

# Simulación del algoritmo Pan-Tompkins para la detección de intervalos QRS en tiempo real<sup>1</sup>

*Simulation of the Pan-Tompkins algorithm for real time detection of QRS intervals*

Edwin Andrés Quintero Salazar\* Juan David Valencia Parra\*\*

Presentado: 29 de febrero del 2012 Aprobado: 10 de abril del 2012

## Resumen

**Introducción:** en el presente documento se muestran los resultados obtenidos al realizar la simulación del algoritmo propuesto por Pan y Tompkins, ampliamente utilizado para la detección de complejos QRS en señales electrocardiográficas, sobre la plataforma VisualDSP++ del procesador digital de señales ADSP-EF533 de la marca Analog Devices, el cual trata de un sistema embebido en el que se posibilita el tratamiento de los datos en tiempo real. **Metodología:** para el desarrollo de la simulación se aplicó el algoritmo a 20 señales descargadas de manera aleatoria de la base de datos Physionet, del Massachusetts Institute of Technology. **Resultado:** el sistema detectó 99 intervalos QRS de un total de 96 existentes, registrando tres desaciertos debido a la presencia de ruido cuyo origen no se sitúa en la señal eléctrica del corazón, sino en interferencias electromagnéticas externas. **Conclusiones:** es posible pasar a la fase de implementación del algoritmo de reconocimiento, sobre el hardware del procesador ADSP-EF533, lo cual permitirá una identificación fiable de complejos QRS, a velocidades mucho mayores que las alcanzadas por los equipos de cómputo convencionales.

**Palabras clave:** electrocardiograma, intervalo QRS, procesamiento digital de señales, sistema embebido, tiempo real.

## Abstract

**Introduction:** This paper shows the results obtained by running a simulation of the algorithm proposed by Pan and Tompkins, widely used for the detection of QRS complexes in electrocardiographic signals, on the VisualDSP++ platform of the ADSP-EF533 digital signal processor from Analog Devices; which is an embedded system that makes the treatment of information in real time possible. **Methodology:** For the simulation, we applied the algorithm to 20 random signals from the Physionet database of the Massachusetts Institute of Technology. **Results:** The system detected 99 QRS intervals from a total of 96, the 3 false positives were originated by noise, not from the electric signal from the heart, but from external electromagnetic interference. **Conclusions:** It is now possible proceed to the implementation phase of the recognition algorithm on the ADSP-EF533 processor hardware, this will provide a trustworthy identification of QRS complexes at better speeds than conventional computer equipment.

**Keywords:** electrocardiogram, QRS interval, digital signal processing, embedded system, real time.

Cómo citar este artículo: Quintero Salazar, Edwin Andrés y Valencia Parra, Juan David (2012), "Simulación del algoritmo Pan-Tompkins para la detección de intervalos QRS en tiempo real", en *Revista Memorias*, vol. 10, núm. 18, pp. 73-81

<sup>1</sup> Artículo de investigación resultado del proyecto de investigación "Procesamiento en tiempo real de señales de electrocardiograma", desarrollado en el 2011 por el grupo de investigación de Ingeniería Electrónica de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP).

\* Ingeniero Electrónico de la Universidad de Manizales. Magíster en Instrumentación Física de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Director del Programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Correo electrónico: equintero@utp.edu.co.

\*\* Ingeniero Electrónico de la Universidad Tecnológica de Pereira. Jefe del Departamento Técnico de Media Commerce. Correo electrónico: juandask@utp.edu.co

## Introducción

El electrocardiograma contiene información importante que permite detectar y corregir enfermedades cardíacas de forma certera, una vez que los datos relevantes son individualizados por un cardiólogo experto. Una de las secciones más representativas de este tipo de señales es el intervalo QRS, el cual representa la despolarización de los ventrículos del corazón. Así pues, su detección correcta y en tiempo real es sumamente importante en los equipos electrocardiográficos con desfibriladores automatizados, ya que la probabilidad de desfibrilación exitosa disminuye rápidamente a medida que pasa el tiempo luego de una fibrilación ventricular (González, 2008). Dado lo anterior, es posible concluir que constituye un problema de investigación importante que requiere atención y que es pertinente enfrentar desde el procesamiento digital de señales. Esta característica de urgencia, y por ende el requerimiento de altas velocidades de procesamiento, anulan la posibilidad de utilizar sistemas convencionales de cómputo para el tratamiento de este tipo de señales, con lo cual se abre la posibilidad de implementar sistemas embebidos con capacidad de operación en tiempo real.

Si bien en la actualidad son abundantes los documentos científicos existentes que abordan la detección del QRS, son pocos los que hacen referencia a su identificación en sistemas embebidos que posibiliten el procesamiento en tiempo real. Dentro de este conjunto de reducidos elementos cabe destacar el trabajo "Metodología para implementación de algoritmos sobre DSP orientados al proceso de bioseñales" (Avendaño, 2004), en el cual se desarrolla la implementación de algoritmos para la detección de complejos QRS en tiempo real, orientados al procesador digital de señales TMS320C6701 de la marca Texas Instruments, utilizando para ello operaciones de submuestreo y de transformada Wavelet. Asimismo, en "Análisis

e implementación de algoritmos de detección de complejos QRS en tiempo real" (Escolá, 2009), se presenta la implementación de un algoritmo que permite identificar los intervalos QRS por medio de filtros, integradores y derivadores, que básicamente tratan de encontrar los cambios bruscos de pendiente que caracterizan el inicio de las ondas R, todo enfocado a la implementación en la ADSP-BF533 de Analog Devices. Finalmente cabe mencionar que en "Mejoramiento del algoritmo clásico de detección de complejos QRS en señal electrocardiográfica" (Vidal, 2010), se presenta el trabajo de un grupo de ingenieros de la Universidad de Talca en Chile, los cuales realizaron mejoras al algoritmo clásico de detección de complejos QRS Hamilton-Tompkins, usando el algoritmo de Holsinger —basado en la medición de la tasa de cambio del ECG— e identificando cuando dicho valor es superior a un umbral definido. Sin embargo, este estudio llegó a la conclusión de que el algoritmo propuesto aumenta la cantidad de falsos positivos detectados, disminuyendo su efectividad.

Así pues, para la identificación oportuna de patologías cardíacas, que se evidencian en las variaciones presentadas por el intervalo QRS de la señal electrocardiográfica, fue necesario implementar algoritmos de reconocimiento con altas tasas de aciertos —como el Pan-Tompkins— sobre sistemas embebidos que permitan el procesamiento de los datos en tiempo real, como lo hace la tarjeta de procesamiento digital de señales ADSP-BF533 de la marca Analog Devices. Sin embargo, siempre será necesario agotar la etapa inicial de simulación antes de proceder con la implementación, con el fin de validar el método e identificar posibles puntos a mejorar de manera que el sistema opere óptimamente. Por esta razón, el objetivo fundamental del presente trabajo consiste en aplicar el algoritmo anteriormente mencionado a una serie de 20 señales ECG con el fin de evaluar la confiabilidad del método y, de esta manera, establecer la posibilidad de proceder con la etapa de implementación.

## Metodología

Para la ejecución de esta investigación inicialmente se realizó la implementación del algoritmo de Pan-Tompkins en el *software* de desarrollo integrado Visual DSP++ 5.0, el cual permite simular los puertos y unidades de memoria de la tarjeta ADSP-BF533 de Analog Devices (Kuo, 2007). Una vez agotada esta fase, se procedió a ingresar al algoritmo 20 señales electrocardiográficas obtenidas de la base de datos Physionet, del Massachusetts Institute of Technology (2011), detectando de esta manera los complejos QRS de cada una de las señales pertenecientes a la muestra, y comparando los resultados obtenidos con la información suministrada por Physionet acerca del número de eventos QRS existentes en cada señal, para de esta manera establecer el porcentaje de aciertos del sistema desarrollado.

## Fundamentación teórica

### Complejo QRS

Cada onda presente en el ECG se encuentra directamente relacionada con una acción específica del sistema cardiaco que genera diferentes potenciales. Un periodo cíclico de la señal ECG correspondiente a un individuo sano, se encuentra conformado por una onda P, el complejo QRS, la onda T y la onda U. Las secciones dentro del electrocardiograma que se encuentran entre las deflexiones se denominan *segmentos*, y las distancias entre las ondas se conocen como *intervalos*.

Las señales ECG se pueden ver divididas en los siguientes intervalos o segmentos (ver figura 1): *onda P*, *complejo QRS*, *onda T*, *onda U*, *segmento PR*, *segmento ST*, *intervalo PP*, *intervalo RR*, e *intervalo QT*.

El complejo QRS representa la despolarización de los ventrículos. Asimismo, se encuentra conformado por las ondas Q, R y S. Su duración es de aproximadamente 100 ms y su amplitud se encuentra entre 1 mV y 3 mV. Durante este evento

se lleva a cabo la repolarización auricular, llamada onda T, la cual queda enmascarada por el complejo QRS y, por tanto, esta deflexión no suele observarse en la señal ECG de 12 derivaciones.

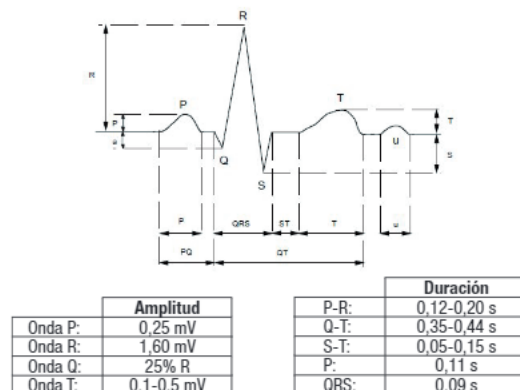


Figura 1. Características de la señal ECG

Fuente: los autores

### Algoritmo de Pan-Tompkins

Pan y Tompkins (1985) proponen un algoritmo de detección de complejos QRS (figura 2) basado en el análisis de la pendiente, la amplitud, y el ancho de los complejos QRS. El algoritmo involucra una serie de filtros y operadores de tipo paso bajo, paso alto, derivador, cuadratura, integrador, umbralización adaptativa y procedimientos de búsqueda (Rangayyan, 2001), los cuales se analizan en los siguientes apartados.



Figura 2. Diagrama de bloques del algoritmo de Pan-Tompkins

Fuente: los autores

### Filtro pasa bajo

El filtro *pasa bajo recursivo*, utilizado en el algoritmo de Pan-Tompkins, posee coeficientes enteros con el fin de reducir la complejidad y el consumo

computacional. La función de transferencia discreta de este filtro está dada por la ecuación (1).

$$H(z) = \frac{1}{32} \frac{(1 - z^{-6})^2}{(1 - z^{-1})^2} \quad (1)$$

En términos de una ecuación en diferencias, con el objeto de implementar el filtro *pasa bajos discreto* en forma computacional, la salida  $y(n)$  está relacionada con la entrada de  $x(n)$  a través de (2).

$$y(n) = 2y(n-1) - y(n-2) + \frac{1}{32} [x(n) - 2x(n-6) + x(n-12)] \quad (2)$$

Con velocidad de muestreo de 200 Hz, el filtro tiene una frecuencia de corte de  $f_c = 1$  Hz, e introduce un retraso de 5 muestras o 25 ms. El filtro suministra una atenuación superior de 35 dB a 60 Hz, y suprime de manera efectiva interferencias en la línea eléctrica, si es que esta se encuentra presente.

#### Filtro pasa alto

El filtro *pasa alto* utilizado en el algoritmo es implementado como un filtro *pasa todo* menos un filtro *paso bajo*. El componente paso bajo tiene la función de transferencia dada por (3).

$$H_{lp}(z) = \frac{(1 - z^{-32})}{(1 - z^{-1})} \quad (3)$$

En ecuación en diferencia, la relación entrada-salida se encuentra especificada por (4).

$$y(n) = y(n-1) + x(n) - x(n-32) \quad (4)$$

Así, la función de transferencia  $H_{hp}(z)$  del filtro de paso alto se especifica en la expresión (5).

$$H_{hp}(z) = z^{-16} - \frac{1}{32} H_{lp}(z) \quad (5)$$

De manera equivalente, la salida  $p(n)$  del filtro de paso alto está dada por la ecuación de diferencias descrita en (6).

$$p(n) = x(n-16) - \frac{1}{32} [y(n-1) + x(n) - x(n-32)] \quad (6)$$

Con  $x(n)$  y  $y(n)$  relacionados en la ecuación (5). El filtro paso alto tiene un límite de frecuencia de 5 Hz e introduce un retraso de 80 ms.

#### Derivador

El operador derivativo usado por Pan y Tompkins está dado por la ecuación (7).

$$y(n) = \frac{1}{8} [2x(n) + x(n-1) - x(n-3) - 2x(n-4)] \quad (7)$$

Esta expresión se aproxima el operador ideal  $\frac{d}{dt}$  hasta 30 Hz. El procedimiento derivativo elimina las componentes de baja frecuencia de las ondas P y T, y proporciona una gran ganancia para las componentes de alta frecuencia.

#### Cuadratura

La operación de cuadratura hace positivo el resultado de los filtros descritos anteriormente y enfatiza las grandes diferencias resultantes de los complejos QRS. Las pequeñas diferencias derivadas de las ondas P y T son suprimidas. Las componentes de alta frecuencia en la señal relacionada con el complejo QRS, son acentuadas.



### Integrador

Como se observa en el apartado anterior, la salida de una operación derivativa exhibe múltiples picos dentro de la duración de un complejo QRS simple. El algoritmo de Pan-Tompkins suaviza la salida de las operaciones realizadas anteriormente a través de un movimiento de ventana del filtro integrador dado por (8).

$$y(n) = \frac{1}{N} [x(n - (N - 1)) + x(n - (N - 2)) + \dots + x(n)] \quad (8)$$

### Arquitectura de la tarjeta ADSP-BF533 y descripción del entorno de desarrollo visual DSP++ 5.0

El procesador ADSP-BF533 es un miembro de la familia Blackfin®, producto incorporado por Analog Devices®, Inc. Intel Micro. Basados en arquitectura de micro señal (MSA), y desarrollados en conjunto con Intel®, los procesadores Blackfin combinan una serie de instrucciones de 32 bits RISC trabajando de forma similar a los microcontroladores de propósito general. Además, cuentan con una funcionalidad de procesamiento de señal de multiplicación y acumulación (MAC) de 16 bits dual. En la figura 3 es posible observar la arquitectura del sistema embebido en cuestión, mientras que la figura 4 contiene una vista general de la tarjeta.

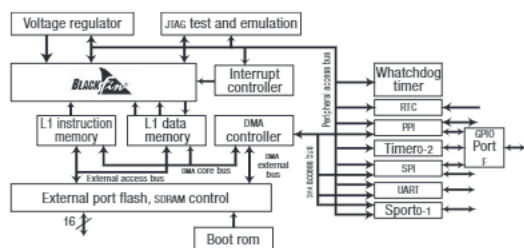


Figura 3. Diagrama de bloques funcional  
Fuente: Analog Devices

Todos los miembros de la familia Blackfin® comparten el mismo núcleo, lo único que los diferencia es la capacidad de memoria, la velocidad de operación, el consumo de potencia y el número de periféricos integrados, lo que hace que estos procesadores sean muy utilizados en dispositivos electrónicos y en equipos de telecomunicaciones y procesamiento de audio y video de alto desempeño.

El ADSP-BF533 proporciona un alto rendimiento, caché de arquitectura flexible, un sub-sistema mejorado del acceso directo a memoria (DMA), y la funcionalidad del manejo de energía dinámica (DPM), ofreciendo de esta manera a los diseñadores una plataforma flexible para abordar una amplia gama de aplicaciones, incluyendo las comunicaciones, la electrónica automotriz y la instrumentación industrial.



Figura 4. Vista general del procesador digital de señales ADSP-BF533 de Analog Devices  
Fuente: Analog Devices

Algunas de las características más importantes de la tarjeta son:

- Procesador Blackfin de alto rendimiento hasta 600 MHz.
- Dos MAC (registros controladores de acceso a memoria) de 16 bits, dos ALU (unidades aritméticas) de 40 bits, cuatro ALU de vídeo de 8 bits, shifter de 40 bits.