

# Filtro adaptativo para la detección de latidos fetales

## Adaptive filter for fetal heartbeat detection

Rafael Bustamante Alvarez<sup>1,a</sup> , Rossina Isabel Gonzales Calienes<sup>1,b</sup> 

**Resumen**— En el presente artículo se presenta el procesamiento digital de señales provenientes de los latidos fetales mediante la implementación de un filtro digital adaptativo cancelador de ruido que permite obtener la señal de latido fetal para que sirva de ayuda al diagnóstico de las condiciones en que se encuentra el feto en el vientre materno.

**Abstract**— This paper present general ideas on design and construction of a Keyboard adapted by hardware to computer access for affected persons of Quadriplegia (Tetraplegia) and that are unable to speak. The above-mentioned keyboard will allow them to write characters in one PC using any processor of text, as response to one voluntary movement of the user.

**Palabras Claves**— LMS, fetal, ecg, adaptativo, filtro

**Key Words**— LMS, fetal, ecg, adaptive, filter

Presentado: 01/03/2024

Aceptado: 15/10/2024

Publicado: 31/12/2024

<sup>1</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

<sup>a</sup> Email: rbustamantea@unmsm.edu.pe

<sup>b</sup> Email: rgonzalesc1@unmsm.edu.pe

### I. INTRODUCCIÓN

El Procesamiento Digital de Señales [1] es cada vez más importante y brinda soluciones en múltiples campos como la medicina, para procesar señales bioeléctricas. Es precisamente una de estas soluciones, la que se plantea en el presente estudio. Se trata de detectar la señal fetal electrocardiográfica (fetal ECG) de una madre gestante a partir de la señal abdominal electrocardiográfica (abdominal ECG) de su vientre. La solución se plantea luego de un análisis de la información de los antecedentes de esta investigación.

El proyecto consiste en separar la señal de cardiaca fetal ECG de la señal abdominal ECG de la madre considerando la señal materna electrocardiográfica (materna ECG). Para lograrlo, se plantea el uso de un filtro adaptativo que nos permita procesar la señal abdominal ECG de la madre y obtener la señal cardiaca del feto, usando el algoritmo de LMS (Least Mean Square). El filtraje adaptativo se implementa usando el software de Matlab.

La aplicación desarrollada permitirá ayudar a diagnosticar el sufrimiento fetal que puede llevar a graves consecuencias en el feto. Por tanto, permitirá una oportuna atención de la madre gestante.

Los objetivos del presente estudio fueron alcanzados mediante la implementación del filtro digital adaptativo para el filtrado de la señal cardiaca fetal ECG, usando el algoritmo

LMS (Least Mean Square), el cual se aplica para separar señales como la señal abdominal ECG. Para ello se desarrolló el programa para implementar el filtro digital adaptativo cancelador de ruido con Matlab mostrando el resultado mediante una interfaz gráfica para el usuario. A continuación, se presenta los antecedentes para el abordaje del presente estudio.

En el artículo [2] se propone dos métodos para obtener la señal fetal ECG a partir de la señal abdominal ECG mediante filtros adaptativos. El primero empleando número de coeficientes fijos (WO-FS) y el segundo, usando número de coeficientes variables (WO-VS).

En el artículo [3] se presenta el desarrollo de un sistema electrocardiográfico fetal no invasivo. Se propone un método de separación de la señal fetal ECG mediante el uso de filtros digitales adaptativos pero con la constante de adaptación variable.

El artículo [4] publica un método para extraer la señal fetal ECG de la señal abdominal ECG, y luego la determinación de la frecuencia cardiaca del feto. Para ello se empleó tres tipos de algoritmos en dos sistemas diferentes como son los sistemas SISO (entrada y salida única) y sistemas MISO (entradas múltiples y salida única).

En el artículo [5] se propone un método combinado de filtros adaptativos LMS y RLS denominado combinado (CRLS), obteniendo buenos resultados para la extracción de la señal fetal ECG de la señal abdominal ECG.

El artículo [6] se presenta un método donde se extrae la señal fetal ECG de la señal abdominal ECG mediante el empleo de un filtro adaptativo donde los coeficientes son del mismo número de muestras de la señal error promedio. Finalmente, se presenta la implementación de dicho algoritmo en un módulo VIRTEX-7 FPGA.

En el artículo [7] se propone dos métodos para determinar la frecuencia cardiaca fetal analizando el espectrograma específicamente la relación de tiempo y frecuencia. Un método emplea la señal de referencia y el otro no. La señal de referencia es la señal abdominal ECG.

En el artículo [8] se realiza un análisis comparativo entre el uso de una sola referencia de señal materna ECG y el caso de usar referencias múltiples para la extracción o realce de la señal fetal ECG mediante la implementación del filtro QRD-RLS. La implementación de múltiples referencias muestra mejores resultados.

El artículo [9] se propone separar la señal fetal ECG de la señal abdominal ECG mediante el uso de un filtro cancelador de ruido con subfiltros múltiples (MSF), el cual funciona mejor que si usara un solo subfiltro (LSF).

En [10] se presenta un método para obtener la señal fetal ECG de la señal abdominal ECG. El método consiste en proponer un filtro adaptativo secuencial en el tiempo que se aplica a la señal abdominal ECG para mejorar la calidad de la señal fetal ECG obtenida.

Jiménez [11], propone el estudio el espacio tiempo ICA (ST-ICA) en la separación de la señal fetal ECG y maternal ECG de la señal abdominal ECG. Para ello, se combina ST-ICA y el método de retardos con FAST-ICA y el clasificador automático para aplicar a la base de datos de electrocardiogramas fetales directos y abdominales en Physionet. Se analizó este artículo para futuros trabajos.

#### A. Objetivo general

- Implementar un filtro digital adaptativo con estructura cancelador de ruido, para el procesamiento de señales de latidos fetales.

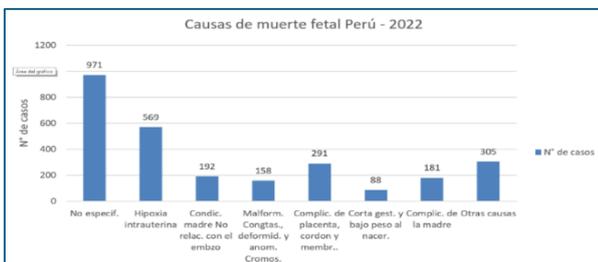
#### B. Objetivos específicos

- Analizar una simulación del procesamiento digital de señales para detectar la señal de los latidos fetales.
- Desarrollar un programa que permita procesar la señal de latido fetal (fetal ECG), el resultado se implementará mediante una interfaz gráfica.

#### C. Justificación

El desarrollo de un filtro que permita filtrar la señal cardiaca del feto (fetal ECG) de la señal abdominal (abdominal ECG) de la madre gestante permitirá realizar un diagnóstico de la situación en que se encuentra el feto en el vientre materno, mediante el análisis de la señal fetal ECG graficada. Una de las aplicaciones en el que se podría utilizar el algoritmo validado sería su implementación en un equipo portátil que sea capaz de analizar el resultado y emitir una alarma al usuario en este caso la madre gestante, sobre todo en los últimos meses del embarazo.

En la Fig. 1, según el Boletín Epidemiológico 31-SE 52 de la Semana Epidemiológica (del 25 al 31 de diciembre 2022) del Ministerio de Salud del Perú (MINSA) [12], una de las causas de muerte fetal en el Perú más específica es la hipoxia intrauterina, la que se puede diagnosticar mediante la medición de la frecuencia cardiaca fetal.



**Fig. 1.** Causas de la Muerte fetal Perú-2022 según Boletín Epidemiológico 31-SE 52 del MINSA.

## II. BASES TEÓRICAS

### A. Procesamiento digital de señales electrocardiográficas

El procesamiento digital de señales o DSP (digital signal processing) [1] es la aplicación matemática constituido por un conjunto de operaciones lógico matemática, de una señal

convertida en un conjunto de datos o muestras correspondiente a la señal del corazón, para representarla gráficamente con fines de diagnóstico médico. Este puede ser representado en el dominio del tiempo discreto, en el dominio frecuencia discreta, u otro dominio discreto de señales por medio de una secuencia de números o símbolos.

### B. Señal materna ECG

La señal materna ECG o señal torácica, es la señal del corazón de la madre captada durante el embarazo exenta de ruidos y otras interferencias que pudiera presentar.

### C. Señal fetal ECG

Es la señal proveniente del corazón del feto, y constituye una opción para identificar fetos con problemas de desarrollo, lo que permite ayudar al tratamiento oportuno para combatir el sufrimiento fetal. La señal fetal ECG se obtiene a partir de la señal abdominal ECG mediante diferentes métodos.

### D. Señal abdominal ECG

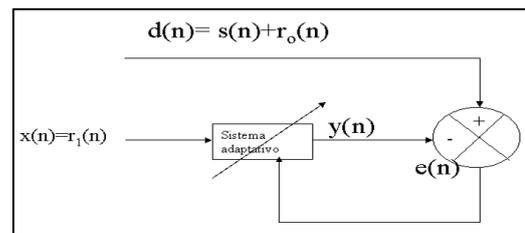
Es la señal que proviene del vientre materno y esta constituido por la señal fetal ECG, materno ECG o torácica y los ruidos del abdomen de la madre.

### E. Filtrado digital adaptativo

El algoritmo que se emplea para el filtrado adaptativo es el de Mínimos Cuadrados, LMS (Least Mean Square). La Fig. 2 muestra la estructura del filtrado adaptativo que se emplea para separar la señal objetivo de la señal con ruido. En el caso de la señal deseada  $d(n)$  es la señal fuente  $s(n)$  más la señal de ruido  $r(n)$ . Luego a la señal  $d(n)$  se le resta la señal  $y(n)$  y se genera la señal de error  $e(n)$ . La señal  $y(n)$  es la salida del sistema adaptativo o filtro digital finite impulse response (FIR) [1] con la particularidad que los coeficientes del filtro digital FIR [13] varían de acuerdo con la fórmula de la Regla Delta, donde se calcula el valor de  $w_{n+1}$  que son los coeficientes de valor siguiente una vez determinado los coeficientes en cada ciclo que es  $w_n$  que son los coeficientes de valor actual del filtro digital FIR mencionado. La señal de entrada  $x(n)$  del sistema adaptativo es una señal de naturaleza similar a la señal de ruido de la señal  $r(n)$  de la señal  $d(n)$ , es decir  $x(n)$  es igual a  $r_1(n)$ . Los coeficientes del filtro digital varían hasta que la señal  $e(n)$  sea igual a la señal fuente  $s(n)$  que es la señal objetivo del filtrado; es decir, la que pasa a través del filtro digital adaptativo.

$$d(n) = s(n) + r_o(n) \quad (1)$$

$d(n)$  = Señal deseada  
 $r_o(n)$  = Señal de ruido



**Fig. 2.** Filtro digital adaptativo.

La señal deseada  $d(n)$  está definida de la siguiente manera:

Determinación de la señal de error  $e(n)$ :

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2)$$

Donde:

$e(n)$ = Señal de error del sistema que luego varias actualizaciones de  $w_{n+1}$ , finalmente tomara el valor  $s(n)$ .

$s(n)$ = Señal fuente o señal objetivo luego del proceso de filtrado adaptativo.

$d(n)$ = Señal deseada

$y(n)$ = Señal de salida del Sistema Adaptivo.

La ecuación de actualización de los coeficientes  $w_{n+1}$  del Sistema Adaptivo o filtro digital FIR es la siguiente:

$$w_{n+1} = w_n + \mu e(n) x(n) \quad (3)$$

Donde:

$w_{n+1}$ = Coeficientes del estado siguiente o actualizado.

$w(n)$ = Coeficientes del estado actual para el cálculo del estado siguiente de los coeficientes.

$\mu$ = Constante de adaptación.

$e(n)$ = Señal de error.

$x(n)$ = Señal de entrada al Sistema Adaptivo o filtro digital FIR.

La señal  $y(n)$  queda definida de la siguiente manera:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{L-1} w_{n(k)} x_{(n-k)} \quad (4)$$

$y(n)$ = Señal de salida del Sistema Adaptivo.

$w_{n(k)}$ = Coeficientes del estado actual para el cálculo del estado siguiente de los coeficientes.

$x_{(n-k)}$ = Señal de entrada del sistema adaptativo o filtro FIR.

El procedimiento para el filtrado mediante el Sistema Adaptivo o filtro digital FIR basado en LMS tendría las siguientes etapas en su funcionamiento:

- 1) Inicialización de los coeficientes del filtro adaptativo, constante de adaptación, número de coeficientes y número de muestras a procesar de la señal de entrada  $x(n)$ , señal fuente  $s(n)$  y la señal de ruido  $r_o(n)$ .
- 2) Determinación de la salida del filtro  $y(n)$ .

$$y(n) = \sum_{k=0}^{L-1} w_{n(k)} x_{(n-k)} \quad (5)$$

- 3) Determinación del error del sistema en (2):

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2)$$

- 4) Actualización de los coeficientes del filtro como en (3):

$$w_{n+1} = w_n + \mu e(n) x(n) \quad (3)$$

### III. METODOLOGÍA

En la metodología, se empleó una forma mediante la cuales

se procesaron las señales de latidos o señal fetal ECG de la base de datos Physionet:

- Programa que permita procesar la señal de latido fetal, el resultado se implementará mediante una interfaz gráfica.

Para el presente estudio se empleó las señales del portal Physionet donde se ubica la Base de datos sintética de fetal ECG. En la cual se encuentran señales que corresponden a las señales materna ECG, fetal ECG muestreadas a una frecuencia de muestreo 250Hz y resolución de 16bits por muestra. Las señales abdominales ECG se obtuvieron de la suma de las señales: Fetal ECG, materna ECG y ruidos internos del abdomen materno.

## IV. RESULTADOS

### A. Programa que permita procesar la señal de latido fetal

Para la implementación del filtro digital adaptativo se recurrió al uso del siguiente algoritmo de LMS:

- 1) Inicialización de los coeficientes del filtro adaptativo:
- 2) Determinación de la salida del filtro:

$$y(n) = w_n^T \cdot x_n \quad (7)$$

- 3) Determinación del error del sistema:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2)$$

- 4) Actualización de los coeficientes del filtro.

A continuación, se muestra en la Fig. 3, el código fuente de la función filtro adaptativo.

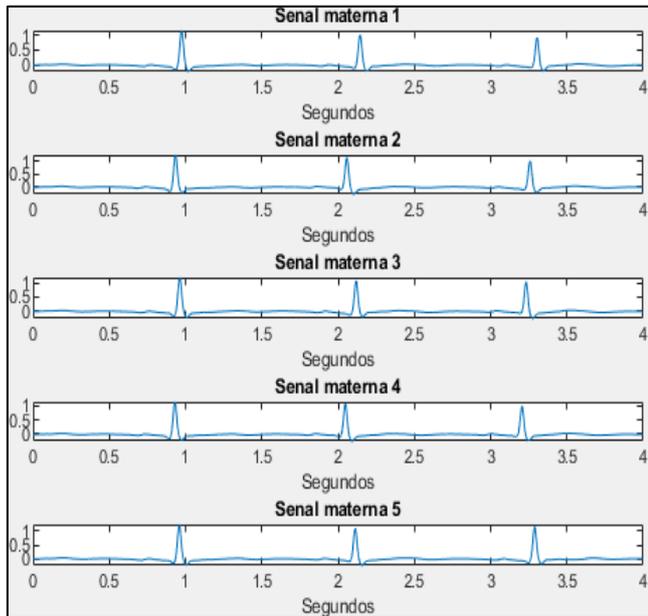
```
function fECG=adapta(aECG,mECG,n,ncoe,cad)
% Inicializacion del filtro adaptativo
w=randn(1,ncoe); %COEFICIENTES
mECG=[zeros(1,ncoe-1) mECG];
for m=1:n;
    y=(mECG(m+ncoe-1:-1:m))*w';
    %y=[sal];
    fECG(m)=aECG(m)-y;
    w=w+cad*fECG(m)*(mECG(m+ncoe-1:-1:m));
end
end
```

Fig. 3. Código de la función del filtro adaptativo.

En la Fig. 3, entre los parámetros de la función adapta() aECG contiene la señal abdominal ECG, luego mECG contiene la señal materna ECG, n contiene el número de muestras de las señales, ncoe es el número de coeficientes, cad es la gradiente de adaptación y fECG la señal filtrada; es decir, la señal fetal ECG que es la salida de la función.

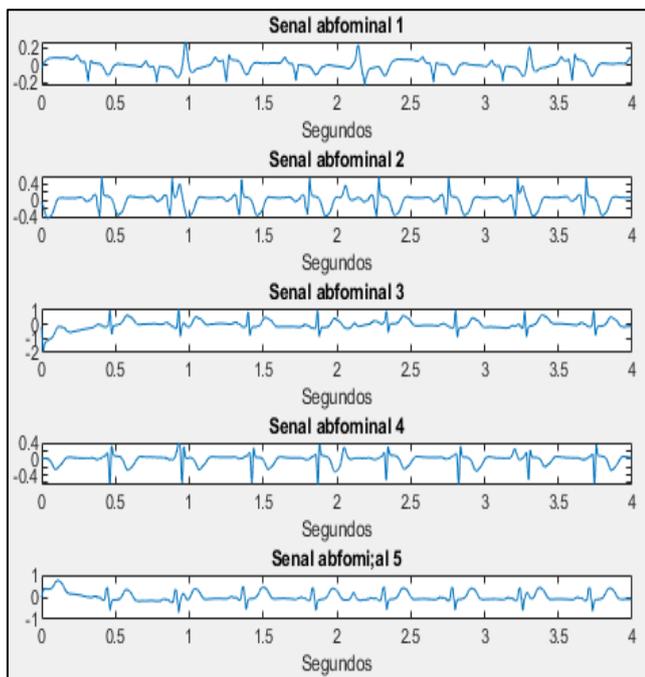
Para el filtrado adaptativo se empleó 65 coeficientes (varían en cada iteración) y una gradiente de adaptación de 0.000011.

Este procedimiento se implementó en el programa Matlab para obtener la señal fetal (fetal ECG). Una vez obtenido los resultados se procedió a graficar la señal materna o torácica, la señal abdominal que es la señal compuesta por la señal materna, la señal fetal y otros ruidos abdominales; luego, solamente la señal fetal como se observa en las figuras Fig.4, Fig.5 y Fig.6, respectivamente. En las gráficas mencionadas se observan señales de cada una de ellas se presentan cinco.



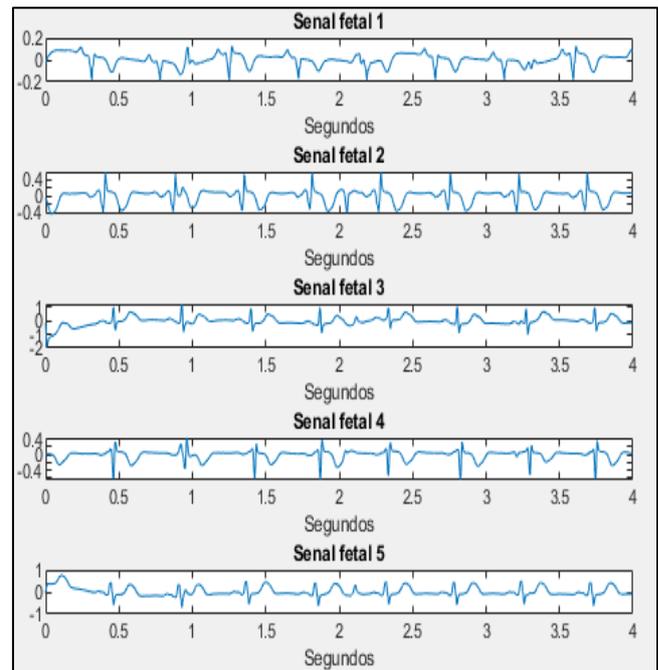
**Fig. 4.** Señales maternas ECG.

En la Fig.4 se observa las señales maternas ECG obtenidas de la base de datos de Physionet que constituyen la señal de entrada del filtro adaptativo lo que sería  $s(n)$  en la Fig. 2.



**Fig. 5.** Señales abdominales ECG.

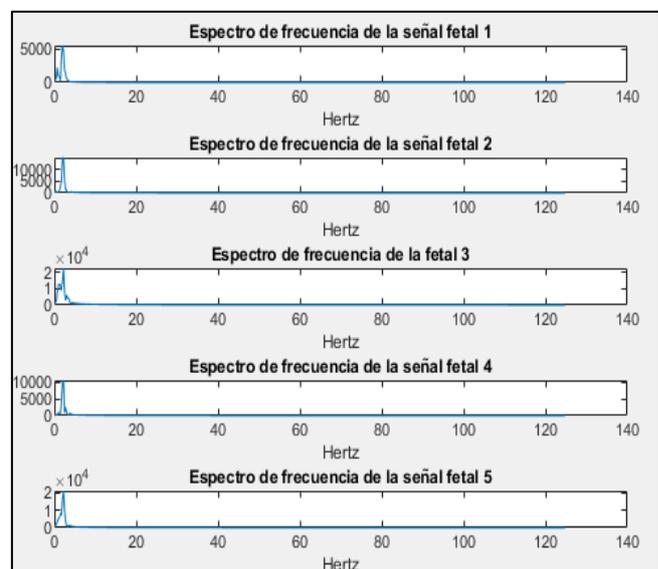
La Fig. 5 presenta las señales abdominales ECG que para el filtro adaptativo sería la señal  $d(n)$  en la Fig.2



**Fig. 6.** Señales fetales ECG.

Las señales de la Fig.6 son las señales fetales ECG que en el filtro adaptativo sería la señal de error  $(n)$  en la Fig.2.

En la Fig. 7 se presentan los espectros de frecuencia de las señales fetales, que resultan con las siguientes mediciones  $f_1=2\text{Hz}$   $f_2=2\text{Hz}$   $f_3=2.25\text{Hz}$   $f_4=2.25\text{Hz}$  y  $f_5=2.25\text{Hz}$  y que realizando la conversión a número de latidos por minuto sería  $f_1=120\text{lat/min}$ ,  $f_2=120\text{lat/min}$ ,  $f_3=135\text{lat/min}$ ,  $f_4=135\text{lat/min}$  y  $f_5=135\text{lat/min}$ , respectivamente.



**Fig. 7.** Espectro de las señales fetales.

En el gráfico de la Fig.6, presenta el resultado del filtrado adaptativo mediante las señales fetales, las cuales presentan frecuencias entre 2Hz y 2.25Hz, esperadas según las gráficas de la Fig. 7 que equivale a 120 y 135 latidos/minutos los que son resultados esperados dentro del rango de frecuencia de latidos de los fetos que es entre 120 y 160 latidos/minuto.

En la siguiente Fig.8 se muestra el resultado de lo realizado en el ítem de Metodología, es decir se presenta la

implementación de la interfaz gráfica de monitoreo de los latidos fetales en el cual se exhibe el gráfico de la señal fetal y su espectro de frecuencia con el resultado de la medición efectuada a la señal fetal ECG. Es decir, la frecuencia en Hertz y latidos por minuto de la señal fetal ECG. La frecuencia de la señal fetal ECG es 138 latidos por minuto que se observa en parte inferior de la Fig. 8. Es necesario anotar que la señal fetal puede presentar ligeras variaciones en la frecuencia cardiaca del feto, especialmente luego de las contracciones de la madre.

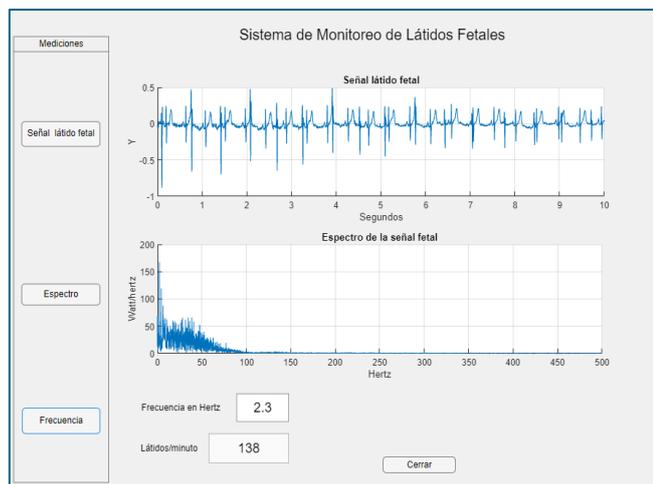


Fig. 8. Interfaz gráfica para el análisis de la señal fetal.

La importancia de la determinación de la frecuencia cardiaca fetal radica en que esta revela la situación del sufrimiento fetal por asfixia en caso de producirse una causa que los provoque como el estrangulamiento con el cordón umbilical que conduce a un estado hipoxia.

## V. CONCLUSIONES

- El filtro digital adaptativo basados en el algoritmo LMS permite obtener la señal fetal ECG, a partir de la señal abdominal ECG y la señal materna ECG, determinando adecuadamente el valor de la constante de adaptación y el número de coeficientes del filtro digital del sistema adaptativo.
- La interfaz de procesamiento de la señal fetal permite mostrar la señal y su espectro muestra el mismo resultado que los obtenidos mediante el filtro digital adaptativo propuesto en el presente estudio con el resultado esperado es decir obtener la señal fetal ECG y su frecuencia cardiaca.

## REFERENCIAS

- [1] J. Proakis y D. Manolakis, Tratamiento digital de señales, Madrid: Prentice Hall, 1998.
- [2] E. Dash y M. Suchetta, «Weight optimized fixed and variable step-size adaptive filters for fetal ECG extraction,» *Biomedical Signal Processing and Control*, 2024.
- [3] J. Jebastine, «Fetal ECG Extraction and QRS Detection Using Advanced Adaptive Filtering-Based Signal Decomposition and Peak Threshold Technique from Abdominal ECG Signals,» *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2023.

- [4] N. Rafia, I. Rubaiya, M. Farinha Tasnimi y R. Md. Abdur, «Non-Invasive Extraction of Fetal and Maternal ECG Signals using Adaptive Filter for Pregnancy Monitoring System,» *Actas of IECON (Conference about industry and electronic)*, 2023.
- [5] Y. Xuan, X. Zhang, S. Li, L. García y R. Togneti, «A New Approach to Extract Fetal Electrocardiogram Using Affine Combination of Adaptive Filters,» *ICASSP IEEE, International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2023.
- [6] E. Dhas y M. Suchetta, «Extraction of Fetal ECG From Abdominal and Thorax ECG Using a Non-Causal Adaptive Filter Architecture,» *IEEE Transaction Biomedical Signal Processing and Control*, 2022.
- [7] A. Ahmed, D. Nyitamen, S. Lawan y C. Wamdeo, «Fetal Heart Rate Estimation: Adaptive Filtering Approach vs Time-Frequency Analysis,» *2019 2nd International Conference of the IEEE Nigeria Computer Chapter, NigeriaCompConf2019, 8949643*, 2019.
- [8] E. Sulas, M. Urru, R. Tumbarello, L. Raffo y D. Pani, «Comparison of Single-and Multi-reference QRD-RLS adaptive filter for non-invasive fetal electrocardiography,» *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, pp. 1–5, 8856824, 2019.
- [9] A. Krupa, D. Samiappan, R. Kumar y S. Kumar, «Multiple Sub-Filter Adaptive Noise Canceller for fetal ECG Extraction,» *Procedia Computer Science*, 165, pp. 182–188, 2019.
- [10] E. Fotiadou, J. Van Laar, S. Oei y R. Vulling, «Enhancement of low-quality fetal electrocardiogram based on time-sequenced adaptive filtering,» *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2018.
- [11] A. Jiménez y N. Castañeda, «Blind extraction of fetal and maternal component from abdominal,» *Biomedical Signal processing and control*, 2020.
- [12] Ministerio de Salud (MINS), «Boletín Epidemiológico 31-SE 52 de la Semana Epidemiológica (del 25 al 31 de diciembre 2022),» 2022.
- [13] R. Bustamante, Diseño de una interfaz para análisis espectral, monitoreo, adquisición, grabación y reproducción de señales por computadora, Lima - Peru: Universida Nacional Mayor de San Marcos, 1998.

## Conflicto de intereses / Competing interests:

Los autores no incurren en conflictos de intereses.

## Rol de los autores / Authors Roles:

Rafael Bustamante Alvarez: Conceptualización, investigación, redacción programación, preparación del borrador original.

Rossina Isabel Gonzales Calienes: Recopilación de información y redacción del artículo, preparación del borrador original.

## Fuentes de financiamiento / Funding:

Esta investigación se realizó con el financiamiento de los autores.

## Aspectos éticos / legales; Ethics / legals:

Los autores declaran no haber violado u omitido normas éticas o legales al realizar la investigación.