

Plataforma de evaluación de algoritmos de detección de complejos QRS fetales

Andrés Heredia¹ , Jorge Merchán¹ , Andrés Rojas¹ , Sara Wong² 

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril, Cuenca, Ecuador.

² Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril y Agustín Cueva, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: sara.wong@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 17 de agosto de 2017 - Fecha de aceptación: 29 de septiembre de 2017

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de una plataforma de evaluación de desempeño de algoritmos de detección de QRS fetal (fQRS), la cual permite combinar las tres etapas clásicas de estos algoritmos: i) preprocesamiento, ii) detección y eliminación del QRS materno (mQRS) y iii) detección del fQRS. Tres algoritmos involucrados en la competencia: "PhysioNet / Computing in Cardiology Challenge 2013" fueron integrados en la plataforma. La metodología fue validada utilizando las anotaciones de la base de datos disponible en la competencia. El desempeño de cada detector se caracterizó mediante la sensibilidad (SEN), valor predictivo positivo (VPP) y tiempo de retardo (td). Los resultados muestran que la combinación de etapas de algoritmos mejora la sensibilidad de la detección en relación a los algoritmos originales.

Palabras clave: ECG Fetal, plataforma, detección de QRS, PhysioNet.

ABSTRACT

The development of a performance evaluation platform for fetal QRS detection algorithms (fQRS) is presented. The platform allows to combine the three classic stages of these algorithms: i) preprocessing, ii) detection and elimination of maternal QRS (mQRS), and iii) detection of fQRS. Three algorithms involved in the competition: "PhysioNet / Computing in Cardiology Challenge 2013" were integrated into the platform. The methodology was validated using the annotations of the database available for the competition. The performance of each detector was characterized by sensitivity, positive predictive value and time delay. The results show that the combination of algorithm stages improves detection sensitivity in relation to the original algorithms.

Keywords: Fetal ECG, platform, QRS detection, PhysioNet.

1. INTRODUCCIÓN

La detección del complejo QRS fetal (fQRS) es importante porque permite monitorear la frecuencia cardíaca fetal (fHR) y así analizar el estrés al que puede estar propenso el feto. Las contracciones uterinas, que se presentan durante el nacimiento, pueden reducir el flujo de sangre de la madre hacia la placenta, resultando en una disminución de oxígeno hacia el feto. Las técnicas electrónicas de monitoreo fetal pueden ser invasivas o no invasivas, con evaluación intermitente o continua. Estas técnicas incluyen la fonocardiografía fetal, la ecografía Doppler, la cardiotocografía, la magnetocardiografía fetal y la electrocardiografía fetal (fECG) (Clifford, Silva, Behar, & Moody, 2014). El método directo consiste en colocar un electrodo en la cabeza del feto, mientras la madre está en proceso de dilatación, antes del alumbramiento. Esta metodología es muy confiable puesto que el trazado se obtiene directamente del feto, sin interferencia de los biopotenciales maternos. Sin

embargo, dicho método es sumamente invasivo e impráctico. Las alternativas no invasivas corresponden a registrar el electrocardiograma (ECG) en la superficie del abdomen materno, con lo cual se obtiene una señal combinada que representa tanto el fECG como el ECG materno (mECG).

Aun cuando se podría pensar que un monitoreo continuo de la fHR podría ayudar a una reducción considerable de la hipoxia fetal no diagnosticada, estudios en este campo han demostrado que los resultados de este tipo de monitores son poco fiables y difíciles de interpretar, lo cual tiene como consecuencias el aumento de cesáreas costosas y dolorosas, mayor prevalencia de depresión postparto y dolor postoperatorio que afecta negativamente la lactancia materna y el cuidado del bebé (Clifford *et al.*, 2014).

Actualmente, la estimación de la fHR ha sido mejorada mediante el uso de técnicas de procesamiento de señales más sofisticadas, aplicadas a señales más fiables. Esto, junto con una mejor comprensión de las limitaciones de la vigilancia fetal, han llevado a una mayor aceptación de este tipo de análisis en la práctica clínica.

En el reto del congreso *Computing in Cardiology (CinC Challenge 2013)* se desarrollaron numerosos algoritmos para la detección de fQRS. Entre los más destacados se encuentran los algoritmos de Haghpanahi & Borkholder (2013), Di-Marco, Marzo, & Frangi (2013), Kuzilek & Lhotska (2013), entre otros (Silva *et al.*, 2013). La mayoría de estos algoritmos están divididos en tres bloques: preprocesamiento, detección y eliminación de mQRS, y detección de fQRS. Además, se han desarrollado iniciativas de fusión de estos algoritmos. En Loja *et al.* (2015) se propone un procedimiento de fusión simple y eficaz, considerando los tipos más comunes de combinación de detectores. Este proceso pretende mejorar la extracción de fECG como la combinación de tres técnicas diferentes. Los resultados obtenidos con este enfoque prueban que la fusión puede ser explotada y que es necesaria más investigación sobre el tema para mejorar estos resultados preliminares. En otras palabras, aun es necesario un trabajo de exploración y evaluación de la diversidad de algoritmos propuestos, por ejemplo, la evaluación de cada uno de los bloques de los algoritmos y a las medidas de desempeño.

En el presente trabajo se propone el desarrollo de una plataforma que permita intercambiar las etapas (preprocesamiento, detección y eliminación de mQRS, y detección de fQRS) de los algoritmos considerados, para evaluar sus desempeños. Inicialmente se han considerado tres algoritmos: Kuzilek & Lhotska (2013), Haghpanahi & Borkholder (2013), y Di-Marco *et al.* (2013), que serán descritos en la siguiente sección. En los resultados también se presentan los desempeños de algunas combinaciones de estos algoritmos.

2. METODOLOGÍA

2.1. Base de Datos

Los datos utilizados en este trabajo corresponden a: “PhysioNet / Computing in Cardiology Challenge 2013”, del cual se tomó el conjunto A. El conjunto A consta de 75 registros con anotaciones de referencia de cada complejo fQRS, cada registro posee la duración de 1 minuto. Adicionalmente se dispone de un conjunto B de registros, los cuales no poseen ninguna anotación de referencia disponible. Se utilizaron cuatro derivaciones ECG fetales no invasivos, adquiridos a una frecuencia de muestreo de 1 kHz con 16 bits de resolución, un ejemplo de estos registros se presenta en la Figura 1.

2.2. Algoritmos

Se evaluaron y compararon tres algoritmos propuestos por: i) Kuzilek & Lhotska (2013), basado en un conjunto de filtros clásicos para realzar el ECG fetal, combinado con una técnica robusta de detección de QRS; ii) Di-Marco *et al.* (2013), que localiza los picos locales utilizando una estimación ponderada por expectativa de punto fiducial, basado en una distribución Gaussiana; y iii) Haghpanahi & Borkholder (2013), quienes utilizan procesamiento de arreglos de señal para filtrar el ECG materno, usando una descomposición iterativa del subespacio que conforman los datos de entrada.

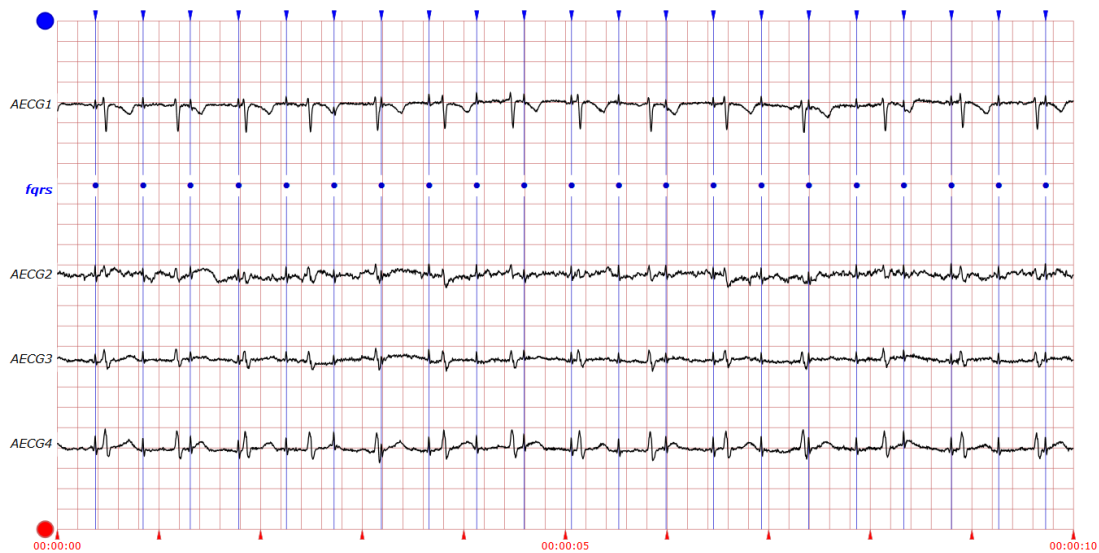


Figura 1. Cuatro derivaciones pertenecientes a un registro de la base de datos, con sus respectivas anotaciones.

En la Figura 2, se muestra el diagrama de bloques común a estos algoritmos: preprocesamiento, detección y eliminación del QRS materno (mQRS) y detección del fQRS.

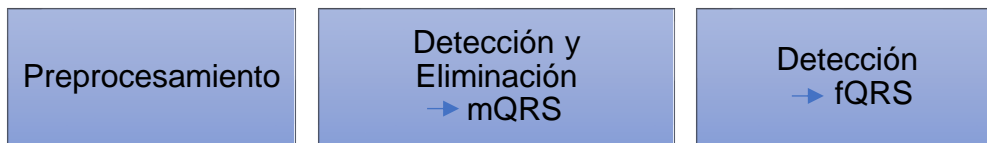


Figura 2. Diagrama de bloques común en los algoritmos evaluados.

Los algoritmos para la comparación están disponibles en el sitio web: <https://physionet.org/challenge/2013/sources/>. MATLAB es utilizado como herramienta para crear la plataforma de integración, que permite realizar la evaluación del desempeño y combinaciones de las etapas de los algoritmos, en base a las anotaciones originales de la base de datos descrita. Algoritmo propuesto por Kuzilek & Lhotska (2013), hace uso del error cuadrático medio entre estimaciones fRR y estimaciones de referencia. La Figura 3 muestra el diagrama de bloques, los cuales se describen brevemente a continuación.

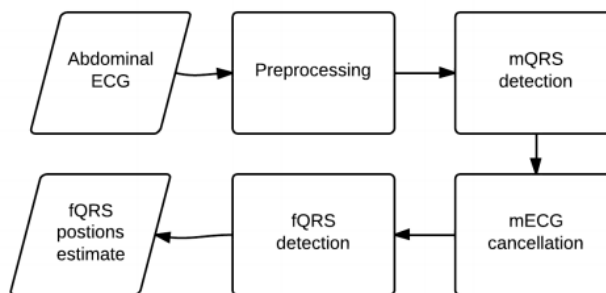


Figura 3. Diagrama de bloques del algoritmo propuesto por Kuzilek & Lhotska (2013).

1. *Pre-procesamiento*: se elimina la línea de base y se usa un filtro FIR de mediana móvil de 50 muestras para las cuatro derivaciones ECG disponibles.
2. *Detección de mQRS*: esta etapa hace uso del algoritmo de detección QRS propuesto por Christov (2004) para detectar los mQRS.

3. *Cancelación de mECG*: esta etapa evalúa una ventana de 20 mQRS y efectúa el procesamiento por separado para realizar la estimación del ECG. Posterior al proceso de construcción el mECG estimado se resta del ECG abdominal y se toma la decisión sobre la calidad de cancelación.
4. *Detección del fQRS*: se utiliza dos detectores, el Sameni (provisto por los organizadores del desafío) y uno basado en entropía, el cual estima la entropía no normalizada Wavelet Shanon de cinco muestras consecutivas.
5. *Estimación de las posiciones fQRS*: Todas las estimaciones se pasan a un algoritmo de corrección, que comprueba las posiciones fQRS e intenta estimar los complejos QRS faltantes.

El algoritmo propuesto por Haghpanahi & Borkholder (2013) proponen un método que utiliza una matriz de procesamiento de señales para detectar el mECG usando una descomposición iterativa del subespacio de datos de entrada. Una vez que se elimina el mECG, los canales se combinan para generar una señal con alto SNR donde se realiza la detección de fQRS (Fig. 4).

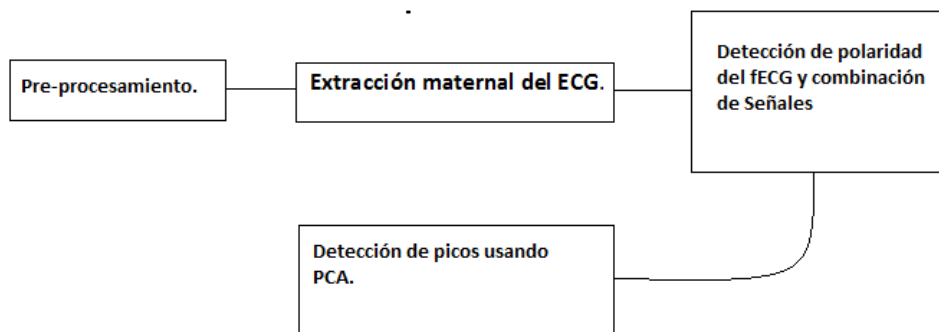


Figura 4. Diagrama de bloques del algoritmo propuesto por Haghpanahi & Borkholder (2013).

1. *Pre-procesamiento*: en esta etapa se eliminan las interferencias de la línea de alimentación de cada canal usando un filtro *notch* simple de segundo orden. Luego se aplica un filtro de promediado móvil en dos pasos para eliminar la línea de base de los registros ECG.
2. *Extracción maternal del ECG*: se aplica descomposición sub-espacial iterativa y filtraje Kalman para eliminar los componentes mECG de las señales ECG.
3. *Detección de polaridad del fECG y combinación de Señales*: clasifica las señales fECG en base a su calidad global para la detección del pico fetal, posteriormente se compara el latido promedio del ECG con una muestra de latido fECG conocida con la finalidad de detectar la polaridad de los complejos QRS.
4. *Detección de picos usando PCA*: esta etapa aplica un simple detector de picos, para localizar la ubicación de los mQRS e implementa una ventana rectangular en cada pico para removerlos, para posteriormente detectar los fQRS.

El Algoritmo propuesto por Di-Marco *et al.* (2013) propone un método en el que los mQRS se detectan en una señal de ECG preprocesada y se cancelan. En la señal residual se hallan los picos locales utilizando una estimación ponderada por expectativa del siguiente punto fQRS basado en una distribución Gaussiana (Fig. 5).

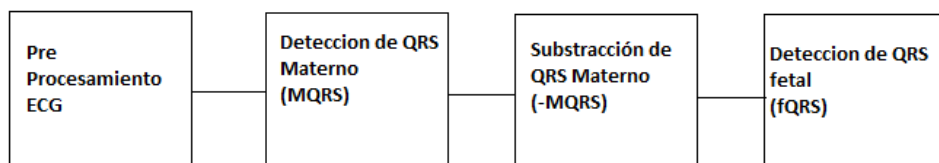


Figura 5. Diagrama de Flujo del algoritmo propuesto por Di-Marco *et al.* (2013), basado en una estimación ponderada de pesos.

1. *Pre-procesamiento*: implica técnicas de filtrado de ruido para la cancelación de interferencias de línea de energía.
2. *Detección mQRS*: los mQRS se detectaron utilizando el algoritmo de Pan & Tompkins (1985), teniendo en cuenta todos los canales.
3. *Sustracción del mQRS*: para cada complejo QRS, se recolectan los 10 mejores complejos QRS correspondientes al mismo canal para crear una plantilla media. Posteriormente la plantilla QRS se resta del ECG abdominal para obtener la fECG.
4. *Detección del fQRS*: esta etapa busca cada uno de los fQRS mediante una estimación ponderada de pesos del siguiente punto fQRS basado en una distribución Gaussiana $G(\mu, \sigma)$, donde μ expresa la distancia más probable al siguiente punto. μ, σ se determinan minimizando la desviación estándar de las series de tiempo fQRS estimadas resultantes para cada registro.

2.3. Validación

Las anotaciones son las referencias utilizadas para evaluar el rendimiento de detección de cada algoritmo, el cual se estima usando los siguientes indicadores:

- *Verdaderos positivos (VP)*: eventos detectados correctamente.
- *Verdaderos negativos (VN)*: eventos rechazados correctamente.
- *Falsos positivos (FP)*: eventos detectados incorrectamente (falsas alarmas).
- *Falsos negativos (FN)*: eventos no detectados (no detecciones).

Para evaluar el rendimiento de detección se hace uso de las siguientes medidas estadísticas:

- *Sensibilidad*: capacidad de detectar correctamente los fQRS que estén centrados en las anotaciones dadas.

$$SEN = \frac{VP}{VP + FN} \quad (1)$$

- *Especificidad*: capacidad de rechazar los fQRS incorrectos que no estén centrados en las anotaciones dadas.

$$ESP = \frac{VN}{VN + FP} \quad (2)$$

Valor predictivo positivo: es la probabilidad de que coincida la detección fQRS con la anotación.

$$VPP = \frac{VP}{VP + FP} \quad (3)$$

- *Valor predictivo negativo*: es la probabilidad de que la detección no pertenezca al fQRS, si este no está centrado en la anotación dada.

$$VPN = \frac{VN}{VN + FN} \quad (4)$$

- *Retardo de la detección*: tiempo transcurrido entre la anotación y su detección.

$$t_d = TP - Anotacion \quad (5)$$

3. RESULTADOS

Se desarrolló una plataforma de integración en la cual es posible intercambiar los módulos de procesamiento de los tres algoritmos. En la Figura 6 se presenta la interfaz gráfica de la plataforma de evaluación. En la parte superior izquierda se puede observar la opción de selección de base de datos. Para este ejemplo se utiliza la base de datos antes mencionada, luego se tiene la selección de los

algoritmos para: preprocesamiento, detección y eliminación de mQRS, detección de fQRS, y finalmente el botón para realizar la combinación eligiendo previamente una ventana. En la parte central se tiene los resultados de la evaluación del desempeño para cada algoritmo y combinación que se realice. En la parte derecha se tiene los puntos de detección y las anotaciones. Adicionalmente en la Figura 6 se puede observar los resultados luego de realizar la evaluación del desempeño, de cada algoritmo y/o algunas combinaciones, se puede ver la curva COR (Característica Operativa del Receptor), la cual describe la tasa de verdaderos positivos (TVP) o sensibilidad versus la tasa de falsos positivos (TFP) o 1 - especificidad.

En la Tabla 1 se puede ver como el algoritmo de Kuzilek & Lhotska (2013) tiene un mejor desempeño, con un retardo de detección de 2ms y sensibilidad de 80.69%. Esto indica su capacidad de detectar correctamente los fQRS que estén centrados en las anotaciones dadas. Estos resultados son seguidos por los del algoritmo de Haghpanahi & Borkholder (2013), con retardo de detección de 3.5 ms. Finalmente, el algoritmo de Di-Marco *et al.* (2013) obtuvo el desempeño más bajo con retardo de detección de 388ms.

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos de la combinación de los algoritmos, combinados en el siguiente orden: [Preprocesamiento/Detección y Eliminación de mQRS/Detección fQRS]. Esta tabla muestra que las combinaciones de diferentes etapas de los algoritmos, permite mejorar la sensibilidad de los esquemas de detección, la primera combinación (Haghpanahi & Borkholder, 2013; Di-Marco *et al.*, 2013; Kuzilek & Lhotska, 2013) incrementa la sensibilidad en más del 1%, en detrimento del tiempo de retardo.

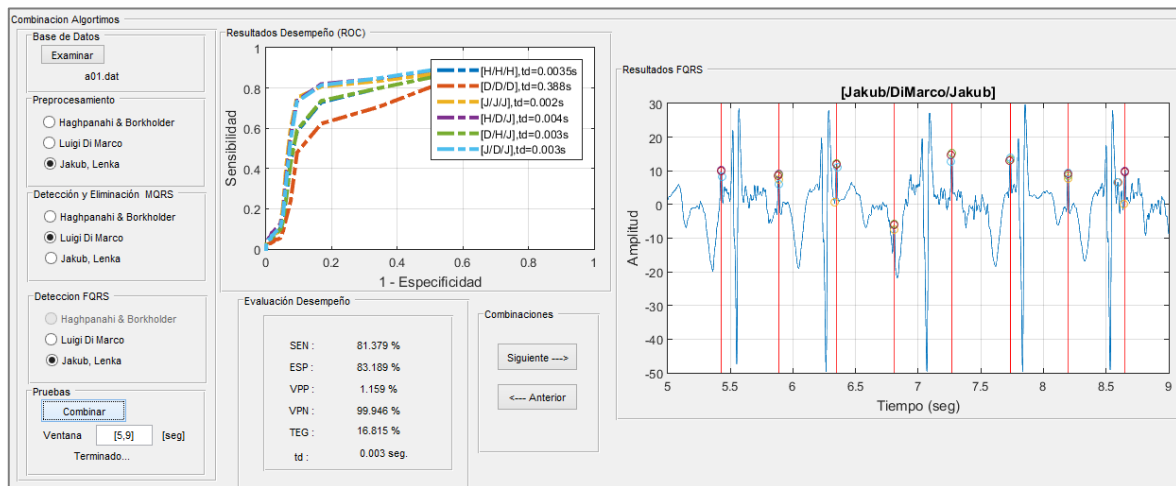


Figura 6. Interfaz gráfica de la plataforma de evaluación, luego de realizar la evaluación del desempeño.

Tabla 1. Evaluación del desempeño de cada algoritmo. Sensibilidad (SEN), Especificidad (ESP), Valor Predictivo Positivo (VPP), Valor Predictivo Negativo (VPN), Tasa de Error Global (TEG), Tiempo de retardo (td).

Set A CinC 2013	Haghpanahi & Borkholder (2013)	Di Marco <i>et al.</i> (2013)	Kuzilek & Lhotska (2013)
SEN (%)	72.92	62.33	80.69
ESP (%)	83.17	83.14	83.19
VPP (%)	1.03	0.89	1.15
VPN (%)	99.92	99.89	99.94
TEG (%)	16.86	16.90	16.82
td (ms)	3.5	388	2

Tabla 2. Evaluación del desempeño de la combinación de los algoritmos. Sensibilidad (SEN), Especificidad (ESP), Valor Predictivo Positivo (VPP), Valor Predictivo Negativo (VPN), Tasa de Error Global (TEG), Tiempo de retardo (td).

Set A CinC 2013	Haghpanahi & Borkholder (2013), Di-Marco <i>et al.</i> (2013), Kuzilek & Lhotska (2013)	Di-Marco <i>et al.</i> (2013), Haghpanahi & Borkholder (2013), Kuzilek & Lhotska (2013)	Kuzilek & Lhotska (2013), Di-Marco <i>et al.</i> (2013), Haghpanahi & Borkholder (2013)
SEN (%)	81.94	81.38	81.38
ESP (%)	83.19	83.19	83.19
VPP (%)	1.16	1.16	1.16
VPN (%)	99.958	99.95	99.95
TEG (%)	16.81	16.81	16.81
td (ms)	4	3	3

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una plataforma que permite evaluar el desempeño de detectores fRQS intercambiando sus etapas de procesamiento. Se demostró que la combinación de los algoritmos mejora la sensibilidad de los algoritmos originales en alrededor de 1%, afectando el tiempo de retardo en [1-2] ms. Esta plataforma puede ser usada para integrar y evaluar nuevos algoritmos, lo cual es útil tanto en la docencia como en investigación. Los trabajos futuros están dirigidos a la integración de otros algoritmos disponibles para este desafío en Physionet.

REFERENCIAS

- Christov, I. I. (2004). Real time electrocardiogram QRS detection using combined adaptive threshold. *BioMedical Engineering OnLine*, 3(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-3-28>
- Clifford, G. D., Silva, I., Behar, J., Moody, G. B. (2014). Non-invasive fetal ECG analysis. *Physiological Measurement*, 35(8), 1521-1536. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/35/8/1521>
- Di-Marco, L., Marzo, A., Frangi, A. (2013). Multichannel foetal heartbeat detection by combining source cancellation with expectation-weighted estimation of fiducial points. *2013 Computing in Cardiology*, 40, 329-332.
- Haghpanahi, M., Borkholder, D. (2013). Fetal ECG extraction from abdominal recordings using array signal processing. *2013 Computing in Cardiology*, 40, 173-176.
- Kuzilek, J., Lhotska, L. (2013). Advanced signal processing techniques for fetal ECG analysis. *2013 Computing in Cardiology*, 40, 177-180.
- Loja, J., Velecela, E., Palacio-Baus, K., Astudillo, D., Medina, R., Wong, S. (2015). *CinC Challenge 2013: comparing three algorithms to extract fetal ECG*. In: 11th International Symposium on Medical Information Processing and Analysis (Vol. 9681, p. 968117). <https://doi.org/10.1117/12.2214359>
- Pan, J., Tompkins, W. J. (1985). *A real-time QRS detection algorithm*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, BME-32(3), 230-236. <https://doi.org/10.1109/TBME.1985.325532>
- Silva, I., Behar, J., Sameni, R., Zhu, T., Oster, J., Clifford, G. D., Moody, G. B. (2013). Noninvasive Fetal ECG: the PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge 2013. *2013 Computing in Cardiology*, 40, 149-152.