

ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS PARA FILTRADO DE SEÑALES EN FONOCARDIOGRAFÍA

Jaime Jalomo Cuevas

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán
jaimejc@itcg.edu.mx

Víctor Isidro Palomares Alonso

Universidad de Guadalajara

Cristian Omar Cortez Olguín

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán
contra314@gmail.com

José de Jesús García Cortes

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán
jjcortes@itcg.edu.mx

Jesús Ezequiel Molinar Solís

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán
molinarov@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio comparativo de dos tipos de filtrado digital aplicado al tratamiento de señales fonocardiográficas. Se muestra el comparativo de los filtros digitales IIR (infinite impulse response) de tipos Butterworth y Chebyshev en el procesamiento de señales medidas a partir de un sensor piezoeléctrico. Se utiliza un criterio de desempeño definido en términos de la raíz del error cuadrático medio relativo a la señal de bajo ruido. Se aplican filtros pasa banda y pasa bajas para resolver el problema del ruido de la señal. Se

implementan filtros pasa banda para tratar con el ruido de la señal de suministro de energía de 60 Hz.

Palabra(s) Clave: Filtro Butterworth, filtro Chebyshev, filtro IIR, raíz del error cuadrático medio, señal fonocardiográfica.

Abstract

In this work, a comparative study for the phonocardiogram (PCG) signal treatment problem by digital filtering is presented. We show the Butterworth and Chebyshev digital filters comparative study applied to heart sound signals obtained by means of a piezoelectric sensor. For performance analysis, we use de root mean square error signal to obtain signal relative to low noise signal. Band pass and low pass digital filter in the noise problem solution are applied. We treat the 60 Hz noise energy supply by a succession of stopband filters to reduce harmonic signals.

Keywords: *Butterworth filter, Chebyshev filter, IIR filter, root mean square error, phonocardiography signal.*

1. Introducción

El filtrado de señales electrocardiográficas y fonocardiográficas son algunos de los problemas importantes de ingeniería moderna [1], dado el aumento en las enfermedades crónico degenerativas de la población adulta. En la actualidad existen muchas marcas comerciales que manejan estándares de medición que resuelven las necesidades del área médica con bastante eficiencia a costos que pueden ser solventados mediante una adecuada administración de los recursos de hospitales públicos y privados. Sin embargo en las instituciones académicas hay un requerimiento creciente por sistemas de código abierto y bajo costo que permiten poder hacer investigación básica y aplicada, para los cuales la oferta de opciones es muy reducida y de alto costo, razón por la cual los grupos de investigación se ven en la necesidad de hacer desarrollos tecnológicos que cumplan con estos requerimientos, permitiendo que las universidades puedan incursionar en estudios serios relacionadas a las áreas médicas y biomédicas. A

ese respecto, este trabajo presenta el diseño de una herramienta de procesamiento de señales fonocardiográficas que se compone de elementos estandares que pueden estar al alcance de los recursos de las universidades para su desarrollo, además se presenta una metodología para el filtrado de dichas señales mediante un estudio comparativo entre dos técnicas de filtrado, en donde se busca establecer un criterio de eficiencia para este tipo de señales complejas. El estudio de investigación se define como el comparativo de eficiencia de filtrado entre las técnicas de filtros digitales de tipo Chebyshev y Butterworth [2],[3], en donde se define el criterio de la raíz cuadrática media (RMS por sus siglas en inglés) del error entre la señal de bajo ruido y la señal filtrada, utilizando filtros pasa bajas y de rechazo de banda. Las señales que se utilizarán para filtrado provienen de una condición de corazón acelerado, obtenidas de una persona después de un esfuerzo físico realizado, se eligió este tipo de señal puesto que tiene mayor energía que la señal del corazón en condiciones normales y resulta más sencillo poderla medir con un sensor piezoelectrico convencional de bajo costo. Este trabajo va orientado al desarrollo de tecnología nacional en el área de la biomedicina, pues en la primera etapa de desarrollo de un estetoscopio digital de bajo costo, de arquitectura y código abiertos cuyo propósito principal es la investigación dentro de las universidades. Las señales fueron grabadas a través de la tarjeta de sonido de la computadora a una frecuencia de muestreo de 44100 muestras por segundo y ocho bits de resolución, utilizando el software adobe audition a través de la entrada de audio estándar de la computadora, con el sensor que se muestra en la figura 1.

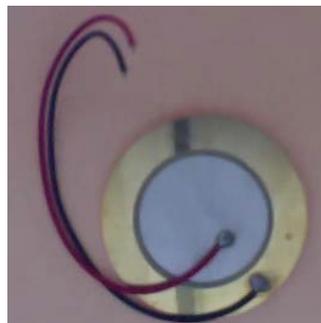


Figura 1 Sensor piezo eléctrico estándar.

Los filtros pasabajas se calculan para permitir el paso de las señales por debajo de los 120 Hz que corresponden a la frecuencia de un corazón acelerado, que es cercano al doble de un corazón en condiciones saludables normales de una persona de compleción normal y edad adulta [4]. Estudios previos relacionados reportan la implementación de técnicas de filtrado similares a las propuestas en este artículo, pero aplicada al electrocardiograma (ECG) [5] con muy buenos resultados, mientras que nosotros proponemos un estudio para el fonocardiograma (PCG por sus siglas en inglés). El estudio realizado cuenta con la asesoría de especialistas en el ramo de la cardiología que laboran dentro del sistema de hospitales ISSSTE de nuestro país dando la validación a nuestros resultados.

2. Métodos

La metodología aplicada para estas pruebas consiste en la medición de señales del corazón utilizando un sensor piezoeléctrico como el mostrado en la figura 1, para posteriormente realizar el procesamiento de las señales. Para llevar a cabo el filtrado de las señales PCG se hace uso de los filtros digitales, los cuales son sistemas discretos que cumplen con las condiciones para resolver el problema convencional de filtrado de ruido [6], [2], la clasificación más importante de estos sistemas los divide en dos grandes grupos: los filtros FIR (Finite Impulse Response) e IIR (Infinite Impulse Response). Específicamente los filtros más importantes de tipo IIR están descritos por una ecuación a diferencia de la siguiente estructura, ecuación 1.

$$y(n) = b_0x(n) + b_1x(n-1) + \dots + b_Mx(n-M) - a_1y(n-1) - a_2y(n-2) - \dots - a_Ny(n-N), \quad (1)$$

Donde $x(n)$ es la entrada, $y(n)$ es la salida del filtro, $\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ y $\{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ son los coeficientes del filtro. Partiendo de la ecuación 1 es posible obtener la función del sistema en el dominio z mediante la transformada, obteniéndose ecuación 2.

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_Mz^{-M}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_Nz^{-N}} \quad (2)$$

Donde N es el orden del filtro.

En la figura 2 se muestra una representación de diagrama de bloques de la estructura.

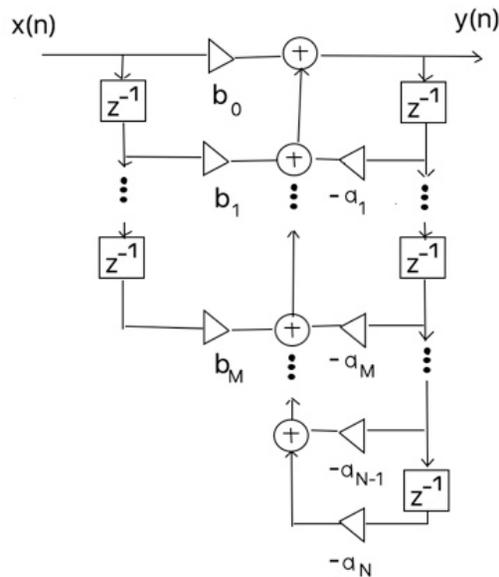


Figura 2 Diagrama del filtro en la forma directa.

A continuación, se aplicaron filtros de tipo Butterworth y Chebyshev como los que se describen en las siguientes subsecciones:

- *Filtro Butterworth y Chebyshev.* Un filtro pasabajas Buterworth es un filtro formado únicamente de polos [3], cuya magnitud al cuadrado viene dada por ecuación 3. Donde ω_c es la frecuencia de corte.

$$|H_a(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + (j\Omega/j\Omega_c)^{2N}} \quad (3)$$

- *Filtro Chebyshev.* Los filtros Chebyshev están definidos en términos de los polinomios de Chebyshev [3], ecuaciones 4.

$$T_N(x) = \begin{cases} \cos(N\cos^{-1}x) & |x| \leq 1 \\ \cosh(N\cosh^{-1}x) & |x| > 1 \end{cases} \quad (4)$$

Estos polinomios pueden generarse de manera recursiva con ecuación 5, con $T_0(x)=1$ y $T_1(x)=x$.

$$T_{k+1}(x) = 2xT_k(x) - T_{k-1}(x) \quad k \geq 1 \quad (5)$$

3. Resultados

Las mediciones fueron realizadas en laboratorio obteniéndose vectores de 4.5 segundos de duración con un tamaño de 197632 muestras con la especificación de mencionada en la introducción. La figura 3 muestra la señal obtenida con ruido agregado.

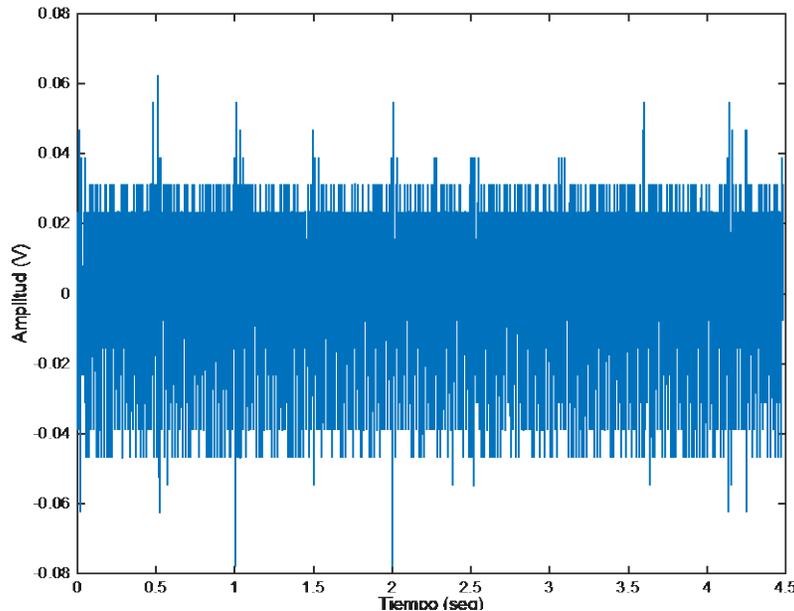


Figura 3 Señal medida con un sensor piezoeléctrico.

A continuación, se realizó un pre-filtrado, pues de acuerdo a las recomendaciones de los ingenieros de audio, es necesario remover las componentes de la señal de la línea de suministro de energía y sus primeros ocho armónicos [7]. Para la realización de este proceso se utilizó la herramienta “sptool” de Matlab, en donde se diseñaron ocho filtros de rechazo de banda para las frecuencias 60, 120, 240, 300, 360, 420 y 480 Hz.

Posteriormente se ejecutó un filtrado pasa-bajas de tipo Butterworth digital de estructura IIR utilizando la herramienta “sptool” para una frecuencia paso de 1 Hz y una frecuencia de rechazo de 3 Hz que corresponde a la cantidad de latidos de un corazón en condiciones esfuerzo físico. A partir de estas pruebas se obtiene la señal que se muestra en la figura 4, en donde es más fácil identificar los pulsos del corazón.

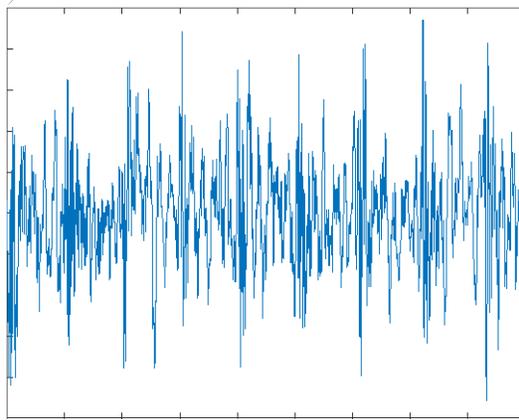


Figura 4 Señal obtenida con el filtro Butterworth.

Cuyos parámetros en formato de matriz SOS y G son:

SOSMatrix: [1 1 0 1 - 0.999709367823036 0]

GValues: [0.000145316088482204; 1]

De igual manera se realizó el filtrado mediante un filtro pasa bajas tipo Chebyshev de parámetros similares obteniéndose la gráfica de la figura 5.

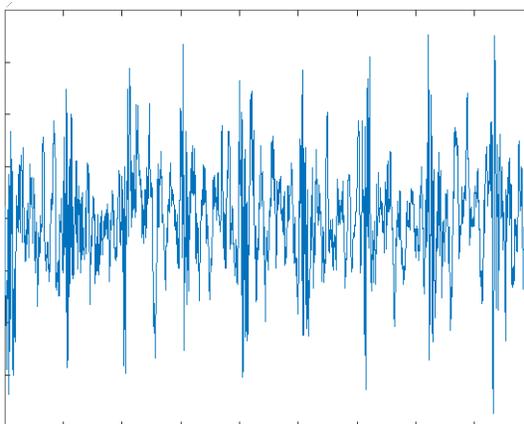


Figura 5 Señal obtenida con el filtro Chebyshev.

Cuyos parámetros en formato de matriz SOS y G son:

SOSMatrix: [1 1 0 1 - 0.999720041830378 0]

GValues: [0.000113997908481104; 1]

Las señales son de diferente índice de magnitud y con similitudes, así que para establecer un criterio de eficiencia se compararon con una señal patrón de la figura 6, obtenida por técnicas de filtrado adaptable.

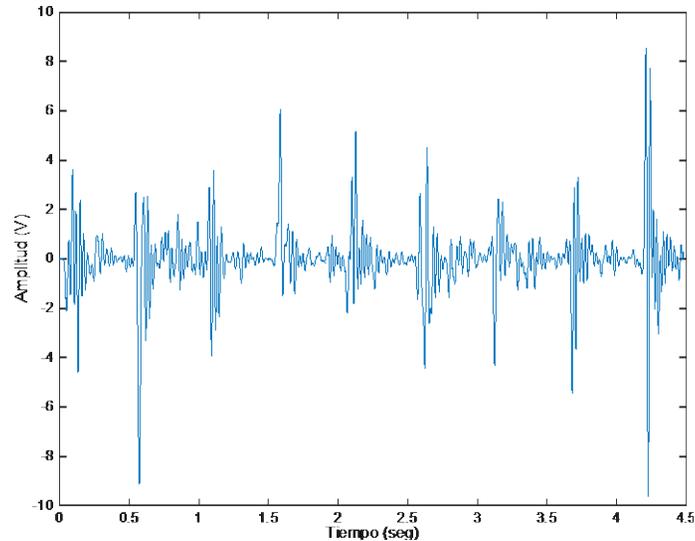


Figura 6 Señal patrón obtenida por técnicas de filtrado adaptable.

Finalmente se decidió amplificar las señales filtradas por un factor de 1000, para poder ver un efecto significativo en el comportamiento del error, puesto que la señal patrón es de índice de magnitud de nivel de los volts, pero también para poder escuchar la señal con el sistema de sonido de la computadora. Así, mediante el valor del error cuadrático medio se obtuvieron los siguientes resultados:

- Error de la señal del filtro Butterworth = 1.324333358450467
- Error de la señal del filtro Chebyshev = 1.311888395576601

De estos resultados se establece que el filtro Chebyshev tiene mejores condiciones para su aplicación en el filtrado de sonidos del corazón, además, los sonidos obtenidos después del filtrado fueron validados por personal médico especialistas en cardiología, dándole un valor a la metodología como herramienta

complementaria para el personal médico en el caso de la identificación de arritmias, como la taquicardia o la bradicardia.

4. Discusión

En este artículo se muestra el estudio comparativo de eficiencia de filtrado de dos tipos de filtros digitales tipo Butterworth y Chebyshev. Se ha aplicado un criterio definido como el error cuadrático medio. Se ha desarrollado una herramienta que complementa a las ya existentes en la práctica médica, la cual ha sido validada por personal médico especialista. Se ha establecido que el filtro Chebyshev es el que logra una mejor eficiencia de filtrado para el caso de las señales PCG. Se ha validado el procedimiento de la eliminación de la señal de 60 Hz de la línea de suministro de energía, así como de las primeras ocho armónicas de la misma para poder llevar a cabo el filtrado de frecuencias altas sin que se afecten las componentes importantes de la señal de PCG.

Los autores agradecen a la Tecnológico Nacional de México por el apoyo económico otorgado en la convocatoria 2016 de “Apoyo a la Investigación Científica, Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2016 en los Programas Educativos de los Institutos Tecnológicos y Centros”, para la realización de este proyecto y al Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán por las facilidades otorgadas.

5. Bibliografía y referencias

- [1] Abbas A. (2009), Phonocardiography signal processing, Connecticut, Morgan & Claypool, Pag. 4-5.
- [2] Madisetti V. (1999), Digital Signal Processing Handbook, USA, McGraw Hill, Pag 228-237
- [3] Hayes M. (1999), Schaum's Digital Signal Processing, USA, McGraw Hill, Pag 367-371
- [4] Fuller J. (2010), Instrumentación quirúrgica, principios y práctica, Madrid, Ed. Medica Panamericana, Pag. 924-927

- [5] Merit R. "Analysis of different types of IIR and FIR Filters in ECG signal using various transforms for different orders and time consumption" *International research journal of engineering and technology (IRJET)*, India, 2017, Pag. 1643-1659.
- [6] Chen W. (2003) *The circuits and filters handbook*, USA, CRC Press, Pag. 2650-2651
- [7] Ballou G. (2008), *Handbook for sound engineers*, USA, Elsevier, Pag. 296-297.