

## IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO DE MARCHA DE BAJO COSTO

Ferrari, Flavio A.<sup>1</sup>; Vera, José O<sup>1</sup>.; Cordero, María C.<sup>1</sup>; Rapallini, José A.<sup>2</sup>; Osio, Jorge<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UIDET UNITEC y <sup>2</sup>UIDET CeTAD, Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 48 y 116, La Plata, Argentina, [corderomc@gmail.com](mailto:corderomc@gmail.com)

### INTRODUCCIÓN

El estudio del movimiento humano y más concretamente de la marcha ha sido de particular interés desde tiempos remotos, generando el desarrollo de diferentes métodos para su estudio. Con el avance de la tecnología, los sistemas de cómputo y los avances en la informática se han desarrollado sistemas para análisis del movimiento humano que son de gran ayuda para el diagnóstico y terapéutica de diferentes patologías.

El desarrollo de un Laboratorio de marcha de bajo costo para análisis del movimiento surge a requerimiento de la Asociación pro Rehabilitación Infantil La Plata (APRILP), entidad sin fines de lucro que fue fundada en 1959 para enfrentar las consecuencias de importantes epidemias de poliomielitis. Actualmente es un centro de diagnóstico, derivación y rehabilitación especializado en patologías del sistema neurolocomotor.

El desarrollo de este equipamiento constituye un hecho altamente relevante puesto que en nuestro país sólo existe un Laboratorio de Marcha con fines diagnósticos y terapéuticos, que se encuentra bajo el ámbito de FLENI (Fundación para la Lucha contra las Enfermedades Neurológicas de la Infancia) en la localidad de Escobar [1, 2].

El valor comercial de uno de estos equipos supera los 150.000 euros, por lo que implementar un Laboratorio de Marcha de bajo costo, modular, replicable y escalable, constituye un proyecto de relevancia que permitirá el acceso a un gran número de pacientes.

### Proceso de adquisición de datos para análisis del movimiento

Como se ha mencionado, el análisis instrumentado de la marcha corresponde al análisis de la condición clínica de marcha de una persona mediante el uso de tecnología altamente especializada.

Al paciente se le colocan marcadores pasivos reflectantes sobre la piel, elegidos como puntos de referencia óseos y, en algunos casos, electrodos de superficie y/o aguja para registro de actividad electromiográfica y otros sensores de variables fisiológicas, de acuerdo a protocolos normalizados. Las mediciones son realizadas por el sistema, mientras el paciente camina libremente a lo largo del sendero de marcha del laboratorio.

El medio de medición del Laboratorio de Marcha está constituido generalmente por un sistema opto-electrónico de cámaras infrarrojas y de videos convencionales, ubicadas en el camino de marcha, plataformas de fuerzas empotradas en el piso o pedígrafos y un equipo de registro de electromiografía dinámica. Disponen además de tecnología para el cálculo del gasto energético de la marcha y medición de fuerzas sobre el pie para estudio de presiones plantares. El sistema de medición del laboratorio de marcha debe ser calibrado diariamente, recomendándose hacerlo para cada estudio a realizar. Este aspecto es fundamental para asegurar la calidad de las adquisiciones.

La información obtenida en el análisis de marcha debe interpretarse en conjunto y comparada con la base de datos de individuos normales de cada laboratorio para identificar las anomalías y postular las causas que las determinan.

La información obtenida es la siguiente:

a) Parámetros temporo-espaciales: Se refiere al cálculo de indicadores tales como la velocidad de marcha, largo de los pasos, cadencia (número de pasos por minuto), ancho del paso y

duración de las fases del ciclo de marcha, entre otros. Estos son calculados en base a los datos obtenidos de la posición de los marcadores reflectantes.

b) Cinemática: Durante la adquisición el paciente camina libremente a lo largo de la senda de marcha del laboratorio, el cual está rodeado por un sistema especial de captura tridimensional compuesto por múltiples cámaras especializadas conectadas a un computador central. Estas cámaras poseen una lente central de captura y celdas periféricas que emiten radiación infrarroja. La radiación infrarroja emitida, es reflejada por los marcadores ubicados sobre la piel del paciente y capturada por la lente central de las cámaras del laboratorio. El conjunto de imágenes provistas por las cámaras es integrado y procesado por un software instalado en una PC para la obtención del movimiento articular tridimensional. El análisis cinemático define los ángulos articulares y el movimiento de los segmentos en el espacio.

c) Cinética: Corresponde a la medición de las reacciones producidas entre la fuerza ejercida por el peso del individuo sobre la tierra y la fuerza de reacción del piso (GRF). Contempla la medición de los momentos o torques y potencias articulares internos, el punto de aplicación de la GRF bajo el pie y sus tres componentes; vertical, medio lateral y anteroposterior. Aporta información complementaria a la cinemática al definir las causas que determinan el movimiento articular a lo largo del ciclo de la marcha, es decir, qué grupo muscular es el predominante en cada momento y que tipo de contracción muscular está ejerciendo; excéntrica o de frenado o concéntrica para generación de potencia. Define además la presencia de sobrecargas articulares anormales. Se adquiere a través de plataformas de fuerza empotradas en el piso.

**Ciclo de la Marcha:** El Ciclo de la Marcha es el conjunto de acciones realizadas y fenómenos producidos desde el contacto del talón con el suelo hasta el siguiente contacto del mismo talón con dicho plano de apoyo con el fin lograr el desplazamiento del peso corporal desde un punto a otro, de forma bípeda. Existen fases de apoyo y oscilación, iniciales medias y finales. Fig. 1.

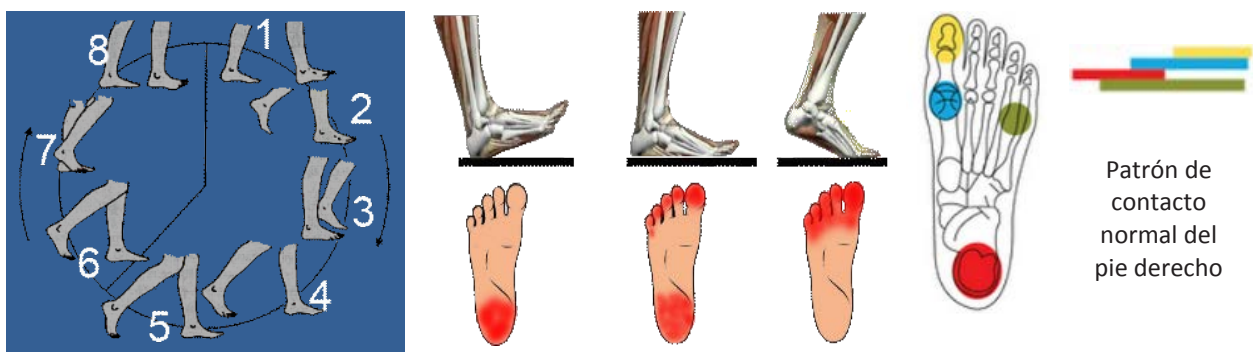


Figura 1. Fases del ciclo de marcha y Distribución de presiones plantares en la marcha

**Distribución de Cargas en el Pie:** La distribución de presiones en la planta del pie cambia según la etapa del paso que se observe, tal como se muestra en la Figura 1.

Los estudios estáticos de las huellas plantares y la distribución de cargas responden a diferentes técnicas de medición ampliamente utilizadas, entre ellas: *Pedigrafía*, *Fotopodograma*, *Radiofotopodograma*, *Podoscopio* y *Escáner Podológico*. La tecnología utilizada para los estudios dinámicos es la Plataforma de Baropodometría (con y sin reconstrucción 3D).

## PARTE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La implementación del Proyecto del Laboratorio de marcha de bajo costo para APRILP, es de característica bianual y se lo ha dividido en tres módulos: Digitalización de la pisada, Digitalización de la marcha y Adecuación edilicia del espacio físico.

## Digitalización de la pisada: Desarrollo de Instrumentación Electrónica para Relevamiento de Huellas Plantares en Tiempo Real

Para el desarrollo de la instrumentación, denominada Pedígrafo digital, que permita el relevamiento de las huellas plantares en tiempo real, se deben tener en cuenta las siguientes especificaciones:

- Relevamiento y Reconstrucción de la huella plantar en Tiempo Real.
- Superficie sensible suficientemente amplia
- Resolución espacial apropiada
- Comunicación con una computadora
- Alta velocidad de transferencia de datos
- Interfaz de fácil utilización
- Visualización de presiones en forma relativa
- Reproducción y Almacenamiento post relevamiento
- Utilización de materiales de alta disponibilidad en Argentina
- Bajo Costo

*Elección de los sensores:* Las especificaciones que son clave para el rendimiento del sensor de presión a elegir incluyen los siguientes parámetros: linealidad, histéresis, rango de presión, sensibilidad a la temperatura, resolución, Precisión vs. Exactitud y robustez.

Luego del estudio de las tecnologías disponibles en el mercado se optó por los sensores resistivos que responden a los requisitos exigidos. La resistencia equivalente formada entre los electrodos y la goma conductiva depende total e intrínsecamente de la geometría empleada y es por este motivo que se ensayaron variantes en cuanto al material, al espesor y forma de la goma, así como también separación entre pistas y ancho de las pistas que conforman los electrodos. Los ensayos tuvieron lugar en el Laboratorio del Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados de la FIUNLP. Allí se ensayaron diferentes configuraciones geométricas: forma cuadrada o redondeada, tipo peine, de pistas angostas o anchas, de distribución centrada, etc. Se probaron las gomas conductivas marca AVIGOM en espesores de 1 mm y 3,5 mm. Se estudiaron los resultados de los gráficos de resistencia y conductancia en función de la presión para la elección final.

Se decidió utilizar la goma conductiva de AVIGOM, de 3.5mm de espesor, redonda y el electrodo de Forma Redondeada, distribución Tipo Peine y Pista Ancha.

*Método de medición:* En las Figuras 2 y 3 se muestra el diagrama en bloques del sistema de medición para relevamiento de la huella plantar en tiempo real. Se realiza el barrido de la matriz de sensores para obtener la totalidad de la digitalización de la pisada.

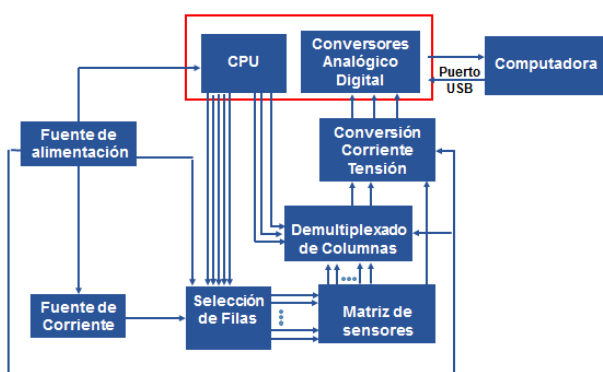


Figura 2. Diagrama en bloques

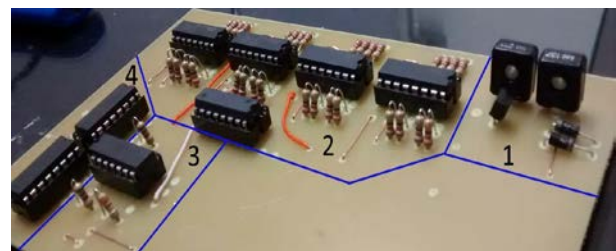


Figura 3. Diagrama en bloques prototipo  
1 Bloque "Fuente de Corriente", 2. Bloque "Selección de Filas", 3. Bloque "Conversión Corriente/Tensión" y 4. Bloque "De-Multiplexado de Convertidores"

*Prototipo final:* En la Figura 4 se muestra el prototipo para relevamiento de la huella plantar en tiempo real. Se observa la placa con los sensores (Placa sensora), que irá fijada sobre los parantes que tienen como base la placa de control (Placa controladora). Este dispositivo se colocará sobre la senda o pasarela del Laboratorio de marcha.

En este prototipo se estableció un muestreo y una reconstrucción en tiempo real a una tasa de 20 cuadros/s, que en comparación con un dispositivo comercial actual (100 cuadros/s) permite considerar que se está en un 20% de similitud.

Se consiguió generar una interfaz amigable, de fácil uso y muy bajo costo.

Se dispuso una placa de 20cm x 30cm con 512 sensores de presión redondos dispuestos en forma de panel de abeja, consiguiendo que un 91% de la superficie total sea sensible a la pisada. Se logró una densidad de 0.92 sensor/cm<sup>2</sup> que en comparación con dispositivo comercial y actual (1.64 sensor/cm<sup>2</sup>), alcanzando una semejanza por encima del 50%.

La implementación se realizó con componentes de alta disponibilidad en el mercado y en la región, lo que permite pensar en un mantenimiento de bajo costo a largo plazo.



Figura 4. Placa sensora, Prototipo final del Pedígrafo digital e Interfaz gráfica.

Las líneas de acción futuras respecto de este prototipo consisten en aumentar la densidad de sensores con el objetivo de aumentar la resolución en pantalla, introducir una comunicación inalámbrica entre el pedígrafo y la computadora para no estar limitado a las distancias máximas que establece el protocolo USB, lograr una aplicación independiente de la plataforma desarrollada en MATLAB, optimizar la aplicación de software para mostrar la reconstrucción de las huellas plantares con "píxeles redondos" en lugar de cuadrados, con la meta de añadir aún más realismo al resultado en pantalla.

Y por último, mejorar la interfaz con el usuario añadiendo funciones para establecer y operar una base de datos de pacientes.

**Digitalización de la marcha:** Se encuentra en etapa de desarrollo un sistema que capture los puntos reflectantes (ver Figura 5) colocados sobre el paciente a tratar y los digitalice para obtener un registro de la marcha sobre una pasarela. Se decidió trabajar con marcadores pasivos y cámaras infrarrojas IP con iluminación LED. Se eligió la cámara DS-2CD2632 de 3 MP de HIKVISION (Figura 6). Se utilizarán 3 cámaras iguales en el primer prototipo. Al ser una solución escalable y modular, no habrá inconvenientes futuros para incrementar el número de cámaras y prestaciones.



Figura 5. Marcadores reflectantes



Figura 6. Cámara infrarroja DS-2CD2632 de 3 MP de HIKVISION

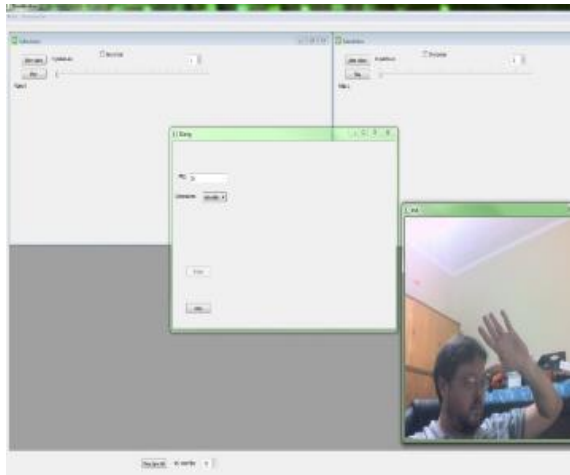


Figura 7. El Ing. Vera desarrollando software para el sistema de digitalización de la marcha.



Figura 8. Prueba de cámara (Análisis y caracterización de interfaz de comunicación de datos y software de procesamiento de imágenes para diagnóstico).

Para el primer prototipo se utilizó lenguaje C++ utilizando el framework QT 5. Esta elección permite alcanzar la máxima performance en cuanto a aprovechamiento de recursos de una PC con sistema operativo Linux, distribución Debian. Todo el sistema que se está implementando se basa en la utilización de software OpenSource, para evitar el pago de licencias y cumplir con los requisitos de bajo costo para el desarrollo del Laboratorio de marcha.

Se pretende diseñar en el espacio de trabajo en APRILP una pasarela sobre piso modular, con al menos 3 (tres) cámaras IP (escalables a 7 cámaras) que capturen el movimiento y guarden las muestras en un Servidor de datos que luego serán analizados en las estaciones de trabajo.

Actualmente se está trabajando en el análisis y caracterización de interfaz de comunicación de datos y software de procesamiento de imágenes para diagnóstico (Ver figuras 7 y 8). Se están llevando a cabo pruebas para posicionamiento óptimo de las cámaras para la adquisición de imágenes del paciente.

**Adecuación edilicia del espacio físico:** Se trabaja con profesionales de la Arquitectura para asesoramiento en la adecuación edilicia del espacio físico. Se deben decidir especificaciones para la pintura de paredes, tipo de cierre de ventanas, iluminación de la zona de trabajo, localización del servidor, y en particular el tipo de piso debajo del cual se instalará en pedígrafo digital. Se está estudiando la posibilidad de instalar tapetes anti fatiga para pisos secos que, a su vez, sean pisos modulares, acoplables, lavables y ventilados.

## CONCLUSIONES

Con el fin de proporcionar una herramienta de diagnóstico y tratamiento para pacientes con dificultades neurolocomotoras a instalar en APRILP La Plata, de modo de prestar atención gratuita a quien sea derivado para ello, se ha logrado la colaboración de tres unidades de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. Las mismas, a través del trabajo conjunto y multidisciplinar, han desarrollado e implementado gran parte de la instrumentación solicitada. Estas Unidades de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia de la FIUNLP son UNITEC, a cargo de la coordinación general del proyecto, CeTAD, especializada en temas de hardware electrónico de alto nivel y FEP, encargada de obtener el financiamiento necesario.

El desarrollo de este equipamiento constituye un hecho altamente relevante puesto que en nuestro país sólo existe un Laboratorio de Marcha con fines diagnósticos y terapéuticos, que se encuentra bajo el ámbito de FLENI (Fundación para la Lucha contra las Enfermedades Neurológicas de la Infancia) en la localidad de Escobar.

El valor comercial de uno de estos equipos supera los 150.000 euros, por lo que implementar un Laboratorio de Marcha de Bajo costo constituye un proyecto relevante para el acceso de todos los pacientes que lo soliciten.

El proyecto se ha basado en una filosofía de desarrollo de tipo modular, escalable y replicable, con el fin de ir incrementando prestaciones a medida que se obtengan los recursos para su financiamiento. Contará con un proceso automatizado en la toma de datos y además tendrá la posibilidad de llevar un registro de estos datos.

Se ha trabajado con especialistas en fisiología y rehabilitación neurolocomotora para implementar el Laboratorio de Marcha según sus necesidades específicas. De este modo se les permitirá entender las alteraciones dinámicas de la marcha y diferenciar las causales primarias de las alteraciones secundarias y mecanismos compensatorios; definir el perfil de marcha en diferentes patologías; ayudar en la planificación de los tratamientos con mejor optimización de los recursos; aportar información para tomar decisiones con objetivos más realistas y aclarar expectativas sobre los tratamientos; les facilitará la toma de decisiones quirúrgicas con criterio multinivel, reduciendo el número de veces que el paciente debe ser intervenido, sometido a anestesia y a periodos de rehabilitación; medir los resultados de tratamientos conservadores y quirúrgicos con estimadores más objetivos y dinámicos; hablar un lenguaje común que facilita el intercambio de experiencias entre diferentes centros. Y, por último, utilizar una herramienta ampliamente reconocida para docencia e investigación.

Por último se ha trabajado en el desarrollo de competencias y compromiso social en los alumnos que participan en el proyecto: cognitivas y técnicas, sociales, éticas y afectivo-emocionales.

## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] CRESPO, M. Desarrollo de herramientas de análisis y modelización en el laboratorio de marcha y estudio de movimientos de FLENI. *XI Jornadas Internacionales de Ingeniería Clínica y Tecnología Médica*. 2006.
- [2] CRESPO, M. Laboratorio de marcha y análisis de movimiento. Principios básicos y aplicaciones clínicas. *Arch. Neurol. Neuroc. Neuropsiquiatr.* 2009, 18, (2), 49-55
- [3] HARO D, M. *Laboratorio de análisis de marcha y movimiento* Rev. Med. Clin. Condes - 2014; 25(2) 237-247
- [4] MARTÍNEZ CARRILLO, F.; GÓMEZ JARAMILLO, F.; ROMERO CASTRO, E. Desarrollo de un laboratorio de marcha con integración sincrónica mediante una arquitectura en módulos. *Acta biol.Colomb.*, Vol. 15 N° 3, 2010 235 – 250.
- [5] <http://www.stanfordchildrens.org/en/service/motion-gait-analysis-laboratory/gait>. Acceso junio 2016.
- [6] COSENTINO R. *Miembros inferiores*. El Ateneo, Buenos Aires. 1992
- [7] BARRIENTOS, M. *Desarrollo de Instrumentación Electrónica para Relevamiento de Huellas Plantares en Tiempo Real*. Trabajo Final de Carrera Ingeniería Electrónica. FIUNLP. 2015.