

Análisis y filtrado de señales ECG mediante descomposición empírica

Jorge O. Pérez¹, Hilda N. Ferrao¹ & Gustavo E. Juárez¹

(1) *Laboratorio Tecnológico Procesamiento Digital de Información, Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.*
lpdi@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta el procesamiento digital de señales de Electrocardiogramas (ECG), a nivel de filtrado digital de ruidos interferentes, mediante el método por descomposición en componentes empíricas (DCE). A partir de la propuesta base, se procedió a un análisis comparativo con el método de filtrado digital convencional, a fin de valorar las ventajas o desventajas de esta metodología, las mejoras observables se dan tanto en el aumento de la relación señal ruido luego del procesamiento, como en la calidad de forma de onda final lograda por el método DCE. En una segunda etapa se analiza el método de trabajo basado en el análisis de las componentes individuales de la señal ECG, por su correlación con la señal completa ECG a fin de eliminar componentes espurias disminuyendo el grado de carga computacional con un aumento de la velocidad final de procesamiento, orientada esto al trabajo en tiempo real. Los resultados obtenidos confirman la validez del método propuesto, particularmente para este tipo de señales ECG no estacionarias.

1 INTRODUCCION

1.1 Señales ECG y métodos de procesamiento

Las señales eléctricas ECG (Clifford, 2007), indican un modo de medida de la actividad eléctrica del corazón, requiriendo para su visualización y análisis de un procesamiento analógico compuesto por electrodos y amplificadores de instrumentación, como así también de un procesamiento digital si su actividad debe ser digitalizada en un sistema con microprocesador. Considerando en particular los sistemas de procesamiento digital de señales, en relación a las señales ECG, los procedimientos básicos incluyen el filtrado digital de ruido interferente, la determinación de parámetros de ondas características QRS (Clifford, 2007), y algunos algoritmos relacionados con la determinación de anomalías en el funcionamiento del corazón a partir del análisis de las ondas ECG. El filtrado digital temporal de la señal ECG, mediante un algoritmo de ecuaciones de diferencias, permite por ejemplo la limpieza de la señal frente al ruido interferente, el análisis en frecuencia mediante el uso de transformadas de Fourier (Kuck, 1998) indica las componentes formantes de la onda ECG y sus posibles desviaciones frente a una onda de referencia clásica. Los métodos transformados en frecuencia

parten del supuesto de la descomposición de la onda principal en componentes estacionarias, sin embargo por la naturaleza no lineal propia de los sistemas biológicos, tal como el origen de las señales ECG, estas ondas se presentan con un comportamiento claramente no estacionario, surgiendo entonces un error de procesamiento relacionado con la equiparación de sumas de componentes estacionarias para representar o formular una onda no estacionaria.

Como alternativa a este análisis en frecuencia, existe el método aquí utilizado de descomposición por la transformada de Hilbert-Huang (THH) (Huang, 2005), este procesamiento del tipo adaptivo, como se analiza más adelante, se acerca más a la naturaleza no estacionaria de las ondas ECG, y permite contar con un conjunto de ondas componentes denominadas funciones de modo intrínseco (IMF) (Huang, 2005), las cuales algorítmicamente requieren una carga computacional comparativa a los análisis de Fourier y Wavelets (Daubechies, 2006).

2 DESCOMPOSICIÓN Y ANALISIS POR THH

2.1 Descomposición IMF

Las señales ECG originadas en la actividad eléctrica del corazón, poseen una naturaleza

dinámica no estacionaria, la cual se debe en parte al proceso no lineal que las origina, y en parte por el medio de transmisión entre el músculo cardíaco y la ubicación de los electrodos. De este modo, como se mencionó anteriormente, la descomposición en componentes armónicas estacionarias resulta inexacta como representación de las ondas ECG. El enfoque de la transformada THH considera una solución al problema de descomposición de señales no estacionarias sin un juego o conjunto base de ondas generales de partida como en el caso de las wavelets, por el contrario el conjunto base de componentes soluciones parciales surge de la misma onda, por lo cual es un procesamiento adaptivo acorde al proceso no lineal que origina la señales ECG.

La transformada THH utiliza para la descomposición un set de ondas componentes originadas en del procesamiento de la señal ECG en estudio, estas funciones componentes reciben el nombre de modos oscilatorios y son intrínsecas a la señal original, de allí el nombre generalizado de IMF. Las características fundamentales de las IMF son dos:

- a) Tienen valor medio cero.
- b) Existe un único cero entre dos extremos locales, o el mismo número de extremos que cruce por ceros, o diferir en no más de uno localmente.

El método práctico para la aplicación de la THH se denomina Desplazamiento Intrínseco (DI), y algorítmicamente comprende lo siguiente:

- a) Encontrar todos los extremos locales en la señal ECG.
- b) Unir todos los máximos extremos locales por una línea cúbica, envolvente superior.
- c) Unir todos los mínimos extremos locales por una línea cúbica, envolvente inferior

De este modo el conjunto de datos originales $x(n)$ de la ECG digitalizada están contenidos entre ambas envolventes, si se denomina m_1 al valor medio entre envolventes, la primera IMF se obtiene de la expresión (1).

$$h_1 = x(n) - m_1 \quad (1)$$

La siguiente IMF se obtiene considerando a h_1 como un conjunto de datos a descomponer, y m_2 como el valor medio entre sus envolventes como se expresa en (2).

$$h_2 = h_1(n) - m_2 \quad (2)$$

En modo iterativo, se puede expresar por la expresión (3), con $h_o = x(n)$.

$$h_i = h_{i-1}(n) - m_i \quad i = 1, 2, 3, 4, N \quad (3)$$

Este proceso es realizado en la práctica en forma recursiva, obteniéndose un número de funciones IFM determinado por un criterio de finalización del algoritmo dado un valor mínimo de convergencia N_c prefijado empíricamente entre 0.2 y 0.3, dado por la expresión (4).

$$N_c = \frac{\sum_{n=0}^T |h_{c-1}(n) - h_c(n)|^2}{\sum_{n=0}^T h_{c-1}^2(n)} \quad (4)$$

2.2 Análisis de las componentes IMF

El conjunto de funciones IMF componentes de la señal ECG original, registradas en el apartado anterior, pueden ser analizadas en una escala de tiempo y frecuencia consideradas como instantáneas preservando la longitud de datos e información de la señal ECG en cada instante de análisis. La recomposición de las múltiples IMF permite inversamente reconstruir la señal original ECG en un proceso energéticamente conservativo. De este modo la información relevante puede ser discriminada por análisis de cada componente IMF en escala de frecuencia, incluyendo la presencia de ruido y como este se distribuye a lo largo de la escala temporal.

2.3 Criterio de selección de IMF

El método de descomposición por componentes IMF puede ser utilizado considerando cada una y todas las componentes obtenidas. Sin embargo en la práctica no todas ellas son relevantes, el principal basamento de este análisis esta dado en la cuadratura de las componentes IMF respecto a la señal original, y por lo cual una medida de su importancia o peso en la reconstrucción de la señal está dado por el grado de correlación existente con la señal ECG, como criterio de selección de IMF con un nivel mínimo de correlación predeterminado.

Otro basamento de interés resulta del análisis de las componentes IMF en su nivel de ruido y rango de frecuencias de ocurrencias, esto permite algorítmicamente eliminar aquellas IMF con poca información pero alto nivel de ruido. El efecto de calidad de onda sobre la señal reconstruida debe ser evaluado a fin de determinar la pertenencia de su eliminación o no.

3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo se basó en la obtención de señales ECG en tiempo real mediante un sistema con amplificadores de instrumentación y entorno FPGA, al igual que señales previamente obtenidas de otros ensayos basados en microcontroladores y banco de señales. Todas estas señales poseen distintos niveles de contaminación de ruido, parte originada en la red eléctrica (inducción electromagnética) y parte debido a ruidos de altas frecuencias originadas en los sistemas digitales conmutados. Este conjunto de señales bases fueron utilizados en el entorno Matlab a fin de realizar una serie de ensayos planificados del siguiente modo.

- Análisis tiempo y frecuencia en la señal ECG adquirida, mediante FFT.
- Análisis de la señal ECG adquirida por descomposición DCE, y análisis de cada IMF por FFT.
- Filtrado digital de la señal ECG original y de las componentes IMF.
- Estudios Comparativos de ambos métodos, a nivel de relación señal ruido.

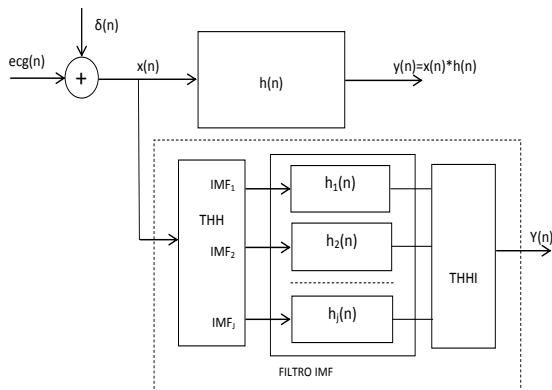


Figura 1. Comparativa de filtrado clásico e IMF.

4 ENSAYOS Y RESULTADOS

Los ensayos comparativos se realizaron en base a señales ECG considerando 1000 puntos de datos muestreados a $f_s = 1000$ Hz, con los niveles de ruido indicados en las gráficas presentadas y tablas adjuntas. A modo descriptivo se presentan algunos resultados obtenidos de los ensayos realizados. Las Fig. 2 y Fig. 3, muestran la señal ECG original, su análisis en frecuencia y nivel de ruido sin filtrado.

Las componentes IMF correspondientes hasta el orden 4 son presentadas en la Fig. 4.

El filtrado digital de la señal ECG mediante un filtro Butterworth de cuarto orden con frecuencia superior de corte en $f_c = 180$ Hz, origina una respuesta de la señal filtrada como la de la Fig. 5, si considerar el filtrado de la componente 50 Hz.

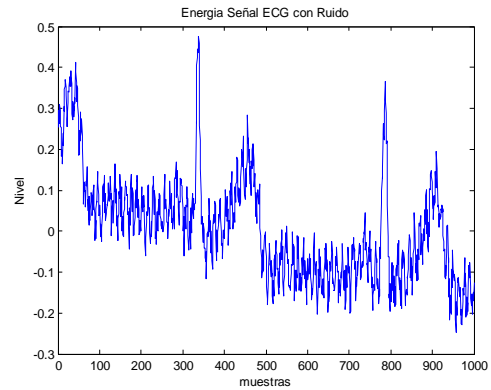


Figura 2. Señal ECG con SNR= 4.1 dB.

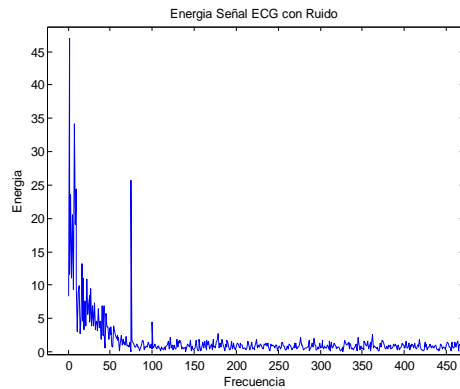


Figura 3. Espectro de la señal ECG, con SNR= 4.1 dB.

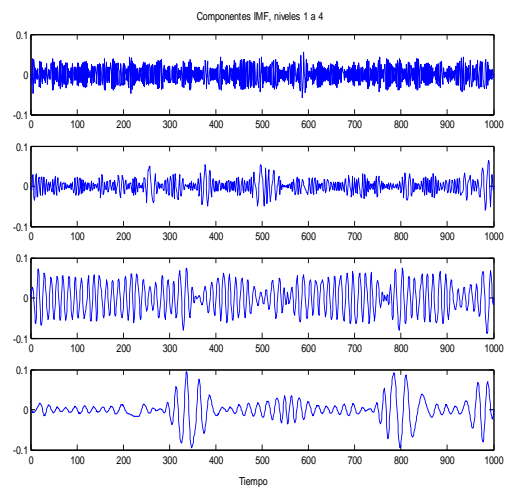


Figura 4. Descomposición de la señal ECG, con IMF de orden 4. SNR= 4.1 dB.

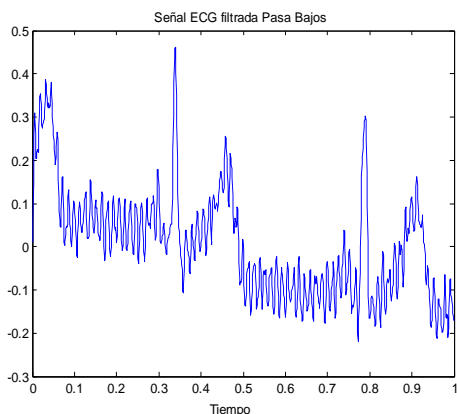


Figura 5. Señal ECG filtrada mediante pasa bajos $f_c=180$ Hz.

El análisis de las IMF comprende al estudio del nivel de ruido presente en cada instante, y del grado de correlación con respecto a la señal ECG original, la Tabla 1 resume los parámetros de estudio efectuados en dichas ondas, para niveles de correlación y AB de ruido.

Tabla 1. Valores de Análisis de las Componentes IMF

IMF	Correlación Media	AB Ruido
1	-0.0114	> 300 hZ
2	-0.12	< 210 hz
2	-0.15	< 140 hZ
4	-0.14	< 120 hZ

Del estudio precedente, y para largas series de IMF, es posible considerar un criterio de selección basado en la correlación y ruido presente. Por ejemplo la primera componente no posee una gran incidencia sobre la onda ECG final, y su nivel de ruido y ancho de banda indica que puede ser eliminada. Concretamente cada una de las componentes evaluadas algorítmicamente por parámetros como los de las Tabla 1, son filtradas en forma individual para obtener luego la onda ECG restaurada sólo con las componentes que poseen un nivel de aporte adecuado. La Figura 6, muestra el efecto sobre la onda ECG mediante el método propuesto para el caso de eliminación de las componentes IMF1 y filtrado Butterwoth en cada ancho de banda de interés, con una mejora en la relación SNR media del SNR= 6.3.

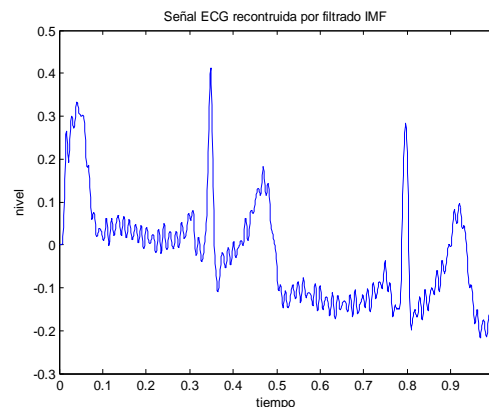


Figura 6. Señal ECG filtrada mediante pasa descomposición THH.

5 CONCLUSIONES

El método presentado se enmarca en el análisis de señales no estacionarias, el caso más frecuente de señales originadas en procesos naturales, presenta como ventaja principal su adaptación a la señal original a diferencias de otros métodos que utilizan juegos de funciones predefinidas. Los resultados comparativos indican la validez del método, y se continúa trabajando a fin de mejorar la respuesta algorítmica, por ejemplo mediante el uso de distintas funciones de interpolación para la obtención de las envolventes.

REFERENCIAS

- Gari D. Clifford, G.D., F. Azuaje & P. E. McSharry, *Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis*. ISBN-10: 1-58053-966-1. 12-25. 2007
- Kuck, R., *Introduction to Digital Signal Processing*. Roman. ISBN-10: 0071005439. 67-86. 1998.
- Huang, N. E., S. S. Shen, *Hilbert-Huang transform and its applications*. ISBN 981-256-376-8. 1-28. 2005.
- Daubechies, I., *Ten Lectures on Wavelets*. ISBN 0.89871-274-2. 1-25. 2006.