



Karol Bibiana García
Fisioterapeuta
Magister Intervención Integral en el Deportista
Departamento de Movimiento Humano
Universidad Autónoma de Manizales
Antigua Estación del Ferrocarril
Manizales, Colombia
karolgarcia@autonoma.edu.co

Hisnel Franco
Ingeniero electrónico.
Candidato a Magister en Mecatrónica y Control
Departamento de Electrónica y Automatización
Universidad Autónoma de Manizales
Antigua Estación del Ferrocarril
Manizales, Colombia
hisnel@autonoma.edu.co

Diana Marcela Castaño
Ingeniera Biomédica
Programa Jóvenes Investigadores Colciencias.
Departamento de Electrónica y Automatización
Universidad Autónoma de Manizales
Antigua Estación del Ferrocarril. Manizales, Colombia
dianamar917@gmail.com

Rubén Darío Flórez
Ingeniero Electricista
Magister en Instrumentación.
Departamento de Electrónica y Automatización
Universidad Autónoma de Manizales
Antigua Estación del Ferrocarril
Manizales, Colombia
rubenfh@gmail.com

Jorge Iván Gómez
Ingeniero Químico.
Magister en Instrumentación
Departamento de Diseño y Arte
Universidad Autónoma de Manizales
Antigua Estación del Ferrocarril
Manizales, Colombia

Clara Eugenia Bahamon
Arte sin Fronteras - Programa Talentos Especiales

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE PLANTILLA PARA MEDICIÓN DE PRESIONES Y CINEMÁTICA DEL PIE

Design and implementation of system for measurement pressures and foot kinematics

Fecha de recepción: 11 de julio de 2014 - Fecha de aprobación: 1 de diciembre de 2014

RESUMEN

Este es un trabajo donde se desarrolló e implementó un sistema integrado que combina una plantilla instrumentada con sensores de presión y un módulo de sensores inerciales compuesto por un acelerómetro y un giroscopio, los cuales permitieron la medición de variables baropodométricas (presiones plantares) y variables cinemáticas (aceleración, velocidad angular y desplazamiento angular) del pie. El sistema resultante le deja al especialista realizar un estudio biomecánico del pie a través del análisis estático y/o dinámico del movimiento y la visualización en pantalla de datos cuantitativos e información cualitativa, para la evaluación e intervención de los deportistas.

PALABRAS CLAVE

Plantillas instrumentadas, sensores de fuerza, sensores inerciales, presiones plantares, aceleración y desplazamiento del movimiento.

ABSTRACT

This paper presents the development and implementation of an integrated system that combines an instrumented insole with pressure sensors and an inertial sensor module consisting of an accelerometer and a gyroscope, which allows measurement of baropodometric variables (plantar pressures) and kinematic variables (acceleration, angular rate, and angular displacement) of the foot. The resulting system allows the specialist to conduct a foot biomechanical study through static and/or dynamic analysis and screen display of quantitative data and qualitative information, whose analysis allows prevention and intervention programs for musculoskeletal disorders that may affect the performance of athletes.

KEY WORDS

Instrumented insoles, force sensors, inertial sensors, plantar pressures.

Los arcos plantares son soportes mecánicos que facilitan la absorción y distribución del peso impuesto por el cuerpo durante la marcha y el terreno. Hurtado (2012) manifiesta que la distribución del peso corporal se reparte en forma equitativa entre las dos extremidades inferiores y sobre cada una de las superficies plantares, y el resultado de toda esta cadena termina en el pie. Según Díaz, Torres, Ramírez, García y Álvarez (2006) la distribución de las presiones plantares cambia con el calzado. Este reduce la presión pico del talón produciendo una distribución de presiones más uniforme con el talón. Con zapatos, la distribución de la carga del antepié se desplaza medialmente con la máxima presión bajo las cabezas del primer y segundo metatarsiano. Las presiones bajo los dedos también se incrementan con el calzado.

Para el estudio baropodométrico del pie (presiones plantares) se han desarrollado varios métodos como los podómetros electrónicos, las plataformas dinamométricas y las plantillas de presión, diseñadas para el registro dinámico y posterior análisis de la distribución de presiones entre la planta del pie y el calzado.

Según Pérez (2012) las aplicaciones de las plantillas de presión se encuentran en el estudio de la fisiología deportiva y del aparato locomotor. En este ámbito, el sistema de plantillas permite evaluar aquellas patologías, estructurales o funcionales, que repercuten en el apoyo del pie y en la distribución de presiones de contacto durante las diferentes fases de la marcha.

Por otra parte, gracias al avance de la microfabricación de tecnologías, se han desarrollado métodos como tapetes electrónicos o sistemas portables basados en sensores, para estimar fuerzas de reacción sobre la superficie, centros de presión y parámetros temporales de la marcha. Este sistema puede medir parámetros cinemáticos como ángulos de articulaciones, aceleraciones o velocidades angulares a través del uso de acelerómetros y giroscopios en tecnología Microelectromecánica (MEM).

En esta investigación se desarrolló e implementó un sistema para la medición baropodométrica y de variables cinemáticas del pie; el cual permite a través de una plantilla instrumentada, un sistema basado en sensores inerciales, un sistema de comunicación en tiempo real y un software de registro y visualización, la medición de dichas variables, con el fin de realizar un estudio comparativo entre los patrones fisiológicos y los patológicos, que tengan aplicación en la práctica clínica, especialmente en el área de la biomecánica deportiva.

METODO

Se utilizó en el estudio los siguientes equipos y materiales: 12 Sensores Flexiforce modelo A201, 12 Amplificadores MCP6004, 1 Multiplexor análogo de 16 canales CD74HC4067, 1 Sistema de desarrollo ARM mbed NXP LPC1768, 3 Acelerómetros triaxial ADXL345 y 3 Giroscopios ITG3200.

El sistema de plantillas instrumentadas es un mecanismo de valoración funcional del pie durante la marcha, de tipo cuantitativo y

cinético, que permite registrar presiones entre el pie y el calzado y utilizan sensores de presión fijos sobre la base de una plantilla, para el desarrollo del sistema se utilizaron los Flexiforce de Teckscan. Estos son piezorresistivos de fuerza y carga, durables, ultradelgados, que sensan fuerzas de contacto, y están disponible en diferentes rangos de fuerza, formas y tamaños a través de cuatro modelos estándar (A201, A301, A401, HT201). De acuerdo a los requerimientos de diámetro y tamaño establecidos, se escogió el modelo A201 que es presentado en la figura 1 Sensor Flexiforce modelo A201.

Para su soporte se utilizó una estructura que permitió distribuir el peso a través del área de sensado, asegurando de esta forma que la distribución de la carga se mantuviera constante. El circuito fue manejado con el amplificador MCP6004, una resistencia RF de 100 K Ω y un voltaje de referencia VT de -1V, el cual se presenta en la figura 2.

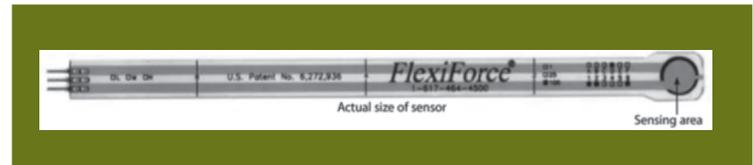


Figura 1. Sensor Flexiforce modelo A201



Figura 2. Estructura de soporte para distribución de peso en área de sensado.

Para la caracterización de los sensores se ubicó un total de 18 cargas que sumaban 9 Kg. Las cargas se ubicaron cada 10 segundos para permitir la estabilidad de la respuesta. Se registraron los valores de carga y descarga de cada sensor para dos mediciones. Una vez registrados los datos se obtuvieron los promedios de voltaje, resistencia y el valor de conductancia.

Finalmente, por medio de Excel, se realizó una aproximación lineal del gráfico de Fuerza vs. Voltaje y se efectuó un análisis de regresión lineal, obteniendo el coeficiente de correlación y la ecuación característica para cada sensor. Las 12 salidas de los amplificadores operacionales MCP6004 fueron llevadas a un multiplexor análogo de 16 canales, el CD74HC4067. La salida común del mismo se co-

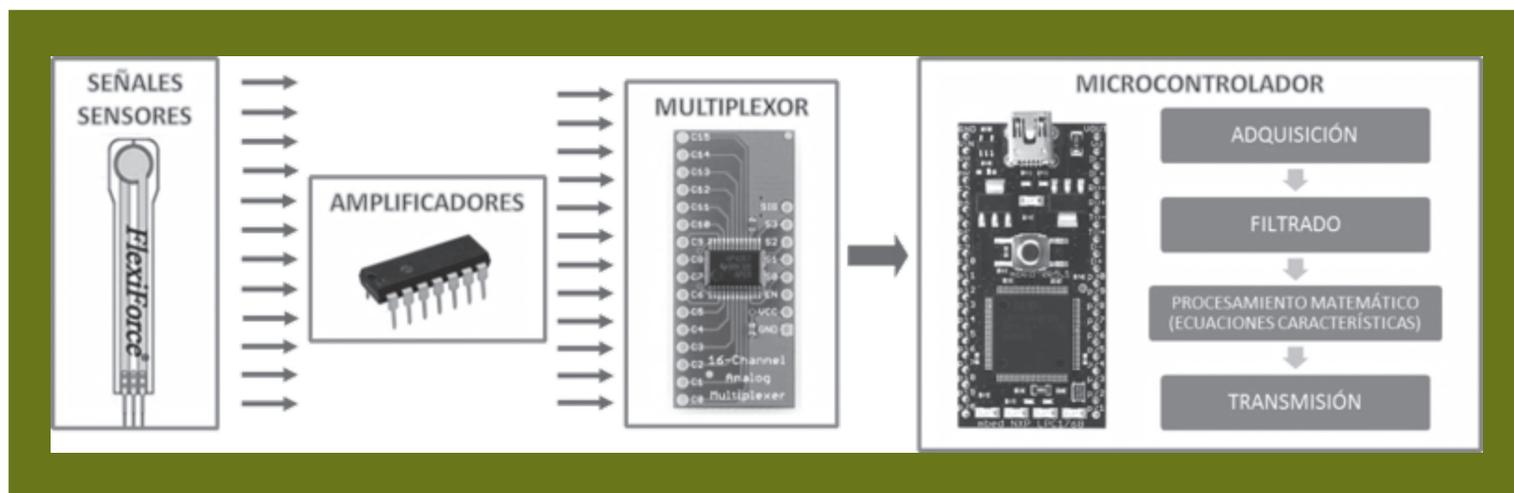


Figura 3. Procesamiento de las señales de presión.

nectó a una de las entradas análogas del sistema de desarrollo ARM mbed NXP LPC1768 como se presenta en la figura 3.

Este microcontrolador se programó a través de un compilador online al cual se accede a través de la página de Mbed.org, en lenguaje C++. Allí se implementó un algoritmo que permitió leer la entrada análoga, procesarla y transmitirla vía puerto serial.

Este microcontrolador se programó a través de un compilador online al cual se accede a través de la página de Mbed.org, en lenguaje C++. Allí se implementó un algoritmo que permitió leer la entrada análoga, procesarla y transmitirla vía puerto serial.

Para la distribución de los sensores en la plantilla, se escogieron doce (12) puntos anatómicos que se muestra en la figura 4. Hállux, cabeza del primer metatarsal, cabeza del segundo metatarsal, centro de cabezas metatarsales 3 y 4, cabeza metatarsal 5, arco externo (entre la 5ta cabeza metatarsal y el mediopie externo), mediopie interno, central y externo, zona medial, externa y posterior del retropie.

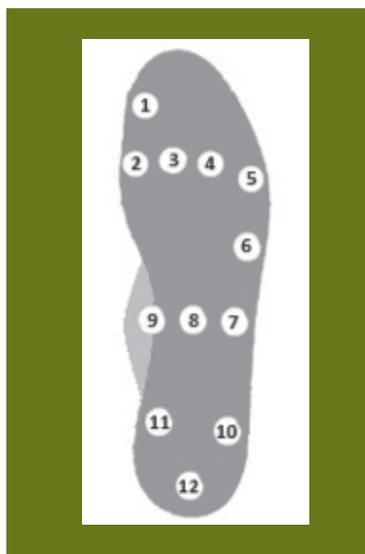


Figura 4. Puntos anatómicos

Para la construcción de la plantilla se tuvieron en cuenta cuatro etapas (ver figura 5)

1. **Modelado:** En esta fase se esculpió y ajustó el modelo de la plantilla según la talla y horma. Para esto se utilizó la fórmula descrita en la ecuación (Hurtado, 2012).
2. **Cera de abejas 60% + parafina 30% + colofonia 10% + grea demás al gusto** (Esta fórmula se obtuvo de manera experimental por parte del profesor Jorge Iván Gómez Angarita Coordinador del programa de diseño y arte de la Universidad Autónoma de Manizales en sus 25 años de experiencias).
3. **Moldeado:** Consistió en la fabricación de los moldes rígido y flexible que se utilizaron posteriormente para realizar el vaciado y obtener el modelo definitivo.
4. El proceso consistió básicamente en aplicación de un tenso-activo, seguido del elastómero (caucho), silicona y finalmente el yeso. Después del secado se dividió por la mitad obteniendo los dos moldes.
5. **Vaciado:** En esta etapa se obtuvo el modelo definitivo sobre el que se elaboró la plantilla. Se utilizó una resina dura, la cual se obtuvo de mezclar resina poliéster con un acelerante (Octoato de Cobalto) y un catalizador (Meckperóxido).
6. **Elaboración de la plantilla:** Se utilizó el elastómero 471, que es un tipo de caucho que presenta características como elasticidad, buen moldeo y resistencia al uso y al desgaste. Para la implementación se aplicaron capas de material fibro-reforzado, elastómero (caucho), aislante de ruido (aluminio), polietileno de baja densidad (para la adherencia de los sensores). Para el posicionamiento de los sensores, se fijaron con cinta invisible, y se incorporó un material fibro-reforzado elástico para que quedaran bien ajustados y evitar que se movieran del punto. Se estableció utilizar en el sistema, acelerómetros integrados con giroscopios para realizar el análisis cinemático del pie. Las Unidades Inerciales o IMU implementaron in-

ternamente tres ejes ortogonales, sobre los cuales se montan los sensores, de manera que a cada eje se le asigna un acelerómetro y un giroscopio, algunas veces también un magnetómetro. La información suministrada por una IMU es la aceleración lineal y la velocidad angular correspondiente a cada uno de los ejes del sistema (Izquierdo, Martínez, Larrión, Irujo y Gómez, 2008)



Figura 5. Pasos elaboración de plantilla

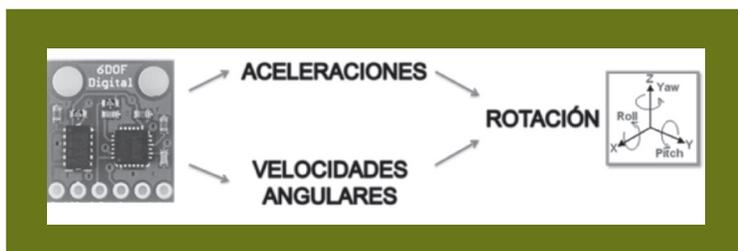


Figura 6. IMU Digital Combo Board 6 Degrees of Freedom de Sparkfun

Finalmente la IMU Digital Combo Board 6 Degrees of Freedom de Sparkfun se presenta en la figura 6; la cual tiene integrados el acelerómetro triaxial ADXL345 y el giroscopio ITG3200.

El giroscopio ITG3200 proporciona una salida digital de la velocidad angular en X, Y y Z, con una sensibilidad de 14.375 LSBs por $^{\circ}/\text{seg}$ y un rango de escala completo de $\pm 2000^{\circ}/\text{s}^1$. El acelerómetro ADXL345 es un sistema de medida de la aceleración en los tres ejes, con un rango de medida seleccionable de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ ó $\pm 16g$. Mide la aceleración dinámica resultante del movimiento o choque y la aceleración estática, tal como la gravedad (Invensense, 2010).

Para la caracterización de la Unidad Inercial, se conectó directamente a la interfaz I2C del microcontrolador. Para la lectura de los valores de aceleración y velocidad angular entregados por la IMU, se implementó un algoritmo usando las librerías para ambos sensores, acelerómetro y giroscopio, disponibles en mbed.org. A través del algoritmo del ITG3200, se verificó el rango de $\pm 2000^{\circ}/\text{s}$, moviendo el sensor en los diferentes ejes (X, Y y Z), y observando las mediciones de velocidad angular en un emulador serial. Con el algoritmo del ADXL345, se realizaron modificaciones en los bits Do y D1 del registro DATA_FORMAT, los cuales definen el rango a utilizar ($\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ ó $\pm 16g$). Con cada cambio de rango se realizaron movimientos del sensor en los tres ejes, y se verificó que los valores obtenidos correspondieran a los valores típicos especificados en la hoja de datos del sensor. El procesamiento de las señales inerciales que incluye adquisición, procesamiento y transmisión de las mismas, se muestra en la figura 7.

Después de portarla al compilador del sistema de desarrollo, se implementó el código necesario para obtener los valores de desplazamiento angular, las aceleraciones y las velocidades angulares. La comunicación entre el módulo conectado al usuario y el computador se hizo a través de una librería disponible en mbed.org denominada RPC (Remote Procedure Call), la cual permite realizar la interfaz entre el microcontrolador y Labview. El esquemático y la tarjeta de circuito impreso (pcb por sus siglas en inglés), fueron elaborados en el software de diseño Eagle PCB. En la figura 8 se presenta el diseño y la implementación de la tarjeta electrónica, que incluye las entradas de los sensores, los amplificadores operacionales, el multiplexor, el módulo de RF, el microcontrolador y la alimentación del sistema.

1. Datasheet ADXL345. 3-Axis, $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$ Digital Accelerometer ADXL345. Analog Devices

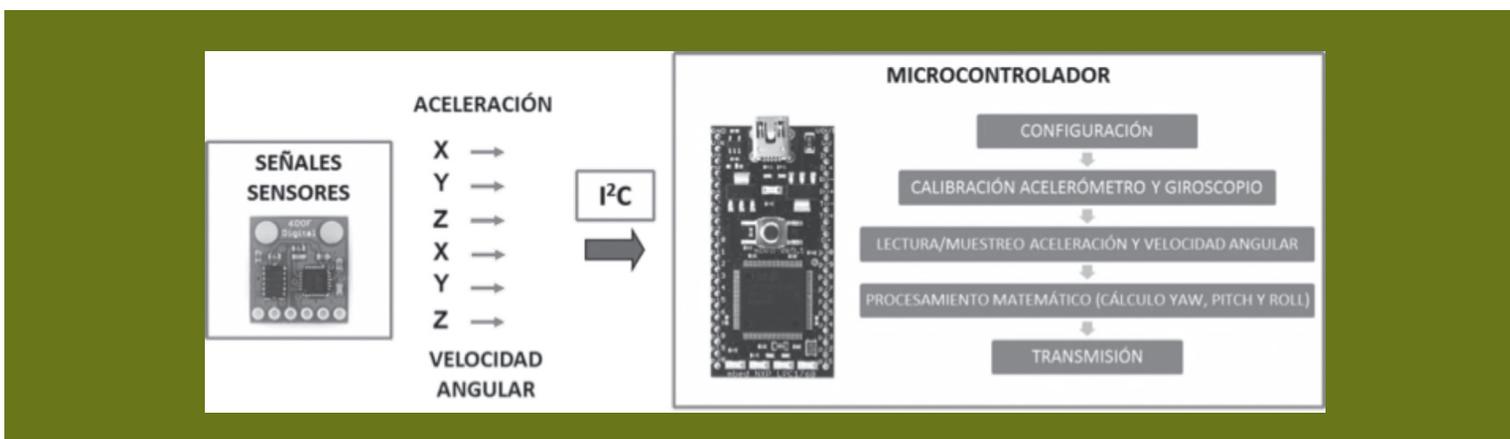


Figura 7 El procesamiento de las señales inerciales que incluye adquisición, procesamiento y transmisión.

Se diseñó una interfaz en Labview que permite la interacción entre el usuario y el sistema desarrollado. El algoritmo implementado permite recibir las variables transmitidas desde el microcontrolador

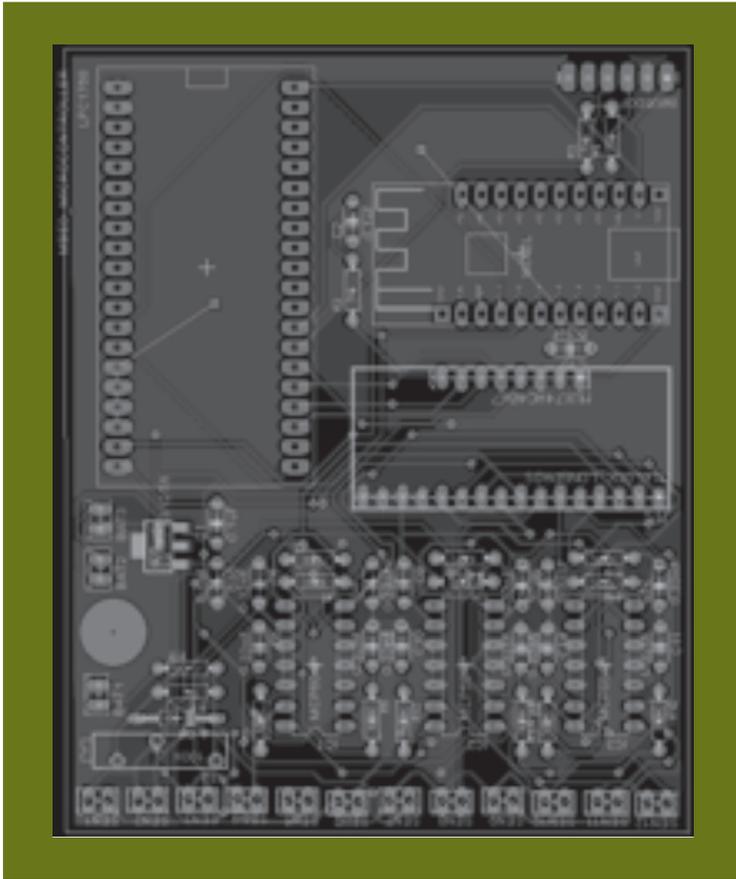


Figura 8. Diseño e implementación de la tarjeta electrónica

a través de la librería RPC. Además permite ingresar los datos básicos del usuario (figura 9); visualizar las variables de presión (Kg/cm²), desplazamiento angular (°), velocidad angular (°/s) y aceleración (m/s²) de forma cuantitativa (datos numéricos) (figura 10) y cualitativa (gráficos e imágenes) (figura 11). Para la visualización de las presiones se representaron los sensores en forma de círculos ubicados análogamente a los sensores reales de la plantilla en una imagen de la planta de un pie. El incremento de la presión en cada punto se representa por el aumento del tamaño del sensor y el cambio de color del mismo, de acuerdo a un código de colores preestablecido. Los ángulos de elevación (pitch) y giro (roll) se representan gráficamente a través del movimiento de un rectángulo. Además se presentaron los gráficos de orientación/velocidad angular/aceleración contra tiempo. Esto con el fin de facilitar el análisis de la información entregada por el sistema. Finalmente la interfaz guarda en un archivo .TDMS los datos de la prueba.

RESULTADOS

Se desarrolló e implementó un sistema integrado conformado por una plantilla instrumentada y dos sensores inerciales (acele-



Figura 9. Microcontrolador a través de la librería RPC.



Figura 10. Componentes del sistema integrado.

rómetro y giroscopio), el cual permite hacer un análisis en tiempo real de 20 variables relacionadas con el movimiento y apoyo del pie (12 presiones plantares, aceleraciones y velocidades angulares en los tres ejes, y rotaciones en dos ejes).

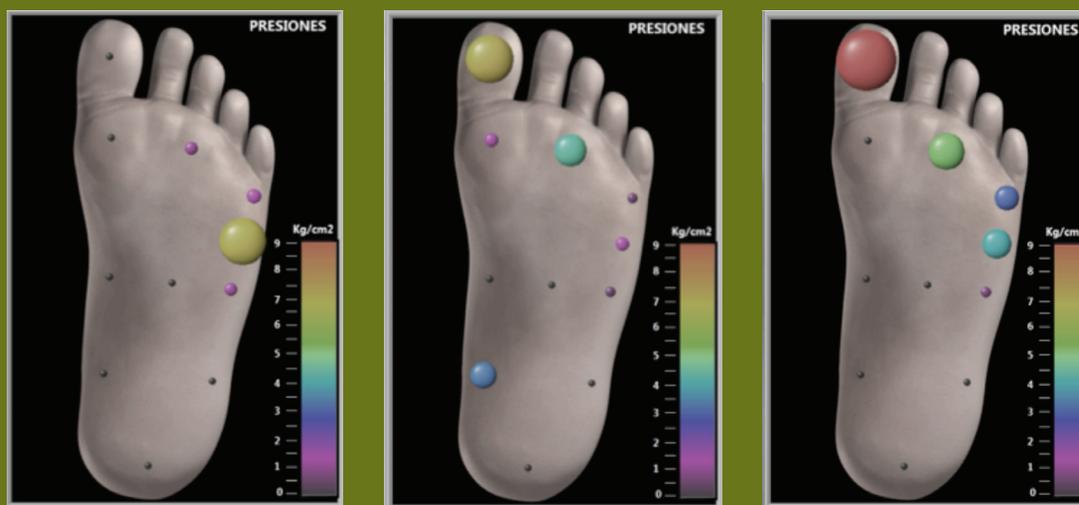


Figura 11. Sistema de presiones digitales

Después de integrar los diferentes componentes del sistema (plantilla, IMU, tarjeta electrónica e interfaz gráfica), se obtuvo un dispositivo como la que se presenta en la figura 10. Funcionamiento general del sistema integrado.

Cuando el usuario ajusta la plantilla y sujeta la unidad inercial al pie, las señales generadas por los sensores durante el apoyo o la marcha, se dirigen al módulo de acondicionamiento y procesamiento (tarjeta electrónica), que está ubicado en la carcasa fijada con velcro a la pierna de la persona; de allí las señales digitales son transmitidas por medio de un cable serial-USB al computador, donde son recibidas y visualizadas a través de una interfaz gráfica diseñada en Labview. Adicionalmente, los resultados son almacenados en un archivo de texto, que permite tener un registro para cada usuario del sistema y brinda la opción de realizar un análisis off-line en el cual el especialista puede observar con detenimiento las variaciones en los diferentes parámetros estudiados.

DISCUSION

El prototipo de plantilla instrumentada permitió medir variables baropodométricas (presiones plantares) en 12 puntos anatómicos relevantes para el análisis y diagnóstico de alteraciones, patologías y generalidades de la marcha y el apoyo del pie.

El prototipo de sistema basado en sensores inerciales, permitió la medición de variables cinemáticas como la aceleración y el desplazamiento relevantes para el análisis del movimiento del pie.

La comunicación alámbrica entre el módulo del usuario y el computador posibilita la medición de variables en tiempo real, pero genera limitaciones de espacio para el análisis de marcha.

La interfaz gráfica diseñada permitió una fácil interpretación de las mediciones obtenidas a través de la representación gráfica y numérica de las diferentes variables.

El desarrollo e implementación del prototipo descrito, representa un fortalecimiento de la investigación e intervención desde el área de la biomecánica deportiva a nivel regional y nacional. Especialmente porque en el Eje Cafetero, no se encontraron antecedentes escritos de desarrollos de este tipo.

La plantilla instrumentada ayudó a identificar las características morfológicas del pie para poder realizar diagnósticos más precisos y así realizar planes de intervención desde un enfoque preventivo y terapéutico.

Es relevante esta investigación ya que se pudo realizar un trabajo interdisciplinario con profesionales del área de ingeniería, diseño industrial, y salud. Además de seguir fortaleciendo la apropiación del conocimiento desde la interacción con diferentes grupos de investigación de la universidad, y con el apoyo y acompañamiento de joven investigadora avalada desde Colciencias.

Es una investigación de desarrollo tecnológico que sirve para generar innovación en fisioterapia, diseñando y construyendo herramientas tecnológicas de bajo costo y ajustadas a las necesidades del entorno que permiten realizar una valoración y análisis del movimiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado gracias al apoyo del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) en su programa de Jóvenes Investigadores e Innovadores, convocatoria 2012, quién financió la participación de la Joven Investigadora; y la Universidad Autónoma de Manizales, quién proporcionó los recursos físicos, económicos y humanos para la materialización de este proyecto.

REFERENCIAS

- Díaz, C., Torres, A., Ramírez, J.I., García, L.F. & Álvarez, N. (2006). Descripción de un sistema para la medición de las presiones plantares por medio del procesamiento de imágenes: Fase I. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 6, 43-55.
- Hurtado, A. (2012). Uso de la Baropodometría. *Orthotips*, 2 (4) [en línea]. Recuperado el 02 de mayo de 2012 de: <http://new.medigraphic.com/cgi-bin/resumen.cgi?IDREVISTA=72&IDARTICULO=10656&IDPUBLICACION=1159>
- Invensense (2010). ITG-3200 Product Specification. Revision 1.4. Invensense Recuperado el 04 de mayo de 2012 de: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Gyro/PS-ITG-3200-00-01.4.pdf>
- Izquierdo, M., Martínez, A., Larrión, J.L., Irujo, M. & Gómez, M. (2008). Valoración de la capacidad funcional en el ámbito domiciliario y en la clínica. Nuevas posibilidades de aplicación de la acelerometría para la valoración de la marcha, equilibrio y potencia muscular en personas mayores. *Anales Sist. Sanit. Navar.* 31 (2), 159-170.
- Pérez, J.M. (2012). Medición de la Presión Plantar durante la Marcha. Aplicación del sistema electrónico portátil PDM240 en medicina pericial y forense. *Lesionología y peritología forense* [en línea]. Recuperado el 04 de mayo de 2012 de: <http://www.peritajemedicoforense.com/>