial.
- Instalación de estuche portador de IMU. El IMU fue instalado en la región lumbar dorsal, a la altura de L2.
- Conexión de sensores con *software* de registro mediante wifi. Esto requirió que el terapeuta manipulara el computador directamente, seleccionando la red wifi generada por la placa de adquisición.
- Explicación del procedimiento de marcha. El terapeuta entregó las instrucciones al paciente para que caminara por el gimnasio de terapia física en un trayecto de 10 metros lineales. Las instrucciones fueron: camine hasta la marca del piso; deténgase 3 segundos; gire; deténgase nuevamente 3 segundos y vuelva a la posición de inicio.
- Adquisición de las señales. El terapeuta entregó la señal de inicio al paciente. Se ejecutó el recorrido, mientras se activó el *software* de adquisición. Cada paciente realizó 3 registros.
- Análisis de las señales. El terapeuta fue guiado por el equipo innovador para poder navegar en la plataforma web que permitió el análisis y visualización de las señales de marcha del paciente. El equipo innovador entregó una breve explicación de cada parámetro cinemático de la marcha y de activación muscular de los grupos registrados. Además, se resolvieron dudas de interpretación surgidas en la misma sesión.



**Figura 8.** Registro fotográfico de una sesión de prueba del sistema en el Hospital del Trabajado de Santiago. Las imágenes superiores corresponden al momento de instalación de los electrodos y el estuche portador de la placa de adquisición. Los electrodos (2 derivadas bipolares) fueron ubicados en la región anterior y posterior de la pierna derecha. También puede observarse la placa de adquisición (caja gris), de tamaño pequeño, la cual recibe los cables provenientes de los electrodos. Esta placa se conecta mediante Wifi con el computador de registro (imágenes inferiores). En las imágenes centrales puede observarse momentos del registro de marcha. Finalmente, en las imágenes inferiores puede observarse la operación de adquisición de las señales (izquierda) y análisis (derecha).

## Resultados de usabilidad por terapeutas

Para evaluar la experiencia de los usuarios (terapeutas y pacientes) durante una sesión de valoración de la marcha con nuestro sistema, se aplicaron dos instrumentos de usabilidad: *System Usability Scale* (SUS) y *Quebec user Evaluation of Satisfaction with assistive Technology* (QUEST 2.9), de los cuales se extrajeron ítems relevantes para el tipo de solución y contexto del presente proyecto. Ambos instrumentos se basan en una escala de Likert de 5 puntos de calificación para cada ítem. Estos instrumentos fueron aplicados a dos terapeutas y 4 usuarios de la ACHS.

SUS es una herramienta para la valoración de la usabilidad enfocada en sistemas interactivos (Peres et al., 2013; Grier et al., 2013). Es ampliamente valorado por la obtención de resultados confiables con especial énfasis en la percepción de la calidad del producto (Tor-Carroggio et al., 2019). Se ha utilizado en un amplio espectro de situaciones que van desde intervenciones para depresión basadas en internet (Mol et al., 2020), aplicaciones web de centros de salud (Holden 2020), y uso de dispositivos móviles (Baumgartner et al., 2019), entre otros. En términos generales, SUS es una buena herramienta para evaluar la valoración subjetiva que se le da al producto, así como las potenciales barreras de uso percibidas por los usuarios.

QUEST en cambio es un instrumento no tan ampliamente utilizado, pero orientado específicamente a tecnologías de asistencia (Hwang & Chung, 2015; Guerreiro et al., 2022). Se ha utilizado para la evaluación de brazos robóticos en pacientes secuestrados de accidentes cerebro vasculares (Guillén-Climent et al. 2021, 2022), exoesqueletos en pacientes con lesiones medulares (Dijsseldonk et al., 2020), entre otros. QUEST es un instrumento de usabilidad con orientado a la evaluación de dispositivos de uso clínico (Domingues et al., 2019; Mehmood et al., 2022; Pani et al., 2016; Farina et al., 2019), que a diferencia de SUS, se enfoca en características más objetivables del dispositivo (como tamaño y peso), en contraste con la percepción subjetiva sobre la valoración general que se le daría al dispositivo en diferentes aspectos.

Los resultados obtenidos en las pruebas de usabilidad para los terapeutas se pueden observar que el QUEST presentó todas las respuestas estuvieron en el rango de 4 y 5 (“Satisfecho” o “Muy satisfecho”). Es decir, tanto para atributos físicos como las dimensiones y peso del aparato (solución de presente proyecto) como para la facilidad de operación y satisfacción general con el aparato, entre otros ítems (Tabla 1, para más detalles ver Anexo, Tabla A1).

**Tabla 1.** Evaluación de usabilidad por terapeutas mediante los instrumentos SUS y QUEST.

<b>Instrumento</b>	<b>Preguntas</b>	<b>Puntaje Terapeutas</b>
<b>QUEST</b>	Las dimensiones (talla, ancho, largo) de su aparato?	5
	El peso de su aparato?	5
	La facilidad para ajustar (graduar, asegurar) las partes de su aparato?	4.5
	La durabilidad (duración y resistencia al uso) del aparato?	4.5
	La facilidad para usar (tenerlo puesto) el aparato?	5
	La efectividad del aparato para resolver el problema para el cual usted lo usa?	4
	La calidad de los servicios profesionales (información, atención) que usted recibió para utilizar su aparato?	5
	¿Cuál es su nivel de satisfacción en general con el aparato?	5
<b>SUS</b>	Creo que me gustaría usar este sistema frecuentemente	4.5
	Encuentro el sistema innecesariamente complejo	1.5
	Pienso que este sistema fue fácil de usar	4.5
	Creo que necesitaría el soporte de personal técnico para poder utilizar este sistema	3.5
	Encontré que la variedad de funciones del sistema estaban bien integradas	3.5
	Pienso que el sistema tenía muchas inconsistencias	3.5
	Imagino que la mayoría de las personas aprendería a usar el sistema muy rápido	4.5
	Encontré que el sistema era muy engorroso de usar	3
	Me sentí muy seguro/a usando el sistema	5
	Tuve que aprender muchas cosas antes de poner en marcha el sistema	3

Para el instrumento SUS las respuestas de los terapeutas también apuntan a una buena experiencia de usabilidad, destacando puntajes de 4 y 5 para ítems que se orientan en el gusto de volver a usar el dispositivo, la facilidad de utilización y el pensamiento que para la mayoría de las personas sería fácil de utilizar. Los puntajes más bajos están orientados a las funciones del sistema y su integración (Tabla 1, ver Anexo Tabla A2 para más detalles). Por otra parte, este instrumento nos mostró los desafíos para un futuro proyecto de continuidad, destacando que para un terapeuta resulto engorroso la utilización del equipo y la eventual necesidad de instrucción directa (capacitación).

Esto último es relevante, pues las pruebas de usabilidad no consideraron ningún tipo de capacitación, más que la supervisión durante la primera experiencia de uso del equipo. Es importante considerar esto al interpretar los resultados de usabilidad, pues el dispositivo y su *software* fueron evaluados en una situación desventajosa (sin experiencia previa y sin capacitación). Sin embargo, la experiencia entrega ciertos puntos clave que pueden ser facilitados, así como considerar una capacitación dirigida para el uso del equipo y su *software*.

## Resultados de usabilidad por usuarios

Al evaluar los aspectos de usabilidad objetivables más relevantes en contextos de dispositivos de asistencia clínica (QUEST), Es posible observar que la gran mayoría de las respuestas estuvieron en el rango de 4 y 5, es decir “Satisfecho” o “Muy satisfecho”, tanto para atributos físicos como las dimensiones y peso del aparato (solución de presente proyecto) como para la seguridad del equipo, la comodidad y la satisfacción general (Tabla 2, para más detalles ver Anexo Tabla A3).

Cuando se realiza la evaluación de percepción general y potenciales barreras de uso del dispositivo (SUS) las respuestas de los usuarios apuntan a algunos problemas. En general se ve que el dispositivo es percibido como complejo y engorroso, y que es difícil de usar. La sensación de seguridad también se vio comprometida. Si bien estas son debilidades detectadas desde los futuros pacientes, sus puntajes en general estuvieron sobre 3, indicando que, pese a que hay espacios de mejora, la versión actual no sería percibida negativamente.

El único puntaje percibido como negativamente, fue la pregunta referente a lo que había que aprender para poner en marcha el sistema. Este último punto creemos puede verse fuertemente influenciado porque fue también de los primeros usos que los terapeutas le dieron al equipo, generando cierta inseguridad en el paciente. Sin embargo, se ven ciertos

espacios de mejora para facilitar la usabilidad usuaria y en particular aumentar la confianza sobre el dispositivo.

**Tabla 2.** Evaluación de usabilidad por usuarios mediante los instrumentos SUS y QUEST.

<b>Instrumento</b>	<b>Preguntas</b>	<b>Puntaje Usuarios</b>
<b>QUEST</b>	Las dimensiones (talla, ancho, largo) de su aparato?	4.7
	El peso de su aparato?	4.7
	La facilidad para ajustar (graduar, asegurar) las partes de su aparato?	4
	La seguridad y la posibilidad de que no le haga daño el aparato?	4.5
	La facilidad para usar (tenerlo puesto) el aparato?	4.7
	La comodidad del aparato?	4.7
	¿Cuál es su nivel de satisfacción en general con el aparato?	4.7
<b>SUS</b>	Encuentro el sistema innecesariamente complejo	3.1
	Pienso que este sistema fue fácil de usar	3.6
	Imagino que la mayoría de las personas aprendería a usar el sistema muy rápido	3.3
	Encontré que el sistema era muy engorroso de usar	3.3
	Me sentí muy seguro/a usando el sistema	3.5
	Tuve que aprender muchas cosas antes de poner en marcha el sistema	2.0

## Apreciación general de la usabilidad y espacio de mejora

Por otra parte, al finalizar las pruebas tanto con terapeutas como usuarios, se realizó una breve entrevista no estructurada, con el fin de rescatar las percepciones emergentes de manera libre y espontánea. Desde aquí pudimos verificar consistencia del relato con las calificaciones de los dos instrumentos previamente detallados, incluyendo una buena percepción de usabilidad de la solución desarrollada y se rescata la necesidad de una breve capacitación en el uso del equipo e interpretación de los resultados.

En base a estas pruebas de usabilidad, el equipo detectó los siguientes espacios de mejora:

### 1. *Hardware*

- 1.1. Cambio de filtros analógicos para ajustarse a la señal EMG
- 1.2. Evaluación de uso de un conversor análogo digital externo al microcontrolador
- 1.3. Utilización de nueva versión del microcontrolador
- 1.4. Rediseño de PCB para hacerla más compacta
- 1.5. Agregar planos de tierra a la PCB para mejorar aislamiento de radiofrecuencia
- 1.6. Incluir interfaz USB para programación y carga en la PCB
- 1.7. Agregar circuito de carga de batería
- 1.8. Agregar LEDs indicadores de carga de batería
- 1.9. Mejoras en la carcasa

### 2. Algoritmo

- 2.1. Mejora de la segmentación automática de pasos y obtención de métricas de cantidad de pasos
- 2.2. Mejora en la detección de los periodos de actividad muscular.
- 2.3. Revisión de la magnitud de cada métrica respecto a reportes de la literatura.

### 3. *Software*

- 3.1. Mejoras del *backend* para incorporar nuevos pacientes.
- 3.2. Mejoras del *frontend* para aumentar o disminuir el tamaño de las señales en los gráficos de visualización
- 3.3. Mejoras en la diagramación de las métricas para visualizar todas en una sola vista o seleccionar métricas deseadas.

Es relevante indicar que estos son los espacios de mejora detectado en un número pequeño de pruebas, las que no estaban diseñadas como pruebas de estrés. Es decir, el prototipo aún no es evaluado en condiciones de uso regular ni exigido.

## Recomendaciones para Sistema de Seguridad y Salud en el Trabajo

El actual desarrollo permite valorar la marcha de manera portátil y sencilla. El equipamiento es además de bajo costo, lo que implica que existe posibilidad de escalabilidad si fuese necesario. No obstante, el desarrollo actual es un prototipo inicial que requiere perfeccionamiento para su utilización sistemática y confiable. Este equipo tiene el potencial de mejorar la calidad de las prestaciones musculoesqueléticas, entregando información objetiva al terapeuta y el equipo clínico sobre la calidad de la marcha por medio de una evaluación breve y sencilla. Para su implementación, aún se requieren resolver limitaciones técnicas y generar un sistema robusto en contexto de uso regular.

## Conclusiones

Este proyecto cumplió los objetivos propuestos. Estos fueron ajustados de acuerdo con la contingencia nacional que implicó un desajuste presupuestario mayor. No obstante, el *hardware* desarrollado cumple con criterios de un producto mínimo viable. Este aún requiere mejoras para un uso regular, además de poder facilitar algunos aspectos de usabilidad. Pese a estas limitaciones, el *hardware* fue capaz de entregar una señal adecuada para los objetivos terapéuticos que se solicitó.

El algoritmo desarrollado fue capaz de establecer los indicadores de interés clínico. Se detectaron algunas imprecisiones en la segmentación de los pasos, pero esto puede explicarse por la tasa de muestreo y otros ajustes que requiere el *hardware*. Incluso bajo estas limitaciones, el algoritmo permite valorar el estado del paciente en momentos específicos, de modo tal que permite realizar un seguimiento de la evolución de la capacidad de marcha del paciente, información relevante para la decisión terapéutica. El *software* presentó una positiva evaluación de usabilidad, salvo algunos detalles menores que pueden ser ajustados con un trabajo menor, y en alguna medida supeditados al empaquetamiento en los sistemas de la ACHS. Salvo por esto, el *software* operó de manera estable, confiable, versátil e intuitiva.

El resultado es el prototipo de un equipamiento de bajo costo (menor al de las alternativas comerciales consideradas), de menor tamaño, y acompañado de un *software* intuitivo y fácil de operar. Al mismo tiempo, se ha trabajado cercanamente a la ACHS para asegurar que el desarrollo satisface las necesidades específicas del entorno hospitalario del Hospital del trabajador, así como también adhiriéndonos a los lineamientos del desarrollo de productos digitales para que el desarrollo de *software* sea fácilmente empaquetable en los sistemas de la ACHS. Hemos logrado generar no sólo un prototipo útil para el problema propuesto, sino a medida para las necesidades de la ACHS. En estos términos, se considera que el proyecto ha sido cerrado de manera exitosa. No obstante, el desarrollo del presente dispositivo aún está en etapa de prototipo en nivel TRL 5<sup>2</sup>. Además, de las mejoras antes mencionadas, para transitar a TRL 6<sup>3</sup>, se requieren hacer pruebas de usabilidad de largo aliento, considerando problemas derivados de uso repetitivo y condiciones de estrés sobre el software y hardware. Además, requiere la demostración de la efectividad de la medición para lo que se requeriría pruebas clínicas en un alto número de pacientes.

---

<sup>2</sup> TRL (Technology Readiness Level) 5 corresponde al nivel de demostración de función crítica y función o características complementarias relevantes de la tecnología en entorno relevante.

<sup>3</sup> TRL 6 corresponde a la demostración de un prototipo de la solución en entorno relevante.

## Referencias

- Ammori, M. B., & Abu-Zidan, F. M. (2018). The biomechanics of lower limb injuries in frontal-impact road traffic collisions. *African Health Sciences*, 18(2). <https://doi.org/10.4314/ahs.v18i2.17>
- Bailo, G., Saibene, F. L., Bandini, V., Arcuri, P., Salvatore, A., Meloni, M., Castagna, A., Navarro, J., Lencioni, T., Ferrarin, M., & Carpinella, I. (2024). Characterization of Walking in Mild Parkinson's Disease: Reliability, Validity and Discriminant Ability of the Six-Minute Walk Test Instrumented with a Single Inertial Sensor. *Sensors*, 24(2), 662. <https://doi.org/10.3390/s24020662>
- Baumgartner, J., Frei, N., Kleinke, M., Sauer, J., & Sonderegger, A. (2019). Pictorial system usability scale (p-sus).. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300299>
- Bonnefoy-Mazure, A., Coulon, G., & Armand, S. (2020). Self-perceived gait quality in young adults with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 62(7), 868-873. <https://doi.org/10.1111/dmnc.14504>
- Canonica, A. C., Alonso, A. C., Da Silva, V. C., Bombana, H. S., Muzaurieta, A. A., Leyton, V., & Greve, J. M. D. (2023). Factors Contributing to Traffic Accidents in Hospitalized Patients in Terms of Severity and Functionality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 853. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010853>
- Canseco, K., Becker, B. M., Muscott, R. K., Schmeling, G. J., & Fritz, J. M. (2023). Gait and strength assessment following surgical repair by intramedullary nailing of isolated tibial shaft fracture. *Journal of Orthopaedic Research*, jor.25704. <https://doi.org/10.1002/jor.25704>
- Chakravorty, A., Mobbs, R., Anderson, D., Rooke, K., Phan, K., Yoong, N., ... & Choy, W. (2019). The role of wearable devices and objective gait analysis for the assessment and monitoring of patients with lumbar spinal stenosis: systematic review. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12891-019-2663-4>
- Cruz-Montecinos, C., Pérez-Alenda, S., Querol, F., Cerda, M., & Maas, H. (2020). Changes in Muscle Activity Patterns and Joint Kinematics During Gait in Hemophilic Arthropathy. *Frontiers in Physiology*, 10, 1575. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01575>
- Gana, P. (2019). Estadísticas de accidentabilidad 2022 Superintendencia de seguridad social. SUSESO.

- Daly, J., Nethery, J., McCabe, J., Brenner, I., Rogers, J., Gansen, J., ... & Holcomb, J. (2009). Development and testing of the gait assessment and intervention tool (g.a.i.t.): a measure of coordinated gait components. *Journal of Neuroscience Methods*, 178(2), 334-339. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2008.12.016>
- Dijsseldonk, R., Nes, I., Geurts, A., & Keijsers, N. (2020). Exoskeleton home and community use in people with complete spinal cord injury. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72397-6>
- Domingues, I., Pinheiro, J., Silveira, J., & Martins, A. (2019). Powered wheelchair impact – user-centered observational study., 947-953. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-31635-8\\_115](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31635-8_115)
- Ensink, C., Smulders, K., Warnar, J., & Keijsers, N. (2023). Validation of an algorithm to assess regular and irregular gait using inertial sensors in healthy and stroke individuals. *PeerJ*, 11, e16641. <https://doi.org/10.7717/peerj.16641>
- Farina, N., Sherlock, G., Thomas, S., Lowry, R., & Banerjee, S. (2019). Acceptability and feasibility of wearing activity monitors in community-dwelling older adults with dementia. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 34(4), 617-624. <https://doi.org/10.1002/gps.5064>
- Gausden, E. B., Sin, D., Levack, A. E., Wessel, L. E., Moloney, G., Lane, J. M., & Lorich, D. G. (2018). Gait Analysis After Intertrochanteric Hip Fracture: Does Shortening Result in Gait Impairment? *Journal of Orthopaedic Trauma*, 32(11), 554–558. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000001283>
- Gordt, K., Gerhardy, T., Najafi, B., & Schwenk, M. (2018). Effects of Wearable Sensor-Based Balance and Gait Training on Balance, Gait, and Functional Performance in Healthy and Patient Populations: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Gerontology*, 64(1), 74–89. <https://doi.org/10.1159/000481454>
- Govaerts, R., Tassignon, B., Ghillebert, J., Serrien, B., De Bock, S., Ampe, T., El Makrini, I., Vanderborght, B., Meeusen, R., & De Pauw, K. (2021). Prevalence and incidence of work-related musculoskeletal disorders in secondary industries of 21st century Europe: A systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 22(1), 751. <https://doi.org/10.1186/s12891-021-04615-9>
- Grier, R., Bangor, A., Kortum, P., & Peres, S. (2013). The system usability scale. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1), 187-191. <https://doi.org/10.1177/1541931213571042>

- Guerreiro, J., Arberas, E., Trillo, P., Figueira, O., Buñuel, P., Pais, S., ... & Pousada, T. (2022). Cross-cultural validation of quebec user satisfaction with assistive technology 2.0 for spanish population (quest-2.0 es). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15), 9349. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159349>
- Guillén-Climent, S., Garzo, A., Muñoz-Alcaraz, M., Casado-Adam, P., Arcas-Ruiz-Ruano, J., Mejías-Ruiz, M., ... & Mayordomo-Riera, F. (2021). A usability study in patients with stroke using merlin, a robotic system based on serious games for upper limb rehabilitation in the home setting. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00837-z>
- He, Y., Chen, Y., Tang, L., Chen, J., Tang, J., Yang, X., Su, S., Zhao, C., & Xiao, N. (2024). Accuracy validation of a wearable IMU-based gait analysis in healthy female. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 16(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s13102-023-00792-3>
- Hendriks, M., Hulst, M., Weijs, R., Lotringen, J., Geurts, A., & Keijsers, N. (2022). Using sensor technology to measure gait capacity and gait performance in rehabilitation in patients with neurological disorders. *Sensors*, 22(21), 8387. <https://doi.org/10.3390/s22218387>
- Holden, R. (2020). A simplified system usability scale (sus) for cognitively impaired and older adults. *Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care*, 9(1), 180-182.
- Hsu, C.-Y., Tsai, Y.-S., Yau, C.-S., Shie, H.-H., & Wu, C.-M. (2019). Differences in gait and trunk movement between patients after ankle fracture and healthy subjects. *BioMedical Engineering OnLine*, 18(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s12938-019-0644-3>
- Hwang, W. and Chung, Y. (2015). Test-retest reliability of the quebec user evaluation of satisfaction with assistive technology 2.0-korean version for individuals with spinal cord injury. *Journal of Physical Therapy Science*, 27(5), 1291-1293. <https://doi.org/10.1589/jpts.27.1291>
- Ju, S. (2022). Can observational gait assessment tools be used to assess independent walking in stroke patients?. *Journal of the Korean Society of Physical Medicine*, 17(1), 10-20. <https://doi.org/10.13066/kspm.2022.17.1.11>
- Kim, M. and Kaneko, F. (2023). Virtual reality-based gait rehabilitation intervention for stroke individuals: a scoping review. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 19(2), 95-104. <https://doi.org/10.12965/jer.2346114.057>

- Kobsar, D., Charlton, J. M., Tse, C. T. F., Esculier, J.-F., Graffos, A., Krowchuk, N. M., Thatcher, D., & Hunt, M. A. (2020). Validity and reliability of wearable inertial sensors in healthy adult walking: A systematic review and meta-analysis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17(1), 62. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00685-3>
- Lee, H., Lee, B., Joo, N., & Park, D. (2021). The parameters of gait analysis related to ambulatory and balance functions in hemiplegic stroke patients: a gait analysis study. *BMC Neurology*, 21(1). <https://doi.org/10.1186/s12883-021-02072-4>
- Li, S., Francisco, G., & Zhou, P. (2018). Post-stroke hemiplegic gait: new perspective and insights. *Frontiers in Physiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01021>
- Mehmood, N., Ali, I., Daud, S., & Ilyas, S. (2022). Wheelchair user's satisfaction and its impact on physical activity and quality of life in people with spinal cord injury. *Physikalische Medizin Rehabilitationsmedizin Kurortmedizin*, 33(06), 336-343. <https://doi.org/10.1055/a-1870-3090>
- Mikołajczyk, T., Ciobanu, I., Badea, D., Iliescu, A., Pizzamiglio, S., Schauer, T., ... & Berteanu, M. (2018). Advanced technology for gait rehabilitation: an overview. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(7), 168781401878362. <https://doi.org/10.1177/1687814018783627>
- Mirando, M., Conti, C., Zeni, F., Pedicini, F., Nardone, A., & Pavese, C. (2022). Gait Alterations in Adults after Ankle Fracture: A Systematic Review. *Diagnostics*, 12(1), 199. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12010199>
- Mol, M., Schaik, A., Dozeman, E., Ruwaard, J., Vis, C., Ebert, D., ... & Smit, J. (2020). Dimensionality of the system usability scale among professionals using internet-based interventions for depression: a confirmatory factor analysis.
- Navarro-López, V., Molina-Rueda, F., Jiménez-Jiménez, S., Alguacil-Diego, I., & Carratalá-Tejada, M. (2021). Effects of transcranial direct current stimulation combined with physiotherapy on gait pattern, balance, and functionality in stroke patients. a systematic review. *Diagnostics*, 11(4), 656. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11040656>
- Pani, D., Piga, M., Barabino, G., Crabolu, M., Uras, S., Mathieu, A., ... & Raffo, L. (2016). Home tele-rehabilitation for rheumatic patients: impact and satisfaction of care analysis. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 23(2), 292-300. <https://doi.org/10.1177/1357633x16632950>

- Peres, S., Pham, T., & Phillips, R. (2013). Validation of the system usability scale (sus). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1), 192-196. <https://doi.org/10.1177/1541931213571043>
- Petraglia, F., Scarcella, L., Pedrazzi, G., Brancato, L., Puers, R., & Costantino, C. (2019). Inertial sensors versus standard systems in gait analysis: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 55(2). <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.18.05306-6>
- Small, S. R., Bullock, G. S., Khalid, S., Barker, K., Trivella, M., & Price, A. J. (2019). Current clinical utilisation of wearable motion sensors for the assessment of outcome following knee arthroplasty: A scoping review. *BMJ Open*, 9(12), e033832. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2019-033832>
- Tor-Carroggio, I., Segura, D., & Vilageliu, O. (2019). Usability as a premise of quality. *Journal of Audiovisual Translation*, 2(2), 57-71. <https://doi.org/10.47476/jat.v2i2.77>
- Vienne, A., Barrois, R. P., Buffat, S., Ricard, D., & Vidal, P.-P. (2017). Inertial Sensors to Assess Gait Quality in Patients with Neurological Disorders: A Systematic Review of Technical and Analytical Challenges. *Frontiers in Psychology*, 8, 817. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00817>
- Wentink, E. C., Schut, V. G. H., Prinsen, E. C., Rietman, J. S., & Veltink, P. H. (2014). Detection of the onset of gait initiation using kinematic sensors and EMG in transfemoral amputees. *Gait & Posture*, 39(1), 391–396. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.08.008>
- Werner, R. A., Gell, N., Hartigan, A., Wiggermann, N., & Keyserling, M. (2011). Risk Factors for Hip Problems Among Assembly Plant Workers. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 21(1), 84–89. <https://doi.org/10.1007/s10926-010-9259-z>
- Werner, R. A., Gell, N., Hartigan, A., Wiggermann, N., & Keyserling, W. M. (2010). Risk factors for foot and ankle disorders among assembly plant workers. *American Journal of Industrial Medicine*, 53(12), 1233–1239. <https://doi.org/10.1002/ajim.20898>
- Zhang, H., Song, Y., Li, C., Dou, Y., Wang, D., Wu, Y., Chen, X., & Liu, D. (2023). Validation of a Wearable System for Lower Extremity Assessment. *Orthopaedic Surgery*, 15(11), 2911–2917. <https://doi.org/10.1111/os.13836>

## ANEXO

**Material Suplementario 1.** Carta de aprobación del Comité de Ética de Investigación Científica del Hospital del Trabajador.



Ramón Carnicer 185  
Providencia  
Santiago - Chile  
Fono: (+56 2)2685 3333

SANTIAGO, Diciembre 21 del 2022.  
**Asunto: Aprobación CEC/20/2022.**

Señores:

Rodrigo Vergara Ortúzar, Joaquín Jil Basoalto, Hachi Manzur Valdivia, Juan José Marimán  
**Presente**

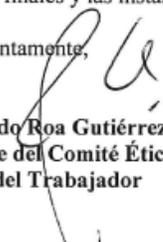
Estimados Señores:

El Comité de Ética de Investigación Científica del Hospital del Trabajador, ha revisado el proyecto “**Desarrollo de un sistema portátil para la valoración cinética y cinemática de marcha en ambiente hospitalario**”, presentado 19 de noviembre del 2022.

Informamos a ustedes que, después de las revisiones y correcciones en su versión final del 14 diciembre, del 2022, no se encontraron reparos éticos para su realización divulgación, por lo cual se encuentra APROBADO.

Les solicito por favor informar semestralmente a este Comité los avances del proyecto, resultados finales y las instancias de divulgación del proyecto terminado.

Saluda atentamente,

  
**Dr. Ricardo Roa Gutiérrez**  
Presidente del Comité Ética Científico  
Hospital del Trabajador



c.c.: Directora Técnica HT  
Subdirectora Médica Quirúrgica  
Jefe Depto. Docencia Investigación y Rree  
Archivo.  
Dr.RRG/xa

**Tabla A1.** Respuestas entregadas por terapeutas al responder el instrumento QUEST.

Ítems del QUEST ¿Qué tan satisfecha/o (contento/a) está con:	Respuestas 1: Nada satisfecho 2: No muy satisfecho 3: Más o menos satisfecho 4: Satisfecho 5: Muy satisfecho	
	Terapeuta 1	Terapeuta 2
Las dimensiones (talla, ancho, largo) de su aparato?	5	No contesta
El peso de su aparato?	5	5
La facilidad para ajustar (graduar, asegurar) las partes de su aparato?	5	4
La durabilidad (duración y resistencia al uso) del aparato?	5	4
La facilidad para usar (tenerlo puesto) el aparato?	5	5
La efectividad del aparato para resolver el problema para el cual usted lo usa?	4	4
La calidad de los servicios profesionales (información, atención) que usted recibió para utilizar su aparato?	5	5
¿Cuál es su nivel de satisfacción en general con el aparato?	5	No contesta

**Tabla A2.** Respuestas entregadas por terapeutas al responder el instrumento SUS.

Ítems del SUS	Respuestas 1: Muy en desacuerdo 5: Muy de acuerdo	
	Terapeuta 1	Terapeuta 2
Creo que me gustaría usar este sistema frecuentemente	5	4
Encuentro el sistema innecesariamente complejo	1	2
Pienso que este sistema fue fácil de usar	5	4
Creo que necesitaría el soporte de personal técnico para poder utilizar este sistema	4	3
Encontré que la variedad de funciones del sistema estaban bien integradas	4	3
Pienso que el sistema tenía muchas inconsistencias	4	3
Imagino que la mayoría de las personas aprendería a usar el sistema muy rápido	5	4
Encontré que el sistema era muy engorroso de usar	4	2
Me sentí muy seguro/a usando el sistema	5	No contesta
Tuve que aprender muchas cosas antes de poner en marcha el sistema	3	No contesta

**Tabla A3.** Respuestas entregadas por usuarios al responder el instrumento QUEST.

<b>Ítems del QUEST</b> ¿Qué tan satisfecha/o (contento/a) está con:	<b>Respuestas</b> 1: Nada satisfecho 2: No muy satisfecho 3: Más o menos satisfecho 4: Satisfecho 5: Muy satisfecho			
	<b>Usuarios</b>			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Las dimensiones (talla, ancho, largo) de su aparato?	5	5	4	5
El peso de su aparato?	5	5	4	5
La facilidad para ajustar (graduar, asegurar) las partes de su aparato?	4	5	4	3
La seguridad y la posibilidad de que no le haga daño el aparato?	5	5	4	4
La facilidad para usar (tenerlo puesto) el aparato?	5	5	4	5
La comodidad del aparato?	5	5	4	5
¿Cuál es su nivel de satisfacción en general con el aparato?	5	5	4	5

**Tabla A4.** Respuestas entregadas por usuarios al responder el instrumento SUS.

Ítems del SUS	Respuestas 1: Muy en desacuerdo 5: Muy de acuerdo			
	Usuarios			
	1	2	3	4
Encuentro el sistema innecesariamente complejo	1	1	1	1
Pienso que este sistema fue fácil de usar	5	5	4	5
Imagino que la mayoría de las personas aprendería a usar el sistema muy rápido	3	5	3	5
Encontré que el sistema era muy engorroso de usar	3	1	2	2
Me sentí muy seguro/a usando el sistema	5	5	4	5
Tuve que aprender muchas cosas antes de poner en marcha el sistema	2	1	2	2