

Aportaciones de la ingeniería biomédica: Seguimiento eléctrico y acústico del bienestar fetal



Aída Jiménez González
*Laboratorio de Ingeniería
en Fenómenos Fisiológicos Perinatales,
Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa*



Abstract

The objective of this work was to present contributions of the Perinatal Physiological Phenomena Engineering Laboratory (LIFFPer) towards the monitoring of fetal well-being during pregnancy, and to emphasize the participation of biomedical engineering in the face of the global and unresolved problem of early identification of fetuses with problems of oxygenation. To this end, the relevance of electronic monitoring of fetal heart rate has been described along with the way in which it can be conducted through alternatives that incorporate harmless technology (for recording signals in the maternal abdomen), and computerized tools that eliminate maternal and environmental information that usually contaminates them. Finally, results obtained by the LIFFPer are presented.

Keywords: Abdominal electrocardiogram, abdominal phonocardiogram, fetal heart rate, independent component analysis

Resumen

El objetivo de este trabajo fue presentar algunas contribuciones del Laboratorio de Ingeniería de Fenómenos Fisiológicos Perinatales (LIFFPer) hacia el seguimiento del bienestar fetal durante el embarazo, y enfatizar la participación de la ingeniería biomédica ante el problema mundial y no resuelto de la identificación temprana de fetos con problemas de oxigenación. Para ello, se ha descrito la relevancia del seguimiento electrónico de la frecuencia cardíaca fetal y la forma en que puede realizarse mediante alternativas que incorporan tecnología, inocua para el registro de señales en el abdomen materno, y herramientas computarizadas para eliminar la infor-

mación materna y ambiental que suele contaminarlas. Finalmente, se presentan algunos resultados obtenidos en el LIFFPer.

Palabras clave: Electrocardiograma abdominal, fonocardiograma abdominal, frecuencia cardíaca fetal, análisis por componentes independientes

Introducción

Si alguna vez has estado en contacto con una embarazada (hermana, tía, amiga, etc.) seguramente te percataste de sus visitas al profesional del cuidado de la salud y te platicó sobre los estudios que le realizaron. Incluso es probable que te haya hablado sobre las imágenes que vio de su bebé y sobre el sonido que escuchó cuando el médico “le puso el ultrasonido en el abdomen” (figura 1), diciendo algo como “lo vi moverse y escuché su corazón”. También pudo mencionarte que el médico “le midió algunas cosas al feto” y que le pidió a ella ciertos estudios adicionales para “ver si todo estaba bien”.

Como resultado de esas pláticas es posible que te hayas preguntado cosas como: ¿por qué son importantes las revisiones médicas durante el embarazo? y ¿qué tipo de información fetal busca el médico con el equipo de ultrasonido?. Adicionalmente, si ya tienes conocimientos al respecto, tu curiosidad podría haberte llevado a preguntarte si ¿sería posible obtener esa información mediante métodos alternativos? y ¿cuál sería la relevancia de profesionistas como los ingenieros biomédicos en esa tarea?. Pues bien, en este artículo hablaremos al respecto y pondremos énfasis en algunas aportaciones de la ingeniería biomédica en el seguimiento alternativo de la condición fetal.



Figura 1. Ultrasonido fetal (sonograma fetal) durante el embarazo¹.

Importancia del seguimiento del bienestar fetal durante el embarazo

El seguimiento del bienestar fetal durante el embarazo tiene como objetivo identificar a aquellos casos que tienen problemas de oxigenación, así que es una actividad fundamental para el cuidado del feto. Para este fin, el médico especialista observa y analiza una serie de eventos fisiológicos conocidos como la frecuencia cardíaca fetal (FCf), los movimientos y tono fetales (Mf) y el flujo sanguíneo fetal (FSf). Estos eventos tienen la característica de cambiar cuando el suministro de oxígeno (O₂) disminuye (mediante mecanismos de defensa fetales), y mientras que en un feto sano (o en bienestar) se autoajustan exitosamente para garantizarle el suministro de O₂ necesario para su crecimiento y desarrollo (aumentando su frecuencia cardíaca, por ejemplo), en

un feto con problemas no lo hacen, lo que incrementa el riesgo de resultados adversos antes, durante o después del trabajo de parto. Así, mediante la observación de las variaciones en estos eventos fetales, el médico busca identificar etapas tempranas asociadas a problemas de oxigenación e intervenir oportunamente para (1) prevenir resultados adversos como daño neurológico fetal (parálisis cerebral o encefalopatía), la muerte o ambos, (2) optimizar el tiempo de nacimiento y (3) evitar intervenciones innecesarias (Godoy Villamil et al., 2022, Sundström et al., 2000).

En la clínica, la observación del bienestar fetal se realiza mediante ultrasonografía, una opción que le permite al especialista médico la observación de la FCf, los Mf y el FSf para la evaluación biofísica del bienestar fetal, la clasificación del embarazo como de alto o bajo riesgo y, así, la decisión del procedimiento a seguir. Desafortunadamente, aunque el uso del ultrasonido ha reducido la cantidad de muertes fetales debidas a problemas de oxigenación, aún se reportan miles de ellas durante el embarazo (Murguía de Sierra et al., 2005). Tan solo en México, el INEGI reportó que durante el año 2021 se registraron 23,000 muertes fetales, 83.5 % de ellas antes del parto, 15.3 % durante el parto y 1.2 % no se especificó (INEGI, 2022).

Aunque las causas para estas cifras no son específicas, estos porcentajes indican que el seguimiento efectivo de la condición fetal sigue siendo un reto, lo que significa que aún hay mucho por hacer para coadyuvar a la solución del problema. En

¹ Imagen de Freepik

este sentido, mientras el lector o lectora puede intuir que la mujer embarazada debe ser copartícipe del proceso, asegurándose de asistir a sus citas médicas y de seguir las indicaciones de su médico, también debe considerar que es importante que el médico especialista posea la experiencia, habilidad y los recursos necesarios para identificar tempranamente los signos asociados a los problemas de oxigenación, condiciones que no siempre se cumplen y cuyo análisis está más allá del objetivo de este artículo.

La cuestión ahora es ver cómo es que la participación de un tercero, un profesional no médico, puede fortalecer al enfoque clínico al proporcionarle métodos alternativos cuya información complementa a la observación tradicionalmente basada en el ultrasonido, que se caracteriza por ser de corta duración (aproximadamente 30 minutos), discontinua (con semanas entre cada revisión), subjetiva (porque el médico interpreta las variaciones de la FCf, los Mf y el FSf durante y decide si hay bienestar o riesgo fetal) y, ciertamente, con vacíos en la comprensión de la respuesta fetal a los problemas de oxigenación (porque aún no se estudian en su totalidad). Al respecto, la siguiente sección describirá algunas estrategias alternativas que las ingenieras e ingenieros biomédicos en la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (Departamento de Ingeniería Eléctrica, Área de Ingeniería Biomédica, Laboratorio de Ingeniería de Fenómenos Fisiológicos Perinatales, LIFFP) han estudiado como mé-

todos complementarios para el seguimiento de la condición fetal durante el embarazo.

La ingeniería biomédica y el seguimiento electrónico del bienestar fetal durante el embarazo

Desde hace décadas se ha considerado que la capacidad de identificación temprana de los fetos con problemas de oxigenación podría incrementarse al aumentar la frecuencia y duración de la observación de la FCf, los Mf y el FSF, pues se aumentaría la probabilidad de encontrar a estos fetos antes de que su crecimiento y desarrollo se vean afectados. Esto, sin embargo, no es posible mediante el ultrasonido porque (1) incrementaría considerablemente el gasto para el seguimiento debido al costo del uso del equipo de ultrasonido y a los honorarios médicos asociados a dicho uso y, (2) si bien se considera a la ultrasonografía como una técnica inocua, la realidad es que su utilización implica que se le aplique energía ultrasónica al tejido fetal, lo que no puede realizarse por periodos largos sin ponerlo en riesgo por calentamiento (Barnett, 2001). Alternativamente, se ha propuesto que el seguimiento tradicional durante el embarazo se complementa con técnicas (1) que no requieran de personal especializado para obtener² la información de las respuestas fetales y (2) que no apliquen ningún tipo de energía al feto, lo que haría al estudio más accesible para la población y completamente inocuo, permitiendo así un seguimiento menos intermitente y por periodos prolongados.

² Es importante recalcar que de ninguna manera podemos excluir al especialista médico, pues es el único autorizado para interpretar la información obtenida, para emitir un diagnóstico y para indicar las acciones a seguir. En este trabajo nos referimos a métodos alternativos que se enfoquen únicamente en la obtención de la información asociada a las respuestas fetales ante la disminución de O₂ fetal, esto de manera accesible e inocua. Una vez que se obtenga esa información, debe presentarse al médico para que la analice y determine si hay riesgo fetal.

Aquí es donde entra en acción la ingeniería biomédica, una disciplina que permite que sus profesionistas comprendan la magnitud del reto que representa el seguimiento del bienestar fetal y que apliquen sus conocimientos para el desarrollo de métodos electrónicos e inocuos que faciliten la observación prolongada de la respuesta fetal a los cambios de O_2 , lo que ha generado lo que se conoce como seguimiento electrónico del bienestar fetal.

Ciertamente la tarea no es sencilla, y antes de entrar en materia sobre el trabajo realizado en el LIFFPPer para este seguimiento es necesario que el lector(a) tenga presentes dos características importantes de las respuestas fetales a los problemas de oxigenación, (1) las variaciones de la FCf, los Mf y el FSf no se producen simultáneamente; por el contrario, se activan dependiendo del grado de deficiencia de O_2 y, (2), la observación electrónica de las variaciones de la FCf, los Mf y el FSf impone niveles de dificultad diferentes para la tecnología. Al respecto, la respuesta fetal más temprana se observa en la FCf (que cambia inmediatamente), seguida por el FSf y, finalmente, por los Mf (que pueden tardar semanas en cambiar). Por su parte, desde el punto de vista de acceso a esos eventos, la observación electrónica de la FCf es relativamente más fácil que la de los Mf y, a su vez, que la del FSf (que actualmente solo puede realizarse mediante equipo de ultrasonido). Es por estas razones que los esfuerzos tecnológicos se han destinado al seguimiento electrónico de la FCf, pues es la respuesta más temprana a los cambios de oxigenación y se puede observar con mayor facilidad.

La ingeniería biomédica y el seguimiento electrónico

de la FCf durante el embarazo

Con ayuda de la ingeniería biomédica, la medición alternativa de la FCf se puede realizar a partir del trazo conocido como electrocardiograma fetal (ECGf) o del trazo conocido como fonocardiograma fetal (FCGf), que se producen respectivamente por la actividad eléctrica y acústica del corazón del feto. Su obtención requiere de tecnología que detecte esas actividades bioeléctricas (mediante electrodos) o bioacústicas (usando micrófonos), que las transforme a señales eléctricas y que las despliegue amplificadas y filtradas para entonces medir la FCf como se muestra en la figura 2.

Obsérvese que en el ECGf es notoria la presencia de un pico de amplitud alta que se repite (positivo en este ejemplo e indicado por \diamond). Ese pico se conoce como onda R (R), y su repetición se debe a la despolarización rítmica del músculo cardíaco (específicamente del ventrículo) que, captada por unos electrodos, produce el trazo en (a). Por su parte, en el FCGf, es notoria la presencia de un evento con valores positivos y negativos de amplitud alta que se repite (marcado por \diamond). Ese evento se conoce como primer sonido cardíaco (S1), y su repetición se debe a que la contracción rítmica del corazón cierra un par de válvulas cardíacas (conocidas como tricúspide y mitral), lo que produce vibraciones que viajan hacia la superficie abdominal para ser captadas por un micrófono y generar el trazo presentado en (b). Ahora, para calcular ese ritmo (mejor conocido como frecuencia cardíaca) a partir del ECGf o del FCGf, es necesario medir el tiempo (T) entre dos ondas R consecutivas en (a) o entre dos sonidos S1 consecutivos en (b) y, entonces, dividir 1 entre T ($FCf = 1/T$). Finalmente, si se

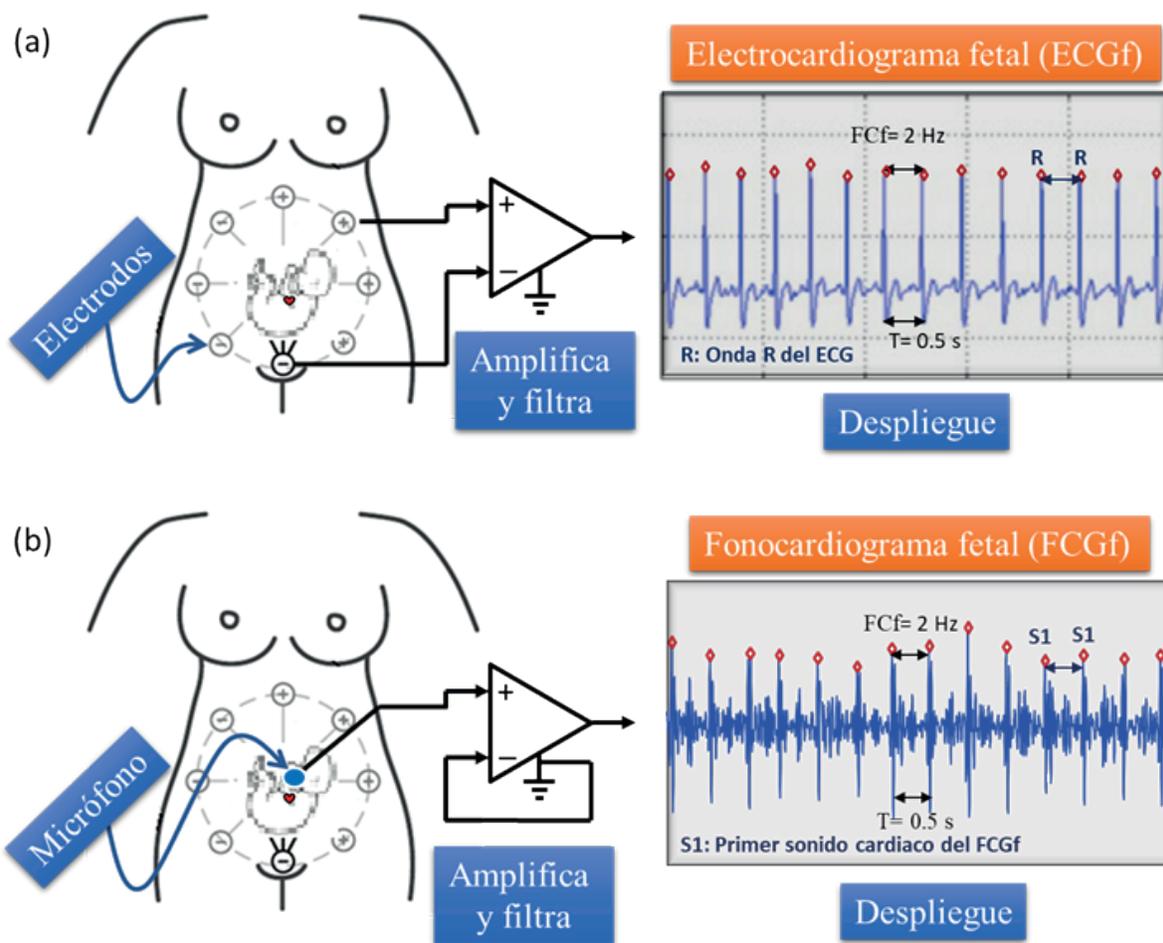


Figura 2. Registro alternativo de información fetal y medición de la FCf a partir del (a) electrocardiograma fetal y (b) fonocardiograma fetal.

multiplica FCf por 60, se obtiene la frecuencia cardíaca fetal en latidos por minuto (lat/min), que normalmente tiene valores entre 120 y 160 lat/min.

Hasta ahora todo es favorable en esta descripción, pues la tecnología biomédica sin duda alguna permite medir de manera electrónica la FCf durante el embarazo sin importar (1) que el corazón del feto se encuentra relativamente lejos de los electrodos o el micrófono (dentro de la caja torácica fetal, que a su vez está rodeada por el líquido amniótico, y éste por los tejidos abdominales maternos) y (2) que el corazón

fetal es tan pequeño que produce señales bioeléctricas y bioacústicas de muy baja intensidad. Esto es un punto a favor de la estrategia alternativa que se ha mencionado en esta sección, pues al usar electrodos o micrófonos en la superficie abdominal se garantiza que la medición de la FCf se realice de manera inocua y continua, lo que favorece al seguimiento del bienestar fetal. Sin embargo, como la estrategia alternativa se basa en la detección de información fetal en la superficie del abdomen materno (y no directamente sobre el tórax fetal, por razones obvias), es necesario que los profesionales en ingeniería biomédica

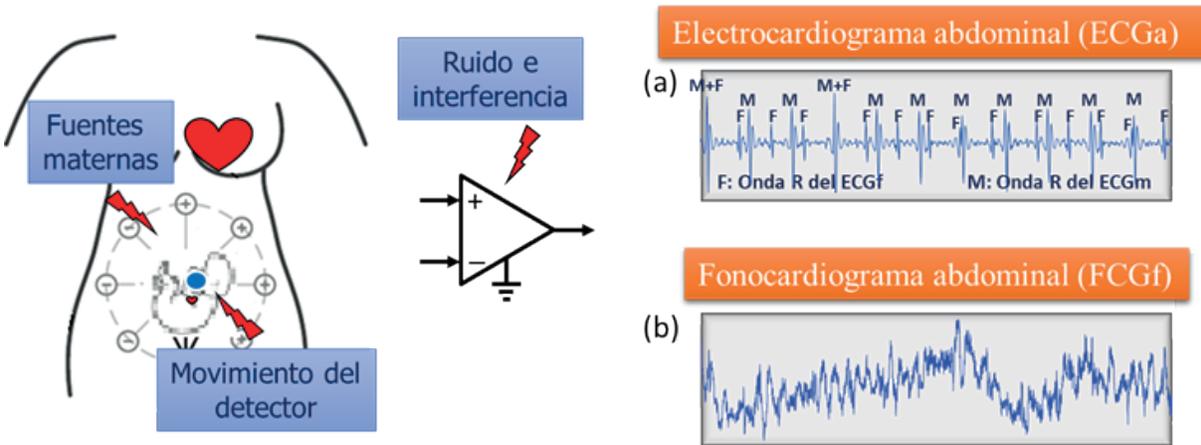


Figura 3. Registro real obtenido sobre el abdomen materno. (a) Electrocardiograma abdominal y (b) fonocardiograma abdominal. En (a), F denota la actividad cardíaca fetal y M la actividad cardíaca materna, mientras que M+F indica que los eventos materno y fetal coincidieron en ese instante.

tomen en cuenta factores adicionales que afectan a la información fetal al momento de su registro y despliegue, pues la realidad es que en el abdomen materno se obtiene un electrocardiograma abdominal (ECGa) o un fonocardiograma abdominal (FCGa), como se describe a continuación.

En la práctica, los registros abdominales siempre contienen tres fuentes de información, la de origen fetal (corazón; con la menor intensidad), la de origen materno (corazón, músculos abdominales, intestinos; con hasta 10 veces la intensidad fetal) y el ruido e interferencia (ambiental, electrónico o por movimiento; con intensidades variables e impredecibles). Esta información se detecta simultáneamente con los electrodos o micrófonos abdominales, produciendo mezclas que en el párrafo anterior fueron mencionadas como ECGa y FCGa (respectivamente) y que se ilustran en la figura 3.

Obsérvese que el ECGa en (a) presenta dos picos de amplitud alta etiquetados como M y F, indicando que corresponden respecti-

vamente a la despolarización rítmica del corazón materno y del fetal (latiendo con diferente frecuencia). Adicionalmente, puede notarse que los dos picos de mayor amplitud están marcados como M+F, indicando que en ese instante particular la despolarización materna coincidió con la fetal, ocultando a la segunda por completo e imposibilitando su visualización en esos dos casos. Ahora obsérvese (b), y nótese que el problema se vuelve más evidente, puesto que el FCGa obtenido está contaminado fuertemente por fuentes no fetales con intensidad acústica tan alta que ocultaron por completo al FCGf, haciendo imposible la visualización de la información cardíaca fetal, incluso para el ojo experto.

Ante esta realidad surge el siguiente reto para un profesional en ingeniería biomédica interesado(a) en contribuir en el seguimiento del bienestar fetal durante el embarazo: Dado un registro inocuo de ECGa o FCGa como el de la figura 3, ¿será posible medir la FCf de manera continua?. La respuesta es sí, pero primero se tiene que

separar a la componente cardíaca fetal presente en el ECGa o el FCGa, lo que en el LIFFPer se ha hecho mediante una técnica de procesamiento digital de señales conocida como Análisis por Componentes Independientes (ICA, por sus siglas en inglés).

Los fundamentos matemáticos de ICA no serán tratados en este artículo, y lo único que el lector(a) debe mantener en mente es que ICA es una herramienta computacional que, basada en estadística de orden alto (kurtosis y no-Gaussianidad), se desarrolló para trabajar con mezclas con el propósito específico de recuperar sus fuentes constitutivas, resolviendo así lo que la literatura denomina “el problema de separación ciega de fuentes” (DeLorme). Así, en el reto planteado, las mezclas en cuestión serán los ECGas (o los FCGas), las fuentes constitutivas serán el ECGf (o el FCGf), las fuentes maternas y el ruido e interferencia; y la herramienta de separación será ICA.

La figura 4 muestra los resultados obtenidos en el LIFFPer ante el reto de extraer el ECGf a partir del ECGa (Jiménez-González y Castaneda-Villa, 2020). En (a), se presentan los ECGas registrados con un equipo de cuatro canales (indicados como canal 1, canal 2, canal 3 y canal 4), y en (b) se ilustra el ECGf extraído con ICA de cada canal. Como puede verse, ICA fue capaz de recuperar la información cardíaca fetal en cada canal, incluso en aquellos casos donde se presentó el traslape M+F, lo que permite medir la FCf de manera continua a partir del registro abdominal.

La figura 5 muestra los resultados obtenidos en el LIFFPer ante el reto de extraer el FCGf a partir del FCGa (Jiménez-González & James, 2013). En (a), se presenta el FCGa registrado con un equipo de un

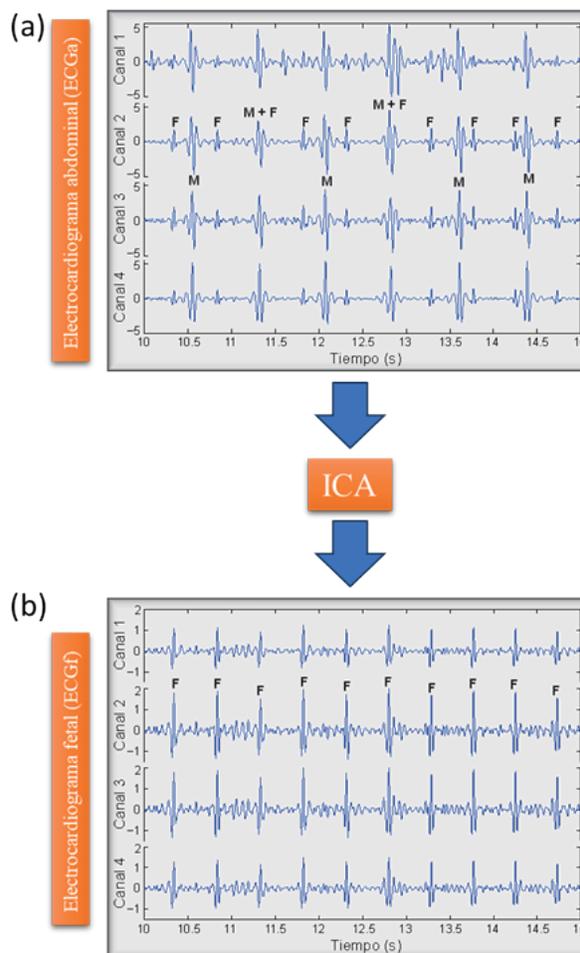


Figura 4. Extracción del ECGf a partir del ECGa mediante ICA. (a) ECGas registrados durante el embarazo utilizando un equipo de cuatro canales y (b) ECGfs extraídos de cada canal abdominal mediante ICA. F denota la actividad cardíaca fetal y M la actividad cardíaca materna, mientras que M+F indica que los eventos materno y fetal coincidieron en ese instante. Las unidades en el eje Y son volts.

canal y, en (b), se ilustra el FCGf extraído con ICA. Adicionalmente, y con fines ilustrativos, se presentan las fuentes indeseables (c) de origen cardíaco materno, (d) por movimiento del micrófono durante la respiración materna y (e) por ruido ambiental, todas separadas por esta he-

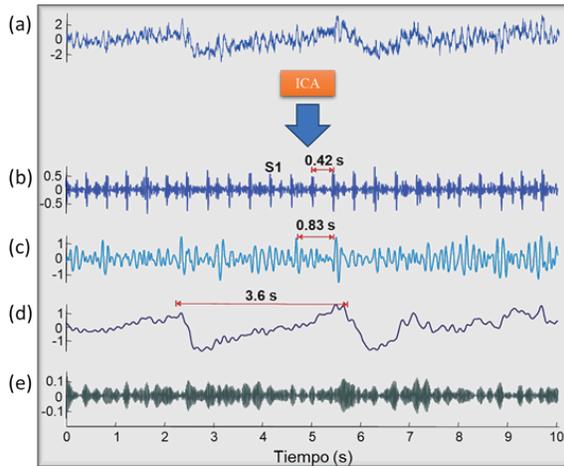


Figura 5. Extracción del FCGf a partir del FCGa mediante ICA. (a) FCGa registrado durante el embarazo utilizando un equipo de un canal y (b) FCGf extraído mediante ICA. Adicionalmente, las fuentes indeseables (c) cardíaca materna, (d) por movimiento del micrófono durante la respiración materna y (e) por ruido ambiental. S1 denota la actividad cardíaca fetal (primer sonido cardíaco). Las unidades en el eje Y son volts.

ramienta computacional. Como puede verse, ICA fue capaz de extraer al FCGf, lo que permite medir la FCf de manera continua a partir del registro abdominal.

La figura 6 muestra los resultados obtenidos al medir de manera continua la FCf a partir del (a) ECGf y del (b) FCGf extraídos por ICA en sujetos diferentes. En (a), arriba, se presenta el trazo de referencia (también conocido como patrón o “estándar de oro”) de la FCf latido a latido, mientras que abajo se ilustra el trazo medido en el LIFFPer a partir de uno de los ECGfs extraídos por ICA e ilustrados en la figura 4. Nótese que en este ejemplo la medición de la FCf se realizó durante 5 minutos continuos y que la morfología y valores en el trazo medido son similares a los del trazo de referencia. Esto último indica que

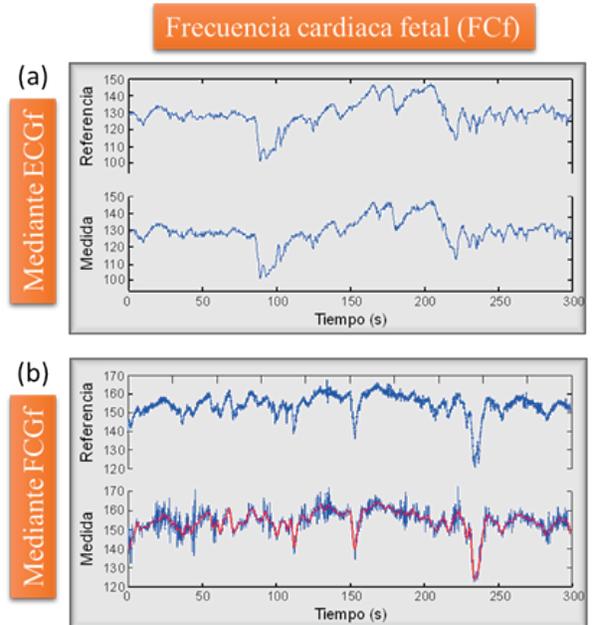


Figura 6. Medición continua de la FCf a partir del (a) ECGf y del (b) FCGf extraídos por ICA en sujetos diferentes. En (a), arriba, el trazo de referencia de la FCf latido a latido y, abajo, el trazo medido en el LIFFPer a partir de un ECGf extraído por ICA. En (b), arriba, el trazo de referencia de la FCf latido a latido y, abajo, en color azul el trazo medido a partir de un FCGf extraído por ICA. El trazo rojo corresponde a una versión suavizada del trazo azul. Las unidades en el eje Y son latidos / minuto.

se puede confiar en las mediciones obtenidas a partir de los ECGf extraídos por ICA del ECGa. Por su parte, en (b), arriba, se observa el trazo de referencia de la FCf latido a latido, mientras que abajo en color azul, se ilustra el trazo medido en el LIFFPer a partir del FCGf extraído por ICA e ilustrado en la figura 4. Obsérvese que en este ejemplo, el trazo medido (en color azul) presenta variaciones rápidas que no se encuentran en el trazo patrón, así que hay errores en la medición latido a latido. Afortunadamente, estas variaciones pueden reducirse al suavizar la FCf medi-

da para producir el trazo en color rojo, que se parece mucho a la FCf de referencia e indica que la medición de la FCf a partir del FCGf también es posible.

El paso final sería presentarle estos trazos al médico especialista como información complementaria para apoyarlo en la evaluación y diagnóstico de la condición fetal durante el embarazo, siempre con el propósito de coadyuvar a la identificación temprana de fetos con problemas de oxigenación y mediante el uso de estrategias y herramientas alternativas que no representen ningún tipo de riesgo para el binomio feto-madre. Por supuesto, la ingeniería biomédica puede seguir colaborando y proceder al análisis automatizado del trazo de la FCf para buscar patrones que alerten al especialista médico en caso de anomalías, pero es material para otro artículo.

Conclusión

La identificación temprana de fetos con problemas de oxigenación durante el embarazo es un problema mundial y es una tarea que corresponde del médico especialista. En este sentido, el profesional en ingeniería biomédica puede participar en la búsqueda de soluciones y ayudar al médico, esto al incorporar alternativas que, basadas en tecnologías inocuas y herramientas computacionales, faciliten el seguimiento continuo de la FCf durante el embarazo. En el caso del LIFFPer, esto se hace mediante el registro y procesamiento digital del ECGa y del FCGa, lo que ha permitido recuperar señales que contienen la información fetal de interés y medir la FCf. Esta FCf es un indicador significativo para el seguimiento del bienestar fetal, y su monitoreo continuo puede ofrecer información complementa-

ria al esquema clínico tradicional para la identificación de fetos en riesgo.

Referencias

Barnett, S.B. Intracranial temperature elevation from diagnostic ultrasound. *Ultrasound in medicine & Biology*, 27(7), pp. 883-888, 2001.

Comunicación Social INEGI. *Estadísticas de Defunciones Fetales (EDF)*, 2022 (última consulta el 28 de junio de 2024).

DeLorme, A. *Infomax Independent Component Analysis for dummies* https://ar-nauddelorme.com/ica_for_dummies/ (última consulta el 28 de junio de 2024).

Godoy Villamil, P.C., Acuña Pradilla, C., Caicedo Goyeneche, A.P., Rosas Pabón, D. y Paba Rojas, S.P. Monitoreo fetal: principios fisiopatológicos y actualizaciones, *Archivos de Ginecología y Obstetricia*, 60(1), pp. 47-70, 2022.

Hyvärinen, A. Independent component analysis: recent advances, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1984), 20110534, pp. 1-19, 2013.

Jiménez-Gonzalez, A. & James, C.J. Blind separation of multiple physiological sources from a single-channel recording: a preprocessing approach for antenatal surveillance. En *IX International Seminar on Medical Information Processing and Analysis*, 8922, pp. 101-111, 2013.

Jiménez-González, A. & Castaneda-Villa, N. Blind extraction of fetal and maternal components from the abdominal electrocardiogram: An ICA implementation for low-dimensional recordings, *Biome-*

dical Signal Processing and Control, 58, 101836, pp. 1-14, 2020.

Murguía de Sierra, M. T., Lozano, R., y Santos, J. I. Mortalidad perinatal por asfixia en México: problema prioritario de salud pública por resolver, *Boletín médico*

del Hospital Infantil de México, 62(5), pp. 375-383, 2005.

Sundström, A. K., Rosén, D., y Rosén, K. G. *Control del bienestar fetal*. Neoventa Medical, pp. 1-40, 2000.