

PATRONES DE CORRELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE SEÑALES ELECTROCARDIOGRÁFICAS Y FONOCARDIOGRÁFICAS

Resumen

La investigación en el campo de las bioseñales se ha extendido en gran parte hacia el procesamiento digital de señales, que actualmente presenta potentes herramientas que permiten su desarrollo y evolución, es por esto que en las últimas décadas se han implementado diversas técnicas en el análisis de señales biomédicas que permiten realizar diagnósticos que antes no eran posibles.

En el siguiente artículo se muestra el análisis de tipo estadístico que se realizó a segmentos de señales que corresponden a ECG y PCG (SCG), con el fin de encontrar patrones comunes entre éstas y posteriormente realizar una caracterización. Todo esto para contribuir con un objetivo a gran escala que es la clasificación con métodos estadísticos e inteligencia artificial útil para el diagnóstico clínico de enfermedades cardíacas.

Palabras claves:

- Electrocardiograma (ECG)
- Fonocardiograma (PCG)
- Sincrocardiograma (SCG)
- C – C Ciclo cardíaco (comprende un complejo ECG y PCG simultáneos).

JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ S.*
JULIO CÉSAR GARCÍA*

El estudio se realizó con técnicas de auscultación cardíaca y técnicas de electrocardiografía.

1. Introducción

En el Instituto de Investigación Reynolds (Colombia), se quiso hacer un estudio del comportamiento y descripción del corazón de la ballena en forma no invasiva, debido a la imposibilidad de acceder a ella en condiciones normales.

Se llegó a la conclusión que tanto la señal ECG como la PCG aportan información valiosa acerca del funcionamiento y del comportamiento del sistema electroacústico del corazón, estableciendo así una serie de pausas que dan pie a la investigación de este órgano con entes vivientes de otro hábitat, tanto como lo es el hombre. Debido a esto surgió la idea de determinar ese comportamiento en el humano, con el objetivo de realizar una descripción cardíaca, que dé información detallada para un diagnóstico más riguroso y confiable.

* Grupo de Control y Procesamiento Digital de Señales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Junio 2004.

En la Universidad de los Andes se realizó una propuesta de diseño e implementación de un sistema para la adquisición de señales de ECG y PCG del humano como tal, desarrollada por J. García, 2000(3), y en el cual se deja campo abierto para el posterior análisis de las señales SCG.

2. Objetivo

Determinar herramientas y algoritmos que permitan identificar patrones de correlación que puedan existir entre las señales ECG y PCG en el tiempo y en la frecuencia.

3. Relaciones entre señales ECG y PCG (10)

Los diagramas de la actividad eléctrica y de la actividad mecánica tienen una relación significativa, proporcionando información sobre el estado de salud de la persona. La despolarización eléctrica conlleva a una contracción en la que están involucradas las válvulas y esto produce sonidos característicos según el momento. Sólo el ECG indica cual es la secuencia, intensidad y frecuencias con que aparecen los impulsos nerviosos que controlan las contracciones, permitiendo ver la presencia de algunas anomalías en el funcionamiento eléctrico del corazón. Por otro lado, el PCG indica si las válvulas están cumpliendo bien su función de cerrado y apertura. Al relacionarse la información entregada por los dos instrumentos, se tienen algunos parámetros de diagnóstico en humanos tales como:

- Relación S1-onda QRS. La componente M1 del PCG coincide con el descenso del intervalo RS del ECG.
- Relación S2-onda T. El sonido S2 del PCG

coincide con el final de la onda T del ECG, es decir cuando sucede la repolarización de aurículas y ventrículos.

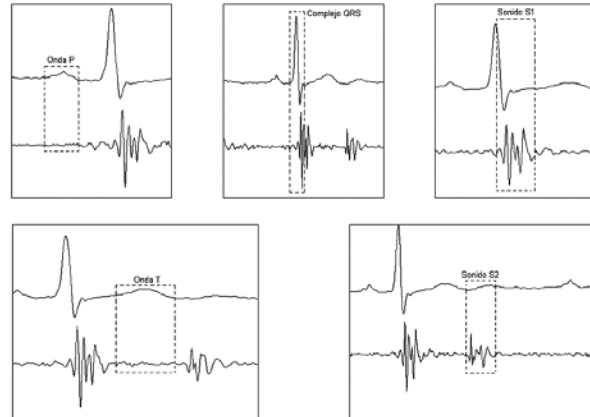


Figura 1. Parámetros de diagnóstico.

4. Banco de señales

Se analizaron los datos tomados a una muestra poblacional colombiana, específicamente, estudiantes universitarios de diferentes regiones de Colombia, con características de edad, peso y estatura similares.

Con un total de 40 personas:

13 mujeres y 27 hombres

Mujeres	Edad	Estatura	Peso
Máximo	24	1,69	64
Mínimo	17	1,5	46
Promedio	20,3	1,6	55,4

Hombres	Edad	Estatura	Peso
Máximo	28	1,87	89
Mínimo	17	1,6	50
Promedio	22,481	1,737	65,851

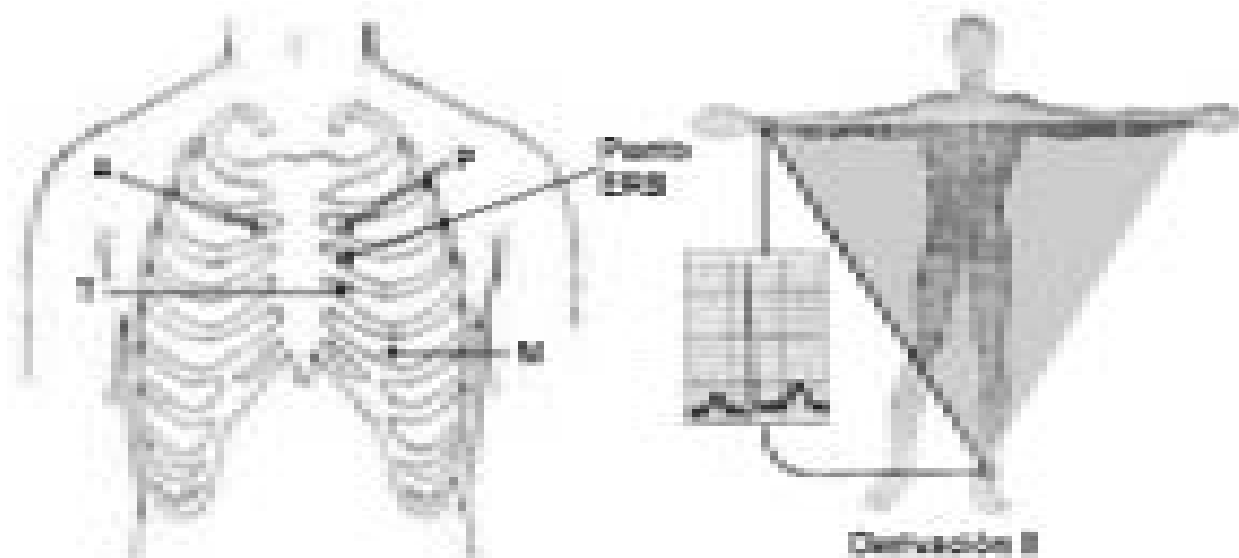


Figura 2. Zonas para registro SCG.

Se examinaron zonas específicas para el registro de cada señal:

Para ECG, se tomó la derivación II (2) que visualiza el comportamiento vectorial, por conducto de un electrodo explorador ubicado en la pierna izquierda y uno indiferente situada en el brazo derecho, siguiendo al eje mayor del corazón. Las fuerzas vectoriales, se acercarán o alejarán de la pierna izquierda.

Esta derivación es donde mejor se ven las ondas en el plano frontal, pues allí coinciden todos los ejes.

La P será muy positiva y grande, el QRS es el más positivo; a causa de las posibles variaciones del vector septal, pueden haber Q ó R inicial, y la existencia de onda S terminal dependerá de la edad del paciente, la onda T será muy positiva.

Para PCG, se seleccionó el punto de auscultación ERB (3), que se encuentra entre los puntos de auscultación Pulmonar o Tricúspideo, en donde se obtiene un registro adecuado a los dos sonidos característicos del corazón S1 y S2.

Para el registro de las señales SCG, se utilizó el conjunto de investigación de la compañía Biopac (1), que consta de un módulo de adquisición MP30, accesorios (conjunto de guía de electrodos desechables y estetoscopio) y un software para el registro de las señales, además del respectivo personal médico el cual realiza y supervisa los métodos para la toma de muestras.

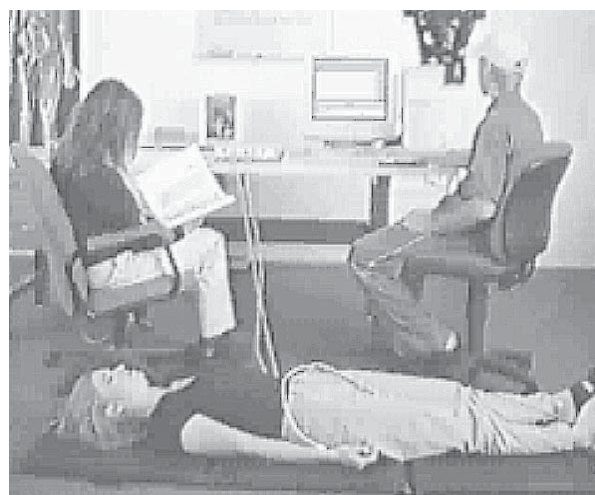


Figura 3. Postura ideal para la toma de datos

5. Tipo de análisis

La necesidad de identificar patrones entre las señales llevó a realizar un análisis por eventos, donde cada evento representa un instante en que se presenta un acontecimiento fisiológico del corazón de antagonismo eléctrico y acústico.

Este análisis por eventos representa una segmentación de la señal SCG de la siguiente manera, ECG: se segmentan las ondas P, QRS, T, siendo éstas los principales eventos eléctricos presentados en la despolarización y repolarización de aurículas y ventrículos. PCG: se segmentan S1 y S2, siendo estos los dos sonidos característicos de cierre y apertura de las válvulas del corazón al recibir estímulos eléctricos (2).

De los métodos de segmentación estudiados, se seleccionó el método de wavelets como el más adecuado por su eficacia, rapidez y versatilidad comparados con los de STFT, cadenas de Markov, inteligencia artificial, entre otros (4).

5.1 Segmentación ECG

Se utiliza una wavelet gaussiana de primer orden, y se implementa la transformada wavelet diádica a escalas 2, 4, 8, y 16m, de acuerdo a características de frecuencia que presentan los complejos del ECG, como se muestra en la tabla 1.

ECG	
ONDA	Frecuencia (Hz)
P	0,5 - 10
QRS	3 - 40
T	0,5 - 10

La escala 2, presenta cierta homogeneidad con la duración del complejo QRS, por lo tanto se utiliza este tipo de escala como fuente de segmentación para su detección mediante la localización de un módulo máximo generado por la transformada wavelet y posteriormente aplicando reglas de decisión, como se explica en (8).

Para la detección de las ondas P y T, se utiliza la escala 16, que genera módulos máximos similares a los de la escala 2 y que tienen simetría con las ondas P y T, por lo tanto la siguiente fase del algoritmo es detectar los módulos generados y aplicar reglas de decisión para establecer la ubicación de los complejos.

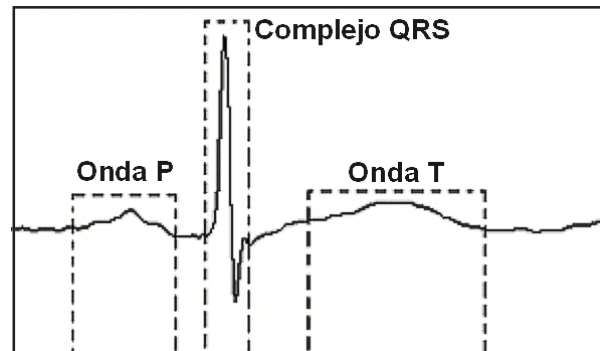


Figura 4. Segmentación ECG

5.2 Segmentación PCG

Se escoge el método de la envolvente de energía normalizada de Shannon, complementado con la descomposición y reconstrucción de wavelets, mediante la transformada wavelet discreta (algoritmo de Mallat), para obtener un mejor rendimiento del algoritmo, al disminuir la cantidad de ruido en la señal, debido a que por la sensibilidad del micrófono a la hora de la toma de datos, es muy difícil obtener un registro con una relación señal a ruido baja.

Se utilizó un banco de filtros Daubechies, de orden 6, y se trabajaron como fuentes de seg-

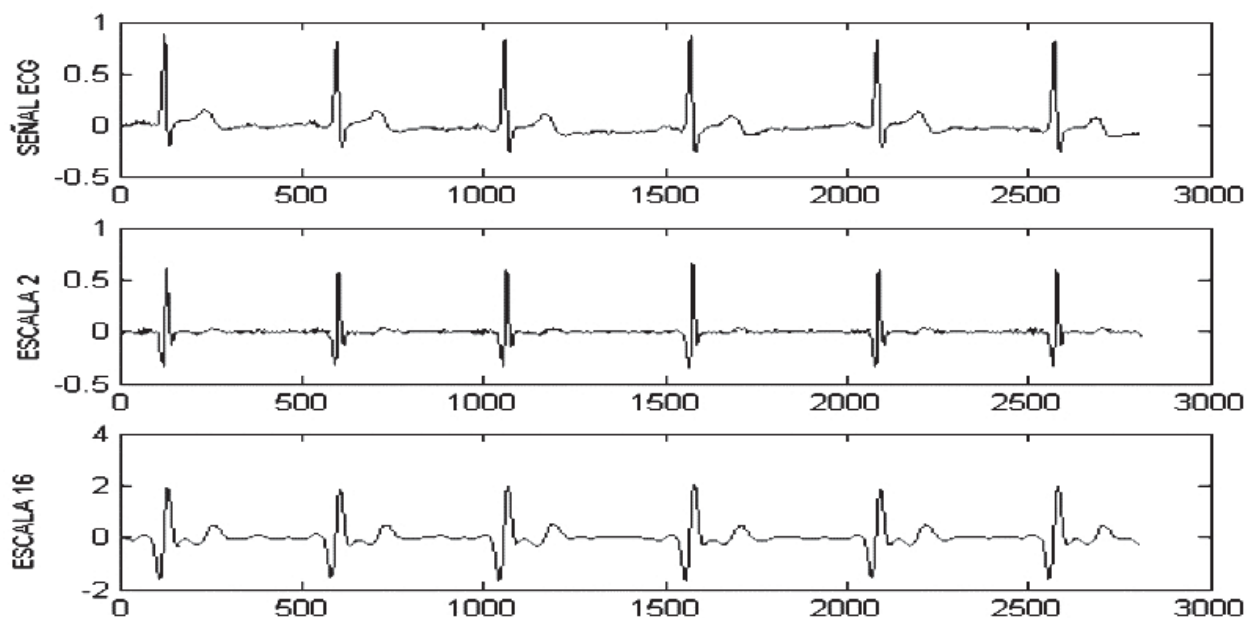


Figura 5. Extracción de coeficientes de la transformada Wavelet como fuentes de segmentación

mentación las aproximaciones 4, 5, y los detalles 4, 5.

Luego de tener las fuentes de segmentación se aplica el algoritmo de la envolvente de

la energía normalizada de Sahnnon como se describe en (8)

$$Es = -\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_{norm}^2(i) \cdot \log x_{norm}^2(i)$$

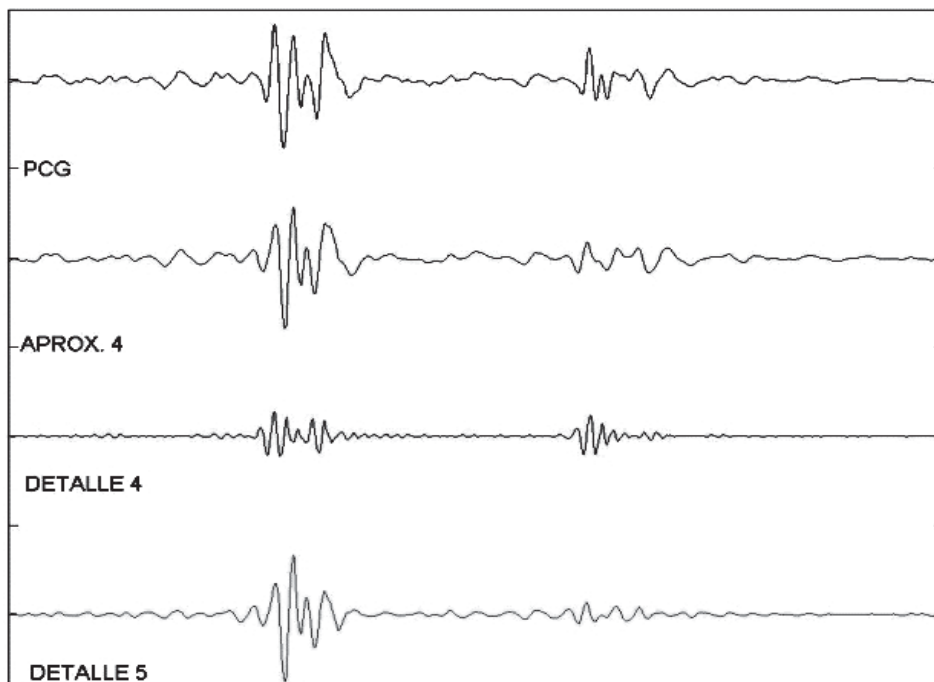


Figura 6. Fuentes de Segmentación PCG.

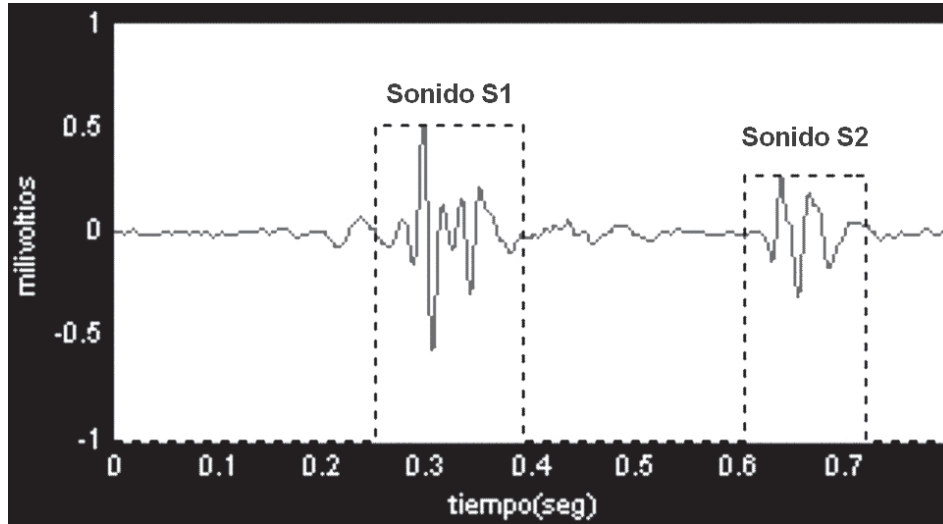


Figura 7. Segmentación PCG.

$$P_a(t) = \frac{E_s(t) - M(E_s(t))}{S(E_s(t))}$$

Obteniendo así 4 intervalos útiles para el diagnóstico de señales PCG, que son: Sonido S1, Sistólico, sonido S2, intervalo Diastólico.

6. Correlación

Para determinar una posible relación entre las señales ECG y PCG se emplea el coeficiente de cross-correlación ρ_{xy} es:

$$\rho_{xy} = \text{Cov}(XY) / \sqrt{\sigma_x \sigma_y}$$

Donde σ_x es la varianza del conjunto de muestras ECG y σ_y es la varianza del conjunto de muestras PCG. La varianza de una variable s con media m_s es:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (s - m_s)^2$$

Mientras la covarianza de x e y , se define como:

$$\text{Cov}(XY) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \mu_x)(y_j - \mu_y)$$

El análisis de magnitud del coeficiente de cross-correlación $|\rho_{xy}| \leq 1$ se realiza en orden a establecer las posibles relaciones existentes entre las señales que conforman el SCG. El análisis de correlación se hace por segmentos correspondientes, así: El complejo QRS del ECG con el respectivo QRS en el PCG. El S1 del PCG, con el respectivo S1 del ECG. A estos segmentos de SCG se les realiza una correlación cruzada a varias escalas, con ventanas que van desde 1 ms, hasta el tiempo que dure el complejo seleccionado a intervalos de 0.5 ms, estos vectores se los ordena de tal forma que se crea una matriz de correlación o lo que se ha denominado un «correlograma cruzado». En el cálculo de correlación se emplea el relleno de ceros (zero padding). Finalmente se escoge la mejor escala, donde se aprecien picos que tengan concordancia entre las dos señales, es decir que posean similitud con el evento cardíaco ocurrido. Los rangos en donde se aprecian mejor los picos están entre 20, 25 y 30 ms del intervalo de correlación, después de realizar pruebas con estos tres rangos se escogió el de 20 ms debido a que se presentó mejores resultados.

7. Resultados y conclusiones

Se dan a conocer entonces una serie de picos que se obtienen al realizar una cross-correlación entre las señales ECG y PCG con un porcentaje de aparición de los picos de más del 65% en 100 C-C estudiados:

• Para QRS:

Pueden existir 3 picos principales

- **Pico 1:** El inicio de este pico coincide con el valor máximo del pico R, evento anterior al inicio del primer componente de S1, es decir cuando la válvula mitral se está cerrando, por lo general este pico se presenta después de 40 milisegundos después del inicio del complejo QRS.
- **Pico 2:** El inicio de este pico coincide con el descenso de la onda R, hasta el inicio del primer componente de S1, y el final coincide con el ascenso de la onda S y parte del primer componente de S1.
- **Pico 3:** En ocasiones hay un tercer pico que corresponde al final o parte del primer componente del sonido S1, dependiendo de la duración del complejo QRS.

Los picos que aparecen antes de 40 milisegundos fueron descartados debido a un filtrado que se le hizo al segmento del PCG antes del inicio del sonido S1.

• Para S1:

Pueden existir 6 picos principalmente, los otros se deben a fluctuaciones de los mismos componentes del sonido S1.

- Pico 1: Su inicio coincide con el final de la onda R.
- Pico 2: El final de este pico corresponde al final del primer componente S1, con el final de la onda S.
- Pico 3: Su inicio corresponde al inicio del segundo componente de S1 y parte del segmento S-T.
- Pico 4: Corresponde al final del tercer componente de S1 y parte de segmento S-T.
- Pico 5: Su inicio corresponde al inicio del cuarto componente del S1 y parte del segmento S.T.
- Pico 6: Su final corresponde al final del cuarto componente del sonido S1 y parte del segmento S-T.

Este tipo de resultados da luces a realizar un análisis profundo con técnicas estadísticas multivariantes y de inteligencia artificial que serán propuestos como proyectos de investigación, para una posterior clasificación de las señales SCG.

Los picos correspondientes a S1 muestran una clara similitud con eventos relacionados al fonocardiograma, especialmente en la apertura y cierre de las válvulas mitral y tricúspide.

Finalmente con toda la información recogida de la investigación se procedió a diseñar una base de datos que permitiera visualizar, y analizar todos los resultados obtenidos.

Con esto se da pie a la incorporación de nuevos registros, y la posibilidad de realizar nuevos tipos de investigación sobre estas señales.

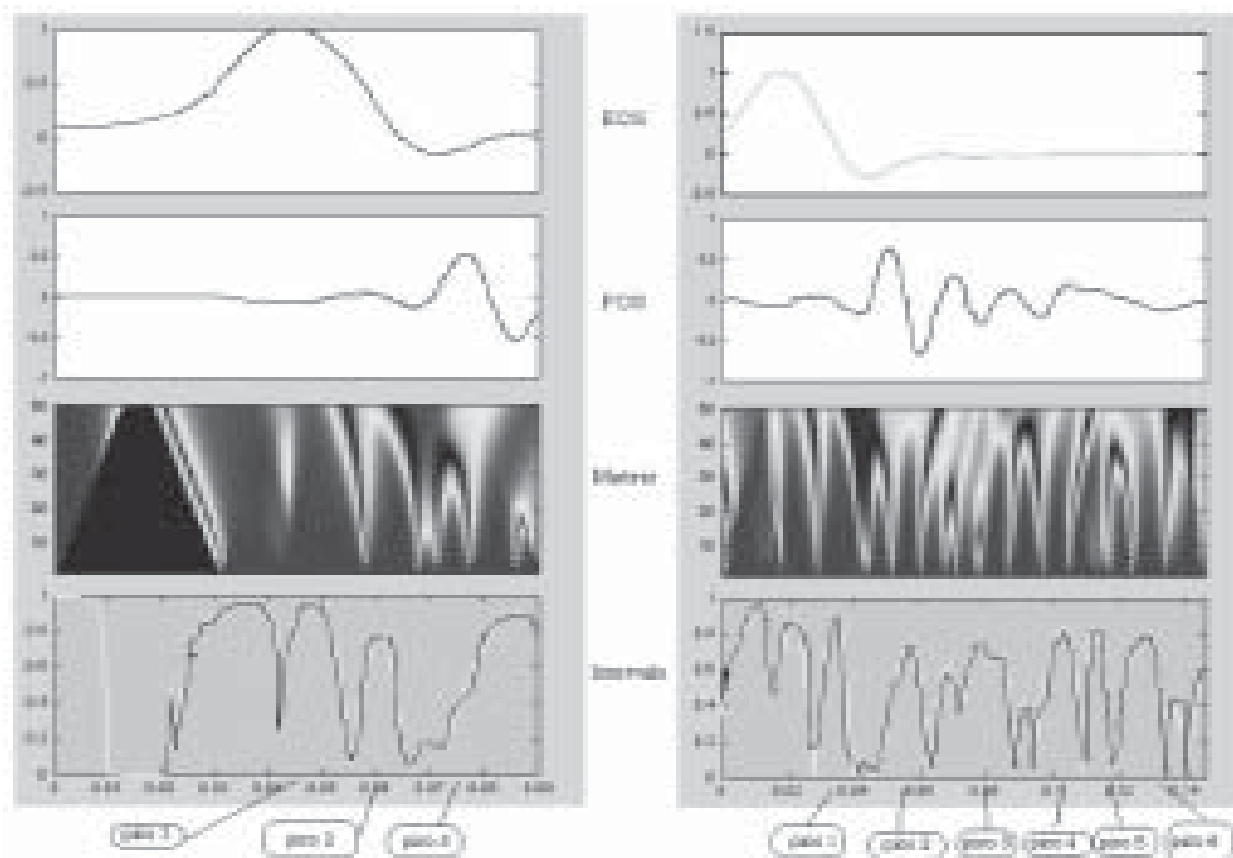


Figura 8. Arriba: segmentosSCG; 3ra gráfica: interpretación de la matriz de correlación en colores que corresponden (azul=0; rojo=1); abajo: picos predominantes a una escala de 20 ms.

Referencias bibliográficas

- (1) BIOPAC, Systems. In. «The Biopac Student Lab», www.biopac.com
- (2) CASTAÑO V. Oscar. «Semiología Cardiovascular no invasora – Rehabilitación Cardíaca-», Universidad de Caldas, 1984
- (3) GARCÍA, Julio. «Implementación de un instrumento de procesamiento de señales eléctricas y acústicas del corazón». Tesis Universidad de los Andes. 2000
- (4) J.S. Sahambi, S.N. Tandon, R.K.P, Bhatt «Using Wavelet Transforms for ECGg characterization», Centre for Biomedical Engineering Indian of Technology Delhi IEEE (Engineering in medicine and biology) Revista Cullen 16, 1997
- (5) LIANG Huiying, Lukkarinen Sakari. «A Heart Sound Segmentation Algorithm Using Wavelet Decomposition and Reconstruction». Helsinki University of Technology. E-mail:hiliang@cc.hut.fi
- (6) LUKKARINEN, Sakari. Huiying, L. Hartimo, I. «HEART SOUND SEGMENTATION ALGORITHM BASED ON HEART SOUND ENVELOGRAM». Computers in Cardiology. 1997
[Http://www.hut.fi/Yksiko/Elektroniikka/English/Projects/Audioscope/](http://www.hut.fi/Yksiko/Elektroniikka/English/Projects/Audioscope/)
- (7) MASTLAB. Documentación PDF. www.mathworks.com
- (8) RODRÍGUEZ, José Luis. «Patrones de correlación estadística entre señales ECG y PCG», Tesis Universidad Nacional, Julio 2002
- (9) VILLA, José Luis. Reynolds Pombo, Jorge. «Caracterización de la señal ecg de la ballena jorobada». SCVS, Junio 1999
- (10) YONKMAN, Fredrick F. «CORAZÓN. Colección CIBA de Ilustraciones Médicas». Tomo V. Salvat Editores 1983

Autores

Julio César García Alvarez, es Ingeniero electrónico de la Universidad Nacional (1998). Magíster en Ingeniería Electrónica y de computadores de la Universidad de los Andes (1999). Actualmente es director de la carrera de Ingeniería Electrónica. Sus áreas de interés son el tratamiento de señales y las comunicaciones.

e-mail: j.c.garcia@ieee.org

José Luis Rodríguez Sotelo, es Ingeniero electrónico de la Universidad Nacional (2002). Actualmente está terminando la tesis de Maestría relacionada con análisis de métodos de extracción de características en señales de EGG.

e-mail: joseluis_rs@hotmail.com

Agradecimientos

Se agradece la colaboración del Med. Cardiólogo Oscar Castaño, decano de la Facultad de Medicina de la Universidad de Manizales de Colombia, y al cuerpo médico perteneciente a la misma, por sus aportes a la realización de la base de datos de SCG, como al diagnóstico de los registros normales adquiridos y a las personas quienes colaboraron en la realización de la base de datos de SCG.