

Análisis tiempo-frecuencia, funciones de forma de onda y métodos en espacio de estados: teoría y aplicaciones biomédicas

Marcelo A. Colominas; Gabriel A. Alzamendi; Juan F. Restrepo Rinckoar, Gastón Schlotthauer, Juan M. Miramont, Ramiro Casal; Joaquín V. Ruiz; Iván A. Zalazar

Autores: Laboratorio de señales y dinámicas no lineales (LSyDnL). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos. Ruta 11 Km. 10, Oro Verde, Entre Ríos. Argentina.

Contacto: marcelo.colominas@uner.edu.ar

ARK: <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s22504559/iwix3dbms>

Resumen

El presente proyecto se centra en el análisis de señales biomédicas de interés y su aplicación al estudio de los procesos fisiológicos que generaron esas señales. El análisis de señales biomédicas es una tarea ampliamente difundida. Antes costosa, debido a limitaciones en la capacidad de cómputo y de almacenamiento, hoy en día puede realizarse en diversos dispositivos tecnológicos de uso frecuente en lo cotidiano y en la clínica, muchos de ellos incluso diseñados para ser portables y realizar el procesamiento de forma remota o en la nube. Los objetivos que se persiguen en esta disciplina son diversos, y van desde un simple acondicionamiento de la señal hasta la extracción de métricas útiles para apoyo al diagnóstico o para la predicción de procesos. Dentro del gran área del procesamiento de señales, proponemos en particular explorar tres líneas temáticas: análisis tiempo-frecuencia y tiempo-escala; descomposición de señales y formas de onda; y métodos en espacio de estados y estimación Bayesiana. Para cada línea, pretendemos contribuir al desarrollo teórico y algorítmico de ellas, y explorar aplicaciones en problemas concretos de la bioingeniería y la biomedicina.

Palabras clave: análisis tiempo-frecuencia; aplicaciones biomédicas; funciones de forma de onda; métodos en espacio de estados

Objetivos Propuestos y Cumplidos

Objetivos generales

Los objetivos generales de este proyecto son los siguientes:

1. Contribuir al desarrollo teórico en las disciplinas del análisis tiempo-frecuencia, la teoría de funciones de forma de onda, y los métodos en espacio de estados.
2. Aplicar dichos desarrollos a la solución de problemas de diferentes ámbitos, prestando especial atención a la bioingeniería y la biomedicina.
3. Consolidar el desarrollo de grupos interdisciplinarios, tanto a nivel nacional como internacional en las líneas que motivan el proyecto, y formar recursos humanos en el área de procesamiento de señales.

Objetivos específicos

Consideraremos los siguientes objetivos específicos:

1. *Análisis de los operadores de reassignment en condiciones ruidosas*: A pesar de su éxito, las técnicas de reassignment (así como cualquier herramienta de procesamiento de señales) son sensibles al ruido. Aún no está del todo claro el rol del ruido complejo en los operadores de reassignment. Esperamos poder arrojar algo de luz en este asunto tan importante, y esperamos poder desarrollar técnicas de reassignment más robustas.
2. *Mejora en las técnicas de detección de crestas y aplicación en estimación de frecuencias instantáneas*: La detección de las crestas que una señal multicomponente genera en el plano tiempo-frecuencia/escala es un asunto que está lejos de haberse cerrado. Las situaciones con presencia de ruido y componentes transitorios deben estudiarse con mayor profundidad. Pretendemos aquí continuar con los trabajos comenzados en [77, 78].
3. *Estudio y aplicación de la Scattering Transform*: Un enfoque, que podríamos denominar “determinístico”, para el aprendizaje profundo (*Deep learning* [79]) es aquél propuesto por S. Mallat con su scattering transform [80]. Sobre la base de una representación tiempo-escala (transformada ondita continua con eje diádico en las escalas), se van obteniendo características útiles para la clasificación de señales. Indagaremos en esta técnica, implementando los códigos necesarios, y aplicándolos a problemas biomédicos.
4. *Análisis teórico de EMD y el modelo de funciones de forma de onda*: El modelo (2) merece más atención, y por ello exploraremos posibles modificaciones que reflejen de mejor manera la naturaleza de las señales biomédicas. Algunas modificaciones ya están siendo discutidas [81], pero aún necesitan de cierto refinamiento. Desde un punto de vista puramente teórico, discutiremos las conexiones con EMD. Como ya fuera planteado por Flandrin [30], los resultados obtenidos mediante EMD son algo más complejos que oscilaciones circulares. El modelo propuesto por Hau-Tieng Wu [3] puede perfectamente incluir los resultados de EMD, y trataremos de formalizarlo.
5. *Estudio y aplicación de modelos en espacio de estados jerárquicos*: en la práctica al momento de formular o implementar un modelo en espacio de estados suelen descuidarse fenómenos asociados a periodicidades/fluctua-

ciones, cambios abruptos de dinámica, ocurrencia de eventos poco probables, o fenómenos que se aprecian a diferentes escalas. Poder modelar mejor estos aspectos sería de gran utilidad tanto para comprender mejor las causas y efectos, como para extraer información más precisa a partir de los modelos. Consideramos que los modelos en espacio de estados con niveles de jerarquía permitirán avanzar en esta línea.

6. *Resolución de problemas inversos aplicando modelos con alternancia de estados*: En diferentes fenómenos físicos, es posible definir condiciones discretas de funcionamiento que van alternándose de manera predecible a lo largo del tiempo. Ejemplos de este comportamiento se pueden encontrar en la fonación humana. La actividad vocal fluctúa entre estados de apertura y cierre de la glotis, lo que repercute a su vez en la periodicidad de señales de interés clínico como la onda de voz, de flujo aire glótico, y la aceleración de la piel del cuello. Poder modelar la alternancia de estados permitirá mejorar las técnicas de resolución de problemas inversos, en particular en las aplicaciones relacionadas con la estimación de la función glótica y la obtención no invasiva de parámetros laríngeos.
7. *Modelado basado en agentes distribuidos interconectados*: El uso de sistemas multiagente ha tenido un impacto notable en tareas de predicción, control o detección de fallas. El objetivo es tener un conjunto de subsistemas específicos distribuidos in situ que estén acoplados entre sí y con un sistema central, de forma tal de contar con información diversa para conocer el estado del sistema completo o para ayudar a la toma de decisión. Estas ideas pueden ser encontrar muchas aplicaciones en la bioingeniería, donde el objeto de estudio es el cuerpo humano que se caracteriza a partir de las diversas interacciones entre los diferentes sistemas y órganos que lo componen, y donde se busca a su vez aprovechar la interacción entre el cuerpo humano y diferentes dispositivos externos para el desarrollo de tecnología de uso clínico.
8. *Aplicaciones biomédicas*: es nuestra intención aplicar todos los desarrollos a problemas biomédicos. Para ello, descansaremos en la vasta trayectoria del LSyDnL en el área. Esperamos para este objetivo trabajar conjuntamente con investigadores internacionales, aplicando nuestros desarrollos en los problemas en los cuales ellos realizan su trabajo. Específicamente, esperamos colaborar con la Dra. Anne Humeau-Heurtier, de la Universidad de Angers (Francia), en señales de electroencefalografía procedentes de pacientes con epilepsia (continuando con la colaboración [82, 83]). Con el Dr. Hau-Tieng Wu, de la Universidad Duke (Estados Unidos) en señales multiparamétricas de pacientes quirúrgicos bajo anestesia. Con el Dr. Matías Zañartu, de la Universidad Técnica Federico Santa María (Chile) en el modelado específico para un paciente basado en registros multimodal simultáneos de señales de voz, de aceleración de piel en cuello, y de videolaringscopia de alta velocidad, entre otras. Con el Dr. Víctor Espinoza, de la Universidad de Chile (Chile), en el desarrollo de técnicas de filtrado inverso para la estimación del flujo de aire glotal a partir de señales de voz o de aceleración de piel del cuello.

Como podrá observarse en las publicaciones logradas en este proyecto, los objetivos generales y específicos han sido alcanzados.

Marco teórico y metodológico

Análisis tiempo-frecuencia y tiempo-escala

Como modelo general tomaremos a las *señales multicomponentes*. Ellas se componen de un número relativamente pequeño de componentes cuyas frecuencias instantáneas son únicas, y sirven de modelo a un gran número de señales del mundo real, como las señales de audio [1, 2], señales biológicas [3, 4], o series de datos económicos [5]. *Analizar* tales señales consiste en resolver un problema de la siguiente forma: dada una señal multicomponente que se puede escribir como

$$x(t) = \sum_{k=1}^K x_k(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t) \cos(2\pi\phi_k(t)), \quad A_k(t), \phi'_k(t) > 0 \forall t, \quad (1)$$

estimar $A_k(t)$ y $\phi'_k(t)$ y/o describir sus propiedades. En este caso, las variaciones temporales de $A_k(t)$ y $\phi'_k(t)$ son muchos menores que las de $\phi_k(t)$, lo cual de forma más precisa quiere decir que $|A'_k(t)|, |\phi''_k(t)| \ll \phi'_k(t)$. Esencialmente, cada componente es una señal modulada tanto en frecuencia como en amplitud (AM-FM); como $|A'_k(t)|, |\phi''_k(t)| \ll \phi'_k(t)$ entonces puede considerarse localmente (en un intervalo $[t - \delta, t + \delta]$, con $\delta \approx (\phi'_k(t))^{-1}$ a los componentes $x_k(t)$ como señales armónicas con amplitud $A_k(t)$ y frecuencia $\phi'_k(t)$ [6].

El razonamiento detrás de un modelo como el de la ecuación (1) es poder codificar no estacionariedades de manera compacta a través de variaciones temporales de las amplitudes y frecuencias de modos “tipo Fourier”. Cada componente, o simplemente modo, $x_k(t)$ es una señal AM-FM, para la cual su frecuencia instantánea se define como la tasa de cambio del argumento de la función coseno [7, 8].

Una forma de analizar estas señales es mediante las llamadas representaciones tiempo-frecuencia o tiempo-escala [1]. Cada componente de la señal genera una “cresta” [9, 10] en la representación, la cual puede ser detectada logrando una estimación de su frecuencia instantánea, y evaluando la representación a lo largo de la cresta se obtiene una estimación de la amplitud instantánea, logrando así los objetivos del análisis de estas señales. Estimar la frecuencia instantánea es vital en el estudio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) [11, 12, 13], y en el estudio de voces patológicas [14]. Sin embargo, estas estimaciones suelen ser interpolaciones polinomiales de series temporales con muestreo no uniforme (con el consiguiente artefacto introducido por la interpolación) en el caso de la VFC o estimaciones constantes a trozos (como en el caso del software Praat [15]) para voces patológicas, siendo de una calidad inferior a aquellas ofrecidas por las representaciones tiempo-frecuencia. Resultados preliminares nuestros muestran evidencia de lo mencionado [16].

Sin embargo, el principio de incertidumbre [7] genera ciertas dificultades cuando queremos leer la representación, “difuminando” la información TF. La reasignación de los coeficientes TF demostró ser una buena manera de lidiar con este problema, mejorando notablemente la legibilidad de la representación [17]. Una forma particular

de *reassignment*, llamada *synchrosqueezing* [6,18] demostró ser muy exitosa en la comunidad del procesamiento de señales, mejorando la legibilidad de la representación y manteniéndola invertible al mismo tiempo [17,19]. Ahora se encuentran disponibles versiones de *synchrosqueezing* de alto orden, que ofrecen mejores resultados [20,21]. Estas versiones de alto orden incluso pueden ser usadas para “ayudar” a los algoritmos de detección de crestas (recordemos que constituyen estimaciones de las frecuencias instantáneas), como lo demuestran resultados nuestros publicados en [22].

Descomposición de señales y funciones de forma de onda

Podemos decir, sin embargo, que analizar algo también es descomponerlo. Además de las frecuencias y amplitudes instantáneas de cada componente, suele ser de utilidad la obtención de los componentes mismos en el dominio temporal ($x_k(t)$; $k = 1, 2, \dots, K$). Esta tarea, denominada comúnmente “recuperación de modos de una señal multicomponente”, atrajo recientemente la atención de una parte de la comunidad científica de procesamiento de señales [19, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. La estrategia basada en una representación tiempo-frecuencia o tiempo-escala consiste en identificar las crestas presentes en ella y “antitransformar” la representación en un dominio acotado que contenga a la cresta [10, 6]. Aplicaciones de este tipo de descomposiciones son las tareas de detrending, donde se remueven tendencias de baja frecuencia, denoising, o limpieza de ruido, y extracción de componentes específicos de la señal relacionados a procesos fisiológicos particulares.

El modelo multicomponente de la ecuación (1) no es el único existente para la representación de este tipo de señales. En trabajos recientes [3, 4] se propone una señal multicomponente más general, de la forma

$$x(t) = \sum_{k=1}^K x_k(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t) s_k(2\pi\phi_k(t)), \quad A_k(t), \phi_k'(t) > 0 \forall t, \quad (2)$$

donde la función coseno es reemplazada por oscilaciones más generales $s_k(t)$, periódicas de período 2π , con representación en serie de Fourier $s(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \hat{s}_k(n) e^{int}$. Este nivel extra de generalidad permite representar de una mejor manera la naturaleza no lineal de los sistemas que generan las señales analizadas [30]. Sin embargo también trae aparejado un nivel extra de dificultad: a la estimación de las frecuencias y amplitud instantáneas se suma la estimación de las forma de onda (en inglés *wave-shape functions*) $s_k(t)$. En la práctica, las forma de onda se estima con un enfoque de mínimos cuadrados, fijando de antemano la cantidad de armónicos que tiene [31]. La búsqueda de un método objetivo para determinar la cantidad óptima de armónicos fue motivo de un trabajo nuestro con resultados promisorios [32]. Las aplicaciones que se derivan de la estimación de la forma de onda de una señal biomédica son importantes. Entre ellas podemos mencionar el análisis de voces [33], y los sintetizadores de voces (patentes [34, 35]), entre otras. Resultados teóricos nuestros en colaboración con el “padre” de la teoría de funciones de forma de onda, el Dr. Hau-Tieng Wu, y que incluyen como ejemplos a señales de fotopletimografía e neumografía por impedancia, pueden encontrarse en [36].

Otro enfoque para descomponer señales es el de la descomposición empírica en modos (EMD, del inglés Empirical Mode Decomposition) [37]. Esta técnica, completamente guiada por los datos, separa una señal en oscilaciones localmente rápidas y lentas. Al final, la señal original se expresa como la suma de una cantidad pequeña de modos, que en ciertos casos pueden representarse como funciones AM-FM. La EMD, sin embargo, posee una limitación importante: se la define como la salida de un algoritmo y no posee bases teóricas sólidas. Por nuestra parte hemos propuesto nuestra propia versión de EMD como la solución a un problema de optimización sin restricciones [38], la cual evaluamos en señales artificiales y reales, y al comparar nuestros resultados con otros métodos de EMD basados en optimización se evidencian ventajas tanto tiempo de cómputo como en desempeño. Dicha propuesta permite una extensión a dos dimensiones de manera natural y sin mayores dificultades que puede encontrarse en [39]. Evaluamos esta extensión bidimensional en imágenes artificiales y reales, comparando nuestros resultados con aquellos métodos similares del estado del arte. Los resultados muestran en todos los casos ventajas para nuestra propuesta. Las variaciones de EMD asistidas por ruido, donde lo que se descompone es una mezcla de la señal de interés más un ruido particular, se han aplicado en muy diversos campos. Nuestros aportes en dicha área pueden encontrarse en [40, 41, 42, 43].

Métodos en espacio de estados y estimación Bayesiana

Se denominan métodos en espacio de estados a aquellas técnicas comprendidas por la teoría del filtrado estocástico guiado por modelos en espacio de estados. Estos métodos han despertado un gran interés en la comunidad científica en diversas áreas, entre las que se incluyen las ingenierías y la medicina, y han demostrado ser de suma utilidad en tareas como seguimiento, control, análisis, predicción y detección de fallas, entre otras [44, 45, 46, 47]. Esto se debe a que permiten combinar la teoría de filtrado estocástico y estimación Bayesiana con la formulación de modelos matemáticos, dando lugar a herramientas muy potentes para el estudio de procesos reales. Se propone aquí investigar métodos en espacio de estados aplicables al estudio de procesos de interés en bioingeniería.

El filtrado estocástico consiste en estimar la información estadística de una señal o un proceso de interés, de forma óptima, a partir de un modelo matemático del fenómeno y de un conjunto de mediciones (observaciones) [46, 47]. De esta forma se centra la atención en la dinámica temporal, las diversas interacciones y la incerteza/aleatoriedad asociada a todo proceso. La estimación se basa en una dependencia funcional (modelo) entre la información que se quiere estimar y las observaciones. Para el caso de procesos no lineales, la dinámica del proceso para cada instante n se describe matemáticamente a partir de un modelo en espacio de estados [44, 45]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[n+1] &= \mathbf{A}(n, \mathbf{x}[n]) + \mathbf{F}(n, \mathbf{u}[n]) + \mathbf{w}[n] \\ \mathbf{z}[n] &= \mathbf{H}(n, \mathbf{x}[n]) + \mathbf{v}[n] \end{aligned} \quad (3)$$

donde $\mathbf{x}[n] \in \mathbb{R}^p$ es el vector de estados latentes que caracteriza el proceso, $\mathbf{u}[n] \in \mathbb{R}^u$ agrupa los estímulos (entradas) conocidos, y $\mathbf{z}[n] \in \mathbb{R}^r$ representa las señales (observaciones) ruidosas del fenómeno. A su vez, $\mathbf{w}[n] \in \mathbb{R}^r$ y $\mathbf{v}[n] \in \mathbb{R}^q$ son procesos aleato-

rios que modelan los errores/incertezas de estados y de observación, respectivamente. En la definición anterior, la primera ecuación gobierna la transición entre los estados del sistema, donde A y F son las funciones de transición de estados y de excitación, respectivamente; y la segunda ecuación explica la ocurrencia de una observación a partir de cada estado no observable, siendo H son la función de observación. Para el caso particular de modelos lineales estacionarios, la formulación se simplifica considerablemente. Luego, aplicando el formalismo Bayesiano se obtienen una variedad de técnicas muy potentes (el filtro de Kalman, su versión extendida a procesos no lineales, diferentes técnicas de suavizado, el filtro *unscented*, y el filtro de partículas, entre otras) que permiten calcular información estadística de las variables latentes y los parámetros de interés [44, 45].

Actualmente, los métodos en espacio de estados han despertado gran interés en aplicaciones ligadas al procesamiento de señales biomédicas y al modelado de procesos fisiológicos, en especial en tareas de sensado virtual no invasivo de variables clínicas, obtención de modelos específicos para pacientes, fusión de señales y datos multiparamétricos, observaciones de sistemas o agentes distribuidos, y detección de eventos críticos, entre otros. En la bibliografía podemos encontrar una gran variedad de ejemplos considerando diferentes señales biomédicas [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55], lo que permite apreciar la potencialidad y la versatilidad de estas técnicas.

En particular, nuestros aportes en esta temática han estado fuertemente ligados a investigar la fonación humana y sus señales relacionadas. Esta metodología ha permitido estudiar las perturbaciones asociadas al período y la amplitud de emisiones de vocales sostenidas y así aportar información relevante de aspectos clínicos y perceptuales. Nuestros primeros aportes en esta línea incluyeron la caracterización de las perturbaciones en señales de voz normales y patológicas a partir del análisis multifractal basado en Onditas Líderes [56], y una estrategia de síntesis de vocales sostenidas con perturbaciones estocásticas en el período y amplitud [57]. Posteriormente, se desarrolló una técnica de análisis de la dinámica de las perturbaciones en estructuras simples con una interpretación clínica directa aplicable a voces sanas y patológicas [58, 59, 60]. Actualmente, se continúa investigando en estas líneas innovando en diferentes estructuras que aporten información más descriptiva para la clínica o en alternativas para la mejor sintonización de los modelos a partir de señales reales [46, 61, 62], y proyectamos incorporar medidas de complejidad desarrolladas a partir de la teoría de la información [63, 64].

Por otro lado, hemos abordado la problemática de evaluar la función laríngea de forma no invasiva mediante la estimación y análisis de la función glótica [65, 66]. Se desarrolló un modelo en espacio de estados de la fonación para sonidos sonoros que busca subsanar las limitaciones de los métodos clásicos haciendo uso de modelos en espacio de estados y así modelar mejor los procesos no estacionarios contaminados con ruido aditivo que ocurren en la laringe [67, 68]. Se propuso también un modelo alternativo de la función glótica formulado a partir de ecuaciones en diferencias estocásticas [67, 69] capaz de capturar la dinámica característica y las aperiodicidades que se imprimen en el flujo de aire glótico debido a la vibración de las cuerdas vocales. Más recientemente, se propuso un método de estimación Bayesiana de la función glótica a partir de la señal de aceleración de la piel del cuello con el propósito de obtener esta información en dispositivos portables para el monitoreo de larga duración de la fun-

ción laríngea [70, 71]. Paralelamente, hemos explorado el uso de la estimación Bayesiana y el modelado no lineal en espacio de estados para el sensado no invasivo de la activación de la musculatura laríngea, la presión subglótica y la presión de contacto en la cuerdas vocales a partir de imágenes de videolaringscopia de alta velocidad y señales multimodales de la fonación grabadas simultáneamente [72, 73]. Aun cuando los resultados obtenidos con estas técnicas han sido promisorios, la experiencia prueba la necesidad de modelos fisiológicos capaces de representar mejor la dinámica de las principales estructuras laríngeas, la interacción entre los procesos físicos que ocurren a nivel glótico y el acople acústico del tracto vocal [74, 75, 76], tareas que forman parte de la presente propuesta.

Síntesis de resultados y conclusiones

Los resultados de la investigación durante el proyecto, que fructificaron en artículos científicos publicados, incluyen:

- Siguiendo la línea de funciones de forma de onda, y a partir de discusiones con Hau-Tieng Wu, se estudiaron métodos objetivos para la estimación de parámetros del modelo de forma de onda fija, y se propuso un nuevo modelo que contemple variaciones temporales en las formas de onda. Estos trabajos se enmarcan en la tesis doctoral de Joaquín Ruiz. Se lograron las publicaciones a.1, a.11, y c.1.
- En estrecha colaboración con Hau-Tieng Wu se propusieron modelos donde la forma de onda varía suavemente a lo largo del tiempo, y de manera abrupta. Se ilustraron aplicaciones con señales biomédicas. Los resultados pueden verse en las publicaciones a.3 y a.7.
- De la colaboración con Sylvain Meignen, en la cual nos abocamos al estudio de los operadores de synchrosqueezing bajo condiciones ruidosas y en situaciones de interferencia entre modos, resultaron las publicaciones a.4, a.8, y a.10.
- De los trabajos enmarcados en la tesis de doctoral de Juan Manuel Miramont, se desprende la publicación a.2, en la cual propusimos emular ciertas evaluaciones perceptuales de la voz a través de la Scattering Transform (una propuesta de S. Mallat).
- La colaboración con el equipo de Matías Zañartu resultó muy fructífera. Pueden dar fe de ello las publicaciones a.5, a.6, b.3, b.4, b.5, b.6, b.7.
- Los trabajos de la tesis doctoral de Iván Zalazar dieron como fruto las publicaciones a.13, y c.2.
- Un enfoque más teórico, donde estudiamos los ceros del espectrograma, dio como resultado un método objetivo para la clasificación de dichos ceros. Ello resulta muy útil para el filtrado de señales multicomponentes. Este resultado fue obtenido en colaboración con investigadores de la Universidad de Nantes, y la Universidad Grenoble-Alpes. Pueden verse los resultados en las publicaciones a.9 y b.2.
- La estimación de frecuencias instantáneas en señales multicomponentes fue abordada desde un punto de vista de estimación Bayesiana. Los resultados pueden verse en la publicación a.12.

- Propusimos un método automático para seleccionar adaptativamente el orden de synchrosqueezing en señales multicomponentes y lograr de esta manera una representación tiempo-frecuencia más concentrada. Ver publicación b.1.
- En colaboración con el Instituto SINC (CONICET CCT Santa Fe – UNL) y con investigadores indios del Instituto Indio de Tecnología sede Guwahati, se redactó un artículo de tipo “review” sobre aplicaciones de la descomposición empírica en modos (EMD, por sus iniciales en inglés) y sus aplicaciones a la voz y habla, y se desarrolló un método para detectar los instantes de cierre de la glotis mediante esta técnica. (ver pubs. a.1 y a.4).

Indicadores de producción

Los resultados del proyecto se han plasmado durante el período informado en:

- Trece (13) publicaciones en revistas científicas indexadas en Thomson Reuters con referato internacional y buen factor de impacto en el área.
- Siete (7) publicaciones de artículo completo en proceedings de congresos internacionales con referato;
- Una (1) publicación de resúmenes en proceedings de congresos internacionales con referato;
- Una (1) tesis doctoral defendida y dos (3) en curso.

Se listan las publicaciones durante el período informado a continuación.

a) Publicaciones en revistas científicas internacionales indexadas con referato

- 1) RUIZ, Joaquin; COLOMINAS, Marcelo A. Wave-shape function model order estimation by trigonometric regression. *Signal Processing*, 2022, vol. 197, p. 108543. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108543>.
- 2) MIRAMONT, Juan Manuel; COLOMINAS, Marcelo Alejandro; SCHLOTTHAUER, Gaston. Emulating perceptual evaluation of voice using Scattering Transform based features. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2022. DOI: [10.1109/TASLP.2022.3178239](https://doi.org/10.1109/TASLP.2022.3178239).
- 3) COLOMINAS, Marcelo A.; WU, Hau-Tieng. Decomposing non-stationary signals with time-varying wave-shape functions. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, vol. 69, p. 5094-5104. DOI: [10.1109/TSP.2021.3108678](https://doi.org/10.1109/TSP.2021.3108678).
- 4) MEIGNEN, Sylvain; PHAM, Duong-Hung; COLOMINAS, Marcelo A. On the use of short-time Fourier transform and synchrosqueezing-based demodulation for the retrieval of the modes of multicomponent signals. *Signal Processing*, 2021, vol. 178, p. 107760. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2020.107760>
- 5) ALZAMENDI, Gabriel A.; PETERSON, Sean D.; ERATH, Byron D.; HILLMAN, Robert E.; ZAÑARTU, Matías. Triangular body-cover model of the vocal folds with coordinated activation of the five intrinsic laryngeal muscles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2022, vol. 151, no 1, p. 17-30. <https://doi.org/10.1121/10.0009169>
- 6) MEHTA, Daryush D.; KOBLER, James B.; ZEITELS, Steven M.; ZAÑARTU, Matías; IBARRA, Emiro J.; ALZAMENDI, Gabriel A.; MANRIQUEZ, Rodrigo; ERATH, Byron D.; PETERSON, Sean D.; PETRILLO, Robert H.; HILLMAN, Robert E. Direct Measurement and Modeling of Intraglottal, Subglottal, and Vocal Fold Collision Pressures during Phonation in an Individual with a Hemilaryngectomy. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no 16, p. 7256. <https://doi.org/10.3390/app11167256>

- 7) COLOMINAS, Marcelo A.; WU, Hau-Tieng. An iterative warping and clustering algorithm to estimate multiple wave-shape functions from a nonstationary oscillatory signal. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2023, early access. DOI: [10.1109/TSP.2023.3252883](https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3252883)
- 8) LAURENT, Nils; COLOMINAS, Marcelo A., MEIGNEN, Sylvain. On local chirp rate estimation in noisy multicomponent signal: with an application to mode reconstruction. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, vol. 70, p. 3429-3440. DOI: [10.1109/TSP.2022.3186832](https://doi.org/10.1109/TSP.2022.3186832)
- 9) MIRAMONT, Juan Manuel., AUGER, Francois, COLOMINAS, Marcelo A., LAURENT, Nils, MEIGNEN, Sylvain. Unsupervised classification of the spectrogram zeros with an application to signal detection and denoising. *Signal Processing*, 2024, 214, 109250. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2023.109250>
- 10) MEIGNEN, Sylvain, COLOMINAS, Marcelo A. A New Ridge Detector Localizing Strong Interference in Multicomponent Signals in the Time-Frequency Plane. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2023, vol. 71, p. 3413-3425. DOI: [10.1109/TSP.2023.3311513](https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3311513)
- 11) RUIZ, Joaquin, SCHLOTTHAUER, Gaston, VIGNOLO, Leandro, COLOMINAS, Marcelo A. Fully adaptive time-varying wave-shape model: Applications in biomedical signal processing. *Signal Processing*, 2024, 214, 109258. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2023.109258>
- 12) LEGROS, Quentin, FOURER, Dominique, MEIGNEN, Sylvain, COLOMINAS, Marcelo A. Instantaneous frequency and amplitude estimation in multi-component signals using an EM-based algorithm. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2024, vol. 72, p. 1130-1140. DOI: [10.1109/TSP.2024.3361713](https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3361713)
- 13) ZALAZAR, I. A., ALZAMENDI, G. A., SCHLOTTHAUER, G. Symmetric and asymmetric Gaussian weighted linear prediction for voice inverse filtering. *Speech Communication*, 2024, 159, 103057. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2024.103057>
- 14) RUIZ, J., WU, H. T., COLOMINAS, M. A. (2024). Enhancing missing data imputation of non-stationary signals with harmonic decomposition. *IEEE Transactions on Signal Processing*. DOI: [10.1109/TSP.2024.3508468](https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3508468)

b) Publicaciones de artículos completos en proceedings de congresos internacionales con referato

- 1) Colominas, M. A., Meignen, S. (2023, June). Making Synchrosqueezing Locally Adaptive in the Time-Frequency Plane. In *ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 1-5). IEEE.
- 2) Laurent, N., Meignen, S., Colominas, M. A., Miramont, J. M., Auger, F. (2023, June). A novel approach based on Voronoï cells to classify spectrogram zeros of multicomponent signals. In *ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 1-5). IEEE.
- 3) Ibarra, E. J., Alzamendi, G. A., Zañartu, M. (2023, March). Constrained extended Kalman filter for improving Bayesian inference of vocal function from laryngeal high-speed videoendoscopy. In *18th International Symposium on Medical Information Processing and Analysis* (Vol. 12567, pp. 445-452). SPIE.
- 4) Alzamendi, G., Peterson, S., Erath, B., Hillman, R., Zañartu, M. (2021). Investigating antagonistic muscle control in non-phonotraumatic vocal hyperfunction using a triangular body cover model of the vocal folds. *The 14th International Conference on Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research (AQL)*. p. 58.

- 5) Ibarra, E., Parra, J., Alzamendi, G., Cortés, J., Espinoza, V., Mehta, D., Zañartu, M. (2021). A machine learning framework for estimating subglottal pressure during running speech from glottal airflow measures. *The 14th International Conference on Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research (AQL)*. p.33.
- 6) Parra, J., Ibarra E., Alzamendi G., Cortés J., Zañartu, M. (2021). Discovering underlying physical parameters from daily phonotrauma index distributions using MonteCarlo simulations of a low-dimensional voice production model. *The 14th International Conference on Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research (AQL)*. p.10.
- 7) Ibarra, E., Parra, J., Alzamendi, G., Cortés, J., Espinoza, V., Mehta, D., Zañartu, M. (2021). Método basado en inteligencia artificial para la estimación de la función vocal usando un sensor de aceleración. *LXXVIII Congreso Chileno de Otorrinolaringología*.

c) Publicaciones de artículos completos en proceedings de congresos nacionales con referato

- 1) Ruiz, J. V., Schlotthauer, G., Colominas, M. A. (2022, September). Denoising Biomedical Signals with Wave-Shape Functions. *Congreso Argentino de Bioingeniería* (pp. 414-421).
- 2) Zalazar, I. A., Alzamendi, G. A., Schlotthauer, G. (2021, November). Gaussian-weighted voice inverse filtering: Effects of varying the attenuation window parameters on the glottal source estimation. *XIX Reunión de Trabajos en Procesamiento de la Información y Control (RPIC)*.

Enviados y en evaluación

Ruiz, J., Schlotthauer, G., Vignolo, L., Colominas, M. A. (2024). Adaptive oscillatory signal modeling with applications to automatic voice analysis. Enviado a *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*.

Bibliografía

- [1] S. Mallat, *A wavelet tour of signal processing: the sparse way*. Academic press, 2009.
- [2] R. Sharma, L. Vignolo, G. Schlotthauer, M. A. Colominas, H. L. Rufiner, and S. Prasanna, "Empirical mode decomposition for adaptive AM-FM analysis of speech: A review," *Speech Communication*, 2017.
- [3] H.-T.Wu, "Instantaneous frequency and wave shape functions (I)," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 35, no. 2, pp. 181-199, 2013.
- [4] H.-T. Wu, Y.-H. Chan, Y.-T. Lin, and Y.-H. Yeh, "Using synchrosqueezing transform to discover breathing dynamics from ECG signals," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 36, no. 2, pp. 354-359, 2014.
- [5] X. Zhang, K. K. Lai, and S.-Y. Wang, "A new approach for crude oil price analysis based on empirical modedecomposition," *Energy economics*, vol. 30, no. 3, pp. 905-918, 2008.
- [6] I. Daubechies, J. Lu, and H.-T.Wu, "Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-liketool," *Applied and computational harmonic analysis*, vol. 30, no. 2, pp. 243-261, 2011.
- [7] L. Cohen, *Time-frequency analysis*, vol. 1. Prentice hall, 1995.
- [8] P. Flandrin, *Time-frequency/time-scale analysis*, vol. 10. Academic press, 1999.

- [9] R. Carmona, W. L. Hwang, and B. Torrèsani, "Characterization of signals by the ridges of their wavelet transforms," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 45, no. 10, pp. 2586-2590, 1997.
- [10] R. Carmona, W. L. Hwang, and B. Torrèsani, "Multiridge detection and time-frequency reconstruction," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 47, no. 2, pp. 480-492, 1999.
- [11] M. Malik, J. T. Bigger, A. J. Camm, R. E. Kleiger, A. Malliani, A. J. Moss, and P. J. Schwartz, "Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use," *European heart journal*, vol. 17, no. 3, pp. 354-381, 1996.
- [12] U. R. Acharya, K. P. Joseph, N. Kannathal, L. C. Min, and J. S. Suri, "Heart rate variability," in *Advances in cardiac signal processing*, pp. 121-165, Springer, 2007.
- [13] H.-T. Wu and E. Z. Soliman, "A new approach for analysis of heart rate variability and QT variability in long-term ECG recording," *Biomedical engineering online*, vol. 17, no. 1, p. 54, 2018.
- [14] D. Talkin, "A robust algorithm for pitch tracking (RAPT)," *Speech coding and synthesis*, vol. 495, p. 518, 1995.
- [15] P. Boersma et al., "Praat, a system for doing phonetics by computer," *Glott international*, vol. 5, 2002.
- [16] J. M. Miramont, M. A. Colominas and G. Schlotthauer, "Voice-jitter estimation using high-order synchrosqueezing operators" (enviado).
- [17] F. Auger and P. Flandrin, "Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 43(5):1068-1089, 1995.
- [18] I. Daubechies and S. Maes. "A nonlinear squeezing of the continuous wavelet transform based on auditory nerve models," *Wavelets in Medicine and Biology*, pages 527-546, 1996.
- [19] S. Meignen, T. Depalle, P. Flandrin, and S. McLaughlin, "Adaptive multimode signal reconstruction from time-frequency representations," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065):20150205, 2016.
- [20] T. Oberlin, S. Meignen, and V. Perrier, "Second-order synchrosqueezing transform or invertible reassignment? Towards ideal time-frequency representations," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 63(5):1335-1344, 2015.
- [21] D.-H. Pham and S. Meignen, "High-order synchrosqueezing transform for multicomponent signals analysis-with an application to gravitational-wave signal," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65(12):3168-3178, 2017.
- [22] M. A. Colominas, D.-H. Pham and S. Meignen, "Fully Adaptive Ridge Detection Based on STFT Phase Information," *IEEE Signal Processing Letters*, 27, 620-624, 2020.
- [23] E. Brevdo, N. S. Fuckar, G. Thakur, and H.-T. Wu, "The synchrosqueezing algorithm: a robust analysis tool for signals with time-varying spectrum," *Arxiv preprint*, 2011.
- [24] S. Meignen, T. Oberlin, and S. McLaughlin, "A new algorithm for multicomponent signals analysis based on synchrosqueezing: with an application to signal sampling and denoising," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, no. 11, pp. 5787-5798, 2012.
- [25] T. Oberlin, S. Meignen, and V. Perrier, "On the mode synthesis in the synchrosqueezing method," in *2012 Proc. 20th European Signal Processing Conference (EU-SIPCO)*, pp. 1865-1869, IEEE, 2012.

- [26] F. Auger, P. Flandrin, Y.-T. Lin, S. McLaughlin, S. Meignen, T. Oberlin, and H.-T. Wu, "Time-frequency reassignment and synchrosqueezing: An overview," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 6, pp. 32-41, 2013.
- [27] P. Flandrin, "Time-frequency filtering based on spectrogram zeros," *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 22, no. 11, pp. 2137-2141, 2015.
- [28] S. Meignen, D.-H. Pham, and S. McLaughlin, "On demodulation, ridge detection, and synchrosqueezing for multicomponent signals," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 8, pp. 2093-2103, 2017.
- [29] D.-H. Pham and S. Meignen, "An adaptive computation of contour representations for mode decomposition," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 24, no. 11, pp. 1596-1600, 2017.
- [30] P. Flandrin and P. Goncalves, "Empirical mode decompositions as data-driven wavelet-like expansions," *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, vol. 2, no. 04, pp. 477-496, 2004.
- [31] H.-T. Wu, H.-K. Wu, C.-L. Wang, Y.-L. Yang, W.-H. Wu, T.-H. Tsai, and H.-H. Chang, "Modeling the pulse signal by wave-shape function and analyzing by synchrosqueezing transform," *PloS one*, vol. 11, no. 6, p. e0157135, 2016.
- [32] J. Ruiz and M. A. Colominas, "Wave-shape function model order estimation by trigonometric regression," (enviado).
- [33] D. G. Childers and C. Lee, "Vocal quality factors: Analysis, synthesis, and perception," *the Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 90, no. 5, pp. 2394-2410, 1991.
- [34] R. Kondo, "Method for synthesizing a voice waveform which includes compressing voice-element data in a fixed length scheme and expanding compressed voice-element data of voice data sections," June 2 2009. US Patent 7,542,905.
- [35] Y. Qian and F. Soong, "Synthesized singing voice waveform generator," July 12 2011. US Patent 7,977,562.
- [36] M. A. Colominas and H.-T. Wu, "Signal decomposition for time-varying wave-shape functions and its biomedical application," (enviado).
- [37] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, 454(1971), 903-995, 1998.
- [38] M. A. Colominas, G. Schlotthauer, and M. E. Torres, "An unconstrained optimization approach to empirical mode decomposition," *Digital Signal Processing*, 40, 164-175, 2015.
- [39] M. A. Colominas, A. Humeau-Heurtier, and G. Schlotthauer, "Orientation-independent empirical mode decomposition for images based on unconstrained optimization," *IEEE Transactions on Image Processing*, 25(5), 2288-2297, 2016.
- [40] M. E. Torres, M. A. Colominas, G. Schlotthauer, and P. Flandrin, "A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise," In *2011 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)* (pp. 4144-4147), 2011.
- [41] M. A. Colominas, G. Schlotthauer, M. E. Torres, and P. Flandrin, "Noise-assisted EMD methods in action," *Advances in Adaptive Data Analysis*, 4(04), 1250025, 2012.
- [42] M. A. Colominas, G. Schlotthauer, M. E. Torres, "Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing," *Biomedical Signal Processing and Control*, 14, 19-29, 2014.

- [43] M. A. Colominas, G. Schlotthauer, and M. E. Torres, "Complete Ensemble EMD and Hilbert transform for heart beat detection," In VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2014, Paraná, Argentina 29, 30 & 31 October 2014 (pp. 496-499). Springer, Cham, 2015.
- [44] B. D. O. Anderson and J. B. Moore, "Optimal Filtering," Courier Corporation, 2005.
- [45] J. V. Candy "Bayesian signal processing: classical, modern, and particle filtering methods," John Wiley & Sons, 2016.
- [46] J. J. Commandeur and S. J. Koopman, "An Introduction to State Space Time Series Analysis," Oxford University Press, Oxford, 2007.
- [47] J. Durbin and S. J. Koopman, "Time series analysis by state space methods," vol. 38. Oxford University Press, 2001.
- [48] H. Auvinen, T. Raitio, M. Airaksinen, S. Siltanen, B. H. Story, and P. Alku, "Automatic glottal inverse filtering with the Markov chain Monte Carlo method," *Computer Speech & Language*, 28(5):1139 – 1155, 2014.
- [49] M. Diaz-Cadiz, S. D. Peterson, G.E. Galindo, V. M. Espinoza, M. Motie-Shirazi, B. D. Erath, M. Zañartu, "Estimating Vocal Fold Contact Pressure from Raw Laryngeal High-Speed Videoendoscopy Using a Hertz Contact Model," *Applied Sciences-Basel*, Special issue "Computational Methods and Engineering Solutions to Voice", 9(11), pp. 2384; 2019.
- [50] P. J. Hadwin, M. Motie-Shirazi, B. D. Erath, and S. D. Peterson, "Bayesian Inference of Vocal Fold Material Properties from Glottal Area Waveforms Using a 2D Finite Element Model," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 13, p. 2735, 2019.
- [51] V. Joukov, V. Bonnet, M. Karg, G. Venture, and D. Kulić, "Rhythmic extended kalman filter for gait rehabilitation motion estimation and segmentation," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(2):407–418, 2018.
- [52] J. Oster, J. Behar, O. Sayadi, S. Nemati, A. E. W. Johnson, and G. D. Clifford, "Semisupervised ECG ventricular beat classification with novelty detection based on switching Kalman filters," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(9):2125–2134, 2015.
- [53] C. Schwartz, V. Denoël, B. Forthomme, J.-L. Croisier, and O. Brüls, "Merging multi-camera data to reduce motion analysis instrumental errors using kalman filters," *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 18(9):952–960, 2015. doi: 10.1080/10255842.2013.864640.
- [54] S. So, A. E. W. George, R. Ghosh, and K. K. Paliwal, "Kalman filter with sensitivity tuning for improved noise reduction in speech," *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 36(4):1476–1492, 2017.
- [55] A. Tsanas, M. Zañartu, M. Little, C. Fox, L. Ramig, and G. Clifford, "Robust fundamental frequency estimation in sustained vowels: Detailed algorithmic comparisons and information fusion with adaptive Kalman filtering", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 135(5), pp. 2885-2901, DOI: 10.1121/1.4870484, 2014.
- [56] R. F. Leonarduzzi, G. A. Alzamendi, G. Schlotthauer, and M. E. Torres, "Wavelet leader multifractal analysis of period and amplitude sequences from sustained vowels," *Speech Communication*, 72:1 – 12, 2015.
- [57] G. A. Alzamendi, G. Schlotthauer, H. L. Rufiner, and M. E. Torres, "Evaluation of a new model for vowels synthesis with perturbations in acoustic parameters," *Latin American Applied Research*, 43(3):225–230, 2013.

- [58] G. A. Alzamendi, G. Schlotthauer, and M. E. Torres, "A new method for structural analysis of perturbed pitch period series," In VI Latin American Conference on Biomedical Engineering (CLAIB 2014), 2014.
- [59] G. A. Alzamendi and G. Schlotthauer, "Describing voice period variability by means of time series structural analysis," In 10th International Workshop on Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications-MAVEBA 2015, pages 11–14, 2017.
- [60] G. A. Alzamendi, G. Schlotthauer, and M. E. Torres, "State-space approach to structural representation of perturbed pitch period sequences in voice signals," *Journal of Voice*, 29(6):682 – 692, 2015.
- [61] J. Duník, O. Straka, O. Kost, and J. Havlík, "Noise covariance matrices in state-space models: A survey and comparison of estimation methods-Part I," *Int. J. Adapt. Control SignalProcess.*, vol. 31, no. 11, pp. 1505–1543, 2017.
- [62] I. A. Zalazar, G. A. Alzamendi, y G. Schlotthauer, "Estudio comparativo de técnicas de extracción de fuente glótica basadas en filtrado inverso de la voz," XXII Congreso Argentino de Bioingeniería y XI Jornadas de Ingeniería Clínica (SABI 2020), Montevideo, Uruguay, 6 al 6 de marzo, 2020.
- [63] J.M. Miramont, Juan F. Restrepo, J. Codino, C. Jackson-Menaldi, G. Schlotthauer, "Voice Signal Typing Using a Pattern Recognition Approach," *Journal of Voice*, 2020. ISSN 0892-1997
- [64] J. F. Restrepo and G. Schlotthauer, "Noise-assisted estimation of attractor invariants," *Physical Review E*, 94:012212, 2016.
- [65] T. Drugman, P. Alku, A. Alwan, and B. Yegnanarayana, "Glottal source processing: From analysis to applications," *Computer Speech & Language*, 28(5):1117 – 1138, 2014.
- [66] K. Järvinen, A.-M. Laukkanen, and A. Geneid, "Voice quality in native and foreign languages investigated by inverse filtering and perceptual analyses," *Journal of Voice*, 2016.
- [67] G. A. Alzamendi, "Modelado estocástico de la fonación y señales biomédicas relacionadas: Métodos en espacio de estados aplicados al análisis estructural, al modelado de la fonación y al filtrado inverso," PhD thesis, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, junio 2016.
- [68] G. A. Alzamendi and G. Schlotthauer, "Modeling and joint estimation of glottal source and vocal tract filter by state-space methods," *Biomedical Signal Processing and Control*, 37:5 – 15, 2017.
- [69] G. A. Alzamendi, G. Schlotthauer, and M. E. Torres, "Formulation of a stochastic glottal source model inspired on deterministic Liljencrants-Fant model," In 9th International Workshop on Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications-MAVEBA 2015, pages 15–18, 2015.
- [70] J. Cortés, G. A. Alzamendi, A. Weinstein, J. Yuz, V. Espinoza, D. Mehta, J. Van Stan, R. Hillman and M. Zañartu, "Uncertainty of ambulatory airflow estimates and its effect on the classification of phonotraumatic vocal hyperfunction," The 13th International Conference on Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research (AQL2019), Montreal, Canadá, 2 al 4 de junio, 2019.

- [71] J. P. Cortés, G. A. Alzamendi, A. J. Weinstein, J. I. Yuz, V. Espinoza, D. D. Mehta, R. E. Hillman and M. Zañartu. "Kalman filter implementation of the subglottal impedance based inverse filtering scheme and its application for assessing model uncertainty," (enpreparación). 2020.
- [72] G. A. Alzamendi, S. D. Peterson, B. Erath and M. Zañartu, "On the role of simultaneous observations for a Bayesian estimation of subglottal pressure and laryngeal muscle activation," The 13th International Conference on Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research (AQL2019), Montreal, Canadá, 2 al 4 de junio, 2019.
- [73] G. A. Alzamendi, R. Manríquez, P. J. Hadwin, J. J. Deng, S. D. Peterson, B. D. Erath, D. D. Mehta, R. E. Hillman, and M. Zañartu, "Bayesian estimation of vocal function measures using laryngeal high-speed videoendoscopy and glottal airflow estimates: An in vivo case study," Journal of the Acoustical Society of America, vol 147, pp. EL434-EL439, 2020.
- [74] G. A. Alzamendi, S. D. Peterson, B. Erath and M. Zañartu, "Updated rules for constructing a triangular body-cover model of the vocal folds from intrinsic laryngeal muscle activation," The 13th International Conference on Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research (AQL2019), Montreal, Canadá, 2 al 4 de junio, 2019.
- [75] G. A. Alzamendi, S. D. Peterson, B. Erath and M. Zañartu, "Modeling modal, breathy, and pressed voice qualities: The role of intrinsic laryngeal muscle activation," The Voice Foundation 48th Annual Symposium: Care of the Professional Voice, Philadelphia, Pennsylvania, 29 de mayo al 2 de junio, 2019.
- [76] G. A. Alzamendi, S. D. Peterson, B. Erath and M. Zañartu, "Biomechanical simulation of human phonation based on the dynamic muscle control of the larynx via the coordinated activation of the five intrinsic muscles," Journal of the Acoustical Society of America, 2020. Enpreparación.
- [77] M. A. Colominas, S. Meignen, and D. H. Pham, "Time-frequency filtering based on model fitting in the time-frequency plane" IEEE Signal Processing Letters, 26(5), 660-664, 2019.
- [78] S. Meignen, D. H. Pham, and M. A. Colominas, "On the Use of Short-Time Fourier Transform and Synchrosqueezing-Based Demodulation for the Retrieval of the Modes of Multicomponent Signals," Signal Processing, 107760, 2020.
- [79] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," nature, 521(7553), 436-444, 2015.
- [80] S. Mallat, "Understanding deep convolutional networks," Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 374(2065), 20150203, 2016.
- [81] C. Y. Lin, L. Su, H. T. Wu, "Wave-shape function analysis" Journal of Fourier Analysis and Applications, 24(2), 451-505, 2018.
- [82] M. A. Colominas, M. E. S. H. Jomaa, N. Jrad, N., A. Humeau-Heurtier, and P. Van Bogaert, "Time-varying time-frequency complexity measures for epileptic EEG data analysis," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 65(8), 1681-1688, 2017.
- [83] M. A. Colominas, V. Wens, A. Mary, N. Coquelet, M. E. S. H. Jomaa, N. Jrad, A. Humeau-Heurtier and P. Van Bogaert, "Multichannel Time-Frequency Complexity Measures for the Analysis of Age-Related Changes in Neuromagnetic Resting-State Activity," IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 23(6), 2428-2434, 2019.

PID 6224 Denominación del Proyecto

Análisis tiempo-frecuencia, funciones de forma de onda y métodos en espacio de estados: teoría y aplicaciones biomédicas

Director

COLOMINAS, Marcelo Alejandro

Codirector

ALZAMENDI, Gabriel Alejandro

Unidad de Ejecución

Facultad de Ingeniería

Contacto

marcelo.colominas@uner.edu.ar

Cátedra/s, área o disciplina científica

Laboratorio de Señales y Dinámicas No Lineales (LSyDnL). Dto.de matematica e informatica.

Integrantes del proyecto

Integrantes docentes UNER: Restrepo Rincoar, Juan Felipe; Schlotthauer, Gastón; Miramont, Juan Manuel; Casal, Ramiro; Ruiz, Joaquín Victorio; Zalazar, Iván Ariel. Becario: Monti, Joaquín Horacio

Fechas de iniciación y de finalización efectivas

26/04/2021 y 25/04/2024

Aprobación del Informe Final por Resolución C.S. N° 404/24 (05-12-2024)