

## **Diseño y desarrollo de un goniómetro basado en sensores cinemáticos con comunicación inalámbrica en tiempo real**

*Julián C. HENAO, Johnnatan A. LÓPEZ, Andrés F. OROZCO*

*Universidad Pontificia Bolivariana; Circ. 1 #70-01, B11, Medellín, Colombia.  
juliancamilo.henao@alfa.upb.edu.co*

Resumen: En este artículo se presenta el diseño y el desarrollo de un goniómetro digital empleando sensores cinemáticos. El dispositivo desarrollado adquiere la señal de un acelerómetro y un giroscopio digital y la transmite de forma inalámbrica a un teléfono inteligente en el cual se implementó una aplicación desarrollada para móviles Android. *Copyright © 2013 UPB*

Palabras clave: Goniometría, sensor cinemático, acelerómetro, giroscopio, aplicación móvil.

Abstract: This article explains the design and development of a digital goniometer using kinematic sensors. The developed device record the signal from an digital accelerometer and gyroscope. The data is transmitted wirelessly to a smartphone in which an application for Android phones was implemented.

Keywords: Goniometry, kinematic sensor, accelerometer, gyroscope, mobile application.

UPB\_autoArt 2013-07-19, s 2013-07-30

## 1. INTRODUCCIÓN

La goniometría es el nombre por el que se conoce a la ciencia y técnica de la medición de ángulos, así como su construcción o trazado. Estudia los grados de libertad de movimiento en cada plano del espacio. Se mide con un aparato denominado goniómetro y se valoriza en grados.

En biomecánica es de gran importancia poder reproducir la movilidad articular del sujeto de estudio a partir de los datos obtenidos por la goniometría. Se aplica para la fabricación y diseño de instrumental quirúrgico, de prótesis y de ortesis. La goniometría aplicada a las ciencias médicas es la técnica de medición de los ángulos creados por la intersección de los ejes longitudinales de los huesos a nivel de las articulaciones (Taobadela, 2007). Es una técnica muy utilizada en kinesiología humana para evaluar ángulos articulares.

En la literatura se reportan valiosas investigaciones en las cuales los goniómetros juegan un importante rol en cada una de las aplicaciones. En un estudio se evaluó la funcionalidad del hombro mediante acelerómetros y giroscopios cinemáticos 3D situando sensores en diferentes partes del cuerpo donde está comprometida la rotación del hombro (Coley, 2006). Una de las nuevas tecnologías utilizadas en los goniómetros es propuesta por investigaciones realizadas por la Universidad Pontificia de Cataluña, la cual trabajó con goniómetros de tecnología láser para el posicionamiento guiado en un robot móvil. La tarea de ellos es calcular la posición y la orientación de un robot móvil o vehículos

auto guiados (AGV) la cual se hace con un constante monitoreo en tiempo real de cada uno de los ángulos captados por el goniómetro y los reflectores (Font & Batlle, 2006).

Algunas aplicaciones de la goniometría en la salud son: En rehabilitación: para determinar el punto de inicio del tratamiento, evaluar su progresión en el tiempo, evaluar los tratamientos y determinar posibles secuelas. En medicina del deporte: para medir y controlar la evolución del entrenamiento de los deportistas (Suárez, 2010). En administración en salud y en epidemiología: el registro goniométrico facilita la revisión e interpretación de datos en las historias clínicas. En medicina legal y medicina del trabajo: para la evaluación de incapacidades producto de secuelas de accidentes o enfermedades que afectan el sistema osteoarticular.

En el Grupo de Investigación en Bioingeniería de la UPB se ha venido trabajando en el desarrollo de aplicaciones para el análisis de movimientos basado en sensores cinemáticos bajo la línea de investigación en biomecánica (Orozco et al, 2010).

En este artículo se presenta el diseño y desarrollo de un prototipo de goniómetro digital en tiempo real, implementado con acelerómetros y giroscopios para medir el ángulo de flexión y extensión de las extremidades del cuerpo humano en la rehabilitación de las personas que han sufrido algún tipo de traumatismo.

Por medio de una comunicación inalámbrica se envían cada una de las señales monitoreadas a un dispositivo móvil con sistema

operativo Android, donde se pueda llevar un control de la evolución de sus terapias de una forma práctica segura y sencilla.

## 2. DISPOSITIVOS EMPLEADOS

Para la elaboración del goniómetro digital se emplearon los siguientes dispositivos:

### 2.1 Microcontrolador MCF51QE128

Este microcontrolador pertenece a la familia de microcontroladores COLDFIRE de 32 bits (Freescale, 2008). Se habilitaron los módulos IIC (Inter Integrated Communication) y SCI (Serial Communication Interface) para la comunicación con los sensores cinemáticos y el dispositivo bluetooth. Los acelerómetros y giroscopios están conectados al microcontrolador mediante el protocolo de comunicación IIC.

### 2.2 Acelerómetro ADXL 345

Este dispositivo permiten medir la aceleración en una, dos o tres dimensiones. Permite medir la inclinación de un cuerpo, puesto que es posible determinar la componente de la aceleración provocada por la gravedad que actúa sobre el cuerpo. Tiene un consumo de 40 mA en modo de medición y 0,1 mA en modo de espera. Opera en el rango de voltaje entre 2 V y 3,6 V (Analog Devices, 2009).

### 2.3 Giroscopio ITG 3200

El ITG3200 es un giroscopio digital que detecta los cambios del eje de rotación causados por alguna fuerza que actúe sobre él. La corriente normal de funcionamiento del sensor es de solo 6,5mA. Presenta un rango de tensión de alimentación de 2,1 V a 3,6 V (Invensense, 2010).

### 2.4 Bluetooth RN42

Para el proyecto se empleó un módulo Bluetooth RN42 de Roving Networks el cual es pequeño, de baja potencia y económico, que soporta múltiples protocolos de interfaz. Opera en la banda libre de 2.4 Ghz. Tiene un consumo 26 uA en modo inactivo, 3mA en conexión establecida y 30mA transmitiendo (Roving Networks, 2013).

### 2.5 Circuito de carga de batería

Se implementó un sistema de carga para alimentar la batería de Litio recargable encargada de alimentar el dispositivo, utilizando un controlador de carga MCP73843 el cual se debe alimentar en un rango de voltaje entre 4.5v y 12v para controlar la carga (Microchip, 2004).

### 3 DISEÑO ELECTRÓNICO

Se diseñó la tarjeta electrónica utilizando el software de diseño EAGLE teniendo en cuenta las recomendaciones, para evitar al máximo el ruido electromagnético. Se tuvo en cuenta las hojas de datos de cada uno de los componentes y sus criterios de diseño. Así también, se redujo el tamaño de la tarjeta a unas medidas cómodas para la buena manipulación de los usuarios.

En la parte superior del diseño se ubican los elementos que conforman el sistema de alimentación y carga del dispositivo. Se ubicó el microcontrolador en un punto central para acomodar los sensores alrededor de él.

En la parte inferior derecha va el módulo bluetooth. Este módulo se ubicó en la tarjeta de modo que su antena quedara libre.

Al ensamblar todos los componentes a la tarjeta, se obtuvo el producto final del prototipo del goniómetro digital, el cual es mostrado en la figura 1. Se ven claramente los dos pares de sensores cinemáticos.

La figura 2 representa el diagrama de flujo del software desarrollado



Figura 1. Board con todos los dispositivos ensamblados

Podemos notar en la parte central izquierda el conector JP1 de 6 pines por medio del cual se programa el microcontrolador con el conjunto de instrucciones necesarias para su funcionamiento. Se empleó el lenguaje de programación "C".

Con un acelerómetro de tres ejes y suponiendo el objeto en reposo, podemos encontrar su orientación en el espacio con la ayuda de la trigonometría.

Por medio de los acelerómetros podemos medir aceleraciones lineales, mientras que con los giroscopios medimos aceleraciones angulares. Si combinamos un acelerómetro de 3 ejes con un giroscopio de tres ejes tendremos perfectamente definida la orientación del objeto en el espacio.

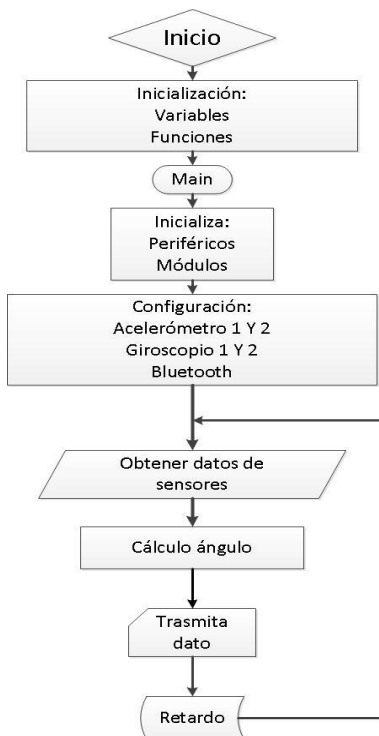


Figura 2. Diagrama de flujo del software desarrollado

### 3.1 Ecuaciones de los cosenos directores

Con los datos obtenidos de los acelerómetros y los giroscopios en los 3 ejes, se obtienen los cosenos directores que nos indican el ángulo que forma el vector con respecto a cada uno de los ejes,

$$\cos x = \cos A_{xr} = R_x/R, \quad (1)$$

$$\cos y = \cos A_{yr} = R_y/R, \quad (2)$$

$$\cos z = \cos A_{zr} = R_z/R, \quad (3)$$

donde,

$$R^2 = R_x^2 + R_y^2 + R_z^2 \quad (4)$$

$R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  representan los datos de los ejes obtenidos por los sensores.,  $A_x$ ,  $A_y$  y  $A_z$  representan las aceleraciones estáticas de cada eje. En la figura 3 se muestra una representación de estos ejes.

Por otro lado, cada canal del giroscopio mide la rotación alrededor de uno de los ejes. Este sensor es empleado debido a que es menos sensible a los movimientos mecánicos lineales, por lo que ayuda a suavizar los errores del acelerómetro. Al hacer un promedio de los datos que vienen del acelerómetro y del

giroscopio, se puede obtener una estimación relativamente mejor de la inclinación del dispositivo.

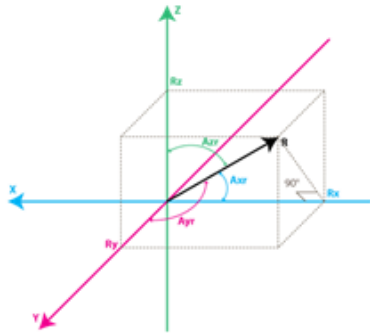


Figura 3. Vector fuerza del acelerómetro en 3 ejes.

#### 4. APLICACIÓN MÓVIL

El aplicativo móvil está implementado utilizando la plataforma Google App Inventor creado a mediados de 2009 por el profesor Harold Abelson del MIT (Instituto tecnológico de Massachusetts), la cual es una aplicación de Google Labs diseñada para crear desarrollos de software para el sistema operativo ANDROID (AppInventor, 2012).

En esta plataforma se crean las aplicaciones enlazando un conjunto de bloques a partir de unas herramientas básicas. Este

editor de bloques emplea la librería Open Blocks de Java para crear un lenguaje visual a partir de bloques bajo licencia libre (MIT License).

Nuestra aplicación tiene el nombre de GONIÓMETRO DIGITAL. Está conformada por varias pantallas o “Screens” a través de los cuales podemos ver toda la información y contenido por medio de los menús y botones que la componen.

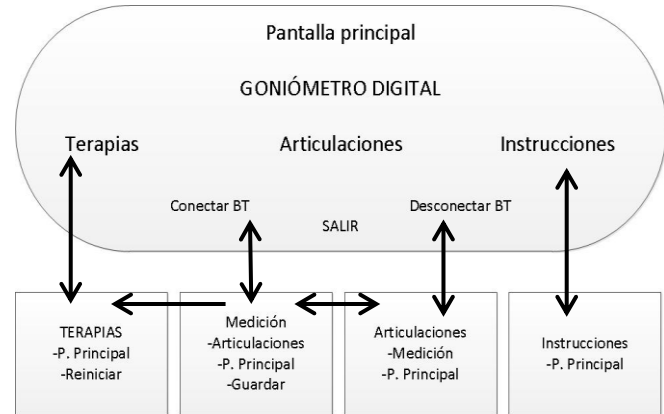


Figura 4. Diagrama de bloques de la aplicación móvil. Las flechas del diagrama indican la forma en que se puede navegar a través de la aplicación.

Las flechas del diagrama indican la forma en que se puede navegar a través de la aplicación.

El ícono creado de la aplicación móvil instalada en un teléfono celular Motorola Defy con un sistema operativo Android 2.3, se muestra en la figura 9. La aplicación puede ser instalada en cualquier dispositivo con sistema operativo Android.

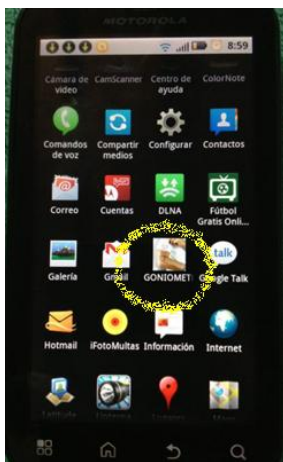


Figura 5. Icono de la aplicación móvil

Cuando la aplicación es descargada, automáticamente se ubica en la carpeta que contiene todas las aplicaciones del teléfono celular, facilitando su búsqueda. Al hacer Click sobre ella, inmediatamente se inicia el programa de la aplicación y se presenta la pantalla principal con un menú de opciones para navegar a través de ella.

La aplicación cuenta con los botones para conectar y desconectar el bluetooth, para ver la información sobre las articulaciones, las terapias guardadas, las instrucciones de funcionamiento y el botón salir.

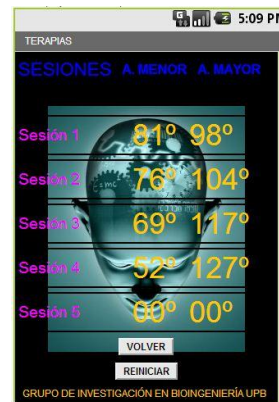


Figura 6. Pantalla terapias

En los demás submenús se muestra al usuario el modo de empleo del dispositivo, donde se enumeran las instrucciones precisas para hacer el uso del dispositivo y almacenar los datos obtenidos.

La aplicación nos presenta los valores promedio de los ángulos de las articulaciones según la goniometría médica.



Figura 7. Pantalla medición

En la pantalla de medición se puede visualizar en la parte superior, el ángulo medido por los sensores.

En la parte inferior observamos el ángulo mínimo y máximo medido en esa sesión. A medida que varía el valor del ángulo recibido por los sensores, se hace una comparación con los datos

almacenados tanto menores como mayores, y si alguno de estos valores cambia, la aplicación se actualiza y muestra los nuevos datos. (Ver figura 7).

#### 4.1 Cómo descargar la aplicación

La aplicación GONIOMETRO DIGITAL se puede descargar a nuestro smartphone Android a través del cable de conexión USB del teléfono, directamente desde un sitio web creado en App Inventor, que es donde está guardada nuestra aplicación.

Por medio de App Inventor se puede crear el código de barras de nuestra aplicación, facilitando su descarga. Solo es necesario que el dispositivo móvil Android tenga un lector de códigos de barras para que lea este, e inmediatamente se inicia la descarga. El usuario solo tiene que aceptarla.

En la figura 8 se presenta el código QR creado de la aplicación. Si se tiene instalado en el dispositivo móvil algún lector de códigos, bastará con escanear esta figura para iniciar la descarga de la aplicación.



Figura 8. Código QR para descargar la aplicación



## 5 CONCLUSIONES

Con el apoyo de la teoría de circuitos electrónicos y de diseño electrónico, se desarrolló la tarjeta del prototipo del goniómetro digital permitiendo la integración de todos los dispositivos que la componen.

Basados en nuevas tecnologías de transmisión de datos inalámbricos, se implementó una comunicación entre el prototipo y un dispositivo móvil encargado de recibir los datos obtenidos por los sensores cinemáticos para su posterior análisis.

Aprovechando los nuevos desarrollos para plataformas móviles libres, se desarrolló una aplicación para la comunicación de dispositivos móviles que tienen sistema operativo Android, con el prototipo del goniómetro digital. Esta se encarga de mostrar visualmente los datos obtenidos por los sensores y brinda al usuario información necesaria para la interpretación de los resultados conseguidos.

Los resultados de este proyecto pueden ser utilizados en futuros desarrollos del Centro de Bioingeniería de la UPB en el área de rehabilitación y biometría.

## REFERENCIAS

- Invensense (2011). *ITG-3200 Product Specification*. Recuperado el 1 de junio de 2012 de <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-ITG-3200A.pdf>
- Microchip (2004). *MCP7341/2/3/4 – Advance Single or Dual Cell Lithion-Ion Charger Management Controllers*. Recuperado el 21 de enero de 2012 de <https://www.sparkfun.com/datasheets/Prototyping/MCP73843.pdf>
- Orozco, A., Peñuela, L., Cardona, J. F., Aljure, J. D., Castaño, V. D. (2010). *Acquisition and Processing of Kinematic Variables for Biomechanical Analysis of Movement*
- Roving Networks (2013). *RN42/RN42N Class 2 Bluetooth Module*. Recuperado el 3 de febrero de 2013 de <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/rn-42-ds-v2.32r.pdf>
- Suárez J. (2010). *La goniometría en la gimnasia rítmica deportiva*. Recuperado el 13 de febrero de 2012 de <http://creamotriz.blogspot.com/2010/03/la-goniometria-en-la-gimnasia-ritmica.html>
- Taobadela, C. H. (2007). Goniometría. Una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales.
- Invensense (2011). *ITG-3200 Product Specification*. Recuperado el 1 de junio de 2012 de <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-ITG-3200A.pdf>
- Microchip (2004). *MCP7341/2/3/4 – Advance Single or Dual Cell Lithion-Ion Charger Management Controllers*. Recuperado el 21 de enero de 2012 de <https://www.sparkfun.com/datasheets/Prototyping/MCP73843.pdf>

- Orozco, A., Peñuela, L., Cardona, J. F., Aljure, J. D., Castaño, V. D. (2010). *Acquisition and Processing of Kinematic Variables for Biomechanical Analysis of Movement*
- Roving Networks (2013). *RN42/RN42N Class 2 Bluetooth Module*. Recuperado el 3 de febrero de 2013 de <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/rn-42-ds-v2.32r.pdf>
- Suárez J. (2010). *La goniometría en la gimnasia rítmica deportiva*. Recuperado el 13 de febrero de 2012 de <http://creamotriz.blogspot.com/2010/03/la-goniometria-en-la-gimnasia-ritmica.html>
- Taobadela, C. H. (2007). Goniometría. Una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales.

## AUTORES



investigación.

*Julián Camilo HENAO HOYOS*, Nacido el 25 de Septiembre de 1978, en Medellín, Colombia. Bachiller académico del Colegio de la Universidad Pontificia Bolivariana. Egresado próximo a graduarse en el programa de ingeniería electrónica. Actualmente forma parte del grupo de bioingeniería de la UPB bajo la modalidad de asistencia a la



*Johnnatan Alexander LÓPEZ BARRETO*, Nacido el 29 de Octubre de 1983, en Medellín, Colombia. Bachiller académico del INEM José Félix de Restrepo. Egresado próximo a graduarse en el programa de ingeniería electrónica. Actualmente labora en el campo de ingeniería de soporte.



*Andrés Felipe OROZCO DUQUE*, Obtuvo su pregrado en Ingeniería Electrónica en la Universidad Pontificia Bolivariana en 2003 y una especialización en Ingeniería Biomédica en la UPB en 2009. Sus áreas de interés son la bioinstrumentación y el procesamiento de señales biomédicas.