



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

## RETOS EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS EN LA ERA DIGITAL

# SISTEMA MICROCONTROLADO PARA MONITOREO DE PACIENTES

**David Alejandro Salas Cárdenas, Andrés Felipe Ramírez Clavijo, Julián Alejandro Hernández Bohórquez, Robinson Jiménez Moreno**

**Universidad Militar Nueva Granada  
Bogotá, Colombia**

### Resumen

Se desarrolla un sistema basado en el microcontrolador STM32F746ZG capaz de hacer seguimiento del ritmo cardiaco de un paciente, así como sus aceleraciones en cada instante. Esto permite saber si el paciente ha sufrido una caída o se encuentra realizando movimientos anormales, por ejemplo, una convulsión.

Se emplean en total tres sensores; un sensor óptico de ritmo cardiaco que proporciona un valor de voltaje proporcional al flujo sanguíneo actual en el dedo del paciente. De manera alternativa otro sensor que posee las conexiones directamente con electrodos para determinar de manera más exacta el ritmo cardiaco del paciente. Ambos son integrados mediante un conversor análogo-digital de 12 bits incorporado por defecto en el microcontrolador. Por su parte, las aceleraciones se miden mediante el MPU6050, un sensor de tipo MEMS que se comunica mediante protocolo I2C.

Toda señal recibida es procesada por medio de filtros digitales, evaluados mediante ecuaciones en diferencias con adaptación de la forma de filtros FIR (Respuesta Finita al Impulso). Toda anomalía, es decir, aumento o disminución del ritmo cardiaco, caída repentina o movimientos bruscos son causal de alerta. Los datos del paciente se monitorean mediante una aplicación móvil y una aplicación web, los cuales son enviados por medio de un módulo bluetooth y un módulo Wifi respectivamente.

**Palabras clave:** monitoreo; microcontrolador; supervisión

## **Abstract**

*It will be developed a system based on the STM32F746ZG microcontroller able to tracking the heart rate of a patient, as well as their accelerations at every moment. This, in order to know if the patient has suffered a fall or is performing abnormal movements typical of a seizure.*

*A total of three sensors will be used; in the first instance, an optical heart rate sensor that provides a voltage value proportional to the current blood flow in the patient's finger. Alternatively, another sensor that has the connections directly with electrodes to more accurately determine the heart rate of the patient. Both will be integrated by means of a 12-bit analog-digital converter incorporated by default in the microcontroller. On the other hand, the accelerations will be measured by means of the MPU6050, a MEMS type sensor that communicates through the I2C protocol.*

*All received signals will be processed by means of digital filters, evaluated by means of difference equations with adaptation of the form of FIR filters (Finite Response to Impulse). Considering this, the response to the impulse of the filter will be taken into account, as well as its frequency response, based on the spectrum of frequencies present in each signal.*

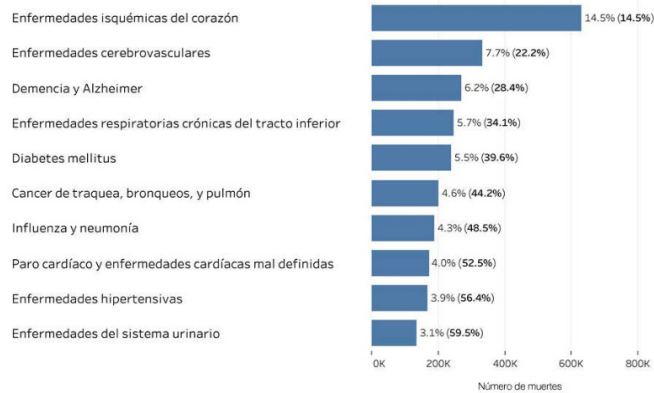
*Any anomaly, that is, an increase or decrease in heart rate, sudden fall or abrupt movements will be cause for warning. The patient data will be monitored by means of a mobile application and a web application, which will be sent by means of a Wifi module and a bluetooth module respectively.*

**Keywords:** *monitoring; microcontroller; supervisión*

## **1. Introducción**

La población de adultos mayores de 60 años presenta un aumento progresivo, según la organización mundial de la salud “las poblaciones de todo el mundo están envejeciendo rápidamente”, entre el año 2000 y 2050 la población de adultos mayores se duplicará del 11% al 22%, para el año 2050 las personas mayores de 60 años representarán un 25% de América latina y el caribe (OMS, 2016). En Colombia, según estadísticas presentadas por el departamento administrativo nacional de estadística, para el año 2018 la población de adultos mayores representó un 9,2% de la población total, aumentando 2,9% respecto a las estadísticas presentadas en el año 2005, de igual manera el índice de envejecimiento paso de 21 a 41 en el año 2018 (DANE, 2018).

Por otro lado, según la organización panamericana de la salud (OPS) las causas de muerte en la población mayor a 60 años se centran en enfermedades asociadas con el corazón (OPS, 2015), lo cual se puede evidenciar en la Figura 1:



**Figura 1.** Diez causas principales de mortalidad en la población de 60 años de edad. Organización Panamericana de la Salud.

Adicional a enfermedades cardíacas, la Organización mundial de la salud presenta estadísticas de muertes ocasionadas por caídas, según la OMS “las caídas son la segunda causa mundial de muerte por lesiones accidentales”, anualmente se estiman 646.000 caídas mortales a nivel mundial, de las cuales las mayores tasas de mortalidad por este evento se presentan en adultos mayores de 60 años (OMS, 2018).

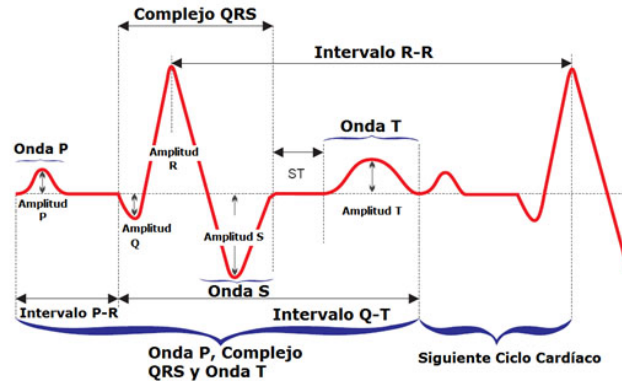
De acuerdo a lo mencionado anteriormente, con el sistema microcontrolado para monitoreo de pacientes se busca disminuir estos índices por medio de información que permitirá tener un reflejo constante de las actividades y el estado actual de una persona que pueda sufrir o padecer alguna de estas complicaciones.

## 2. Marco conceptual

### 2.1 Electrocardiograma (ECG)

El electrocardiograma (ECG) es una representación gráfica de las fuerzas eléctricas que trabajan sobre el corazón. Durante el ciclo cardíaco de bombeo y llenado, un patrón conocido de los pulsos eléctricos cambiantes evidencia exactamente la acción del corazón, estos pulsos eléctricos pueden ser recogidos a través de electrodos pegados en la superficie del cuerpo (Quinayas, Fabián, Jorge, Nadia, Lucy, 2012).

En la siguiente figura 2 se puede visualizar la señal de un ECG con todos los tipos de sus ondas.



**Figura 2.** Señal ECG con sus ondas más representativas.

Las ondas son las distintas curvaturas que toma el trazado del ECG hacia arriba o hacia abajo. Son producto de los potenciales de acción que se producen durante la estimulación cardiaca y se repiten de un latido a otro, salvo alteraciones. Las ondas electrocardiográficas han sido denominadas P, Q, R, S, T, U por ese orden y van unidas entre sí por una línea isoelectrica. Cada onda tiene un significado diferente que sirve para diferentes aplicaciones médicas. La señal ECG está compuesta por los siguientes segmentos más representativos:

**Onda P:** Representa la despolarización o contracción de las aurículas impulsando la sangre hacia los ventrículos. Su duración normal es de 0.1 s.

**Complejo QRS:** Representa la despolarización de los ventrículos. Está formado por las ondas Q, R y S (ver figura 2). Su duración normal es aproximadamente igual a 100ms

**Onda T:** Representa la repolarización de los ventrículos. La onda T normal es asimétrica en sus ramas y está redondeada en su vértice.

**Onda U:** tiene un origen fisiológico poco claro, se piensa que esta onda se produce por la repolarización del sistema de conducción intraventricular.

## 2.2 Filtros FIR (Respuesta finita al impulso)

Los filtros digitales se usan normalmente para el tratamiento digital de señales como los sonidos digitales. FIR es un acrónimo en inglés para *Finite Impulse Response* o Respuesta finita al impulso. Se trata un de tipo de filtro digital en el que, como su nombre lo indica, si la entrada es una señal de impulso, la salida tendrá un número finito de términos no nulos. La obtención de esta salida se basa en entradas actuales y anteriores. La expresión en el dominio n se evidencia en la ecuación 1, donde N es el orden del filtro y sus coeficientes son  $b_k$ . Por otro lado, la salida se puede expresar también como la convolución de la señal de entrada  $x(n)$  con la de la respuesta impulsional  $h(n)$ , la cual se observa en la ecuación 2. (Cedillo, Linding, Romero, 2008)

$$y_n = \sum_{k=0}^{N-1} b_k x(n - k) \quad y_n = \sum_{k=0}^{N-1} h_k x_{n-k}$$

**Ecuación 1.** Expresión Filtro FIR En dominio n **Ecuación 2.** Expresión por convolución.

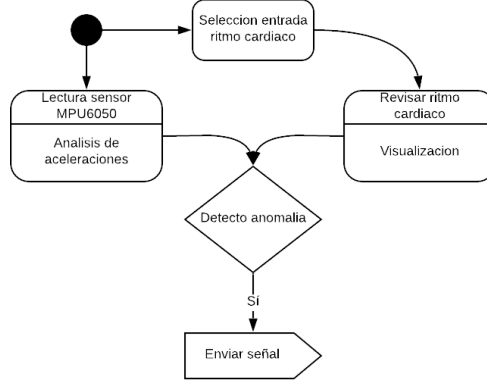
Finalmente, al aplicar la transformada Z a la expresión de la ecuación 2, se obtiene la Ecuación 3, la cual es programada en el microcontrolador.

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k z^{-k} = h_0 + h_1 z^{-1} + \dots + h_{N-1} z^{-(N-1)}$$

**Ecuación 3.** Transformada Z de la convolución.

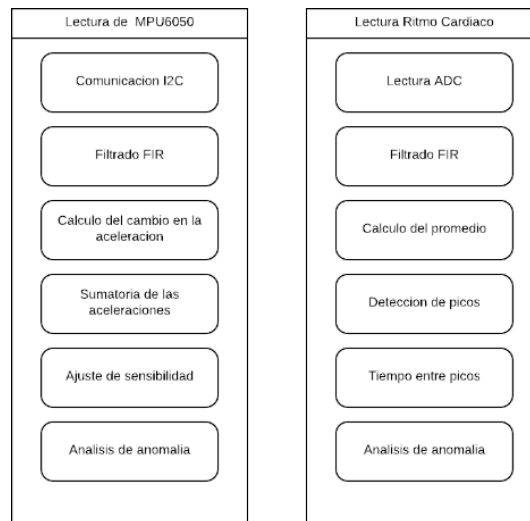
### 3. Desarrollo

Para el cumplimiento de los requisitos del proyecto se plantea el flujo de trabajo especificado en la figura 3, donde se plantea los diferentes módulos con los que cuenta el proceso.



**Figura 3,** Diagrama general de funcionamiento.

El proceso a seguir para la obtención, tratamiento y análisis de los datos de los sensores se presenta en la figura 4, y es explicado adelante en el documento.



**Figura 4,** Diagrama general lectura de sensores.

### 3.1 Lectura del sensor MPU6050

Para el uso de este sensor de aceleración de 6 grados es necesaria la comunicación por I2C, los procesos para la lectura de los valores de aceleración en cada eje se realizan basados en el proceso planteado por el fabricante en la hoja de datos como se observa en la figura 5.

Single-Byte Read Sequence

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		

Figura 5, Diagrama general lectura de sensores.

Para el filtrado de la señal obtenida del sensor se utiliza un filtro FIR pasa bajas, que elimina el mayor componente de ruido ubicado en frecuencias altas, el modelo del filtro está planteado en la ecuación 4

$$y_n = x_n\alpha + (1 - \alpha)y_{n-1}$$

Ecuación 4. Filtro pasa bajas

El valor de alpha fue escogido iterativamente de tal manera que el filtro actuara correctamente sin afectar la medida real del sensor.

Para el análisis de caídas, se verifica con que velocidad cambia la aceleración, es a este cambio al que se le denomina sobre aceleración, la ecuación 5 muestra la sobre aceleración para los tres ejes (x,y,z) empleados, en un intervalo de muestras.

$$\dot{a}_{q_n} = a_{q_n} - a_{q_{n-k}}$$

Ecuación 5. Calculo sobre aceleración

Donde  $a$  es la aceleración,  $q$  es el eje y  $n$  la muestra.

Para obtener un resultado global del estado de las sobre aceleraciones se hace uso del promedio aritmético de la forma mostrada en la ecuación 6.

$$\dot{a} = \frac{\dot{a}_x + \dot{a}_y + \dot{a}_z}{3}$$

Ecuación 6. Promedio sobre aceleración

Finalmente, para el análisis de caída, según la sensibilidad programada por el usuario se realiza la comparación con el rango pertinente al promedio de las muestras de los usuarios.

### 3.2 Lectura del sensor Ritmo Cardíaco

Se tienen destinados dos sensores para la medición del ritmo cardíaco, uno óptico y el otro basado en ECG, esto con el fin de tener una medición rápida de menor precisión, o una baja de mayor precisión, la selección del sensor se realiza mediante la app del teléfono móvil, esta activara la lectura del sensor y ajustara parámetros específicos de cada uno.

Ambos sensores están normalizados para trabajar en un rango de 0 a 3v que serán leídos mediante un ADC por el microcontrolador, este cuenta con 12 bits de resolución, o lo que es lo mismo, el

valor del sensor puede ser almacenado en un rango de 0 a 4095 en el mundo discreto. Se realiza el cálculo del promedio de la señal, para establecer un punto de control con el cual medir los picos ECG, para este promedio, se empleó el promedio aritmético dado por la ecuación 7.

$$P_n = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{X_{n-i}}{k}$$

**Ecuación 7.** Promedio de la señal ECG

Donde P es promedio a calcular, k es el número de muestras y X la señal obtenida del ADC. Para la detección de los picos, se realiza la comparación del valor actual con el promedio más un porcentaje que depende del tipo del sensor, se tienen dos extremos que indicaran el comienzo y el final de un pico, y que fue calibrado manualmente, el aspecto de comparación se representa por la ecuación 8.

$$C = \begin{cases} 1, X > P(Q + 1) \\ 0, X < P(R + 1) \end{cases}$$

**Ecuación 8.** Detección de picos

Donde C es la detección de un pico, P es el promedio actual, Q es el peso del límite de subida y R es el peso del límite de bajada. Para realizar el cálculo de las pulsaciones por minuto se realiza la medición del tiempo que demora entre pico y pico, luego mediante la ecuación 9, se estiman las pulsaciones por minuto.

$$H = \frac{60}{T}$$

**Ecuación 9.** Cálculo de los BPM

Donde H son las pulsaciones por minuto o heart rate y T es el intervalo entre pico y pico o heart rate variability, la medida de T se toma desde el momento en que C en la ecuación 9, cambia de 1 a 0, hasta el siguiente pico en el momento ocurre lo mismo. Se enviará una alarma si los BPM están fuera de los límites permitidos.

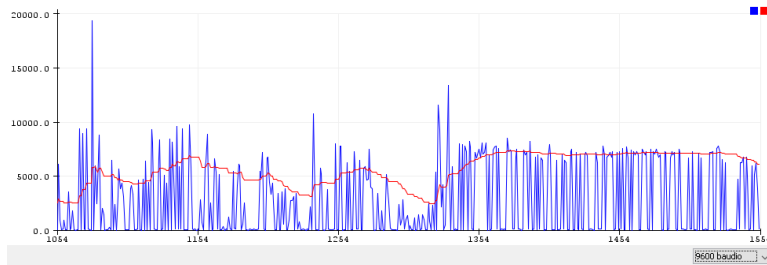
#### 4. Resultados

Después de realizar las conexiones pertinentes en la tarjeta final (figura 6), se midieron las señales recibidas por parte de cada periférico, tanto los sensores que miden el ritmo cardíaco como la unidad inercial, que permitirá monitorear el comportamiento motriz del paciente.



**Figura 6.** Montaje electrónico final del monitor de pacientes.

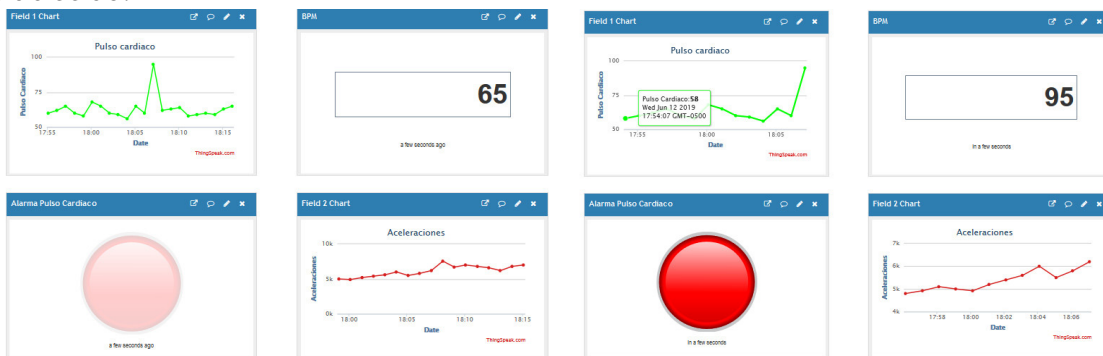
En el caso de los sensores de ritmo cardiaco, su respuesta es leída analógicamente y tratada con filtros digitales como se definió en la sección 3. Para el caso del IMU, a partir de la realización del filtro FIR, otorgó un resultado suavizado, en la figura 8 se puede observar la señal recibida, donde la respuesta azul es la salida pura del sensor, y la señal roja es la misma señal luego de pasar por el filtro.



**Figura 8.** Comparación entre las salidas del sensor MPU6050 junto con su señal filtrada

Esta grafica demuestra que al usar el filtro la medición del movimiento del paciente va a ser más precisa y su comportamiento podrá monitorearse al detectar un cambio muy brusco en sus movimientos, refiriéndose a una situación de alerta como convulsión o caídas.

Finalmente, para la visualización de los datos transferidos a la web, se hizo uso de ThingSpeak, una herramienta propia de MathWorks, la cual permite realizar y visualizar datos enviados desde un microcontrolador a través de un módulo Wifi. En la figura 9 a continuación se visualiza las gráficas obtenidas por ambos sensores de frecuencia cardiaca y los valores de las aceleraciones otorgados por el IMU. De igual forma en la figura 10 se visualiza la misma información, pero esta vez con la alarma activada la cual se encarga de advertir que el pulso cardiaco supera un valor establecido.



**Figura 9.** Información sin alarma. **Figura 10.** Información con alarma activada.



## 5. Conclusiones

Se generó un sistema de monitoreo versátil, capaz de incorporar tecnologías de comunicación, con un enfoque a la supervisión efectiva de un paciente, orientado a mejorar la calidad de vida del mismo, a partir de un seguimiento de su frecuencia cardiaca y aceleraciones que permiten determinar si la persona involucrada ha sufrido una caída o presenta alguna alteración en el corazón, lo cual resulta útil en diferentes escenarios, ya que por ser sencillo y amigable con el usuario puede ser utilizado tanto por un médico con experiencia o por una persona normal que quiera seguir su estado de salud. Este sistema puede operar a distancias cortas a través de una aplicación móvil y a distancias largas por medio de una aplicación web teniendo una conexión a internet.

## 6. Referencias

### Artículos de revistas

- C. Quinayas, R. Fabian, B. Jorge, M. Nadia, M. Lucy. (2012). ECG Portatil. Revista Colombiana de Física, vol 44, No. 3, pp. 269-270

### Libros

- NXP Semiconductors N.V. (2014). I2C-bus specification and user manual, UM10204 User Manual. pp 3-10.

### Fuentes electrónicas

- Cedillo. J, Linding. K, Romero. G, (2008). Implementación de Filtros Digitales Tipo FIR en FPGA. Consultado en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/poli/n37/n37a12.pdf>
- DANE Información estratégica. (2018, noviembre). Resultados preliminares Censo nacional de población y vivienda. Consultado en: <https://sitios.dane.gov.co/cnpv-presentacion/src/#cuantos00>
- Organización Panamericana de la Salud. (2015, mayo). Estado de salud de la población – Salud de adulto mayor. Consultado en: [https://www.paho.org/salud-en-las-americas-2017/?post\\_t\\_es=salud-del-adulto-mayor&lang=es](https://www.paho.org/salud-en-las-americas-2017/?post_t_es=salud-del-adulto-mayor&lang=es)
- Organización Mundial de la Salud. (2016, abril). Acción multisectorial para un envejecimiento saludable basado en el ciclo de vida: proyecto de estrategia y plan de acción mundiales sobre el envejecimiento y la salud. Consultado en: [http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf\\_files/WHA69/A69\\_17-sp.pdf](http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA69/A69_17-sp.pdf)
- Organización Mundial de la Salud (2018, enero). Caídas. Consultado en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/falls>

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)