

Extracción automática del ECG fetal en registros abdominales de cuatro canales mediante la atenuación del ECG materno y el análisis por componentes independientes

K. P. Zea-Espinosa*, N. Castañeda Villa, A. Jiménez González

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Ciudad de México, México.

* tpj83@live.com

Resumen— El monitoreo fetal se puede hacer a través de la de la medición de la frecuencia cardíaca fetal registrando la actividad eléctrica sobre la superficie del abdomen de la madre, las señales adquiridas de tal forma presentan información que no se asocia únicamente a la actividad cardíaca fetal. El análisis de componentes independientes es una técnica que permite separar diversas fuentes que se asumen independientes a partir de mezclas generadas por estas fuentes, por ello en este trabajo se propone usar este tipo de análisis para la extracción del ECG fetal, además se presenta una metodología basada en la atenuación de la señal materna previa al análisis de componentes independientes, también se realiza la separación del ECG fetal a través del algoritmo FastICA, posteriormente se obtiene el componente fetal de forma automática y se mide la tasa de detección de los complejos QRS en la señal fetal obtenida en comparación con el número de complejos QRS en una señal de referencia. El promedio de la tasa de verdaderos positivos obtenida fue igual al 91.38%.

Palabras clave— FastICA, Monitoreo fetal de la frecuencia cardíaca, Seguimiento fetal, Separación ciega de fuentes

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo del seguimiento fetal intraparto es la detección temprana de asfixia fetal, que es la causa más importante de muerte fetal intraparto. La monitorización electrónica de la frecuencia cardíaca fetal (FCF) ha sido ampliamente utilizada en la evaluación del bienestar fetal durante más de 30 años, y se sabe que la disminución de la frecuencia cardíaca fetal está asociada al sufrimiento fetal, por lo tanto es importante obtener medidas confiables de la FCF [1].

Es posible obtener el trazo de la FCF a partir del electrocardiograma registrado sobre la superficie del abdomen de la madre (ECG_a). Sin embargo, las señales adquiridas de tal forma presentan información que no se asocia solamente a la actividad cardíaca fetal, pues se registran también el ECG materno (ECG_m), el EMG materno, la respiración de la madre e interferencias externas provocadas por la red eléctrica [2]. La presencia de todas esas señales en el registro enmascaran a la señal de ECG fetal (ECG_f), por lo que siempre es necesario extraer primero al ECG_f para obtener medidas confiables de éste.

Usar filtros convencionales para resolver el problema no es útil, pues el traslape espectral y temporal entre el ECG_m y el ECG_f dificulta la separación de este último, requiriendo así de técnicas alternativas para resolver el problema.

Una de las técnicas utilizadas es el análisis de componentes independientes (ICA, por sus siglas en inglés), pues permite separar diversas fuentes a partir de un conjunto de observaciones o mezclas, esto bajo la suposición de que las fuentes son estadísticamente independientes y con funciones de distribución no-gaussianas [2-4]. Tal planteamiento es válido para resolver el problema de extraer el ECG_f de los registros abdominales, pues las fuentes involucradas son independientes ya que el ECG_m y el ECG_f provienen de diferentes procesos biológicos y los demás artefactos externos que pueden estar presentes no tienen relación con la fuente fetal de interés.

ICA requiere que el número de mezclas sea mayor o igual al número de fuentes, lo que no siempre se cumple en ciertas bases de datos y hace necesario el incorporar etapas de pre-procesamiento al ECG_a para entonces utilizar ICA. Un ejemplo de esta estrategia se implementó recientemente en [3,4], donde se trabajó con una base de datos pública [5] (que contiene registros intraparto de ECG_a formados por 4 canales) mediante una metodología basada en la atenuación del ECG_m previo a la extracción del ECG_f por ICA. En [3] aplicaron ICA a las mezclas para obtener el ECG_m, detectaron las ondas R en la señal materna y, a partir de esos puntos, en las señales originales se estableció una ventana de atenuación de ± 5 muestras para finalmente aplicar ICA sobre las mezclas con el ECG_m atenuado. En [4] se siguió también una metodología de atenuación materna, pero el trazo del ECG_m se extrajo mediante análisis por componentes principales (PCA) y, en lugar de la ventana se creó una plantilla a partir del ECG_m. Dicha plantilla tiene una morfología tal que, en los instantes donde hay información materna ésta era atenuada y en los instantes en donde había información fetal ésta era resaltada. Aunque ambos trabajos afirman haber obtenido buenos resultados, el presente trabajo consideró que el desempeño de esta metodología basada en atenuación podría mejorar al combinar lo mejor de ellos, esto al generar una separación más robusta mediante ICA [3] y al construir una plantilla ECG_m como en [4]. Además, como los indicadores de desempeño en esos trabajos se basaron únicamente en la

detección de la onda R fetal o en la comparación visual con el ECGf patrón que acompaña a los registros, en este trabajo se evaluó la calidad del ECGf finalmente extraído a través del índice de la relación señal interferencia (SIR) y se cuantificó el número de complejos QRS obtenidos del ECGf estimado en comparación con el ECGf de referencia.

II. METODOLOGÍA

A. Base de datos

La base de datos [5], cuenta con registros intraparto de 5 mujeres entre las semanas 38 y 41 de gestación. Cada registro incluye 4 señales adquiridas sobre el abdomen materno y una señal de referencia registrada directamente sobre el cuero cabelludo del feto mediante electrodo de Hon.

B. Filtrado

Los ECGs fueron filtrados con un filtro Butterworth pasabanda de orden 2 con frecuencia de corte de 10 Hz a 40 Hz que eliminó interferencias debidas a la red eléctrica, el ruido térmico, la línea de base y acentuó los complejos QRS maternos y fetales (ver Fig. 1a).

C. Atenuación del ECG materno

1) *Extracción del componente del ECGm a través de ICA*: Dado un conjunto de observaciones de variables aleatorias $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$, siendo t el tiempo o el índice de las muestras, ICA asume que están generadas por una combinación lineal de componentes independientes como en $\mathbf{x} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}$, donde \mathbf{A} es una matriz de mezcla desconocida y \mathbf{s} son las fuentes originales de interés. ICA consiste en estimar tanto a la matriz \mathbf{A} como las fuentes \mathbf{s} a partir de las observaciones \mathbf{x} [6]. Para asegurar que el modelo ICA tiene solución es necesario asumir ciertas condiciones [6] (i.e., el número de observaciones es mayor o igual al número de componentes independientes a estimar, los componentes son estadísticamente independientes y presentan distribuciones no gaussianas). Existen diferentes algoritmos para el análisis de componentes independientes, y cada uno de ellos se diferencia principalmente por el criterio de independencia utilizado para la estimación de las fuentes. Uno de ellos es FastICA, un algoritmo muy eficiente que utiliza como criterio de independencia la entropía negativa y cuyo código en Matlab está disponible en la red [2]. El programa se aplicó a las cuatro señales filtradas (utilizando como función no lineal a la tangente hiperbólica) de cada registro, y de los cuatro componentes obtenidos, se seleccionó manualmente a aquel que contenía solamente información materna.

2) *Generación de la plantilla*: El ECGm extraído con ICA fue utilizado para el cálculo de una serie de coeficientes para generar una plantilla como se propone en [4], la cual fue utilizada para la reducción de la información materna en los registros filtrados. Los coeficientes se obtienen con (1):

$$C(n) = a^{-b|\tanh(S(n))|}, \quad (1)$$

donde $S(n)$ es la señal de ECGm, a y b son constantes arbitrarias que controlan qué tan rápido disminuyen los coeficientes. A partir de la recomendación en [5] los coeficientes a y b se establecieron en un valor igual a 400 y 1 respectivamente. Adicionalmente, para aumentar las diferencias entre los valores menores y los valores mayores de los coeficientes, estos fueron recalculados con la ecuación (2), donde m se estableció empíricamente con un valor óptimo igual a 5.

$$C_n(n) = \sum_{i=1}^m C(n-i). \quad (2)$$

Posteriormente, la señal de los coeficientes se filtró con un filtro Butterworth de orden 2 basa-bajas con frecuencia de corte en 5 Hz, esto con el fin de atenuar de forma más homogénea los complejos QRS maternos. Finalmente, las señales filtradas se multiplicaron por estos coeficientes obtenidos para reducir la contribución del ECGm a los trazos abdominales (ver Fig. 1-b).

C. Estimación ciega y detección automática del ECGf

Las señales “libres” de complejos QRS maternos fueron procesadas nuevamente con FastICA, recuperando así 4 componentes independientes (CI) que fueron analizados para identificar automáticamente a aquel correspondiente a la fuente cardiaca fetal (i.e., ECGf extraído). Esto se realizó mediante el auto-espectro, por lo que en cada CI se obtuvo la envolvente a través de la transformada de Hillbert, luego el autocorrelograma y, finalmente, la densidad de potencia espectral mediante el periodograma de Welch. Posteriormente se obtuvo el valor en frecuencia que corresponde al valor máximo de la densidad espectral para cada señal. Aquella señal que presentara su máximo en el valor más alto de frecuencia de trató como correspondiente al ECGf, pues se espera que el feto tenga una frecuencia cardiaca mayor que la materna.

D. Evaluación de la separación

La calidad de la estimación de la fuente fetal se midió a través de la relación señal interferencia (SIR, pos sus siglas en inglés), este índice se define como en (3) [7]:

$$SIR(dB) = 10 \log \left(\frac{|\langle \hat{s}_i, s_i \rangle|^2}{\|\hat{s}_i\|^2 \|s_i\|^2 - |\langle \hat{s}_i, s_i \rangle|^2} \right), \quad (3)$$

donde \hat{s}_i es el ECGf estimado, s_i es el ECGf de referencia (incluido en la base de datos), $|\langle *, * \rangle|$ es el producto punto y $\|*\|$ es la magnitud. Nótese que valores más altos corresponden a una mejor estimación [7].

Obtener complejos QRS fetales lo suficientemente visibles para su detección permitiría entonces el cálculo de diferentes variables cardiovasculares que pueden ayudar a la monitorización fetal como la frecuencia cardiaca o parámetros de variabilidad de la frecuencia cardiaca; por tanto, se hizo la detección de los complejos QRS mediante la normalización de las señales y asignando un umbral igual a 0.5 a partir del cual se buscaban los máximos. Como medida de evaluación se obtuvo la tasa de verdaderos positivos (TVP) mediante la ecuación (4), donde VP es el número de complejos QRS detectados correctamente con respecto a la señal fetal de referencia y FN es el número de complejos QRS que no fueron detectados.

$$TVP = \frac{VP - FN}{VP} * 100\%. \quad (4)$$

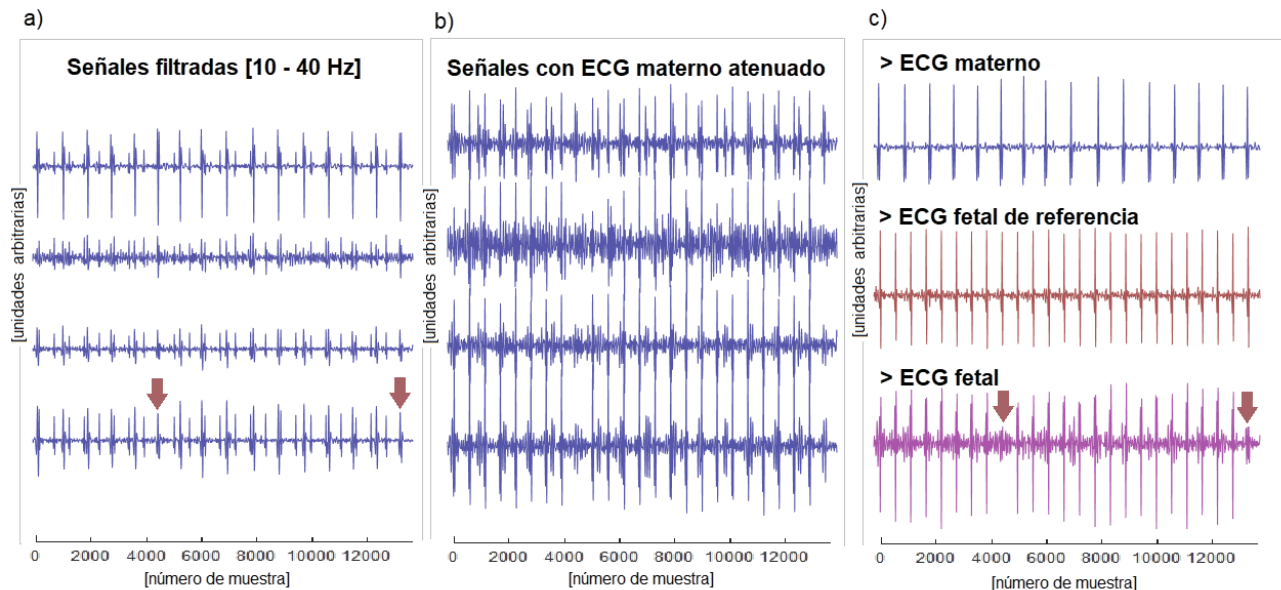
III. RESULTADOS

En la Fig. 1 se presenta un ejemplo de los 5 casos analizados. En general, puede apreciarse que el registro (Fig. 1a) presenta complejos QRS maternos con una amplitud considerablemente mayor que los complejos QRS fetales, sobre todo en el caso de la segunda señal, donde incluso el ECG fetal no se observa. Además también se observa que las señales tienen ruido y que existe traslape entre los complejos QRS fetales y maternos en los casos que se

indican con flechas de color rojo. En la Fig. 1b se observa el resultado de la atenuación de los complejos QRS maternos en los registros, se puede ver que los complejos QRS maternos se redujeron en amplitud significativamente quedando de un tamaño aproximadamente igual o menor a los complejos QRS fetales, dejando la información fetal resaltando del registro. En la Fig. 1c se presenta de arriba hacia abajo el ECG materno obtenido a través de ICA sobre las señales filtradas, el ECG fetal de referencia y el ECG fetal obtenido a través de ICA una vez atenuada la información materna. En todos los casos el ECG materno obtenido fue lo suficientemente bueno para calcular los coeficientes y atenuar los complejos QRS maternos en las señales. Como se observa, el ECG fetal de referencia presenta complejos QRS perfectamente identificables, por lo tanto es una señal de referencia adecuada para evaluar la separación del ECG fetal.

En el caso del ECG fetal estimado se aprecia que los complejos QRS fetales se pueden identificar fácilmente, sin embargo, cuando un complejo QRS materno coincide temporalmente con un complejo QRS fetal, éste se pierde pues durante la etapa de reducción del ECG materno éstos son atenuados.

En el ejemplo presentado, el ECG fetal se detectó de forma automática como se explicó anteriormente y en todos los casos el componente independiente elegido como ECG fetal fue el correcto. En la tabla I se presenta el valor TVP y SIR para cada uno de los casos analizados así como el promedio. Como se observa, la tasa de verdaderos positivos fue mayor al 90% en todos los casos, y el promedio fue igual a 91.38%. El índice SIR presentó valores entre 0.37 y 0.60.



22|Figura 1. a) Señales filtradas de 10 a 40 Hz, b) señales después de la reducción de la información materna, c) de arriba abajo: ECG materno, ECG fetal de referencia y ECG fetal estimado. En flechas color rojo se indica los instantes en los que existe traslape entre los complejos QRS fetales y maternos.

TABLA I
TASA DE VERDADEROS POSITIVOS Y
RELACIÓN SEÑAL INTERFERENCIA

Caso	TVP (%)	SIR
Caso 1	90.32	1.89
Caso 2	92.90	0.37
Caso 3	92.70	0.54
Caso 4	90.30	2.06
Caso 5	90.67	0.65
Promedio	91.38	1.10

IV. DISCUSIÓN

En este trabajo se ha presentado una metodología sistemática para la atenuación de la señal materna en registros de ECG abdominales maternos para la extracción del ECG fetal mediante el análisis de componentes independientes. Los principales retos a los que se hicieron frente fueron el poco número de señales con las que se contaba por registro y la baja amplitud de los complejos QRS fetales en los registros. En general, la metodología utilizada ayudó a la extracción del ECG fetal con una calidad suficiente para la detección de los complejos QRS.

La atenuación de los complejos QRS maternos fue un paso clave para lograr la separación del ECG fetal, pues sin este, dado que el número de señales es pequeño, no es posible separar el ECG fetal ya que se presenta en combinación con el ECG materno a pesar de usar ICA. La detección automática del componente independiente asociado al ECG fetal, se realizó correctamente en todos los casos. El hecho de elegir como componente fetal aquella señal que presente su valor máximo (en la densidad espectral de la envolvente del auto-correlograma del componente) en la frecuencia más alta en comparación con los demás componentes y no establecer un intervalo de frecuencias entre los cuales buscar los máximos, permite una correcta detección del componente fetal independientemente de la frecuencia cardíaca de la madre o del feto.

La limitación del método presentado es que cuando existe traslape temporal entre la aparición de los complejos QRS materno y fetal, la etapa de atenuación disminuye en forma significativa esa parte de la señal y cuando se extrae el ECG fetal los complejos QRS en esos instantes ya no son recuperados.

El índice SIR presentó valores entre 0.37 y 0.60, la diferencia entre los valores para cada registro está relacionada con la calidad de la señal obtenida, tal que, los valores de SIR más bajos se presentan en aquellas señales fetales estimadas que aun presentan cierto nivel de ruido o remanentes de la señal materna lo cual modifica la morfología de la señal, sin embargo la amplitud de tales interferencias es tan pequeño que no impide que los complejos QRS sean detectados, por lo tanto la detección de

los complejos QRS sigue siendo buena, como se refleja en el valor de TVP.

A partir de la señal de ECG fetal estimada es posible obtener diferentes índices como la frecuencia cardíaca fetal o índices de variabilidad, los cuales pueden ser utilizados para la monitorización fetal; sin embargo, los puntos en los cuales no se detectó un complejo QRS fetal generarán errores en la estimación de los índices. Para solucionar este problema y como trabajo a futuro es interesante explorar técnicas de interpolación para recuperar tales valores.

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha logrado la separación del ECG fetal de un número reducido de señales realizando como paso fundamental previo a ICA la atenuación del ECG materno; por lo tanto queda demostrado que es posible obtener índices a partir del ECG fetal que pueden ser útiles para la monitorización fetal durante el embarazo, esto a partir de registros no invasivos y con pocos canales, lo cual facilita el proceso de medición al no tener que colocar un gran número de electrodos. Como trabajo a futuro se sugiere la evaluación de la metodología propuesta en una base de datos más grande.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Salinas, en "Obstetricia", S. H. Ed. RED, 2005. pp. 189 – 201.
- [2] A. Hyvärinen. Fast and Robust Fixed-Point Algorithms for Independent Component Analysis. *IEEE Trans Neural Netw.*, vol. 10, no. 3, pp 626-634, 1999. DOI: 104845.10.1109/72.761722
- [3] Panason M, Nipon U, Sansanee A. "Fetal Electrocardiogram Extraction by Independent Component Analysis" en Memorias de la séptima conferencia internacional de Sistemas de Control, Computación e Ingeniería. Penang, Malasya, pp 24 – 26. DOI: 10.1109/ICCSCE.2017.8284408
- [4] S. Nikam and S. Deosarkar, "Fast ICA based technique for non-invasive fetal ECG extraction," en *Conference on Advances in Signal Processin*, Pune, 2016, pp. 60-65. DOI: 10.1109/CASP.2016.7746138
- [5] Goldberger AL, Amaral LAN, Glass L, Hausdorff JM, Ivanov PCh, Mark RG, Mietus JE, Moody GB, Peng C-K, Stanley HE. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. *Circulation* 101(23):e215-e220 [Circulation Electronic Pages; <http://circ.ahajournals.org/content/101/23/e215.full>]; 2000.
- [6] G.D. Clifford, "Blind source separation: principal & independent component analysis" en *Biomedical Signal and Image Processing*. Spring 2008 pp. 1–47.
- [7] Castañeda-Villa N., Calderón-Ríos E. R., Jiménez-González A. On the Identification of an ICA Algorithm for Auditory Evoked Potentials Extraction: A Study on Synthetic Data. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 36(2), 107-119. DOI: 10.17488/RMIB.36.2.2pdf