

DE RIZADOS EN LA DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA CALCULADA EN UNA SEÑAL DE RITMO CARDIACO

González Javier¹, Forero Edwin², Jiménez Fabián³, Marino Iván⁴

Resumen. El análisis de la variabilidad de la frecuencia cardiaca está basado en el estudio de los cambios de cada ciclo cardiaco. Estos cambios son estudiados a partir de la señal de ritmo cardiaco compuesta por los tiempos entre cada onda de la señal electrocardiográfica. El análisis de la señal de ritmo cardiaco es realizado en dos métodos: cálculos estadísticos (dominio del tiempo) y estimación de la densidad espectral de potencia (dominio de la frecuencia). La estimación de la densidad espectral de potencia (PSD) de una señal de ritmo cardiaco requiere métodos orientados para señales con muestreo irregular. Para este caso se ha implementado la estrategia de Lomb. El objetivo de este artículo es la implementación del método de promediado de espectros para atenuar los rizados que aparecen en el cálculo de la PSD. El procedimiento final se basa en la aplicación de la misma técnica de tomar señales de ritmo cardíacos adquiridos de ritmo sinusal normal del repositorio "Physionet". Los resultados obtenidos de estos experimentos mostraron una disminución de la ondulación en el PSD y la variación de los parámetros en el dominio de la frecuencia.

Palabras Claves: Densidad espectral de potencia, tiempo RR, muestreo irregular.

Abstract. The analysis of heart rate variability is based on the study of changes detected in each cardiac cycle. These changes have been studied from the cardiac rhythm signal and it is composed of data acquired from the time measured between the R waves of electrocardiographic signal. The cardiac rhythm signal analysis is based on two kinds of methods: statistical calculation (time domain) and the power spectrum density estimation (frequency domain). Power spectrum density (PSD) estimation from cardiac rhythm signal, can be done through math methods for signals with non-regular sampling time. For this case, in the literature has been registered the use of Lomb method. The main goal of this paper is the presentation of results obtained from the implementation of a technical based on spectrum averaging oriented to ripple decrease of the PSD estimation in cardiac signal rhythm. The final procedure is based on the application of the same technique taking cardiac rhythm signals acquired from normal sinus rhythm database "Physionet". The results obtained from these experiments showed a decrease of ripple in the PSD and variation of parameters in the frequency domain.

Keywords: Power Spectral Density, RR time, non-regular sampling.

Recibido: Agosto 2013

Aceptado: Septiembre 2013

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la variabilidad de la Frecuencia cardiaca (VFC) está basado en el estudio de las fluctuaciones de la frecuencia cardiaca instantánea. Estos cambios son calculados a través de la detección de la onda R del electrocardiograma (ECG) y de la cuantificación del valor del tiempo entre cada onda. Los valores de tiempo son almacenados en un arreglo denominado la señal de ritmo cardiaco y a la vez se presentan con muestreo irregular [1]. Para el análisis de la VFC, se toman los valores de la señal de ritmo cardiaco para la realización de cálculos estadísticos (análisis en el

dominio del tiempo) y para la medición de indicadores sobre el espectro de esta señal (análisis en el dominio de la frecuencia) [2]. Para el cálculo de los indicadores del espectro de la señal de ritmo cardiaco se utilizan técnicas tradicionales basadas en la interpolación lineal y remuestreo de la señal de ritmo cardiaco con la finalidad de calcular la densidad espectral de potencia (PSD) a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

El método basado en la FFT, puede causar un efecto pasa bajos en la PSD de la señal de ritmo cardiaco [5]. Para evitar el efecto pasa bajos, se ha optado por estrategias no convencionales para la estimación de la (PSD), aplicadas a datos irregularmente muestreados. Siendo la técnica de Lomb, utilizada por sus beneficios para estimar la PSD a partir de las muestras obtenidas a tiempos irregulares sin la necesidad de un remuestreo e interpolación. El método de Lomb [3] toma un arreglo de datos $x_n(t_n)$ el cual contiene las muestras adquiridas para cada tiempo t_n y procede calcular la densidad espectral de potencia para cada valor de frecuencia f como se observa en (1).

¹ González B. Javier E. Ing., Facultad de Ingeniería Electrónica. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C. Colombia. (e_mail: javier.gonzalez@ieee.org).

² Forero Edwin F. Ing., Facultad de Ingeniería Electrónica. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C. Colombia. (e_mail: fedwinforero@usantotomas.edu.co).

³ Jiménez Fabián R. Ing., Facultad de Ingeniería Electrónica. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C. Colombia. (e_mail: fabianjimenez@usantotomas.edu.co).

⁴ Marino M. Iván, Ing., Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C. Colombia. (e_mail: marinobolivar@yahoo.com.co).

$$P(f) = \frac{1}{2\delta^2} \left[\frac{\left(\sum_{n=1}^N (x_n(t_n) - \bar{x}) \cdot \cos(2\pi f((t_n) - \tau)) \right)^2}{\sum_{n=1}^N \cos^2(2\pi f((t_n) - \tau))} + \frac{\left(\sum_{n=1}^N (x_n(t_n) - \bar{x}) \cdot \sin(2\pi f((t_n) - \tau)) \right)^2}{\sum_{n=1}^N \sin^2(2\pi f((t_n) - \tau))} \right] \quad (1)$$

En la ecuación 2, δ^2 corresponde a la a la varianza de los datos $x_n(t_n)$ y el cálculo de la variable τ se realiza a través de la expresión (2).

$$\tan(4\pi\tau) = \frac{\sum_{n=1}^N \sin(4\pi t_n)}{\sum_{n=1}^N \cos(4\pi t_n)} \quad (2)$$

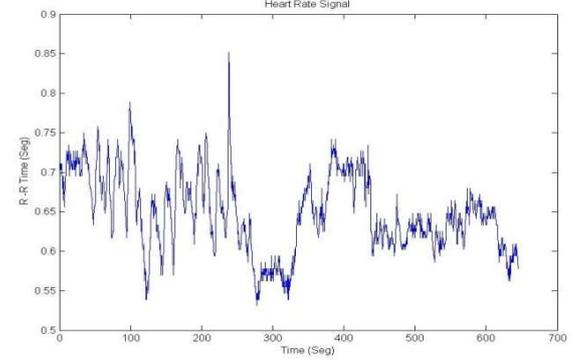
El método de Lomb ha tenido gran utilidad en aplicaciones del procesado de la señal de ritmo cardíaco, la cual presenta un escenario de datos (tiempo de duración entre latido y latido) que se presentan de forma irregular en el tiempo [5,6], también se ha aplicado en el estudio de componentes de audio[7], análisis de señales de múltiples canales [8], análisis de componentes armónicas de sistemas de potencia eléctrica [9], estudios de grabaciones con componentes superpuestas [10], análisis de adquisiciones no regulares de sistemas laser [11] y análisis de la frecuencia respiratoria [12].

En el cálculo de la PSD, es común la presencia de componentes de rizados que puede distorsionar el espectro de los datos bajo estudio. Por lo cual, el objetivo de este artículo es ilustrar los resultados obtenidos al aplicar el promediado de espectros de señales de ritmo cardíaco para la disminución de rizados y obtener un suavizado de la PSD estimada. La aplicación de la técnica de Lomb a través del promediado de espectros ha presentado un excelente resultado sin causar un efecto pasa bajos en la PSD comparado con la técnica basada en la interpolación lineal y el remuestreo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

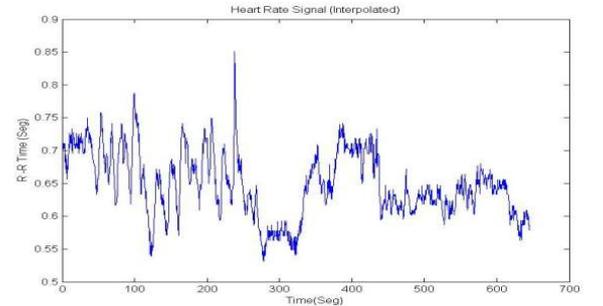
En el estudio en el dominio de la frecuencia de una señal de ritmo cardíaco, también se cuenta con el escenario de una serie de tiempo con muestreo irregular. En la figura 1 se puede apreciar una señal de ritmo cardíaco adquirida de la base de datos señales electro fisiológicas de personas con ritmo sinusal normal del repositorio Physionet.

FIGURA 1
De rizados en la densidad espectral de potencia calculada en una señal de ritmo cardíaco
Señal de ritmo cardíaco tomada de la base de datos Physionet



Como se pudo apreciar en la figura 1, los datos contenidos en la señal de ritmo cardíaco presentan un muestreo irregular. Tradicionalmente, para estimar la PSD y poder hacer un análisis en el dominio de la frecuencia, se procede a realizar un proceso de interpolación lineal y remuestreo.

FIGURA 2
De rizados en la densidad espectral de potencia calculada en una señal de ritmo cardíaco
Resultado obtenido después de interpolar y remuestrear la señal de ritmo cardíaco

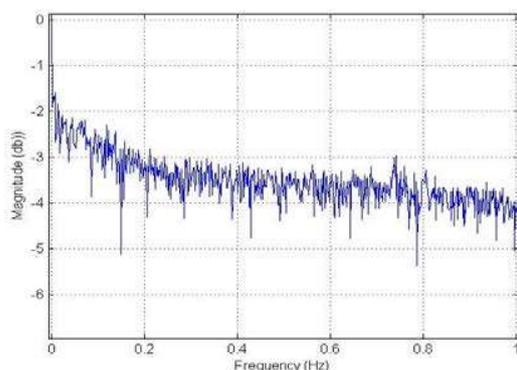


La figura 2 permite observar la señal de ritmo cardíaco después de un proceso de interpolación lineal y remuestreo. El periodo de muestreo se escogió tomando la mitad del menor tiempo de separación que presentó la señal de ritmo cardíaco.

FIGURA 3

De rizados en la densidad espectral de potencia calculada en una señal de ritmo cardíaco

Cálculo de la PSD a través del cálculo de la FFT



La figura 3 contiene el resultado de estimar la PSD a través de la Transformada Rápida de Fourier. Se puede observar que a partir del valor de frecuencia equivalente 0.3 Hz, se experimenta una atenuación de -3db, a partir de la componente de 0.4 Hz la atenuación se incrementa a -3.5db y en la componente de 0.8 Hz la atenuación ya tiene un valor de 6-db, como consecuencia del proceso de interpolación lineal y remuestreo. La figura 3 también permite observar la cantidad de rizados presente en la PSD. El efecto pasa bajo y los rizados pueden alterar los índices estadísticos calculados para el estudio en el dominio de la frecuencia de la V.F.C.

A partir de la señal con frecuencia de muestreo fija, se puede generar una estrategia basada en el periodograma de Welch para la estimación de la PSD a partir de promedios de espectros de l segmentos de la señal con tamaño L . La PSD para cada segmento se puede calcular a través de la ecuación 3.

$$XF_l = \left| \sum_{k=0}^{L-1} x_l(n) e^{j\frac{2\pi nk}{L}} \right|^2 \quad (3)$$

Donde la variable l es un número entero que cumple la condición: $0 < l < L$. La PSD promedio se calcula tomando cada resultado XF_l como se puede ver en la ecuación 4.

$$P_A = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} XF_l \quad (4)$$

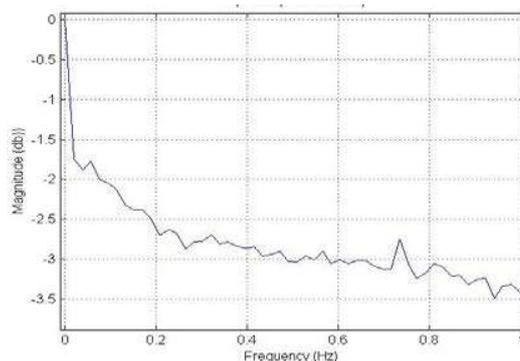
La figura 4 permite observar el resultado de estimar la PSD a través del promediado de espectros. En este caso se ha segmentado la señal de ritmo cardíaco para el cálculo de la PSD a través del

promedio de los espectros de cada segmento. El resultado contenido en la figura 4 indica que el promediado de espectros ha disminuido el contenido de rizados, pero mantiene el efecto pasa bajos en la PSD.

FIGURA 4

De rizados en la densidad espectral de potencia calculada en una señal de ritmo cardíaco

Cálculo de la PSD a través del promedio de espectros usando la FFT



3. RESULTADOS

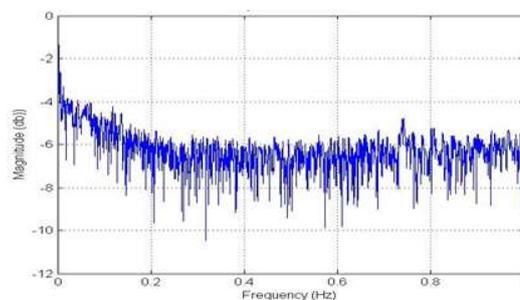
El principal objetivo de este trabajo es poder comprobar los beneficios de la técnica de Lomb para el cálculo de la PSD de la señal de ritmo cardíaco y la atenuación de los rizados.

Al tomar los datos de señal de ritmo cardíaco (Figura 1), sin aplicar procesos de interpolación lineal y remuestreo, es posible calcular la PSD a través de la técnica de Lomb. La figura 5 ilustra el resultado obtenido.

FIGURA 5

De rizados en la densidad espectral de potencia calculada en una señal de ritmo cardíaco

PSD estimada a través del método de Lomb de los datos contenidos en la señal de ritmo cardíaco adquirida de la base de datos Physionet



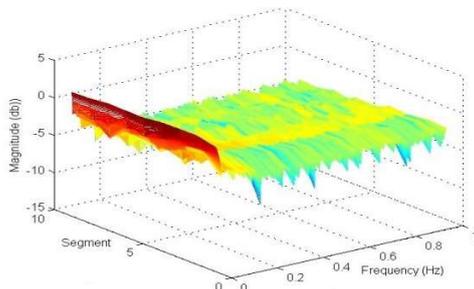
La figura 5 permite observar el resultado del cálculo de la PSD a través de la técnica de Lomb, con gran cantidad de rizados. A partir de la componente de

0.2 Hz existe un efecto pasa bajos que se mantiene constante a diferencia del resultado obtenido con la técnica basada en la FFT. Con la finalidad de poder obtener una atenuación de los rizados, se ha procedido a segmentar la señal de ritmo cardíaco. A cada segmento se ha calculado su respectiva PSD usando la técnica de Lomb. El resultado obtenido se puede apreciar en la figura 6.

FIGURA 6

De rizados en la densidad espectral de potencia calculada en una señal de ritmo cardíaco

Cálculo de PSD de cada segmento de la señal de ritmo cardíaco

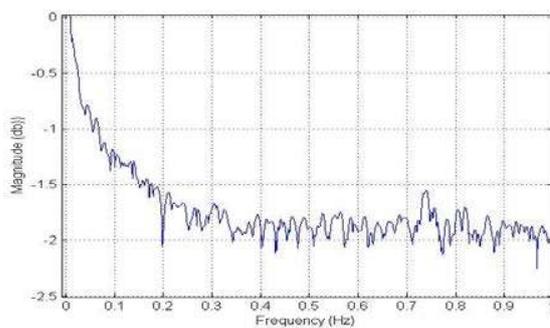


La figura 6 ilustra un efecto pasa bajos constante a partir de 0.2 Hz. También se puede apreciar los rizados de la PSD de cada segmento.

FIGURA 7

De rizados en la densidad espectral de potencia calculada en una señal de ritmo cardíaco

Resultado obtenido después del proceso de promediado de espectros calculados a través de la técnica de Lomb para estimación de PSD

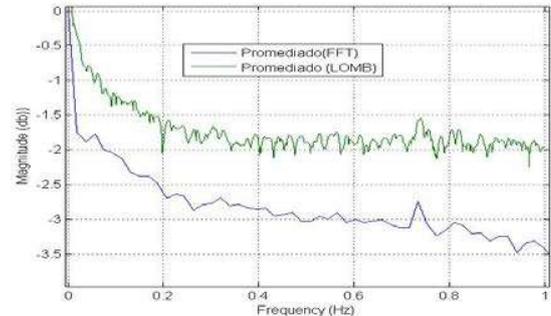


El resultado final del proceso se puede evidenciar en la figura 7. En el cual se puede observar el efecto de suavizado en la PSD calculada a través del promediado de espectros.

FIGURA 8

De rizados en la densidad espectral de potencia calculada en una señal de ritmo cardíaco

Comparación de resultados obtenidos por ambos métodos: FFT y Lomb



La comparación de los resultados obtenidos con ambos procesos de estimación de la PSD a través de promediados de espectros: Lomb y FFT, se pueden observar en la figura 8. Los resultados obtenidos de la comparación entre ambos métodos permiten ver la ventaja que ofrece el uso de la técnica de Lomb en el proceso de atenuación de rizados en la estimación de la PSD.

4. CONCLUSIONES

El análisis en el dominio de la frecuencia de la señal de ritmo cardíaco exige el uso de técnicas orientadas a la estimación de la Densidad Espectral de Potencia para datos irregularmente muestreados. La técnica de Lomb permite calcular la PSD, tomando los datos de la señal de ritmo cardíaco sin importar el tiempo de ocurrencia de cada uno. Al estimar la PSD por medio de la técnica de Lomb, se puede evidenciar la presencia de rizados en el espectro calculado.

En este artículo se ha elaborado con señales de ritmo cardíaco y se ha evidenciado que el promediado de espectros calculados a partir del método de Lomb puede aportar en el suavizado de la densidad espectral de potencia.

El suavizado del espectro, permite facilitar el análisis en el dominio de la frecuencia de la señal de ritmo cardíaco y permite tener una mejor caracterización de la variabilidad de la frecuencia cardíaca.

5. AGRADECIMIENTO

Los resultados obtenidos en este trabajo fueron logrados dentro de los objetivos del proyecto, financiado por la convocatoria interna de proyectos de grupos de investigación, realizada por la unidad de investigación y postgrados de la Universidad Santo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ELECTRÓNICAS

- [1]. **NIMUNKAR, A.J.; TOMPKINS, W.J.** (2007). "*R-peak Detection and Signal Averaging for Simulated Stress ECG using EMD*". Engineering in Medicine and Biology Society. EMBS. 29th Annual International Conference of the IEEE, vol., no., pp.1261-1264, 22-26 Aug.
- [2]. **MALIK M.** (2010). "*Clinical Guide to Cardiac Autonomic Tests*". Kluwer Academic Publisher. Netherland. Pag 149.
- [3]. **LOMB N. R.** (1976). "*Least-squares frequency analysis of unequally spaced data*" Astrophysics and Space Science, vol. 39, no. 2, pp. 447-462.
- [4]. **PRESS W.** (2007). "*Numerical Recipes*" 3r Edition. Hong Kong, China: Cambridge University Press. Pp685.
- [5]. **LAGUNA P., G. B. MOODY AND R.G. MARK** (1998). "*Power Spectra Density of Unevenly Sampled Data by Least-Square Analysis: Performance and Application to Heart Rate Signals*". IEEE Trans. On Biomedical Engineering Vol. 45, No. 6. June. pp. 698-715.
- [6]. **SHAO-YEN TSENG; WAI-CHI FANG,** (2010). "*An effective heart rate variability processor design based on time-frequency analysis algorithm using windowed Lomb periodogram*" Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), IEEE , vol., no., pp.82-85, 3-5 Nov.
- [7]. **ZHIGUO ZHANG; SHING-CHOW CHAN.** (2005). "*Robust adaptive Lomb periodogram for time-frequency analysis of signals with sinusoidal and transient components*" Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings. (ICASSP '05). IEEE International Conference on, vol.4, no., pp. iv/493- iv/496 Vol. 4, 18-23.
- [8]. **ZHANG, Z.G.; CAI, X.L.; CHAN, S.C.; HU, Y.; HU, L.; CHANG, C.Q.** (2009). "*Time-frequency coherence analysis of multi-channel eventrelated potential using adaptive windowed Lomb periodogram*" Neural Engineering. NER '09. 4th International IEEE/EMBS Conference on, vol., no., pp.657-660, April 29 2009-May 2 2009.
- [9]. **ZHANG, Z.G.; CHAN, S.C.** (2010). "Harmonic analysis of power system signals using a new regularized adaptive windowed Lomb periodogram," Green Circuits and Systems (ICGCS), 2010 International Conference on, vol., no., pp.567-572, 21-23 June.
- [10]. **THONG, T.; MCNAMES, J.; ABOY, M.** (2004). "*Lomb-Wechperiodogram for non-uniform sampling*" Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS '04. 26th Annual International Conference of the IEEE, vol.1, no., pp.271-274, 1-5 Sept.
- [11]. **HUI-BOMENG; YAN-LI GAO; ZHI-QIANG LIU; YAN-FANG YU; JIAN-HUA WU.** (2010). "*Analysis of Turbulent Characteristics of Unevenly Velocity Signals in KSM Used Empirical Mode Decomposition and Lomb Periodogram*" Information Engineering and Computer Science (ICIECS), 2010 2nd International Conference on, vol., no., pp.1-4, 25-26 Dec.
- [12]. **VASU, V.; FOX, N.; HENEGHAN, C.; SEZER, S.** (2010). "*Using the Lomb periodogram for non-contact estimation of respiration rates*" Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE, vol., no., pp.2407-2410, Aug. 31 2010-Sept. 4.