



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**

Unidad Iztapalapa

División de Ciencias Básicas e Ingeniería

**“Separación Ciega de Fuentes en el Dominio de la Frecuencia Para la Detección y Extracción de Estertores Crepitantes Simulados en Sonidos Pulmonares Multicanales”**

Tesis que presenta:

**I.B. Martín Emiliano Rodríguez García**

**Matrícula: 2173802010**

Para optar al grado de:

**Maestro en Ciencias (Ingeniería Biomédica)**

Asesores:

**Dra. Sonia Charleston Villalobos**

**Dr. Ramón González Camarena**

Jurados:

**Dr. Bersain Alexander Reyes**

**Dr. Ángel Tomás Aljama Corrales**

**Dra. Norma Castañeda Villa**

Iztapalapa, Ciudad de México, 14 de Julio de 2020

## DEDICATORIA

A

*Todas las personas que estuvieron, que apoyaron y que impulsaron.*

*Mis amigas potosinas en tierras chilangas, Sam y Norma.*

*Mis amigos locales, Pau, Laura, Armando y Adair.*

*Mis amigos migrantes, Alejandro, Rubén y Othoniel.*

*Mis amigos y compañeros con los que disfruté.*

*Mi compañera y amiga, Liz.*

*Mi familia que aguantó y aguantó.*

*Mis profesores, Sonia, Tomás, Jatziri, Óscar, Ramón y Juan Carlos.*

*Mi casa abierta al tiempo.*

Esto comenzó como una aventura radical y terminó con un final sereno. *Si vis pacem, para bellum.*

## CONTENIDO

RESUMEN .....	I
I. INTRODUCCIÓN .....	1
I.1 LOS SONIDOS RESPIRATORIOS: RELEVANCIA Y CARACTERÍSTICAS .....	1
I.2 LOS ESTERTORES CREPITANTES: CARACTERISTICAS Y ASOCIACION CON DIVERSAS ENFERMEDADES .....	2
I.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SONIDOS ADVENTICIOS .....	4
I.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	5
II. ANTECEDENTES .....	6
III. CONCEPTOS TEÓRICOS .....	9
III.1 EL PROBLEMA DE LA FIESTA DE COCTEL .....	9
III.2 SEPARACIÓN CIEGA DE FUENTES .....	11
III.3 ANÁLISIS POR COMPONENTES INDEPENDIENTES (ICA) .....	12
III.3.1 RESTRICCIONES EN ICA .....	13
III.3.1.1 Los CIs se asumen estadísticamente independientes .....	13
III.3.1.2 Los CIs deben tener distribuciones no-gaussianas .....	14
III.3.1.2.1 Teorema del límite central .....	16
III.3.1.3 Matriz de mezcla cuadrada .....	17
III.3.2 INDETERMINACIONES DE ICA .....	17
III.3.2.1 Indeterminación de escalamiento .....	17
III.3.2.2 Indeterminación de permutación .....	17
III.3.3 ALGORITMOS DE ICA .....	17
III.3.4 PREPROCESAMIENTO .....	18
III.3.4.1 Centrar los datos .....	18
III.3.4.2 Blanqueado o decorrelación de los datos .....	19
III.4 ANÁLISIS POR COMPONENTES INDEPENDIENTES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA .....	19
IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	23
IV.1 HIPÓTESIS .....	23
IV.2 OBJETIVOS .....	23
IV.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	23
IV.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES .....	23

<b>V. METODOLOGÍA</b> .....	25
<b>V.1 ADQUISICIÓN DE SONIDOS RESPIRATORIOS NORMALES (SRN) Y GENERACIÓN DE ESTERTORES CREPITANTES (EC) SIMULADOS</b> .....	25
<b>V.2 SIMULACIÓN DE MEZCLAS DE SRN Y EC</b> .....	26
<b>V.2.1 INSERCIÓN DE ESTERTORES CREPITANTES EN MICRÓFONOS FUENTE</b> .....	27
<b>V.2.2 INSERCIÓN DE ESTERTORES CREPITANTES EN MICRÓFONOS DE PROPAGACIÓN</b> .....	28
<b>V.3 ESCENARIOS MULTICANAL SIMULADOS</b> .....	29
<b>V.3.1 ESCENARIOS SIMULADOS</b> .....	29
<b>V.4 ALGORITMOS DE ICA EMPLEADOS PARA LA SEPARACIÓN DE FUENTES</b> .....	31
<b>V.4.1 PREPROCESAMIENTO</b> .....	33
<b>V.4.2 INFOMAX</b> .....	33
<b>V.4.3 ICA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA</b> .....	33
<b>V.4.3.1 ALGORITMO DE FICA</b> .....	33
<b>V.4.3.2 SOLUCIÓN A LAS INDETERMINACIONES DE ESCALAMIENTO Y PERMUTACIÓN</b> .....	34
<b>V.4.3.3 RECONSTRUCCIÓN DE LOS COMPONENTES INDEPENDIENTES EN EL DOMINIO TEMPORAL</b> .....	36
<b>V.4.4 ALGORITMOS DE ICA EN CASCADA</b> .....	36
<b>V.4.4.1 ESQUEMA FICA-TDSEP</b> .....	36
<b>V.4.4.2 ESQUEMA FICA-INFOMAX</b> .....	37
<b>V.5 DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE COMPONENTES INDEPENDIENTES CON ESTERTORES CREPITANTES</b> .....	37
<b>V.6 EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE FUENTES DE LOS ALGORITMOS ICA</b> .....	38
<b>VI. RESULTADOS</b> .....	39
<b>VI.1 ADQUISICIÓN DE SONIDOS RESPIRATORIOS</b> .....	39
<b>VI.2 ESTERTORES CREPITANTES SIMULADOS</b> .....	39
<b>VI.3 INSERCIÓN DE ESTERTORES CREPITANTES SIMULADOS EN SEÑALES DE SRN</b> .....	40
<b>VI.4 BSS MEDIANTE ICA, DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE EC Y DESEMPEÑO DE ALGORITMOS</b> ... 40	
<b>VI.4.1 Prueba 1 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional</b> .....	41
<b>VI.4.1.1 Fuente simulada de EC de tipo fino</b> .....	41
<b>VI.4.1.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso</b> .....	46
<b>VI.4.2 Prueba 2 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional</b> .....	48
<b>VI.4.2.1 Fuente simulada de EC de tipo fino</b> .....	48
<b>VI.4.2.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso</b> .....	53

<b>VI.4.3 Prueba 3 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional .....</b>	<b>53</b>
VI.4.3.1 Fuente simulada de EC de tipo fino .....	53
VI.4.3.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso.....	56
<b>VI.4.4 Prueba 4 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional .....</b>	<b>56</b>
VI.4.4.1 Fuente simulada de EC de tipo fino .....	56
VI.4.4.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso.....	59
<b>VI.4.5 Prueba 5 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN .....</b>	<b>59</b>
VI.4.5.1 Fuente simulada de EC de tipo fino .....	62
VI.4.5.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso.....	62
<b>VI.4.6 Prueba 6 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN .....</b>	<b>62</b>
VI.4.6.1 Fuente simulada de EC de tipo fino .....	65
VI.4.6.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso.....	65
<b>VI.4.7 Prueba 7 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN .....</b>	<b>65</b>
VI.4.7.1 Fuente simulada de EC de tipo fino .....	65
VI.4.7.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso.....	68
<b>VI.4.8 Prueba 8 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN .....</b>	<b>68</b>
VI.4.8.1 Fuente simulada de EC de tipo fino .....	68
VI.4.8.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso.....	71
<b>VI.4.9 Prueba 9 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional .....</b>	<b>71</b>
<b>VI.4.10 Prueba 10 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional .....</b>	<b>74</b>
<b>VI.4.11 Prueba 11 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional .....</b>	<b>74</b>
<b>VI.4.12 Prueba 12 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional .....</b>	<b>77</b>
<b>VI.4.13 Prueba 13 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación unidireccional .....</b>	<b>77</b>
VI.4.13.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino .....	77
VI.4.13.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....	80
<b>VI.4.14 Prueba 14 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación unidireccional .....</b>	<b>83</b>
VI.4.14.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino .....	83
VI.4.14.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....	84

<b>VI.4.15 Prueba 15 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional</b> .....	87
VI.4.15.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino .....	87
VI.4.15.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....	88
<b>VI.4.16 Prueba 16 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional</b> .....	91
VI.4.16.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino .....	91
VI.4.16.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....	92
<b>VI.4.17 Prueba 17 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional</b> .....	95
VI.4.17.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino .....	96
VI.4.17.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....	96
<b>VI.4.18 Prueba 18 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional</b> .....	99
VI.4.18.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino .....	99
VI.4.18.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....	100
<b>VI.4.19 Prueba 19 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación bidireccional</b> .....	103
VI.4.19.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino .....	103
VI.4.19.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....	104
<b>VI.4.20 Prueba 20 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación bidireccional</b> .....	107
VI.4.20.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino .....	107
VI.4.20.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....	108
<b>VII. DISCUSIÓN</b> .....	112
<b>VIII. CONCLUSIONES</b> .....	120
<b>LISTA DE NOMENCLATURA</b> .....	121
<b>REFERENCIAS</b> .....	122
<b>ANEXO A</b> .....	126
<b>A.1 Prueba 2 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional</b> .....	126
<b>A.1.1 Fuente simulada de EC de tipo fino</b> .....	126
<b>A.1.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso</b> .....	129
<b>A.2 Prueba 3 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional</b> .....	132
<b>A.2.1 Fuente simulada de EC de tipo fino</b> .....	132
<b>A.2.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso</b> .....	135

<b>A.3 Prueba 4 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional</b> .....	138
<b>A.3.1 Fuente simulada de EC de tipo fino</b> .....	138
<b>A.3.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso</b> .....	141
<b>A.4 Prueba 5 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN</b> .....	144
<b>A.4.1 Fuente simulada de EC de tipo fino</b> .....	144
<b>A.4.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso</b> .....	147
<b>A.5 Prueba 6 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN</b> .....	150
<b>A.5.1 Fuente simulada de EC de tipo fino</b> .....	150
<b>A.5.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso</b> .....	153
<b>A.6 Prueba 7 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN</b> .....	156
<b>A.6.1 Fuente simulada de EC de tipo fino</b> .....	156
<b>A.6.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso</b> .....	159
<b>A.7 Prueba 8 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN</b> .....	162
<b>A.7.1 Fuente simulada de EC de tipo fino</b> .....	162
<b>A.7.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso</b> .....	165
<b>A.8 Prueba 9 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional</b> .....	168
<b>A.9 Prueba 10 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional</b> .....	171
<b>A.10 Prueba 11 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional</b> .....	174
<b>A.11 Prueba 12 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional</b> .....	177
<b>A.12 Prueba 13 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación unidireccional</b> .....	180
<b>A.12.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino</b> .....	180
<b>A.12.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso</b> .....	183
<b>A.13 Prueba 14 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación unidireccional</b> .....	186
<b>A.13.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino</b> .....	186
<b>A.13.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso</b> .....	189
<b>A.14 Prueba 15 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional</b> .....	192
<b>A.14.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino</b> .....	192
<b>A.14.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso</b> .....	195

<b>A.15 Prueba 16 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional .....</b>	<b>198</b>
<b>A.15.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino.....</b>	<b>198</b>
<b>A.15.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....</b>	<b>201</b>
<b>A.16 Prueba 17 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional .....</b>	<b>204</b>
<b>A.16.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino.....</b>	<b>204</b>
<b>A.16.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....</b>	<b>207</b>
<b>A.17 Prueba 18 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional .....</b>	<b>210</b>
<b>A.17.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino.....</b>	<b>210</b>
<b>A.17.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....</b>	<b>213</b>
<b>A.18 Prueba 19 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación bidireccional .....</b>	<b>216</b>
<b>A.18.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino.....</b>	<b>216</b>
<b>A.18.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....</b>	<b>221</b>
<b>A.19 Prueba 20 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación bidireccional .....</b>	<b>226</b>
<b>A.19.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino.....</b>	<b>226</b>
<b>A.19.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso .....</b>	<b>232</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>237</b>
<b>B.1 Artículo de investigación publicado online en la revista “Health and Technology”, editorial “Springer” .....</b>	<b>237</b>

## RESUMEN

Los estertores crepitantes (EC) son sonidos respiratorios adventicios que indican la presencia, tipo y grado de severidad de distintas enfermedades respiratorias, por lo que la detección automática de estos sonidos es de gran importancia clínica. Recientemente, se han explorado distintas técnicas de procesamiento para la detección de EC como la separación ciega de fuentes, o *Blind Source Separation* (BSS). La BSS, empleando un modelo de mezcla instantáneo, ha mostrado ser eficiente en la recuperación de los EC. Sin embargo, este modelo de mezcla no asemeja el comportamiento de filtrado del parénquima pulmonar. Es por esto que en este trabajo de tesis se empleó la BSS bajo un modelo de mezcla convolutivo para extraer EC de tipo fino y grueso de sonido respiratorio. Se utilizaron algoritmos del análisis por componentes independientes, o *Independent Component Analysis* (ICA), para recuperar fuentes de EC en escenarios de simulación propuestos y se planteó un método basado en la curtosis, el sesgo y un conteo de máximos locales en las bandas de frecuencia adecuadas para detectar automáticamente la presencia, el tipo y el número de EC en los componentes estimados mediante ICA. Entre los algoritmos empleados se encuentra una versión de ICA en el dominio del tiempo llamado Infomax, y una versión de ICA en el dominio de la frecuencia, llamado FICA. También, se emplearon dos algoritmos de ICA en cascada conformados por FICA en la primer etapa y por los algoritmos de *Temporal Decorrelation Source Separation* (TDSEP) y de Infomax, respectivamente, en una segunda etapa. Se emplearon dos enfoques de evaluación del desempeño de los algoritmos empleados mediante el índice señal a interferencia, o *Signal to Interference Ratio* (SIR), el primero basado en la recuperación de la fuente y el segundo con base en la estimación redundante de fuentes, es decir, falsos positivos. Estos índices muestran que FICA logró una mejor eficiencia en la BSS ya que recupera adecuadamente las características morfológicas y el contenido en frecuencia de las fuentes de EC simulados (i.e., un mayor índice SIR bajo el primer enfoque de evaluación) y, a diferencia del resto de los algoritmos, FICA no obtiene falsos positivos (i.e., un menor índice SIR bajo el segundo enfoque de evaluación). Dados los resultados obtenidos, se recomienda emplear FICA en el análisis de máximo tres mezclas para lograr una recuperación de fuentes óptima.

## I. INTRODUCCIÓN

### I.1 LOS SONIDOS RESPIRATORIOS: RELEVANCIA Y CARACTERÍSTICAS

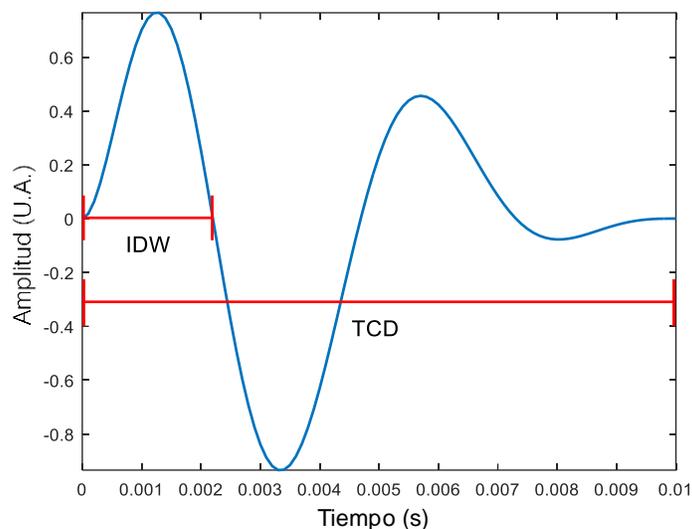
Los sonidos respiratorios (SR) son de gran importancia para el diagnóstico médico debido a que contienen información relevante acerca de la fisiología y patología de los pulmones. Los SR se pueden clasificar de diversas formas. Por ejemplo de acuerdo a su localización, los SR se dividen en dos clases: 1) los sonidos traqueales registrados sobre la parte supraesternal de la tráquea, y 2) los sonidos pulmonares (SP) registrados sobre diferentes secciones de la pared torácica tanto en la parte frontal como posterior. Se asume que los SP son producidos por turbulencias del aire a nivel bronquial. Sin embargo, en bronquios pequeños la velocidad del gas disminuye hasta ser menor que la velocidad crítica necesaria para inducir turbulencia. Por lo tanto, el flujo de aire en vías aéreas pequeñas se cree que es laminar y silencioso [1], [2]. El sonido proveniente de vías aéreas más grandes tiene un amplio espectro de frecuencia. El sonido se transmite a la superficie torácica después de viajar por los pulmones y la pared torácica, los cuales actúan como un proceso de filtrado semejante a un filtro pasa-bajas. Por tanto, los SP basales poseen una banda de frecuencia principalmente alrededor de 200 Hz y un ancho de banda de 50 a 2500 Hz, sin embargo, su energía sufre un decremento importante por encima de 250 Hz [1]–[3]. Las características de los SP no son uniformes a lo largo de los pulmones, existen por ejemplo variaciones regionales en su intensidad. Durante la fase de inspiración realizada desde el volumen residual, el sonido posee una intensidad menor en el ápex pulmonar mientras que en la base del pulmón el sonido es menos intenso al principio de la inspiración y posteriormente, la intensidad se incrementa gradualmente hasta alcanzar su nivel máximo alrededor del 50% de la capacidad vital pulmonar [2].

Otra forma de clasificar los SR es de acuerdo a la información clínica que poseen. En este sentido, existen dos clases: 1) los sonidos respiratorios normales (SRN), sonidos caracterizados por un bajo ruido durante la inspiración y que apenas son distinguibles durante la espiración[4]; y 2) los sonidos anormales, también llamados adventicios (SA) [3], [4]. Los SRN son generados por la actividad respiratoria en sujetos sanos, se diferencian según su localización en la superficie torácica, la fase del ciclo respiratorio y su amplitud varía con el cuadrado del flujo del aire [5]. Por su parte, los SA poseen características acústicas que indican la presencia, severidad y localización de alguna enfermedad en el sistema respiratorio [4]. Se considera que los SA son sonidos adicionales superpuestos en SR y los hay de tipo continuo, como las sibilancias y los ronquidos, y de tipo discontinuo, conocidos como estertores crepitantes (EC) [6].

## I.2 LOS ESTERTORES CREPITANTES: CARACTERISTICAS Y ASOCIACION CON DIVERSAS ENFERMEDADES

Los EC son sonidos de carácter explosivo y transitorio, se encuentran presentes frecuentemente en enfermedades cardiorespiratorias y clásicamente se dividen en dos tipos, estertores crepitantes finos (ECf) y estertores crepitantes gruesos (ECg) [2], [6]. Además, se ha reportado en la literatura que el estudio de los EC es de beneficio para un diagnóstico temprano y el seguimiento de la enfermedad [7]. Por ejemplo, en enfermedades pulmonares restrictivas los EC aparecen en la parte final de la inspiración mientras que en la fibrosis alveolar, los EC se encuentran principalmente en los dos primeros tercios de la inspiración [8]–[10]. En particular, en pacientes con fibrosis pulmonar los EC presentes son normalmente de tipo fino, repetitivos y se encuentran al final de la etapa inspiratoria [2]. En pacientes con asbestosis, los sonidos de EC son también de tipo fino y se han encontrado al final de la inspiración con una incidencia correlacionada con el tiempo de exposición a polvo que contiene asbesto [11]. En contraste, los sonidos de EC de tipo grueso se han encontrado en la bronquiectasia al inicio y parte media de la inspiración, mientras que en enfermedades obstructivas pulmonares crónicas se han detectado tanto en inspiración como en espiración, posiblemente debido a un cierre y apertura secuencial de bronquios proximales [2], [8]–[10], [12]. Otra enfermedad en donde también se detectan ECg son las fallas cardíacas, cerca del final de las etapas de inspiración y espiración [2], [12]. Estos estudios son una muestra de la importancia clínica en el diagnóstico de identificar tanto la presencia como el número y momento de aparición de los sonidos de EC debido a que permiten discriminar entre distintas enfermedades pulmonares y fallas cardíacas.

La clasificación en fino o grueso se basa en sus características morfológicas en el dominio del tiempo tales como el ancho de deflexión inicial, o *Initial Deflection Width* (IDW), y la duración de dos ciclos, o *Two Cycle Duration* (TCD) [2], [6]. La IDW representa la duración entre el inicio del EC y la primera deflexión. La TCD es la duración desde el inicio del EC hasta el punto en el cual la onda completó dos ciclos. Los ECf tienen IDW de 0.9 ms y TCD de 3 ms, mientras que para los ECg el IDW es de 2.2 ms y la TCD de 10 ms [3], [13]. En la **figura 1** se muestran estas características morfológicas. En general, el contenido en frecuencia del EC es amplio, desde 100 hasta 1500 Hz [5]. De acuerdo a sus respectivos parámetros IDW y TCD, los ECf tienen una banda de frecuencia principal alrededor de 660 Hz mientras que los ECg tienen su banda de frecuencia principal cercana a 200 Hz. Además, ambos tipos de EC poseen intensidades del orden de milivolts [5].



**Figura 1.** Forma de onda de un EC simulado donde se pueden observar sus características morfológicas parametrizadas por IDW y TCD (dimensiones de un ECG).

Se asume que los EC se originan a partir de la energía acústica generada por la eculización de presiones después de la súbita apertura de vías aéreas anormalmente cerradas durante la fase de inspiración o durante la parte final de la fase de espiración [2], [3]. El tipo de EC depende del diámetro de las vías aéreas que se cierran y abren, lo que a su vez depende de la patofisiología del tejido circundante; esto se ha demostrado experimentalmente, vías aéreas pequeñas producen EC de menor duración, es decir, ECf [7]. En enfermedades cardiorespiratorias donde se presentan los EC, el cierre anormal de vías aéreas pequeñas puede ser resultado de un incremento en la presión de retroceso elástico, e.g. en fibrosis pulmonar, de un endurecimiento de las vías aéreas pequeñas producido por la acumulación de fluido exudado, e.g. en falla cardiaca, o de células infiltrantes, e.g. en neumonía o alveolitis [2]. El tipo y momento de la generación del EC durante el ciclo respiratorio es indicador de la patología presente [2].

Debido a que los alveolos basales se inflan al final de la inspiración mientras que las vías aéreas basales son las primeras en cerrarse al final de la espiración y a que el cierre de vías aéreas pequeñas son dependientes de la fuerza de gravedad, los EC tienden a aparecer en las etapas tempranas de alguna enfermedad en las zonas basales de los pulmones y, conforme la enfermedad avanza, estos SA se pueden encontrar también en las zonas superiores del pulmón [2], [7]. El número de EC se encuentra asociado con el grado de severidad de la enfermedad en el paciente con desórdenes pulmonares intersticiales dado que mientras más EC se encuentren presentes, mayor será el área pulmonar afectada [2], [3], [14].

### I.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SONIDOS ADVENTICIOS

La técnica más común para la detección y el análisis de sonidos respiratorios es la auscultación usando un estetoscopio. Este dispositivo fue inventado en 1821 por Laënnec y sigue siendo la herramienta de diagnóstico más comúnmente usada por médicos debido a que es económica y no invasiva. Sin embargo, la auscultación con estetoscopio tiene diversas limitantes. El proceso de detección es subjetivo y depende de la capacidad auditiva, la experiencia y la habilidad de diferenciar entre distintos patrones de sonido por parte del médico. De manera similar, no es sencillo generar medidas cuantitativas o producir un registro permanente con esta técnica. El monitoreo de un paciente a largo plazo y observar la correlación del sonido respiratorio con otras señales fisiológicas también resulta complicado. Además, debido a que los sonidos pulmonares son señales no estacionarias, especialmente en pacientes, es difícil tanto analizar cómo distinguir diferentes tipos de sonidos con la auscultación tradicional. Finalmente, el estetoscopio no provee una transmisión independiente a las frecuencias de sonidos; este instrumento tiene una respuesta en frecuencia que atenúa los componentes en frecuencia de los sonidos pulmonares que se encuentren por encima de 120 Hz y amplifica aquellas frecuencias por debajo de este límite.

Lamentablemente, la sensibilidad máxima del oído humano se encuentra normalmente en el rango de 1 a 2 kHz. Debajo de 1000 Hz y especialmente debajo de 500 Hz, la sensibilidad del oído disminuye de manera importante [7], [15]–[17]. Además, la sensibilidad del oído a diferentes frecuencias de sonido depende del volumen relativo del sonido. La habilidad del oído es baja al intentar reconocer un tono de muy poca duración y también existen dificultades al escuchar sonidos cortos con intervalos de separación reducidos [7]. Componentes de bajas frecuencias, o graves, de sonidos complejos le resultan más prominentes al observador cuando el sonido es alto debido a que los sonidos graves enmascaran sonidos agudos; y viceversa, cuando la intensidad del sonido se atenúa, las componentes agudas del sonido se acentúan [7].

Se han realizado pruebas para evaluar la habilidad del oído humano para detectar los sonidos de EC en una señal creada a partir de agregar EC simulados a SRN [18]. Los resultados encontrados indican que los errores de detección se debieron principalmente a la amplitud de los EC, al tipo de EC (los ECf fueron detectados con mayor facilidad debido a que su morfología difiere en mayor medida de la morfología de los SP clásicos en comparación con los ECg) y a la intensidad de la señal respiratoria debido a que mientras mayor sea la intensidad de los SR los EC serán enmascarados más fácilmente. Se puede inferir de estos estudios que la validación de algoritmos

de detección automáticas de EC no debería tener la auscultación como única referencia [3]. También se ha encontrado que debido a la corta duración y a la frecuente baja intensidad de los EC, es difícil su discriminación y caracterización mediante auscultación normal [7].

Recientemente, se han empleado distintas técnicas de procesamiento y de identificación automática para el análisis de sonidos respiratorios en búsqueda de EC como alternativas a la auscultación. Para la extracción de sus características y clasificación se han utilizado distintas técnicas tales como filtros digitales no lineales, modelos autorregresivos, la transformada wavelet y redes neuronales artificiales, entre otros [19]. Kayha y Yilmaz [20] propusieron un sistema de detección automática y clasificación de EC con base en un filtro estacionario/no-estacionario y la transformada de paquete de ondillas o *wavelet packet* que permite aislar los EC. Kayha y colaboradores [21] emplearon un sistema basado en un filtro adaptable e implementaron operadores no lineales aplicados a SP descompuestos mediante ondillas o *wavelets*. Otra técnica que también se ha utilizado para la detección de los EC es el análisis de dimensión fractal [22]. Kaisia y colaboradores desarrollaron un método para detectar automáticamente EC mediante el análisis de bordes en el espectro de frecuencia de tiempo corto [23]. Munakata y colaboradores realizaron un análisis wavelet de tiempo expandido y un análisis con la transformada rápida de Fourier con SR [24]. Recientemente, se han implementado técnicas de separación ciega de fuentes como el análisis de componentes independientes para extraer, a partir de registros pulmonares multicanales, componentes independientes relacionados con los EC [25]. El propósito de los esfuerzos del procesamiento digital de las señales de sonidos respiratorios ha sido disminuir el carácter subjetivo de la técnica de auscultación pulmonar por medio de la extracción y cuantificación de características importantes que no pueden ser apreciadas por el médico con el estetoscopio.

#### I.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En el segundo capítulo se mencionan los esfuerzos realizados previamente para la extracción de los EC. Después, se propone el planteamiento del problema y la aportación de este trabajo en el tercer capítulo. Posteriormente, en el cuarto capítulo se plantean las bases matemáticas de las técnicas empleadas en esta tesis. En el quinto capítulo se describen los escenarios de prueba utilizados así como los pasos empleados para la extracción y la detección automática de los EC. Después, se muestran los resultados obtenidos en cada escenario de prueba en el sexto capítulo mientras que en el séptimo capítulo se analizan estos resultados. Finalmente, en el octavo capítulo se encuentran las conclusiones finales de este trabajo.

## II. ANTECEDENTES

En el Laboratorio de Procesamiento Digital de Señales e Imágenes Biomédicas de la Universidad Autónoma Metropolitana se han diseñado e implementado distintos métodos para la detección de estertores crepitantes. Uno de los primeros intentos incluyó distintas técnicas de procesamiento tales como la dimensión fractal normalizada, el modelado autorregresivo (AR) univariado combinado con una red neuronal supervisada y un modelo AR variante en el tiempo, o *Time-Varying Autoregressive model* (TVAR), para estimar y contar el número de EC existentes en registros de sonidos pulmonares multicanal [19]. En particular, el modelo AR variante en el tiempo fue el método que proporcionó mejores resultados; el modelo TVAR para la señal discreta de SR que contiene EC  $u[n]$  está dado por la ecuación:

$$\sum_{i=0}^p a_i^*[n]u[n-k] = v[n] \quad (1)$$

donde  $p$  es el orden del modelo,  $a_i[n]$  representan los coeficientes autorregresivos,  $u[n-k]$  representa la  $k$ -ésima muestra pasada de la serie de tiempo  $u[n]$  y  $v[n]$  es ruido blanco. El objetivo fue detectar cambios no estacionarios producidos por la aparición súbita de los EC en el sonido pulmonar de fondo. Para contar con un mecanismo de evaluación del desempeño en la detección de EC de las diferentes técnicas se utilizaron registros de sonidos pulmonares multicanal de 10 pacientes sanos en los cuales se insertaron estertores finos y gruesos simulados basados en el modelo matemático de Kiyokawa, et al. [18]. En comparación con el resto de las técnicas de procesamiento, el método TVAR mostró el mejor desempeño para la detección y la cuenta de EC simulados. Con la cuenta de EC en cada uno de los 25 canales adquiridos se logró obtener una imagen que reflejaba la distribución espacial de los EC y que es de tipo funcional al reflejar lo que sucede en cada ciclo respiratorio. Finalmente, en el intento mencionado, el TVAR fue utilizado para la detección de estertores crepitantes en dos pacientes diagnosticados con fibrosis pulmonar idiopática, obteniendo resultados que concordaron con evaluaciones proporcionadas por un médico experto en cuanto a la relevancia acerca de la presencia de los EC así como de su distribución espacial [19]. Sin embargo, con este primer intento no fue posible separar los estertores en finos y gruesos, sino que únicamente se realizó la cuenta de estos sonidos adventicios. Además, no se contaba con una detección que separara los EC fuente (reales) de los EC transmitidos y que eran detectados por micrófonos vecinos del EC fuente.

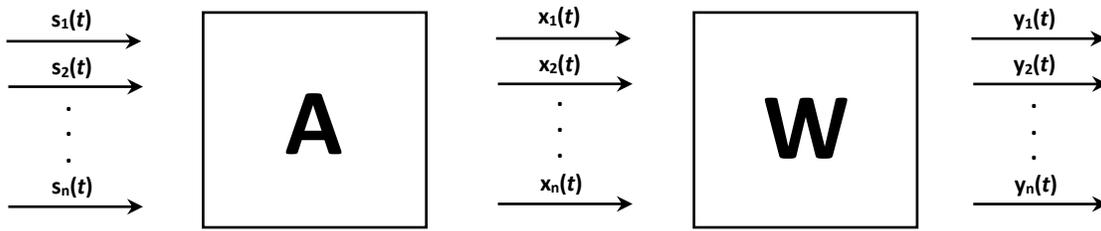
Posteriormente, y debido a la necesidad de identificar las fuentes de EC considerando el fenómeno de transmisión acústica en el parénquima pulmonar, se decidió utilizar la separación

ciega de fuentes por análisis de componentes independientes, o *Independent Component Analysis* (ICA), para aislar o separar sonidos adventicios de sonidos respiratorios normales [25]. En la **figura 2** se muestra el problema general de la separación ciega de fuentes y la solución propuesta mediante ICA. Comúnmente se asume que las mezclas u observaciones  $x(t)$  a separar por ICA provienen de una combinación lineal instantánea de las fuentes  $s(t)$  de la forma:

$$x(t) = \mathbf{A}s(t) \quad (2)$$

Las observaciones  $x(t)$  son generadas por la multiplicación de la matriz de mezcla  $\mathbf{A}$  con las fuentes  $s(t)$ , es decir,  $x(t)$  se genera por una suma ponderada de las fuentes por los elementos de  $\mathbf{A}$ . El método de ICA se enfoca en encontrar una matriz de separación  $\mathbf{W}$  que permita encontrar estimaciones  $y(t)$  confiables de las fuentes. Entre los algoritmos evaluados en el siguiente esfuerzo de este grupo de trabajo se encuentran FastICA, el *Information maximization* (Infomax), el *Joint approximation diagonalization of eigenmatrices* (JADE) y el *Temporal decorrelation separation* (TDSEP) [25]. Estos algoritmos fueron utilizados para la separación de componentes de un registro multicanal de sonidos respiratorios normales de un sujeto sano al cual se le agregaron estertores crepitantes simulados utilizando una matriz de mezcla aleatoria. Los algoritmos fueron comparados con base en una inspección visual de los componentes independientes obtenidos y a criterios de eficiencia en la separación realizada con el software ICASSO, el índice Amari y la relación señal a interferencia. Con base en los resultados obtenidos, se determinó que el algoritmo Infomax obtuvo un mejor desempeño en la tarea de separar las distintas fuentes de los sonidos pulmonares [25].

Dados los resultados en el anterior esfuerzo del grupo de trabajo [25], se buscó combinar Infomax, para encontrar fuentes de EC a partir de registros de sonidos pulmonares multicanales considerando la transmisión acústica en el parénquima pulmonar, con el método TVAR, que se aplicó directamente a componentes independientes (CI) seleccionados para determinar la cuenta y distribución espacial de EC. Como en los casos anteriores, para validar el método propuesto se utilizó un registro de sonidos respiratorios normales multicanal de un paciente sano al cual se insertaron estertores simulados en diferentes zonas pulmonares incluyendo ahora su transmisión acústica a micrófonos en un cierto vecindario. Además, se incluyó el análisis de registros obtenidos de dos pacientes diagnosticados con el síndrome combinado de fibrosis y enfisema pulmonar para evaluar el esquema ICA-TVAR. Con esta información, fue posible generar una imagen funcional más confiable que las obtenidas anteriormente basada en dos conceptos: 1) la estimación de las fuentes



**Figura 2.** Problema general de la separación ciega de fuentes y solución propuesta mediante ICA, donde  $s_i(t)$  representan las fuentes,  $\mathbf{A}$  es la matriz de mezcla instantánea,  $x_i(t)$  son las mezclas obtenidas,  $\mathbf{W}$  es la matriz de separación y  $y(t)$  son las estimaciones de las fuentes [26].

de sonidos adventicios y 2) la cuenta de estertores al buscar cambios no estacionarios en las series de tiempo de los componentes independientes [27].

La desventaja del método anterior es que los CI sobre los que se implementaba TVAR se seleccionaron manualmente del grupo completo de componentes independientes obtenidos por Infomax con base a la cercanía de la morfología temporal de los CI a los crepitantes. Es por eso que en un intento de mejorar este algoritmo, el grupo de trabajo desarrolló un método para la selección objetiva y automática de los CI asociados con los estertores [28]. Este método involucró la extracción de información de los componentes independientes a partir de la obtención de vectores de características para realizar una agrupación de éstos. Los vectores de características (VC) incluyeron la curtosis, la escasez de contenido (conocido en inglés como *sparsity*) y la entropía de cada uno de los componentes independientes obtenidos. Finalmente, se utilizó el promedio del índice silueta para determinar el número mínimo de grupos con base a los VC. Una vez determinados estos grupos, se calculó un índice basado en el vector de características de cada grupo que determinaría, en base a si se supera un umbral, si un grupo contiene solo estertores. Para la evaluación de esta metodología, se emplearon dos escenarios con estertores simulados insertados en sonidos respiratorios normales y se analizaron dos registros de pacientes diagnosticados con fibrosis y enfisema pulmonar. Los resultados obtenidos muestran que la metodología propuesta permite seleccionar de manera adecuada y automática los CI que cuentan con información de estertores crepitantes [28].

### III. CONCEPTOS TEÓRICOS

#### III.1 EL PROBLEMA DE LA FIESTA DE COCTEL

El problema de la fiesta de cóctel (PFC) describe la situación en la que un individuo se encuentra en una habitación con distintas personas hablando simultáneamente mientras trata de seguir una de las conversaciones. Concretamente, este problema es un fenómeno psicoacústico que hace referencia a la tarea de escuchar y reconocer un sonido de interés dentro de un ambiente de complejidad auditiva, es decir, un ambiente en el que existan distintas fuentes sonoras que produzcan interferencia auditiva [29]. Para tratar de resolverlo se colocan en puntos diferentes dentro de la habitación un mismo número de micrófonos como de personas se encuentran en ese lugar. Sería de gran utilidad si a partir únicamente de las señales registradas por los micrófonos se pudiera estimar las señales de voz originales. Éste es el llamado problema de la “fiesta de cóctel” [30].

Para un oyente, la PFC presenta dos retos, el primero es el de segregación de sonido y el segundo, de tipo cognoscitivo, es el de prestar atención a la fuente sonora de interés mientras se ignora el resto o cambiar la atención a otra fuente diferente. En la segregación de sonido, los sonidos presentes en la habitación se suman para generar la señal que recibe el oído. Sin embargo, son las fuentes individuales las que le son de utilidad al organismo, no la mezcla de sonidos. La tarea del sistema auditivo es analizar mezclas y obtener una representación de la señal de interés que le permitirá al sujeto que escucha entender, por ejemplo en el caso del habla, lo que se está diciendo [29], [31].

Además, en la recuperación de una señal de sonido fuente o individual a partir de una mezcla existen dos obstáculos. El primero es que no se conoce qué secciones en la mezcla a lo largo del tiempo pertenecen a la fuente de interés y cuáles a fuentes secundarias. La mezcla puede tener energía en algunas secciones, es decir, información, mientras que la fuente de interés no; es necesario segregar estas secciones de la señal de interés para poder estimar la fuente objetivo o de interés. El segundo obstáculo se da cuando la fuente de interés en algún momento determinado tiene una cantidad significativa de energía pero alguna fuente secundaria tiene una mayor cantidad. Esto causa que el segmento temporal de interés esté físicamente “cubierto” por otros sonidos, lo que hace más difícil recuperar la fuente objetivo a partir de la mezcla [31]. Para resolver este problema, el sistema auditivo y el cerebro utilizan tres procesos neuronales: 1) el análisis del sonido que involucra la segregación; 2) el reconocimiento, es decir, analizar la estructura estadística de los

patrones contenidos en las señales de sonido; y 3) la síntesis, la cual consiste en la reconstrucción de ondas de sonido individuales a partir de sonidos segregados [29], [31].

El análisis que realiza una persona de una escena auditiva involucra los mecanismos de localización de sonido y de reconocimiento de sonido. Con respecto a la localización del sonido se ha observado que el escuchar de forma binaural permite separar sonidos de interés o fuente de forma más sencilla en comparación con escuchar de forma monoaural. Además, las pistas de localización obtenidas por ambos oídos son relevantes ya que si la fuente de sonido de interés tiene una ubicación espacial diferente a los sonidos distractores, tiende a ser más sencillo detectar y entender esta fuente. Con relación al segundo mecanismo este se divide en: a) la segregación de sonido, al procesar el estímulo auditivo para obtener un grupo de características favorables y la agrupación de estas características al combinar elementos similares de sonidos entrantes de acuerdo a criterios específicos en una o más señales coherentes, y b) la determinación del sonido, es decir, la identificación del contenido de la fuente de sonido en cuestión. Otra función básica del análisis auditivo humano es la atención, la cual es la habilidad de un oyente de escuchar a una fuente en particular mientras se ignoran las demás. Finalmente, otro proceso cognitivo es la vinculación de características que puede ser de tipo estática, la cual involucra una unidad representativa que simboliza un conjunto específico de características, o dinámica, la cual involucra conjuntos de características como la unión de unidades para representar un escenario auditivo [29].

Además, al intentar solucionar el PFC, diversos mecanismos perceptuales le permiten al sistema auditivo estimar las fuentes de sonido individuales a partir de mezclas. Los sonidos individuales tienden a mostrar cambios en amplitud regulares en las distintas frecuencias contenidas y, por lo tanto, si una mezcla contiene energía en distintas frecuencias que empiezan o terminan al mismo tiempo es probable que pertenezcan al mismo sonido. También, frecuencias que tengan una relación armónica en una mezcla pertenecen, probablemente, juntas y tienden a ser escuchadas como un solo sonido [29], [31].

Se puede facilitar la percepción auditiva si al escuchar palabras éstas forman oraciones coherentes en lugar de escuchar solo palabras en orden aleatorio, se escucha un acento familiar o se sabe qué es lo que se está escuchando, e.g. haber escuchado la fuente de interés aislada con anterioridad a la mezcla de sonidos. Las pistas visuales de lenguaje, como lectura de labios, también son relevantes y mejoran la habilidad de entender lo que se escucha. Ambos tipos de pistas ayudan

en parte al guiar la atención al lugar relevante de los sonidos percibidos, permitiendo al sujeto que escucha suprimir las partes de la mezcla que no pertenezcan a la fuente de interés [29].

Los párrafos anteriores resumen los elementos del PFC así como los conceptos perceptuales y cognoscitivos que utiliza un ser humano para resolver el PFC y nos da una idea de lo complicado de una posible solución vía el procesamiento de señales. La separación ciega de fuentes, o *Blind Source Separation* (BSS), es una herramienta de procesamiento de información que busca separar las fuentes originales al contar únicamente con las mezclas observadas, de manera similar a lo que hace el ser humano para solucionar el problema de la “fiesta de cóctel”. En la siguiente sección se explica a detalle el funcionamiento de esta técnica de recuperación de fuentes.

### III.2 SEPARACIÓN CIEGA DE FUENTES

Consideremos una situación donde exista un cierto número de señales emitidas por objetos físicos o fuentes, tal y como sucede en el problema de la “fiesta de cóctel”. Estas fuentes físicas pueden ser, por ejemplo: a) diferentes áreas cerebrales emitiendo señales eléctricas, b) personas hablando en una misma habitación emitiendo señales de habla, o c) teléfonos celulares emitiendo ondas de radio. Además, existen distintos sensores ubicados en diferentes posiciones que registran, cada uno, una mezcla de las fuentes originales. Estas mezclas difieren entre ellas debido a la cercanía de los sensores a las distintas fuentes. Para expresar lo anterior de forma matemática, suponga que existen tres señales fuente, denotadas por  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$  y  $s_3(t)$ , y tres señales observadas por los sensores, denotadas por  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  y  $x_3(t)$ , donde  $t$  es el índice temporal. Las señales  $x_i(t)$  son sumas ponderadas de las fuentes  $s_i(t)$ , donde los coeficientes de las sumas ponderadas dependen de las distancias entre las fuentes y los sensores [30]. Considerando lo anterior, las señales registradas se pueden expresar a partir del siguiente sistema de ecuaciones simultáneas:

$$x_1(t) = a_{11}s_1(t) + a_{12}s_2(t) + a_{13}s_3(t) \quad (3)$$

$$x_2(t) = a_{21}s_1(t) + a_{22}s_2(t) + a_{23}s_3(t) \quad (4)$$

$$x_3(t) = a_{31}s_1(t) + a_{32}s_2(t) + a_{33}s_3(t) \quad (5)$$

donde los coeficientes  $a_{ij}$  con  $i, j = 1, \dots, 3$ , en las ecuaciones (3) a (5) son constantes y proveen los pesos de la mezcla. Estos valores se asumen desconocidos si no se conocen todas las propiedades del sistema físico de mezcla, lo cual es casi imposible en la mayoría de los casos prácticos. Las señales fuente  $s_i(t)$  también se desconocen dado que el problema principal es que no se pueden registrar directamente [30].

Se desea encontrar las señales originales a partir únicamente de las mezclas  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  y  $x_3(t)$ . A este problema se le conoce como la separación ciega de fuentes. Aquí, el término “ciego” hace referencia a que no se sabe nada o muy poco respecto a las fuentes originales. Por lo general, se asume que los coeficientes de mezcla  $a_{ij}$  son lo suficientemente diferentes para que la matriz de mezcla  $\mathbf{A}$  que forman sea invertible. Por lo tanto, existe una matriz de separación  $\mathbf{W}$  con coeficientes  $w_{ij}$  que permita separar las fuentes a partir de:

$$s_1(t) = w_{11}x_1(t) + w_{12}x_2(t) + w_{13}x_3(t) \quad (6)$$

$$s_2(t) = w_{21}x_1(t) + w_{22}x_2(t) + w_{23}x_3(t) \quad (7)$$

$$s_3(t) = w_{31}x_1(t) + w_{32}x_2(t) + w_{33}x_3(t) \quad (8)$$

La matriz  $\mathbf{W}$  se encontraría al obtener la inversa de la matriz  $\mathbf{A}$  si se conocieran los coeficientes  $a_{ij}$  [30]. Una solución a este problema es asumiendo la independencia estadística de las señales fuente. Si las funciones de densidad de probabilidad, o *Probability Density Function* (PDF), de las señales no son gaussianas, es suficiente determinar los coeficientes  $w_{ij}$  de tal manera que las señales:

$$y_1(t) = w_{11}x_1(t) + w_{12}x_2(t) + w_{13}x_3(t) \quad (9)$$

$$y_2(t) = w_{21}x_1(t) + w_{22}x_2(t) + w_{23}x_3(t) \quad (10)$$

$$y_3(t) = w_{31}x_1(t) + w_{32}x_2(t) + w_{33}x_3(t) \quad (11)$$

sean estadísticamente independientes. Si las señales estimadas  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  y  $y_3(t)$  son completamente independientes, entonces se asume que éstas son idénticas a las señales originales  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$  y  $s_3(t)$  (multiplicadas por constantes de escalamiento). Por lo tanto, las señales originales son “componentes independientes” del grupo de datos [30].

### III.3 ANÁLISIS POR COMPONENTES INDEPENDIENTES (ICA)

El problema de la BSS se soluciona al encontrar una representación lineal en la cual los componentes obtenidos sean estadísticamente independientes, sin embargo, en la práctica se encuentran componentes que sean lo más independientes posibles. ICA es el método más usado para realizar la BSS. Una fuente equivale a una señal original, es decir, un componente independiente, como la persona que habla en el problema de la “fiesta de cóctel”. Para definir rigurosamente el ICA se puede usar un modelo estadístico de variables latentes. Se observan  $n$

variables aleatorias  $x_1, \dots, x_n$ , las cuales se modelan como combinaciones lineales de  $n$  variables aleatorias  $s_1, \dots, s_n$ :

$$x_i = a_{i1}s_1 + a_{i2}s_2 + \dots + a_{in}s_n, \quad \text{para todas las } i = 1, \dots, n \quad (12)$$

donde cada  $a_{ij}$  son coeficientes reales. Por definición, las  $s_i$  son estadísticamente independientes entre sí. Este es el modelo básico de ICA, el cual es un modelo generativo que describe como la información observada es producida por un proceso de la mezcla de componentes  $s_j$ . Los componentes independientes (CIs)  $s_j$  son variables latentes, es decir, no pueden ser observados directamente. También, los coeficientes de mezcla  $a_{ij}$  se asumen desconocidos. Todo lo que observamos son variables aleatorias  $x_i$  y se deben estimar tanto los coeficientes de mezcla  $a_{ij}$  y los CIs mediante las  $x_i$ . En este planteamiento no se emplea el índice temporal  $t$  debido a que se asume que tanto las mezclas  $x_i$  como las fuentes  $s_i$  son variables aleatorias en lugar de señales o series temporales. Los valores observados  $x_i(t)$  son entonces una muestra de esta variable aleatoria. También se omite cualquier retraso temporal que pudiera existir en el mezclado, es por esto que este modelo básico se le conoce comúnmente como el modelo de mezclado *instantáneo* [30].

Usualmente es más común emplear en ICA la notación vectorial. Se denota por  $\mathbf{x}$  al vector aleatorio cuyos elementos son las mezclas  $x_1, \dots, x_n$  y, similarmente, el vector aleatorio  $\mathbf{s}$  tiene como elementos a las fuentes  $s_1, \dots, s_n$ . Como se mencionó anteriormente,  $\mathbf{A}$  es la matriz de mezcla formada por los coeficientes  $a_{ij}$ . Usando esta notación vectorial, el modelo de mezcla instantáneo sin ruido se escribe como [30]:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{s} \quad (13)$$

mientras que el modelo de separación, considerando  $\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1}$ , se escribe como [30]:

$$\mathbf{s} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{x} \quad (14)$$

### III.3.1 RESTRICCIONES EN ICA

Para que el modelo de ICA de la ecuación (14) pueda estimarse se hacen ciertas suposiciones y restricciones [26], [30], [32].

#### III.3.1.1 Los CIs se asumen estadísticamente independientes.

Este es el fundamento de ICA. Matemáticamente, la independencia estadística se define en términos de la función de densidad de probabilidad. Las variables aleatorias  $x$  y  $y$  son independientes si y solo si:

$$p_{x,y}(x, y) = p_x(x)p_y(y) \quad (15)$$

Esto es, la densidad conjunta  $p_{x,y}(x, y)$  de  $x$  y  $y$  debe ser igual al producto de sus densidades marginales  $p_x(x)$  y  $p_y(y)$ . De manera similar, la independencia puede ser definida reemplazando las funciones de densidad de probabilidad en la ecuación (15) por sus respectivas funciones de distribución acumulativa, las cuales también deben ser factorizables. Variables aleatorias independientes satisfacen la propiedad:

$$E\{g(x)h(y)\} = E\{g(x)\}E\{h(y)\} \quad (16)$$

donde  $E\{\cdot\}$  es el operador de la función esperanza mientras que  $g(x)$  y  $h(y)$  son cualquier función integrable de  $x$  y de  $y$ , respectivamente. Esto es debido a que:

$$E\{g(x)h(y)\} = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x)h(y)p_{x,y}(x, y)dydx$$

$$E\{g(x)h(y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)p_x(x)dx \int_{-\infty}^{\infty} h(y)p_y(y)dy = E\{g(x)\}E\{h(y)\} \quad (17)$$

La independencia estadística de dos variables aleatorias es una propiedad más robusta que su no-correlación. Al considerar la ecuación de no-correlación dada por:

$$r_{xy} = E\{xy\} = E\{x\}E\{y\} = m_x m_y \quad (18)$$

donde  $m_x$  y  $m_y$  representan los valores medios de  $x$  y  $y$ , respectivamente, se observa que la ecuación (18) es un caso especial de (17) donde tanto  $g(x)$  y  $h(y)$  son funciones lineales y únicamente se considera estadísticas de segundo orden como correlaciones y covarianzas.

### III.3.1.2 Los Cls deben tener distribuciones no-gaussianas

Los cumulantes de orden superior son esenciales para la estimación del modelo de ICA, sin embargo, estos cumulantes son igual a cero para distribuciones gaussianas, por lo que, ICA es prácticamente imposible si las variables observadas tienen distribuciones gaussianas. Asumiendo que la distribución conjunta de dos señales fuente,  $s_1$  y  $s_2$ , es gaussiana, se tiene que su PDF está dada por:

$$p_s = p(s_1, s_2) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{s_1^2 + s_2^2}{2}\right) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\|s\|^2}{2}\right) \quad (19)$$

Ahora, si se asume que la matriz de mezcla  $\mathbf{A}$  es ortogonal gracias a un proceso previo de blanqueado, al realizar la transformación dada por la ecuación (13), se puede calcular la densidad de probabilidad conjunta de las mezclas  $p_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$  a partir de la PDF de la señales fuente a través de

$$p_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{|\det \mathbf{A}|} p_s(\mathbf{A}^{-1} \mathbf{x}) \quad (20)$$

y considerando que para una matriz ortogonal  $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^T$ , se obtiene

$$p(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{A}^T \mathbf{x}\|^2}{2}\right) |\det \mathbf{A}^T| \quad (21)$$

Debido a la ortogonalidad de  $\mathbf{A}$ , se tiene que  $\|\mathbf{A}^T \mathbf{x}\|^2 = \|\mathbf{x}\|^2$  y el  $|\det \mathbf{A}| = 1$ . Por lo tanto, se tiene

$$p(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}\|^2}{2}\right) \quad (22)$$

donde se aprecia que la matriz de mezcla ortogonal no cambia la PDF al comparar las ecuaciones (22) y (13). Las distribuciones de las señales fuente y de las mezclas son idénticas, por lo que no hay manera de inferir la matriz de mezcla a partir de las mezclas. El no poder estimar una matriz de mezcla ortogonal a partir de variables gaussianas se relaciona con la propiedad que estipula que variables gaussianas no-correlacionadas son necesariamente independientes. Esta propiedad se puede deducir a partir del hecho que un conjunto de  $n$  variables aleatorias no-correlacionadas, llamado  $\mathbf{z}$  en esta demostración, poseen una matriz de covarianza diagonal  $\mathbf{C}_s$  de dimensión  $n \times n$  y, similar a (19), al ser gaussianas su PDF está dado por

$$p(z_1, \dots, z_n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{2n} |\mathbf{C}_s|}} \exp\left(-\frac{(\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}_s^{-1} (\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu})}{2}\right)$$

$$p(z_1, \dots, z_n) = \frac{1}{(2\pi)^n (\sigma_1 * \dots * \sigma_n)} \exp\left(-\frac{(z_1 - \mu_1)\sigma_1^{-2} + \dots + (z_n - \mu_n)\sigma_n^{-2}}{2}\right)$$

$$p(z_1, \dots, z_n) = \frac{1}{2\pi\sigma_1} \exp\left(-\frac{(z_1 - \mu_1)\sigma_1^{-2}}{2}\right) * \dots * \frac{1}{2\pi\sigma_n} \exp\left(-\frac{(z_n - \mu_n)\sigma_n^{-2}}{2}\right)$$

$$p(z_1, \dots, z_n) = p(z_1) * \dots * p(z_n) \quad (23)$$

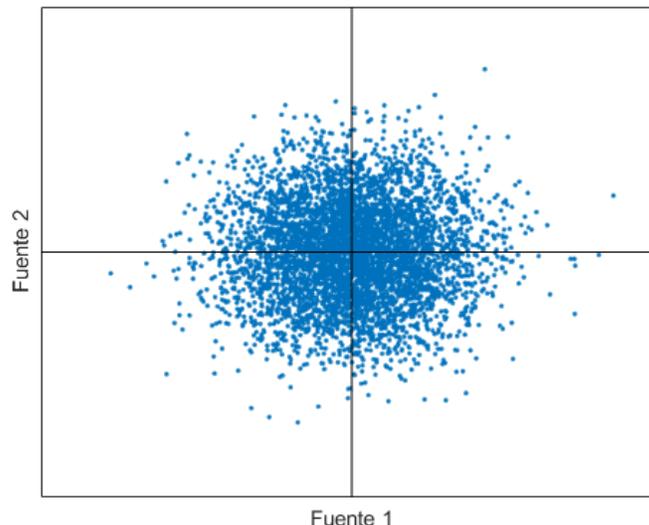
lo que demuestra que este conjunto de variables aleatorias gaussianas no correlacionadas también son estadísticamente independientes. Esta propiedad muestra que la información acerca de la independencia de los componentes gaussianos no es mayor a aquella obtenida al blanquear, es

decir, decorrelacionar los datos. Visualmente, este fenómeno se puede observar al graficar la distribución de las mezclas ortogonales, la cual es idéntica a la distribución de las fuentes. Esta distribución se observa en la **figura 3**, donde se muestra que la densidad es simétrica rotacionalmente. Por lo tanto, no contiene información acerca de las direcciones de las columnas de la matriz de mezcla **A**. Es por esto que **A** no puede estimarse. En el caso de fuentes gaussianas, solo se puede estimar el modelo de ICA hasta una transformación ortogonal.

#### III.3.1.2.1 Teorema del límite central

El teorema del límite central (TLC) presenta otra razón por la cual ICA no puede separar fuentes con distribución gaussiana. El TLC estipula que la distribución de la suma de variables aleatorias independientes tiende a ser gaussiana. Esto se puede interpretar de manera sencilla al asumir que la suma de dos variables aleatorias independientes tiene una distribución más cercana a la gaussiana que cualquiera de las dos variables aleatorias originales.

ICA estima los CIs al minimizar la “gaussianidad” de sus distribuciones para así aproximarse a las fuentes originales. El problema de intentar separar fuentes con distribución gaussiana es que ICA no es capaz de distinguir estas fuentes de las mezclas observadas debido a que tienen distribuciones similares. Es posible emplear ICA cuando solo algunas fuentes son gaussianas. Aunque los componentes gaussianos no podrán separarse, ICA es capaz de estimar todos los componentes no gaussianos. Esto significa que en el caso de tener solo una fuente gaussiana es posible estimar el modelo completo de ICA debido a que el componente gaussiano asociado a la fuente gaussiana no se mezclaría con algún otro componente gaussiano.



**Figura 3.** Distribución multivariada de dos variables gaussianas independientes.

### III.3.1.3 Matriz de mezcla cuadrada

Si la matriz  $\mathbf{A}$  es cuadrada entonces se tiene el mismo número de fuentes como de mezclas observadas. Esto se asume debido a que la estimación se simplifica ya que, después de estimar la matriz de mezcla, se obtiene la matriz de separación al calcular la inversa de  $\mathbf{A}$  para obtener los CIs.

En resumen, es posible estimar el modelo de ICA bajo las restricciones anteriormente mencionadas, o como mínimo contar con las dos primeras, implicando que la matriz de mezcla y los CIs se pueden obtener considerando ciertas indeterminaciones, las cuales se explicarán en la siguiente sección.

### III.3.2 INDETERMINACIONES DE ICA

Bajo el modelo de ICA denotado por la ecuación (13) se tienen las siguientes indeterminaciones o ambigüedades [26], [33]:

#### III.3.2.1 Indeterminación de escalamiento

Esta ambigüedad refiere a que no es posible determinar la varianza (o energía) de los CIs debido a que al ser tanto  $\mathbf{s}$  como  $\mathbf{A}$  desconocidas, cualquier multiplicador escalar de una de las fuentes  $s_i$  puede ser cancelado al dividir la columna correspondiente  $a_i$  de  $\mathbf{A}$  por el mismo escalar. De manera similar, no se puede determinar el signo de los CIs.

#### III.3.2.2 Indeterminación de permutación

No es posible determinar el orden de los CIs debido a que, como se mencionó en la primera indeterminación,  $\mathbf{A}$  es desconocida y se pueden intercambiar el orden de las columnas de  $\mathbf{A}$  sin afectar los CIs estimados. Formalmente, una matriz de permutación  $\mathbf{P}$  y su inversa pueden incluirse en el modelo de (13) para obtener  $\mathbf{x} = \mathbf{AP}^{-1}\mathbf{Ps}$ . Los elementos de  $\mathbf{Ps}$  son las fuentes independientes originales  $s_i$  pero en diferente orden. La matriz  $\mathbf{AP}^{-1}$  es una nueva matriz de mezcla desconocida a ser resuelta por los algoritmos de ICA.

### III.3.3 ALGORITMOS DE ICA

Existen diferentes algoritmos de ICA que buscan estimar los CIs a partir de las mezclas observadas al disminuir la gaussianidad de los CIs ya sea maximizando o minimizando ciertas características estadísticas y de información. Estas características incluyen la curtosis, la negentropía, la información mutua entre componentes y la no-correlación temporal [26], [30], [32]. Entre los algoritmos de ICA clásicos se encuentran FastICA, Infomax y TDSEP.

FastICA es un algoritmo de punto fijo de ICA que utiliza estadísticas de orden superior para recuperar las fuentes originales. FastICA puede estimar los CIs uno a uno mediante un enfoque de

deflación utilizando proyecciones ortogonales o todos simultáneamente con un enfoque de decorrelación simétrica. Este algoritmo utiliza estimaciones de negentropía basado en el principio de máxima entropía, el cual requiere el uso de no-linealidades apropiadas como en el aprendizaje de la red neuronal. Dada la matriz de covarianza de un vector aleatorio, la negentropía es la diferencia existente entre la entropía de este vector aleatorio y aquella de una variable gaussiana con la misma matriz de covarianza. La negentropía es cero para variables gaussianas y positiva para las demás distribuciones [26], [32], [33].

Por otro lado, Infomax es un principio de optimización de una red neuronal con neuronas de salida no lineales, basado en gradientes cuya regla de aprendizaje está fundada en la maximización de flujo de información en la red, regla de donde surge su nombre. Infomax utiliza estadísticos de orden superior para la maximización de información. La fortaleza de este algoritmo es su relación directa con la teoría de la información. Infomax se deriva a través del principio de maximización de información entre las entradas y las salidas no lineales, maximizando la entropía conjunta de los CIs y minimizando la información mutua existente entre ellos. Específicamente, la información mutua es una medida de independencia y siempre es no-negativa; equivale a cero únicamente cuando las variables aleatorias, en este caso los CIs, son independientes [26], [32], [34].

Por último, TDSEP está basado en diagonalizaciones simultáneas de distintas matrices de correlación con retrasos temporales. Este algoritmo usa la propiedad que estipula que las funciones de correlación cruzada son igual a cero para señales mutuamente independientes. TDSEP asume que las fuentes originales tienen estructura temporal. La ventaja de este algoritmo es su simpleza computacional al utilizar estadística de segundo orden [35].

### III.3.4 PREPROCESAMIENTO

Existen ciertos pasos de preprocesamiento que se realizan comúnmente previo a la BSS mediante los algoritmos de ICA [26], [30]. En esa sección se mencionan los pasos de centrar y blanquear los datos.

#### III.3.4.1 Centrar los datos

Se asume que tanto las mezclas como los CIs tienen media cero para simplificar la teoría y los algoritmos. Esto se realiza al sustraer al vector de observaciones  $\mathbf{x}$  su vector de medias, es decir, al centrar las observaciones. De esta forma, los CIs también tendrán media cero debido a que  $E\{\mathbf{s}\} = \mathbf{A}^{-1}E\{\mathbf{x}\}$ . Por otro lado, la matriz de mezcla no cambia al centrar los datos. Después de estimar la matriz de mezcla y los componentes independientes para los datos con media cero, se puede añadir

la media previamente sustraída al sumar a los CIs obtenidos con media cero  $\mathbf{A}^{-1}\mathbf{E}\{\mathbf{x}'\}$ , donde  $\mathbf{x}'$  representan las mezclas originales.

#### III.3.4.2 Blanqueado o decorrelación de los datos

El blanquear los datos implica transformar linealmente el vector de observación tal que sus componentes sean no-correlacionados y tengan varianza unitaria. Si  $\mathbf{x}_w$  denota al vector blanqueado con media cero, se satisface que  $\mathbf{E}\{\mathbf{x}_w\mathbf{x}_w^T\} = \mathbf{I}$ , donde  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad y  $\mathbf{E}\{\mathbf{x}_w\mathbf{x}_w^T\}$  es la matriz de covarianza de  $\mathbf{x}_w$ . Un método popular para realizar el blanqueado es mediante la descomposición de eigenvalores de la matriz de covarianza  $\mathbf{E}\{\mathbf{xx}^T\} = \mathbf{E}\mathbf{D}\mathbf{E}^T$ , donde  $\mathbf{E}$  es la matriz ortogonal de eigenvectores de  $\mathbf{E}\{\mathbf{xx}^T\}$  y  $\mathbf{D}$  es la matriz diagonal de sus eigenvalores  $d_i$ , esto es  $\mathbf{D} = \text{diag}(d_1, \dots, d_n)$ . El blanqueado se realiza al multiplicar los datos por la matriz de blanqueo  $\mathbf{V} = \mathbf{E}\mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{E}^T$ , esto es,  $\mathbf{x}_w$  a través de  $\mathbf{x}_w = \mathbf{V}\mathbf{x}$ . Blanquear los datos transforma la matriz de mezcla a una nueva con la propiedad de ortogonalidad. Es por esto que el blanqueado reduce el número de parámetros a estimar. En lugar de estimar los  $n^2$  elementos de la matriz original  $\mathbf{A}$ , siendo  $n$  el número de fuentes a recuperar, ahora solo se tiene que estimar la nueva matriz ortogonal, la cual tiene  $n(n - 1)/2$  grados de libertad. Este paso es un proceso simple y eficiente que reduce drásticamente la complejidad computacional de ICA.

### III.4 ANÁLISIS POR COMPONENTES INDEPENDIENTES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Si se analiza a detalle el PFC es necesario considerar que existen retrasos y reflexiones en las señales registradas. Esto implica que el modelo de mezcla en realidad es de tipo *convolutivo* en lugar de instantáneo.  $N$  señales fuente  $\{s_i(t)\}$ ,  $1 \leq i \leq N$ , pasan a través de un sistema desconocido lineal e invariante en el tiempo de  $N$  entradas y  $M$  salidas para generar las  $M$  mezclas  $\{x_j(t)\}$ ,  $1 \leq j \leq M$ . Al igual que en el modelo de ICA instantáneo, se asume que todas las señales fuente son estadísticamente independientes [36]. Si se definen los vectores  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_N(t)]^T$  y  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T$ , el sistema de mezcla convolutivo sin ruido en el dominio temporal se representa como:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{H} * \mathbf{s}(t) \quad (24)$$

y su versión expandida como:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ \cdot \\ x_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(l) & \cdots & h_{1N}(l) \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ h_{M1}(l) & \cdots & h_{MN}(l) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s_1(t) \\ \cdot \\ s_N(t) \end{bmatrix} \quad (25)$$

donde el símbolo  $*$  es el operador de convolución. La señal del  $j$ -ésimo sensor puede ser obtenida a través de:

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{l=0}^{L-1} h_{ji}(l) s_i(t-l) \quad (26)$$

donde  $\mathbf{H}$  es la matriz de mezcla,  $h_{ji}(l)$  es la respuesta al impulso de la fuente  $i$  al sensor  $j$ ,  $L$  es el orden de los filtros FIR usados para modelar esta respuesta al impulso. La tarea del modelo convolutivo de ICA es encontrar un sistema de separación tal que las salidas de este sistema  $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), \dots, y_N(t)]^T$  sean mutuamente independientes como estimaciones de las  $N$  señales fuente [36], [37]. El sistema de separación típicamente consiste en un arreglo de filtros FIR  $w_{ij}(t)$  de longitud  $Q$  cada uno y puede representarse como:

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}(l) & \cdots & w_{1M}(l) \\ \vdots & & \vdots \\ w_{N1}(l) & \cdots & w_{NM}(l) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

con la  $i$ -ésima salida del sistema de separación dada por:

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^M \sum_{l=0}^{Q-1} w_{ij}(l) x_j(t-l) \quad (27)$$

Este modelo convolutivo puede realizarse en el dominio de la frecuencia al emplear la transformada de Fourier de tiempo corto, o *Short Time Fourier Transform* (STFT). Este método está basado en transformar el problema convolutivo de BSS en el dominio temporal a una BSS instantánea en cada *bin* de frecuencia proporcionado por la STFT. Tras aplicar la STFT, la operación convolución en la ecuación (24) se transforma en la operación multiplicación para obtener [37]:

$$\mathbf{x}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{s}(\omega) \quad (28)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia analógica en radianes/s. Con base en este modelo convolutivo de ICA en el dominio de la frecuencia (ICA<sub>f</sub>), la relación entre las fuentes y las mezclas puede aproximarse mediante el espectrograma, de manera que:

$$\mathbf{x}(\omega, t_s) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{s}(\omega, t_s) \quad (29)$$

donde  $\mathbf{x}(\omega, t_s)$  y  $\mathbf{s}(\omega, t_s)$  son los espectrogramas de  $\mathbf{x}(t)$  y  $\mathbf{s}(t)$ , respectivamente, y  $t_s$  es la ventana temporal del espectrograma.

Existen tres ventajas de realizar esta transformación al dominio de la frecuencia. Primero, la complejidad computacional se reduce debido a que las operaciones de convolución en el dominio

del tiempo se transforman en operaciones de multiplicación en el dominio de la frecuencia al aplicar la STFT. Segundo, el proceso de separación puede hacerse en paralelo en todos los *bins* de frecuencia. Finalmente, cualquier algoritmo para mezclas instantáneas de ICA puede expandirse para manejar valores complejos y usarse para la separación en cada *bin* de frecuencia. Sin embargo, las ambigüedades de escalamiento y permutación se convierten en problemas importantes en la BSS en el dominio de la frecuencia (F-BSS) [36], [38].

Uno de los algoritmos de ICA usados comúnmente en el dominio de la frecuencia es Infomax modificado para el manejo de datos complejos [37]. Si se denota  $\mathbf{y}(\omega, t_s)$  como las señales de salida de la etapa de preprocesamiento y de la transformación mediante la STFT de las mezclas, se tiene:

$$\mathbf{z}(\omega, t_s) = \mathbf{U}(\omega)\mathbf{y}(\omega, t_s) \quad (30)$$

donde  $\mathbf{U}(\omega)$  es la matriz de filtrado para la separación y  $\mathbf{z}(\omega, t_s)$  son los CIs obtenidos mediante ICA. La regla de aprendizaje para actualizar la matriz de filtrado está dada por:

$$\mathbf{U}_{q+1}(\omega) = \mathbf{U}_q(\omega) + \eta[\mathbf{I} - \varphi(\mathbf{z}(\omega, t_s))\mathbf{z}^H(\omega, t_s)]\mathbf{U}_q(\omega) \quad (31)$$

con  $q$  la iteración actual de la regla de aprendizaje,  $\mathbf{I}$  la matriz identidad, el símbolo  $\cdot^H$  denotando la transpuesta Hermitiana y  $\eta$  la constante de aprendizaje. La función de costo para datos complejos  $\varphi(\mathbf{z})$  está definida como [39]:

$$\varphi(\mathbf{z}) = [\varphi(z_1), \dots, \varphi(z_k), \dots, \varphi(z_K)]^T \quad (32)$$

$$\varphi(z_k) = 2 \tanh(G \cdot \text{Re}(z_k)) + 2j \tanh(G \cdot \text{Im}(z_k)) \quad (33)$$

donde  $z_k$  es el  $k$ -ésimo elemento del vector  $\mathbf{z}(\omega, t_s)$ ,  $K$  es el número de CIs estimados y  $G$  es una constante de ganancia para la función de costo no lineal, asumiendo que la magnitud de  $\mathbf{y}(\omega, t_s)$  está normalizada.

La F-BSS se lleva a cabo al emplear un método de BSS instantáneo en cada *bin* de frecuencia por separado. Por lo tanto, el orden y el escalamiento de los CIs son aleatorios debido a las indeterminaciones de los algoritmos de ICA. Cuando se transforman los CIs del dominio de la frecuencia al tiempo, los componentes en diferentes *bins* de frecuencia pueden no originarse de la misma señal fuente así como tampoco tener escala consistente. Es por esto que es necesario alinear la permutación y ajustar la escala en cada *bin* de frecuencia para que de esta forma un CI en el dominio temporal sea obtenido a partir de componentes en la frecuencia pertenecientes a la misma señal fuente y con amplitud consistente [36]–[38]. Comúnmente, para resolver la indeterminación

de escalamiento se filtra individualmente cada CI obtenido por la inversa del estimado de la matriz de mezcla  $\mathbf{B}(\omega)$ , de manera que los CIs son mapeados al “dominio de los sensores”. Se define:

$$\hat{v}_k(\omega, t_s) = \mathbf{B}(\omega)(0 \dots 0, z_k(\omega, t_s), 0 \dots 0)^T, \quad i = 1, \dots, n \quad (34)$$

donde  $\hat{v}_k(\omega, t_s) = [z_{1,k}(\omega, t_s), \dots, z_{M,k}(\omega, t_s)]^T$  y  $z_{m,k}(\omega, t_s)$  representa la señal recuperada de la  $k$ -ésima fuente al  $m$ -ésimo micrófono [37], [40]. La indeterminación de permutación en ICA<sub>F</sub> implica que diferentes permutaciones en distintos *bins* de frecuencia conducirán a un nuevo mezclado de los CIs en la salida final debido a que cada CI contendrá *bins* de frecuencia pertenecientes a distintas fuentes [40]. Para resolver esta ambigüedad de permutación en los componentes estimados existen distintos métodos tales como emplear matrices de correlación y envolventes [37], encontrar una matriz de permutación que minimice alguna función de costo [40] o el uso de algoritmos de agrupamiento como K-means [41].

## IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El interés de este proyecto de tesis de maestría es continuar con la exploración de la separación ciega de fuentes a través del método de ICA pero en esta ocasión incorporando el dominio de la frecuencia para la detección de estertores crepitantes de tipo fino y grueso. La razón de explorar ICA<sub>F</sub> es que, a diferencia de lo comúnmente asumido, al hacer registros de señales pulmonares en un entorno real, las observaciones obtenidas en realidad son mezclas de tipo convolutivo de las fuentes considerando los retrasos temporales existentes [42]. Se ha indicado en la literatura que en realidad el parénquima pulmonar se comporta como un filtro de tipo pasa-bajas, por lo tanto es más adecuado considerar mezclas de tipo convolutivo de las fuentes de sonido [42]. Es posible obtener una mejor aproximación de las fuentes vía la transformada de Fourier dado que el modelo convolutivo de mezcla se transforma en un modelo instantáneo. Este análisis en frecuencia permite la simplificación del problema convolutivo presente en el dominio del tiempo y mantiene la eficiencia del método de separación ciega de fuentes al considerar las mezclas como combinaciones lineales de las señales fuente.

### IV.1 HIPÓTESIS

En escenarios simulados, el análisis por componentes independientes en el dominio de la frecuencia de los sonidos pulmonares multicanal proporcionará una extracción más robusta de componentes asociados a estertores crepitantes finos y gruesos que el método del dominio del tiempo.

### IV.2 OBJETIVOS

#### IV.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño del análisis por componentes independientes en el dominio de la frecuencia para la extracción de estertores crepitantes en escenarios simulados de sonido pulmonar, contrastando resultados con los obtenidos mediante el análisis de componentes independientes en el dominio del tiempo (ICA<sub>T</sub>).

#### IV.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Proponer escenarios para la evaluación del desempeño del análisis por componentes independientes en el dominio de la frecuencia a través de simulaciones matemáticas de estertores crepitantes.
- Identificar automáticamente los componentes independientes relacionados a estertores crepitantes obtenidos mediante el análisis de componentes independientes.

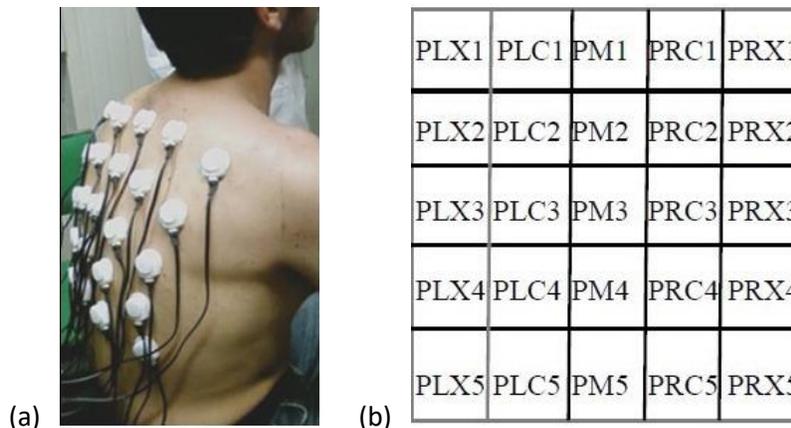
- Proponer un método automático de conteo y clasificación, de acuerdo a su tipo, de los estertores crepitantes en los componentes independientes estimados.
- Comparar el desempeño del método implementado de  $ICA_F$  contra una implementación de  $ICA_T$  con base en Infomax.

## V. METODOLOGÍA

Para evaluar los modelos de ICA tanto en el dominio temporal como en frecuencia bajo el concepto de la BSS se emplearon distintos escenarios simulados. La metodología general involucra en una primera fase la simulación de EC de tipo fino y grueso que se añadieron de manera convolutiva a señales de sonidos respiratorios de un sujeto sano para formar así las mezclas para la BSS. En la segunda fase se aplicaron distintos algoritmos de ICA para la separación de fuentes e intentar recuperar las fuentes de EC simuladas. En la tercera fase se realizó, a partir de los CIs obtenidos, la detección automática de la presencia, tipo y número de EC en alguno de los componentes. Finalmente, se evaluó el desempeño de cada uno de los algoritmos de ICA a través del índice señal a interferencia, o *Signal to Interference Ratio* (SIR), para determinar tanto la calidad de la fuente recuperada como de la separación global de fuentes. A continuación, se describe en detalle cada una de las fases de la metodología utilizada en esta tesis.

### V.1 ADQUISICIÓN DE SONIDOS RESPIRATORIOS NORMALES (SRN) Y GENERACIÓN DE ESTERTORES CREPITANTES (EC) SIMULADOS

Para generar los escenarios simulados se utilizaron datos de SRN de un sujeto sano en los cuales se insertaron EC simulados para evaluar la posible eficiencia del modelo de F-BSS. Las señales de este sujeto pertenecen a una base de datos del grupo de investigación UAMI-INER [19], [25], [27], [28]. Las señales de SR fueron adquiridas con un arreglo de micrófonos de 5x5 colocado en la espalda del sujeto. En la **figura 4** se muestra este arreglo junto con la nomenclatura de los micrófonos. En la **tabla 1** se desglosa el significado de la nomenclatura. La distancia entre los sensores acústicos es de 5 cm tanto vertical como horizontalmente. Además, se registró simultáneamente la señal de flujo respiratorio.



**Figura 4.** (a) Arreglo de micrófonos colocado en la espalda del sujeto de estudio para el registro multicanal de SR y (b) nomenclatura del arreglo.

**Tabla 1.** Nomenclatura asociada al arreglo de micrófonos para registro multicanal de SR.

Símbolo	Significado
P	Posterior
L	Izquierdo ( <i>left</i> , en inglés)
R	Derecho ( <i>right</i> , en inglés)
X	Axilar
C	Clavicular
M	Medio
1 / 2 / 3 / 4 / 5	Número de fila en el arreglo.

Los sensores acústicos constan de micrófonos subminiatura insertados en campanas de plástico con una respuesta en frecuencia de 50 Hz a 3 kHz. Durante la adquisición, el sujeto se encontraba sentado con un clip en la nariz y respirando a través de un neumotacógrafo tipo Fleisch a un flujo de aire de 1.5 L/s. La sesión de adquisición duró 15 s con una fase inicial y final de apnea de 5 s. En la digitalización de las señales de SR multicanal y flujo respiratorio se utilizó una tarjeta A/D de 12 bits con una frecuencia de muestreo de 10 kHz. Para una mayor información acerca de los dispositivos utilizados como marca, fabricante, etc., se recomienda consultar la referencia [19] y las referencias contenidas en el artículo. Las señales se filtraron con un filtro FIR pasa-bandas de orden 201, con una ventana Hamming y una banda de 75 a 1500 Hz.

Los EC tanto finos como gruesos fueron simulados de acuerdo a la ecuación dada por:

$$c(t) = m(t)y_0(t) = \cos^2\left(\pi(\sqrt{t} - 0.5)\right) \sin(4\pi t \log(0.25 - t_0)) \quad (35)$$

donde  $c(t)$  representa el EC simulado,  $y_0(t)$  es una función con dos ciclos con su primer cruce por cero en  $t_0$  y una duración en segundos de  $0 \leq t \leq 1$  y  $m(t)$  es una función que modula la potencia de  $y_0(t)$  en el inicio de la forma de onda [18]. Para simular un tipo particular de EC, es decir, fino o grueso, en la ecuación (35) se sustituye el parámetro  $t_0$  por el valor correspondiente de IDW mientras que el parámetro  $t$  tendría un valor máximo igual a TCD. En este trabajo se emplearon los parámetros IDW de 0.9 ms y TCD de 3 ms para los ECf, mientras que para los ECg el IDW empleado es de 2.2 ms y la TCD de 10 ms.

## V.2 SIMULACIÓN DE MEZCLAS DE SRN Y EC

Dado que las enfermedades pulmonares que producen EC tienen una distribución espacial difusa, los escenarios simulados requerían ser de tipo multicanal donde es posible definir una zona que genera el EC y otra zona que solo recibe el EC transmitido. Adicionalmente, un escenario simulado multicanal permitiría analizar el efecto que tendría el SRN en la BSS dado que los SRN

producidos en las bases pulmonares y en los ápices presentan características diferentes. Otro aspecto que influiría en la definición de las simulaciones es el grado de severidad de la enfermedad pulmonar. Los EC son de tipo fino cuando inicia la enfermedad y mientras esta avanza, los ECf se pueden escuchar desde las bases hasta los ápices pulmonares. Además, los EC se modifican y pasan a ser del tipo grueso con el incremento en la severidad de la enfermedad [2], [3], [7]. En consecuencia, para crear los escenarios de simulación, se añadieron EC simulados a las señales de SRN adquiridas en micrófonos seleccionados (denominados a partir de este momento micrófonos fuente). También, estos EC se propagaron hacia sensores específicos en un cierto vecindario del micrófono fuente (denominados micrófonos de propagación). La inserción de los EC fue realizada según un modelo convolutivo de BSS para que los escenarios fueran lo más semejante posible al efecto que tiene el parénquima pulmonar sobre los EC al viajar desde la vía aérea que los genera hasta ser capturados sobre la superficie torácica.

### V.2.1 INSERCIÓN DE ESTERTORES CREPITANTES EN MICRÓFONOS FUENTE

Se utilizó el modelo convolutivo, definido por la ecuación (26), para generar las mezclas sobre las cuales se empleó el modelo de ICA. Para los filtros FIR que simulan el proceso de propagación por el parénquima pulmonar se seleccionó un orden  $L = 5$ , una ventana Hamming y frecuencia de corte de 200 Hz al considerar la semejanza reportada entre el parénquima y un filtro pasa-bajas de orden bajo [42], [43]. El vector  $\mathbf{s}(t)$  está conformado por la señal de SRN registrada en el micrófono seleccionado,  $s_1(t)$ , y por la fuente de EC simulados,  $s_2(t)$ . La matriz de mezcla  $\mathbf{H}$  se conforma por

$$\mathbf{H} = [h_{11}(l) \quad h_{12}(l)] \quad (36)$$

donde  $h_{11}(l)$  y  $h_{12}(l)$  son las respuestas al impulso de los sistemas para la señal de SRN y la señal de EC simulada, respectivamente, al micrófono donde se registró la señal de SRN utilizada para la mezcla. El filtro  $h_{11}(l)$  fue seleccionado de tal manera que no modificara la señal de SRN debido a que se considera que el SRN registrado es el resultado de la convolución entre la fuente del SR original con el sistema parénquima pulmonar, es decir,  $h_{11}(l)$  representa una función delta de Dirac. En cambio, el filtro  $h_{12}(l)$  fue modelado con las características previamente descritas. El modelo de mezcla está dado por

$$x_1(t) = [h_{11}(l) \quad h_{12}(l)] * \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{bmatrix} \quad (37)$$

donde  $x_1(t)$  es la mezcla convolutiva entre el SRN registrado y la fuente de EC simulada.

### V.2.2 INSERCIÓN DE ESTERTORES CREPITANTES EN MICRÓFONOS DE PROPAGACIÓN

Para simular la propagación de sonido del EC en el parénquima pulmonar se realizaron inserciones de las fuentes de EC simuladas a señales de SRN registradas por micrófonos circundantes a los micrófonos fuente. La inserción del EC en cada uno de estos sensores de propagación se realizó bajo el mismo modelo de mezcla convolutiva que el empleado en la inserción de EC simulados en los micrófonos fuente, sin embargo, se modificó la fuente simulada de EC. La señal propagada de EC fue retrasada temporalmente y atenuada en función a la distancia euclidiana  $d$  existente entre el micrófono fuente y el micrófono de propagación. El retraso temporal  $t_r$  de la fuente de EC es dado por

$$t_r = \frac{d}{v_{prop}} \quad (38)$$

donde  $v_{prop}$  es la velocidad de propagación del sonido a través del parénquima pulmonar, la cual es de aproximadamente 23 m/s [44], [45]. La amplitud de la fuente de EC simulada en los micrófonos de propagación es dada por

$$G_p = G_f \exp(-0.28d) \quad (39)$$

donde  $G_p$  es la amplitud de la señal de propagación y  $G_f$  es la amplitud de la señal de EC en el micrófono fuente. El parámetro  $G_f$  fue determinado de manera que la relación señal-a-ruido, o *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), de la fuente de EC y la señal de SRN del micrófono fuente fuera lo suficientemente baja para que la ubicación de los EC no resulte evidente al visualizar la mezcla convolutiva generada entre estas dos señales. En este trabajo se emplearon valores  $G_f$  de 5 y de 3 para las inserciones de EC en las fases de inspiración y espiración, respectivamente. En la **tabla 2** se muestran las medias y desviaciones estándar de las SNR obtenidas durante la generación de las simulaciones. Estos valores fueron calculados al promediar las SNR obtenidas en los segmentos de inserción de EC de cada una de las fuentes simuladas.

**Tabla 2.** SNR obtenidas durante la generación de las simulaciones.

Fase del ciclo respiratorio	Tipo de EC	SNR obtenido (media $\pm$ desviación estándar, dB)
Inspiración	EC finos	-18.131 $\pm$ 2.065
	EC gruesos	-12.432 $\pm$ 1.748
Espiración	EC finos	-14.455 $\pm$ 1.419
	EC gruesos	-8.848 $\pm$ 1.601

### V.3 ESCENARIOS MULTICANAL SIMULADOS

Los escenarios de simulación se establecieron para incrementar gradualmente la complejidad del problema de BSS, por consecuencia se inició analizando mezclas que solo contienen información de la fuente y su propagación en vecindarios unidireccionales o bidireccionales, en las fases inspiratorias o espiratorias. Para el siguiente nivel de complejidad, en las mezclas a analizar se consideró la existencia de mezclas que incluyeran únicamente SRN. Por último, el caso más complejo de mezclas a trabajar se conformó con dos micrófonos fuente simultáneos, es decir, se consideró el traslape temporal de los EC además del espacial de las propagaciones en un vecindario bidireccional. Esta metodología de evaluación permitirá seleccionar la mejor forma de trabajar en la práctica las mezclas del arreglo de sensores en el problema de BSS. A continuación, se describen cada uno de los escenarios y se indica la forma en que se analizaron las mezclas.

#### V.3.1 ESCENARIOS SIMULADOS

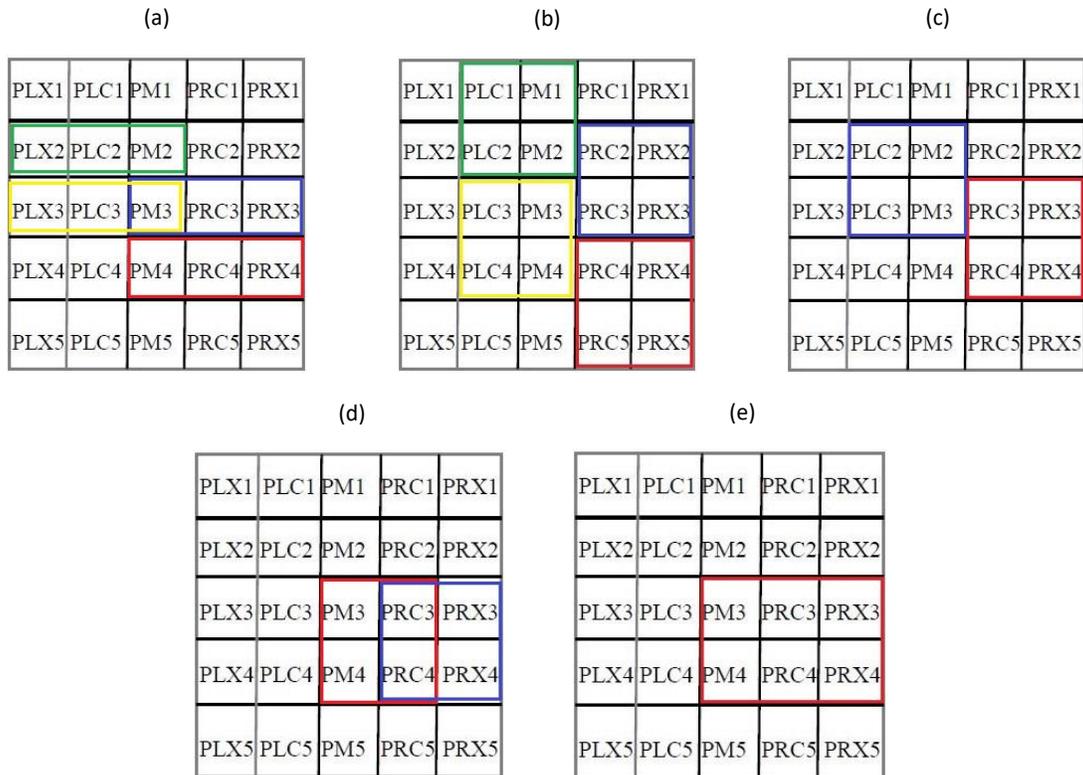
Se definieron 20 escenarios de simulación multicanal sobre los cuales se emplearían los algoritmos de ICA para realizar la BSS. Estos escenarios, también llamados pruebas, se muestran a detalle en la **tabla 3**. En la **figura 5** se pueden observar los arreglos de micrófonos que serán analizados en las pruebas. La distribución de estos arreglos en las pruebas de la siguiente manera. En la **figura 5.a** se muestran en color rojo, azul, amarillo y verde los arreglos de las pruebas 1, 2, 3 y 4, respectivamente; en la **figura 5.b** se encuentra el arreglo de la prueba 5 en color rojo, el arreglo de la prueba 6 en color azul, el arreglo de la prueba 7 en color amarillo y el arreglo de la prueba 8 en color verde; en la **figura 5.c** se pueden observar los arreglos de las pruebas 9, 10 y 13 en color rojo mientras que en color azul se encuentran aquellos de las pruebas 11, 12 y 14; en la **figura 5.d** se muestran los arreglos de las pruebas 15 y 16 en color rojo y en color azul se encuentran los correspondientes a las pruebas 17 y 18; y, finalmente, en la **figura 5.e** se observan en color rojo los arreglos de las pruebas 19 y 20.

Como se mencionó anteriormente, las pruebas fueron diseñadas a manera de incrementar gradualmente la complejidad de la BSS. Esto se logró al considerar dentro de los 20 escenarios de simulación las características espaciales del SRN de cada micrófono, el número de fuentes de EC insertadas y el uso de dos tipos de propagación. Además, en las pruebas diseñadas se analiza únicamente una sola fase del ciclo respiratorio debido a que el sujeto del que se tomaron los SR realizó una maniobra respiratoria a flujo y frecuencia respiratoria controlados. De esta forma se asume que las características de los SR en las diferentes fases son semejantes. De otra forma, las fases de inspiración y espiración pudieran contener información estadística diferente en diferentes

fases respiratorias, sobre todo si el flujo respiratorio no se controla, lo cual aumenta la dificultad para los algoritmos de ICA al momento de recuperar las fuentes originales [30]. Con base en el arreglo de micrófonos utilizado y mostrado en las **figuras 4(a) y 4(b)**, se consideró propagación unidireccional a la propagación de EC desde el micrófono fuente hasta un micrófono de propagación circundante, por ejemplo, ubicado en la misma fila o en la misma columna del micrófono fuente. Se determinó a la propagación bidireccional como aquella donde los EC en un micrófono fuente son propagados simultáneamente vertical y horizontalmente a micrófonos circundantes. Cada una de las pruebas 1 a 4 (**figura 5.a**) contienen una sola fuente simulada de EC propagada unidireccionalmente hacia dos micrófonos en el mismo renglón del arreglo de sensores. En las pruebas 5 a 8 (**figura 5.b**) se insertó, individualmente, una fuente simulada de EC propagada unidireccionalmente a un micrófono aledaño al micrófono fuente ubicado en el mismo renglón del arreglo de sensores y, además, se incluyen dos señales de SRN de micrófonos cercanos ubicados en el renglón superior o inferior del micrófono fuente. Las pruebas 9 a 12 (**figura 5.c**) consideran una fuente simulada de EC con una propagación bidireccional hacia tres micrófonos aledaños: el primero de ellos se encuentra en el mismo renglón del arreglo de sensores que el micrófono fuente mientras que los otros dos se encuentran en el renglón superior. Las mezclas analizadas en las pruebas 13 y 14 (**figura 5.c**) se conforman por dos señales de micrófonos fuentes y señales de un micrófono de propagación unidireccional de cada una de las fuentes simuladas de EC; además, estas fuentes simuladas se encuentran traslapadas temporalmente. En las pruebas 15 a 18 (**figura 5.d**) se insertaron dos fuentes simuladas de EC traslapadas temporal y espacialmente donde la primera de ellas se propaga hacia el segundo micrófono fuente unidireccionalmente y la segunda fuente se propaga bidireccionalmente hacia el primer micrófono fuente y hacia otros dos micrófonos de propagación; en consecuencia, el análisis incluye las señales de ambos micrófonos fuente y las señales de los dos micrófonos de propagación de la segunda fuente. Finalmente, en las pruebas 19 y 20 (**figura 5.e**) se insertaron dos fuentes simuladas de EC traslapadas temporal y espacialmente; ambas fuentes se propagaron bidireccionalmente hacia el otro micrófono fuente y, cada una, hacia otros dos micrófonos de propagación diferentes, lo que produce seis mezclas de SR a analizar. Al considerar las propagaciones realizadas, ambos micrófonos fuentes de las pruebas 15 a 20 también son considerados micrófonos de propagación.

En estas pruebas se consideraron inserciones en la fase de inspiración y de espiración del ciclo respiratorio. Además, las pruebas 1 a 8 y 13 a 20 se realizaron con fuentes simuladas de EC de tipo fino y posteriormente con EC de tipo grueso. En las pruebas no se consideraron inserciones o

propagaciones simultáneas de ECf y de ECg, es decir, en la misma fase del ciclo respiratorio y en los mismos micrófonos debido a que las patologías pulmonares presentan un solo tipo de EC dentro del cuadro clínico [2], [7].



**Figura 5.** Diagrama de micrófonos involucrados en las pruebas a realizar según los escenarios descritos en la **tabla 3**. Diferentes colores simbolizan distintos arreglos de micrófonos a analizar en las pruebas. Se muestran: las pruebas 1-4 **(a)**, pruebas 5-8 **(b)**, pruebas 9-14 **(c)**, pruebas 15-18 **(d)** y pruebas 19-20 **(e)**.

#### V.4 ALGORITMOS DE ICA EMPLEADOS PARA LA SEPARACIÓN DE FUENTES

Se utilizaron distintos algoritmos de ICA para recuperar las fuentes de EC a partir de las mezclas. En este trabajo se utilizó el modelo convolutivo de ICA sin ruido. En el dominio del tiempo se probaron los algoritmos de FastICA, el Infomax y el TDSEP. También se utilizó un algoritmo en el dominio de la frecuencia y finalmente, combinaciones de algoritmos de ambos dominios. Sin embargo, en esta tesis solo se presentan los algoritmos que proporcionaron las mejores medidas de desempeño, entre los cuales se encuentran el Infomax, un algoritmo de ICA<sub>F</sub> (FICA) y una combinación de algoritmos de ICA en cascada: FICA seguido de Infomax y FICA seguido de TDSEP. Los algoritmos de ICA fueron empleados en la fase del ciclo respiratorio de las mezclas donde se realizaron las inserciones de las fuentes simuladas de EC.

**Tabla 3.** Descripción de escenarios de simulación (pruebas).

Prueba	Mezclas a analizar								
	Número de fuentes simuladas	Tipo EC	Número de EC en cada fuente	Micrófono fuente	Micrófono(s) de propagación	Tipo de propagación	Fase respiratoria de inserción	Micrófonos sin EC	Número de mezclas a analizar
1	1	Finos, Gruesos*	10	PRC4	PM4, PRX4	Unidireccional	Inspiración	-	3
2	1	Finos, Gruesos*	8	PRC3	PM3, PRX3	Unidireccional	Inspiración	-	3
3	1	Finos, Gruesos*	8	PLC3	PLX3, PM3	Unidireccional	Espiración	-	3
4	1	Finos, Gruesos*	10	PLC2	PLX2, PM2	Unidireccional	Espiración	-	3
5	1	Finos, Gruesos*	10	PRC4	PRX4	Unidireccional	Inspiración	PRC5, PRX5	4
6	1	Finos, Gruesos*	8	PRC3	PRX3	Unidireccional	Inspiración	PRC2, PRX2	4
7	1	Finos, Gruesos*	8	PLC3	PM3	Unidireccional	Espiración	PLC4, PM4	4
8	1	Finos, Gruesos*	10	PLC2	PM2	Unidireccional	Espiración	PLC1, PM1	4
9	1	Finos	10	PRC4	PRC3, PRX3, PRX4	Bidireccional	Inspiración	-	4
10	1	Finos	10	PRC4	PRC3, PRX3, PRX4	Bidireccional	Espiración	-	4
11	1	Gruesos	8	PLC3	PLC2, PM2, PM3	Bidireccional	Inspiración	-	4
12	1	Gruesos	8	PLC3	PLC2, PM2, PM3	Bidireccional	Espiración	-	4
13	2	Finos, Gruesos*	8	PRC3	PRX3	Unidireccional	Inspiración	-	4
			10	PRC4	PRX4				
14	2	Finos, Gruesos*	10	PLC2	PM2	Unidireccional	Espiración	-	4
			8	PLC3	PM3				
15	2	Finos, Gruesos*	10	PRC4	PRC3	Unidireccional	Inspiración	-	4
			8	PRC3	PM3, PM4, PRC4	Bidireccional			
16	2	Finos, Gruesos*	10	PRC4	PRC3	Unidireccional	Espiración	-	4
			8	PRC3	PM3, PM4, PRC4	Bidireccional			
17	2	Finos, Gruesos*	10	PRC3	PRC4	Unidireccional	Inspiración	-	4
			8	PRC4	PRC3, PRX3, PRX4	Bidireccional			
18	2	Finos, Gruesos*	10	PRC3	PRC4	Unidireccional	Espiración	-	4
			8	PRC4	PRC3, PRX3, PRX4	Bidireccional			
19	2	Finos, Gruesos*	10	PRC3	PM3, PM4, PRC4	Bidireccional	Inspiración	-	6
			8	PRC4	PRC3, PRX3, PRX4				
20	2	Finos, Gruesos*	10	PRC3	PM3, PM4, PRC4	Bidireccional	Espiración	-	6
			8	PRC4	PRC3, PRX3, PRX4				

\*: Las pruebas señaladas se realizaron primero con fuentes simuladas de ECf y posteriormente con fuentes simuladas de ECg.

#### V.4.1 PREPROCESAMIENTO

Previo a realizar la separación de fuentes con los distintos algoritmos de ICA los datos de las mezclas fueron centrados, es decir, se removió su media y fueron blanqueados mediante el procedimiento descrito en la sección III.3.4. Además, se seleccionó un ciclo respiratorio (CR) para trabajar y se segmentó la fase inspiratoria (9600 muestras) y la espiratoria (9600 muestras).

#### V.4.2 INFOMAX

Como se describió en la sección III.3.3, Infomax es un algoritmo basado en gradientes cuya regla de aprendizaje radica en la maximización de flujo de información. La versión tradicional de Infomax busca maximizar la entropía conjunta de los CIs al minimizar la información mutua existente entre ellos [34]. En este trabajo se utilizó esta versión del algoritmo debido a que en esfuerzos anteriores Infomax logró la mejor recuperación de EC entre los algoritmos de ICA<sub>T</sub> evaluados [25], [27], [28], [46].

#### V.4.3 ICA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Emplear ICA<sub>F</sub> consiste en resolver el problema de mezcla instantánea en cada *bin* o intervalo de frecuencia, como se mencionó en la sección III.4. Para el cálculo de la STFT de las mezclas, se utilizaron 64 muestras (6.4 ms) de las mezclas y se empleó una ventana Chebyshev con longitud igual a 64 y con un traslape de 0.5 veces el tamaño de la ventana. La selección de la ventana Chebyshev se realizó con base en la comparación de los espectrogramas obtenidos con diferentes ventanas en el rango de 32 a 256 muestras de longitud en donde se observó que la definición de la información en el eje de la frecuencia fue mejor para la ventana Chebyshev que para otras, probablemente debido a la menor magnitud de los lóbulos laterales de la ventana. Cabe resaltar que la STFT se empleó para el cálculo de las mezclas de ICA<sub>F</sub>, mientras que el espectrograma se utilizó para la visualización de los CIs estimados en el dominio tiempo-frecuencia.

##### V.4.3.1 ALGORITMO DE FICA

El algoritmo seleccionado para la estimación de CIs en el dominio de la frecuencia fue Infomax modificado para el manejo de datos complejos. Para la F-BSS se utilizaron los valores de  $\eta = 1 \times 10^{-8}$  y  $G = 100$ . Se consideró que seleccionar un valor pequeño para el paso  $\eta$  en la ecuación (31) podría favorecer el llegar a un mínimo global de la función de costo en comparación con un valor más grande. Con respecto al valor de  $G$ , éste se seleccionó de acuerdo al valor propuesto en la literatura [40].

#### V.4.3.2 SOLUCIÓN A LAS INDETERMINACIONES DE ESCALAMIENTO Y PERMUTACIÓN

Una vez obtenidos los CIs se tienen que resolver las indeterminaciones de escalamiento y de permutación de los CIs. Para resolver la ambigüedad de escalamiento se filtró individualmente cada CI obtenido por la inversa del estimado de la matriz de mezcla  $\mathbf{B}(\omega)$ , tal como se planteó en la ecuación (34). En el caso de la permutación, después de analizar métodos como las matrices de correlación con envolventes y el encontrar una matriz de permutación óptima, se consideró que el método propuesto por Chen et al. era el más adecuado dado su fundamento en la clasificación de la información en los *bins* de frecuencia vía una versión móvil del método de agrupamiento de K-means [41].

Siguiendo este esfuerzo, primero se dividen los *bins* de frecuencia en lotes traslapados. En cada uno de estos lotes se agrupan los *bins* de frecuencia por el método de K-means. Los  $L$  *bins* de frecuencia totales son divididos en  $N_{lot}$  lotes para todos los CIs, donde cada lote contiene  $B$  *bins* de frecuencia secuenciales, con  $B > K$ , siendo  $K$  el número de CIs a recuperar. Los lotes adyacentes están traslapados en  $B_{trasl}$  *bins* de frecuencia. Por lo tanto, se tiene un número total de lotes definido por:

$$N_{lot} = \left\lceil \frac{L - B_{trasl}}{B - B_{trasl}} \right\rceil \quad (40)$$

donde los corchetes  $\lceil \cdot \rceil$  denotan la función techo. Esta técnica se define como K-means móvil debido a que este método de agrupación se aplica a todos los lotes de manera individual. Para la agrupación de *bins* de frecuencia se emplearon 15 *bins*  $B$  en cada lote con un traslape  $B_{trasl}$  de 14 *bins* y  $L = 33$  *bins* de frecuencia, generando un total de lotes  $N_{lot} = 19$ . Estos valores fueron seleccionados al obtener un mejor desempeño en la BSS tras realizar distintas pruebas con un rango de búsqueda de 5 a 40 *bins* para  $B$ , de 4 a 39 *bins* para  $B_{trasl}$ , de 20 a 60 *bins* para  $L$ .

Para resolver la permutación dentro de un lote se utiliza como vector de características la envolvente de amplitud  $V_k(\omega) = |z_k(\omega, t_s)|$  para la  $k$ -ésima fuente en el *bin* de frecuencia  $\omega$  teniendo como longitud el número de ventanas temporales o *frames* del espectrograma generado mediante la STFT. Al inicio del método, se inicializan aleatoriamente  $K$  *bins* de frecuencia como centroides mientras el resto de los *bins* de frecuencia se asignan a uno de los *clusters* basados en su distancia de norma uno, o distancia *cityblock*, a los centroides. La función de costo es definida como:

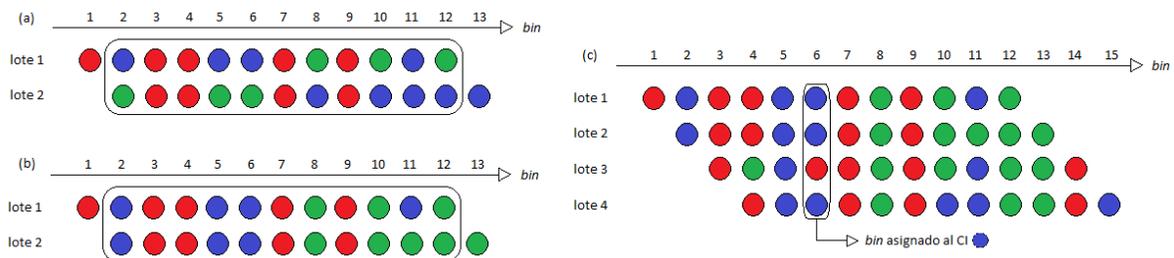
$$J = \arg \min \sum_{k=1}^K \sum_{b=1}^B \|V_k(b) - c_k\| \quad (41)$$

donde  $c_k$  es el centroide de la  $k$ -ésima fuente. Una vez que todos los *bins* de frecuencia fueron agrupados en *clusters* o grupos, se puede actualizar la ubicación de los centroides. Seguido a esto, se calcula la distancia descrita en la ecuación (41) y se vuelven a actualizar los miembros de cada *cluster*. Este proceso iterativo se detiene hasta que la suma del cuadrado de las distancias converja o que se alcance un límite de iteraciones máximas permitidas predefinido. Finalmente, a cada *cluster* se le asigna una etiqueta numérica  $Et$ , con  $1 \leq Et \leq K$ .

Después de utilizar K-means en cada lote, es posible que la etiqueta del mismo *bin* de frecuencia pueda ser diferente en distintos lotes. Chen et al., al solo considerar dos CIs, resuelven este problema al invertir las asignaciones de etiqueta de uno de los lotes si es que existe una incongruencia mayor al 50% en la comparación entre etiquetas de mismos *bins* de frecuencia en distintos lotes [41]. Para generalizar la solución a este problema al considerar la estimación de dos o más CIs, en este trabajo se propuso el criterio:

$$J = \arg \min \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^K \|c_p^F - c_k^R\| \quad (42)$$

para calcular la distancia existente entre los centroides obtenidos de los lotes  $F$  y  $R$  contiguos, con  $R < F$ . Al identificar el centroide  $c_p$  del lote  $F$  que tenga la menor distancia al centroide  $c_k$  del lote  $R$ , se adaptó la etiqueta de  $c_p$  de manera que coincida con la etiqueta de  $c_k$ . Este proceso de actualización de etiquetas, mostrado en la **figura 6.a y 6.b**, inició asumiendo que en el primer lote éstas fueron asignadas correctamente a cada centroide y, al aplicar el criterio lote a lote, se actualizaron las etiquetas de los centroides del lote analizado para que coincidieran con las etiquetas de los centroides correspondientes del lote anterior. Por último, cada *bin* de frecuencia se asigna al CI que corresponda a la etiqueta obtenida en la mayoría de los lotes donde el *bin* de frecuencia se encuentre presente, como se muestra en la **figura 6.c**.



**Figura 6.** Ejemplo del método de K-means móvil para la resolver la indeterminación de permutación de los CIs. Aquí, se consideran cuatro lotes, cada uno con 12 *bins* de frecuencia, una zona de traslape de 11 *bins* y tres CIs (rojo, azul y verde) estimados. En **(a)** se observa la asignación de distintas etiquetas a los centroides obtenidos en diferentes lotes; en **(b)** se muestra la corrección de etiquetas con la propuesta basada en la Ecuación (43); en **(c)** se muestra la asignación de uno de los *bins* de frecuencia al CI representado por el color azul.

#### V.4.3.3 RECONSTRUCCIÓN DE LOS COMPONENTES INDEPENDIENTES EN EL DOMINIO TEMPORAL

Una vez reagrupados los *bins* de frecuencia en los correspondientes CIs, se reconstruyen las fuentes separadas  $\hat{\mathbf{s}}(t)$  mediante la expresión:

$$\hat{\mathbf{s}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w_n(t) \sum_{l=1}^L \hat{v}_n(\omega_l) \exp\left(\frac{i2\pi\omega_l t}{N}\right) \quad (43)$$

donde  $L$  es el número de *bins* de frecuencia,  $N$  es el número de ventanas temporales (*frames*),  $w_n(t)$  representa una de estas ventanas temporales y  $\hat{v}_n(\omega_l)$  es el *frame*  $n$  y *bin*  $l$  de  $\hat{\mathbf{v}}(\omega, t_s)$ .

#### V.4.4 ALGORITMOS DE ICA EN CASCADA

En la literatura, se ha encontrado que la aplicación de algoritmos de ICA en cascada puede proveer una mejora en la BSS. En general, ICA<sub>T</sub> tiene como ventajas el poder tratar las mezclas como independientes en todos sus *bins* de frecuencia y que existe una alta posibilidad de convergencia cerca del punto óptimo de su función de costo; sin embargo, tiene desventajas tales como la complejidad de usar la regla iterativa de aprendizaje y que la calidad de convergencia decae bajo condiciones de reverberaciones en las mezclas. Sin embargo, se considera que la condición de reverberación no existe en el problema de BSS de EC. El modelo de ICA<sub>F</sub> es eficiente simplificando mezclas convolutivas a mezclas instantáneas mediante la transformación de los datos al dominio de la frecuencia y también resulta sencillo que converjan los filtros de separación en el aprendizaje iterativo con gran estabilidad; las desventajas de este modelo incluyen las indeterminaciones descritas en la sección III.3.2 y que la capacidad de separación puede saturarse antes de alcanzar un desempeño adecuado debido a que la suposición de independencia puede colapsar en algunas bandas de frecuencia (en caso de tener un número elevado de estas bandas sobre las cuales realizar la BSS). Las desventajas de cada uno de los algoritmos (a excepción de las indeterminaciones de ICA<sub>F</sub>) se pueden minimizar con las ventajas del otro algoritmo de ICA [47]. Por esta razón se consideró evaluar la BSS en los escenarios simulados con distintos esquemas de algoritmos de ICA en cascada. En todos los esquemas de cascada, el segundo algoritmo de ICA recibe como mezclas los CIs obtenidos a partir del primer algoritmo de ICA y se consideran como las estimaciones de las fuentes a los CIs calculados por el último algoritmo de ICA.

##### V.4.4.1 ESQUEMA FICA-TDSEP

Se espera que FICA tenga un mejor desempeño que ICA<sub>T</sub> en la separación de fuentes debido a que se tienen mezclas convolutivas. Sin embargo, se desea evaluar la posible mejora en eficiencia del esquema de ICA en cascada antes mencionado. Nishikawa et al. emplean un algoritmo de ICA<sub>T</sub> basado en minimizar la correlación cruzada entre los CIs como segunda etapa de su esquema multi-

etapas [47]. Por lo tanto y de manera equivalente a lo propuesto en ese trabajo, con el esquema FICA-TDSEP se evaluará el desempeño de la BSS en los escenarios simulados propuestos.

#### V.4.4.2 ESQUEMA FICA-INFOMAX

A su vez, también se empleó FICA seguido de Infomax debido a que Infomax ha sido reportado en la literatura como el algoritmo óptimo para la separación de fuentes de EC [25], [46]; además se espera que los CIs de FICA ya no posean características de mezclas convolutivas, tales como retrasos temporales y atenuaciones de una misma fuente, lo que permitiría que el esquema FICA-Infomax tuviera un mejor desempeño que el obtenido mediante únicamente Infomax.

### V.5 DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE COMPONENTES INDEPENDIENTES CON ESTERTORES CREPITANTES

Una vez obtenidos los CIs con los distintos algoritmos de ICA, se identificó automáticamente aquellos componentes con presencia de EC. Además, se determinó el tipo y la cantidad de EC presentes mediante una etapa de filtrado y el cálculo del sesgo y la curtosis de los CIs.

Para detectar aquellos CIs que contuvieran información de EC se aplicaron, como primer paso, dos filtros pasa-bandas por separado a cada uno de los componentes calculados. El primero de estos filtros (FiltECf) tiene una región pasabanda de 300 y 1000 Hz, las cuales se encuentran asociadas al contenido en frecuencia de los ECf; el segundo filtro (FiltECg) tiene una región pasabanda entre 30 y 350 Hz, relacionadas al contenido de los ECg. Ambos filtros son de tipo FIR, de orden 201 y emplearon una ventana de Hamming. Posteriormente, se calcularon el sesgo y la curtosis de los CIs filtrados tanto por FiltECf (CIs-FiltECf) como por FiltECg (CIs-FiltECg). Estos índices son representativos de la función de distribución de probabilidad de una variable aleatoria basados en el tercer y cuarto momento central, respectivamente. El sesgo describe el grado de asimetría de la distribución, donde un valor de cero representa una distribución simétrica mientras que la curtosis describe el grado de concentración de los datos alrededor del valor medio. Una distribución gaussiana posee un valor tanto de curtosis como de sesgo igual a cero [48]. En la literatura, se ha encontrado que los SRN tienen una distribución de probabilidad cercana a la gaussiana [49]. En cambio, al considerar el carácter explosivo de los EC se asume que estos SA poseen una PDF súper-gaussiana, lo que implica una mayor aglomeración de datos alrededor de la media a comparación de una PDF gaussiana. Con base en esto, valores elevados de curtosis y sesgo calculados simultáneamente en un mismo CI filtrado implicarán la presencia de EC en ese componente. En este trabajo se emplearon umbrales de 5 y 0.0015 para determinar si los valores de curtosis y sesgo, respectivamente, son suficientemente elevados para indicar la presencia de EC. Estos umbrales

fueron determinados tras calcular los valores de curtosis y sesgo tanto en distintas señales de SRN como en mezclas convolutivas de SRN y EC simulados, obteniendo rangos de búsqueda entre 2 y 15 para la curtosis y entre 0.0005 y 0.003 para el sesgo. Si la existencia de EC es determinada en los Cls-FiltECf, el tipo de EC presente en el CI es determinado como fino; en caso que ésta sea determinada en los Cls-FiltECg, el tipo de EC se determina como grueso. Finalmente, el número de EC se determinó a partir del cálculo de máximos locales en la banda de frecuencia del espectrograma correspondiente al tipo de EC presente en los Cls.

## V.6 EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE FUENTES DE LOS ALGORITMOS ICA

Se evaluó la calidad de la BSS a través de dos enfoques. El primero, involucra la recuperación de las fuentes simuladas de EC por medio de los algoritmos de ICA mientras que el segundo abarca la separación global de las fuentes, es decir, que no exista redundancia de las fuentes de EC recuperadas en los Cls. En ambos casos, se empleó el SIR para evaluar la eficiencia de los algoritmos de ICA. El índice SIR es un criterio de la calidad de separación y mide la calidad del componente estimado con respecto a una señal de referencia. Este criterio está dado por:

$$SIR = \frac{|\langle \hat{s}_i, s_i \rangle|^2}{\|\hat{s}_i\|^2 \|s_i\|^2 - |\langle \hat{s}_i, s_i \rangle|^2} \quad (44)$$

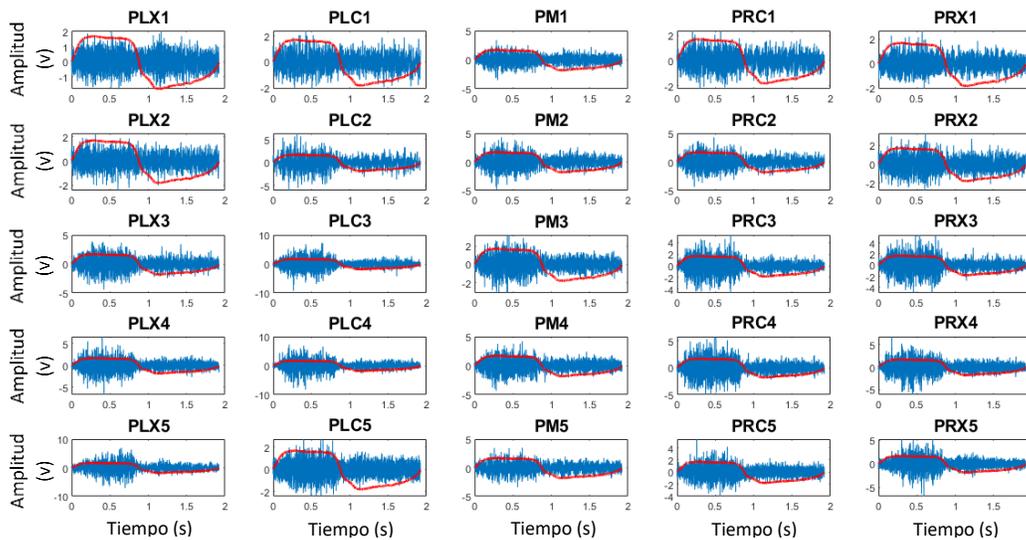
donde los corchetes  $|\cdot|$  indican la función de valor absoluto mientras que los corchetes  $\|\cdot\|$  indican la función de magnitud,  $\hat{s}_i$  representa los Cls estimados y  $s_i$  las fuentes originales o señales de referencia [50], [51]. El producto interno es una medida de la distancia entre dos señales. SIR considera el hecho que, en general, la BSS logra recuperar las fuentes con diferencias en un factor de ganancia. Cuando la fuente estimada es ortogonal a la señal de referencia, SIR es igual a cero; en cambio, si la fuente estimada es igual a un escalamiento  $\alpha$  de la señal de referencia, es decir,  $\hat{s}_i = \alpha s_i$ , SIR es igual a infinito. Por lo tanto, valores altos de SIR indican una buena calidad en la separación del componente debido a una alta semejanza entre la estimación y la referencia.

Bajo el primer enfoque de evaluación de la separación de fuentes, la señal de referencia  $s_i$  será la fuente simulada de EC correspondiente a la recuperada en el CI. En cambio, en el segundo enfoque de la evaluación la señal de referencia  $s_i$  será algún componente filtrado que contenga EC y se medirá el SIR contra el resto de los Cls con presencia de EC del mismo algoritmo. Al considerar estos enfoques, se definirá como el algoritmo óptimo para la BSS en los escenarios simulados propuestos aquel algoritmo que obtenga un índice SIR elevado bajo el primer enfoque de evaluación y un índice SIR cercano a cero bajo el segundo enfoque de evaluación.

## VI. RESULTADOS

### VI.1 ADQUISICIÓN DE SONIDOS RESPIRATORIOS

En la **figura 7** se muestra un CR de las señales adquiridas en los 25 micrófonos del sistema multicanal de registro. En esta figura se observa la señal de sonido respiratorio en color azul mientras que la señal de flujo respiratorio se despliega en color rojo. La parte positiva de la señal de flujo respiratorio indica la fase de inspiración mientras que la parte negativa señala la fase de espiración del ciclo.



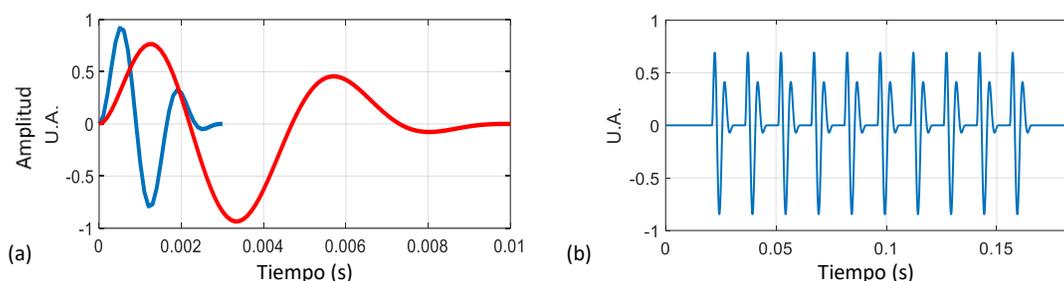
**Figura 7.** Señales de SRN (color azul) adquiridas con el sistema de registro multicanal. En la matriz de sensores el primer renglón identifica los sonidos en la parte apical del pulmón mientras que el último renglón se encuentra ubicado en la porción basal. La señal de flujo respiratorio (color rojo) se encuentra sobrepuesta en cada canal a la señal de sonido.

### VI.2 ESTERTORES CREPITANTES SIMULADOS

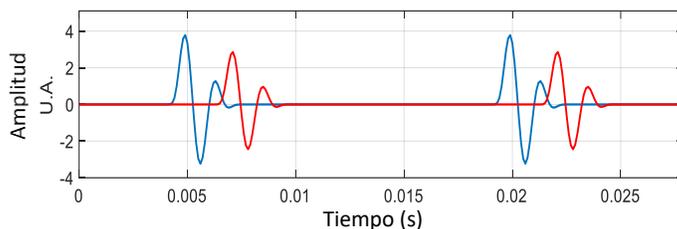
En la **figura 8.a** se muestran un Ecf y un Ecg simulados bajo el modelo matemático presentado en la sección V.1, mientras que en la **figura 8.b** se muestra un ejemplo de una fuente simulada con 10 Ecg. Las fuentes simuladas contienen a los EC uno tras otro, es decir, en ráfaga. Este tipo de fuentes simuladas con EC en ráfaga se diseñaron bajo la suposición que los SA fueron generados por un conjunto de vías aéreas ubicadas en una misma región espacial donde las vías aéreas anormalmente cerradas se encuentran a una profundidad semejante y son de un diámetro similar. Dado el esfuerzo respiratorio a un flujo controlado, se asumió que las vías áreas se abren unas después de las otras, con un cierto lapso de tiempo entre ellas. En consecuencia, los EC tienen la misma amplitud igual y están separados el mismo tiempo. Estas condiciones de simulación se pueden complicar más al considerar que ante el esfuerzo respiratorio, las vías áreas se abren de forma aleatoria, elemento de simulación que vale la pena considerarlo en el futuro.

### VI.3 INSERCIÓN DE ESTERTORES CREPITANTES SIMULADOS EN SEÑALES DE SRN

Para ejemplificar la inserción realizada se creó una fuente simulada con 8 ECf en la fase de inspiración. En la **figura 9** se observa una sección de esta fuente simulada donde, en color azul, se encuentra la fuente a insertarse en el micrófono fuente y, en color rojo, se muestra esta misma fuente simulada pero atenuada y retrasada que se insertará en alguno de los micrófonos de propagación. En esta figura se aprecian los efectos de atenuación y retraso temporal mencionados en la sección IV.3.2 asociados con la propagación de fuentes de EC.



**Figura 8. (a)** Morfología de EC fino (color azul) y de un EC grueso (color rojo) simulados, **(b)** Fuente simulada con 10 ECg en ráfaga.

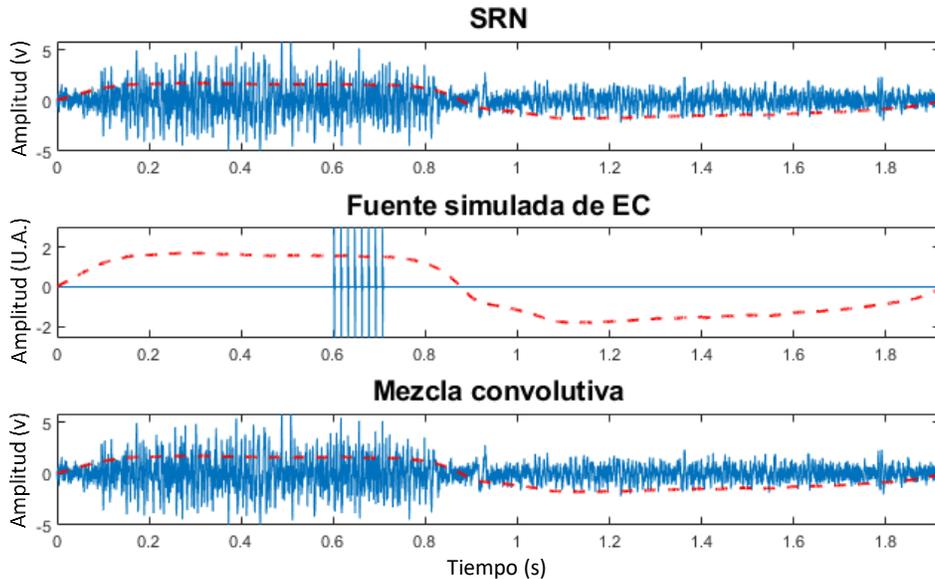


**Figura 9.** Sección temporal de una misma fuente simulada de ECf a insertarse en un micrófono fuente (color azul) y la versión correspondiente a insertarse en un micrófono de propagación (color rojo).

La señal resultante de la convolución entre la fuente de EC simulada con el filtro que simula al parénquima pulmonar se añade a la señal de SRN del micrófono seleccionado para obtener una de las mezclas a separar mediante ICA. En la **figura 10** se muestra una señal de SRN (gráfica superior), la fuente de 8 ECf simulada (gráfica media) y la mezcla generada en este ejemplo bajo el modelo convolutivo de la BSS (gráfica inferior).

### VI.4 BSS MEDIANTE ICA, DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE EC Y DESEMPEÑO DE ALGORITMOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al realizar las pruebas establecidas en la **tabla 3** mediante los distintos algoritmos de ICA. Aquí, se presentan tanto los CIs estimados como las salidas de los filtros CIs-FiltECf o CIs-FiltECg junto a sus respectivos espectrogramas. En la prueba 1 se presentan la fuente simulada de EC y los resultados obtenidos por ambos filtros para



**Figura 10.** Generación de una mezcla convolutiva. La señal de SRN en un CR se muestra en la gráfica superior mientras los EC simulados a insertar así como su posición temporal en el CR, se muestran en la gráfica de en medio. Finalmente, la mezcla se despliega en la gráfica inferior. En todos los casos se muestra la señal de flujo respiratorio en color rojo.

ejemplificar el efecto de la etapa de filtrado dentro de la detección automática de la presencia y tipo de EC. También, se muestra la envolvente de la banda de frecuencia correspondiente al tipo de EC presente en los Cls para mostrar el proceso de conteo de EC presentes en los Cls. Finalmente, en cada prueba se presentan los resultados obtenidos del índice SIR para determinar la eficiencia de cada algoritmo. Con la idea de resumir los resultados para una fácil lectura, en el resto de las pruebas se muestran únicamente el valor de la curtosis y sesgo, el conteo de estertores y el índice SIR obtenido. Las gráficas complementarias de estas pruebas se encuentran en el Anexo para su revisión.

#### VI.4.1 Prueba 1 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional

Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC en la fase de inspiración del CR. La fuente se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó unidireccionalmente hacia los micrófonos PM4 y PRX4.

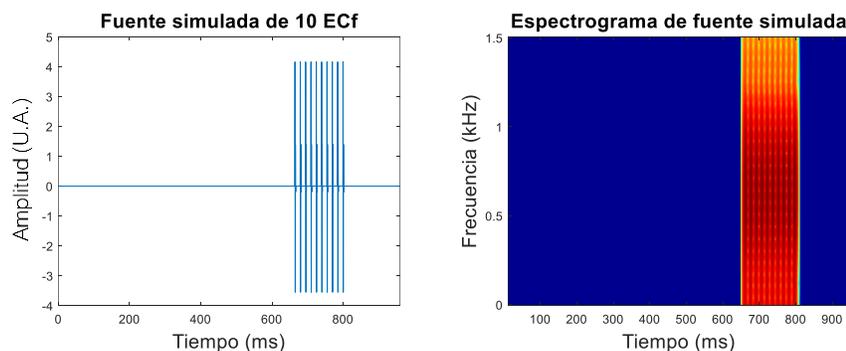
##### VI.4.1.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

En esta subsección, denominada prueba 1f, se muestran los resultados obtenidos a partir de las mezclas generadas. La fuente simulada de ECf y su espectrograma se muestran en la **figura 11**. Como se observa en el espectrograma, la mayor potencia de acuerdo a la escala de colores se encuentra entre 600 a 800 ms y de 0.5 a 1 kHz. Empleando los algoritmos de ICA, es decir, Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax, se calcularon los Cls mostrados en la **figura 12**. Con base en las gráficas del dominio temporal de esta figura, en general no es posible observar información de EC,

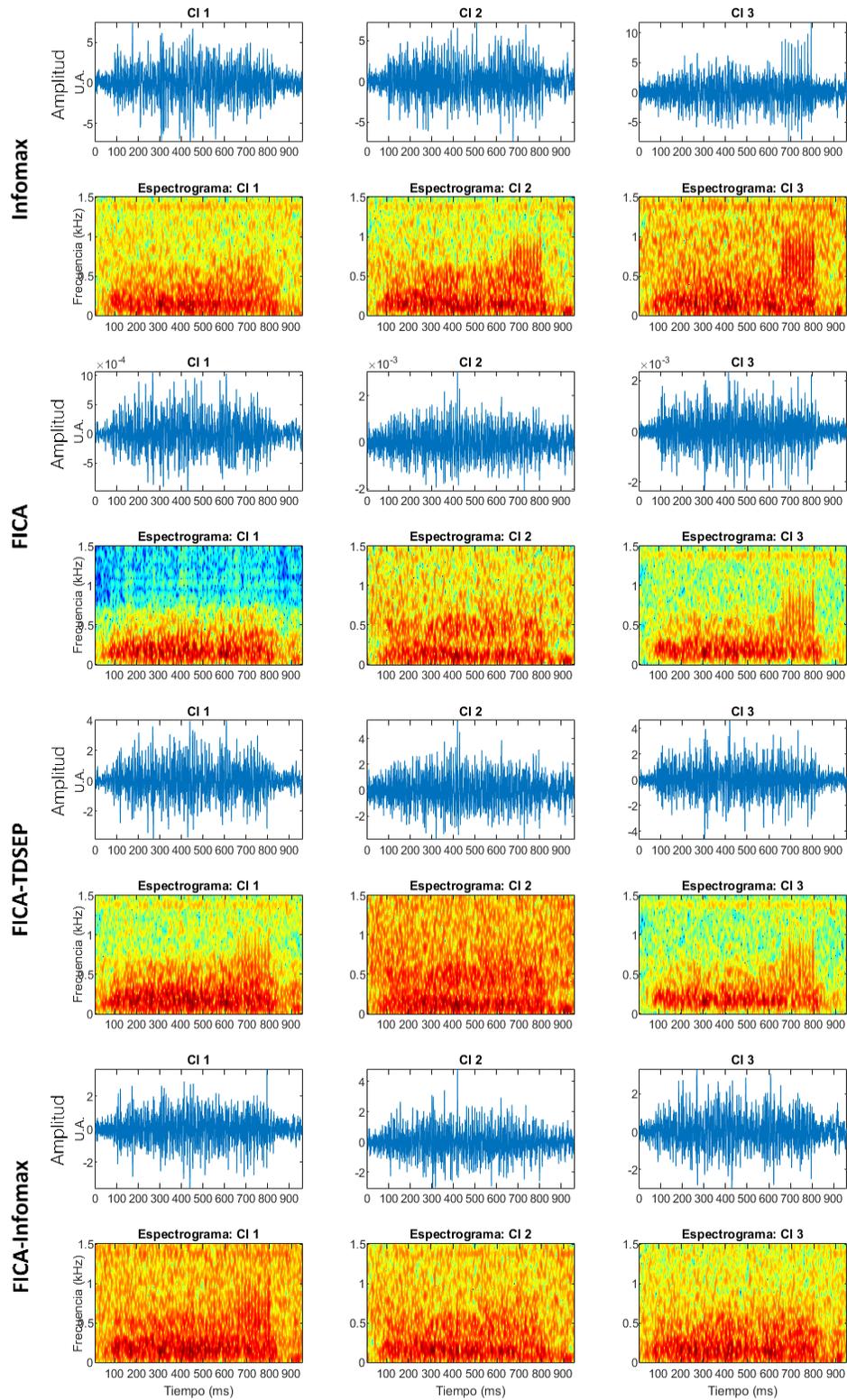
los cuales se visualizan como espigas, en los componentes estimados a excepción del CI 3 de Infomax. En contraste, sí se aprecia mayor información acerca de la presencia de EC en los distintos espectrogramas de los CIs. Para Infomax en los espectrogramas de los CI 2 y CI 3, para FICA y FICA-TDSEP en los espectrogramas de los CI 3, y para FICA-Infomax en el espectrograma del CI 1 se encuentran patrones similares al presentado en la **figura 11**, a la derecha. Los CIs filtrados por FiltECf se muestran en la **figura 13** mientras que los CIs filtrados por FiltECg se muestran en la **figura 14**. En los CIs-FiltECf es posible observar distintos CIs con la presencia del patrón de espigas pero no en los CIs-FiltECg. En la **figura 13**, se presenta el patrón en las gráficas por Infomax del dominio temporal y de los espectrogramas en el CI 2 y CI 3, de FICA en el CI 3, de FICA-TDSEP en el CI 1 y CI 3, y de FICA-Infomax en el CI 1. Para FICA-TDSEP el patrón de espigas en el CI 1 se muestran con baja amplitud e intensidad en el dominio del tiempo y en el espectrograma, respectivamente. El patrón visualizado en los CIs y en los CIs filtrados se encuentra entre los 600 y 850 ms con contenido en frecuencia alrededor de 650 Hz, coincidiendo con la fuente simulada de ECf.

El siguiente paso es la detección automática de EC para la cual se calcularon los valores de curtosis y sesgo de los CIs filtrados mediante FiltECf y FiltECg. En la **figura 15** se muestran los valores de curtosis y sesgo calculados a partir de los CIs filtrados. Se observa que en ningún CI-FiltECg se detectó la presencia de EC, en cambio, distintos CIs-FiltECf muestran EC, lo que indica que los estertores detectados en los CIs son de tipo fino. Los CIs con presencia de ECf son el CI 2 y CI 3 de Infomax, el CI 3 de FICA, el CI 3 de FICA-TDSEP, y el CI 1 de FICA-Infomax.

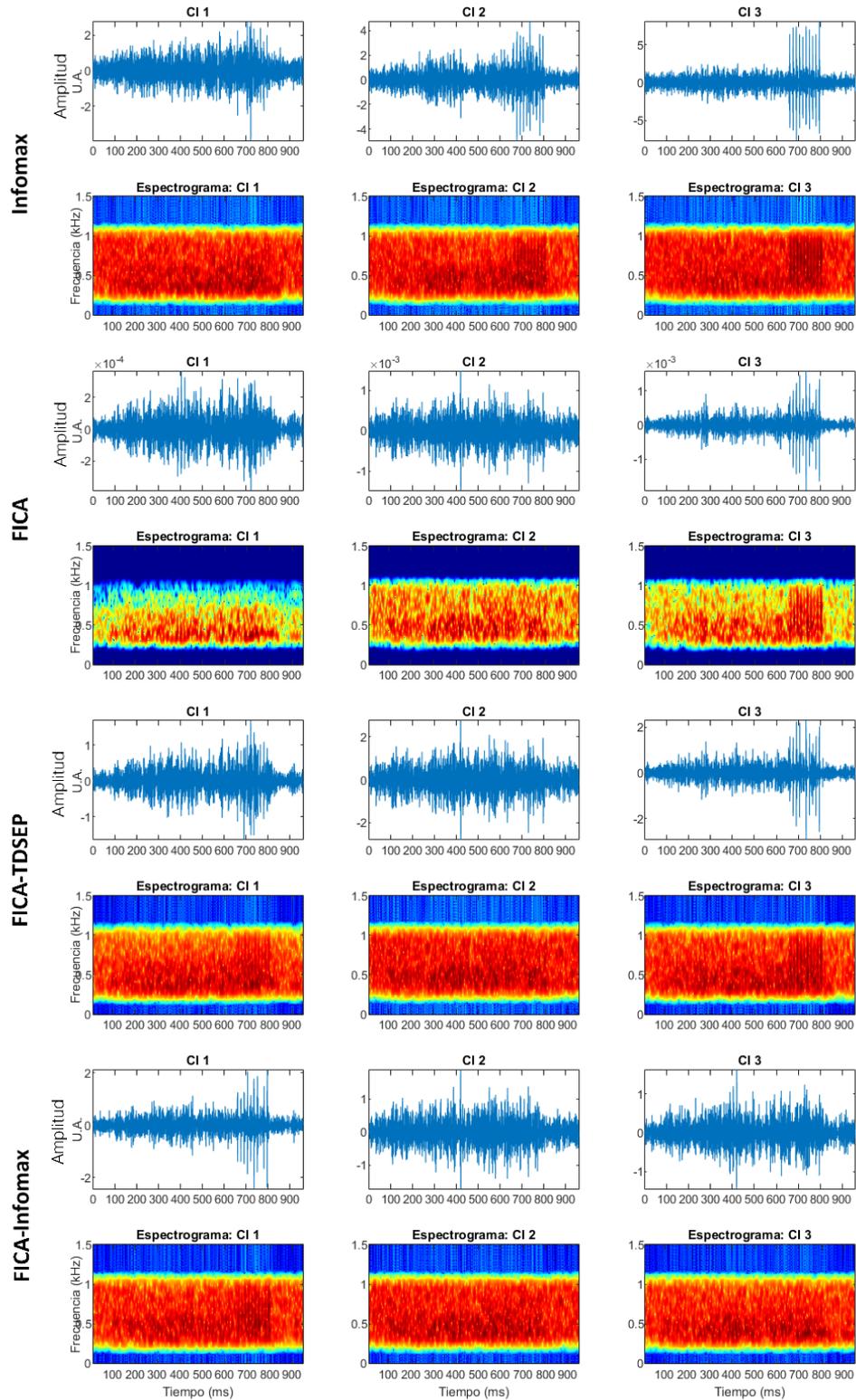
En la **figura 16** se muestra el conteo de EC en la banda de frecuencia del espectrograma asociada a los EC de tipo fino (alrededor de 650 Hz) de los CIs identificados con presencia de EC. En esta figura, se observa que en cada uno de estos componentes se detectaron 10 EC, resultados que coinciden con la fuente simulada. Esto indica que, en total, se detectaron 20 ECf en los CIs de Infomax.



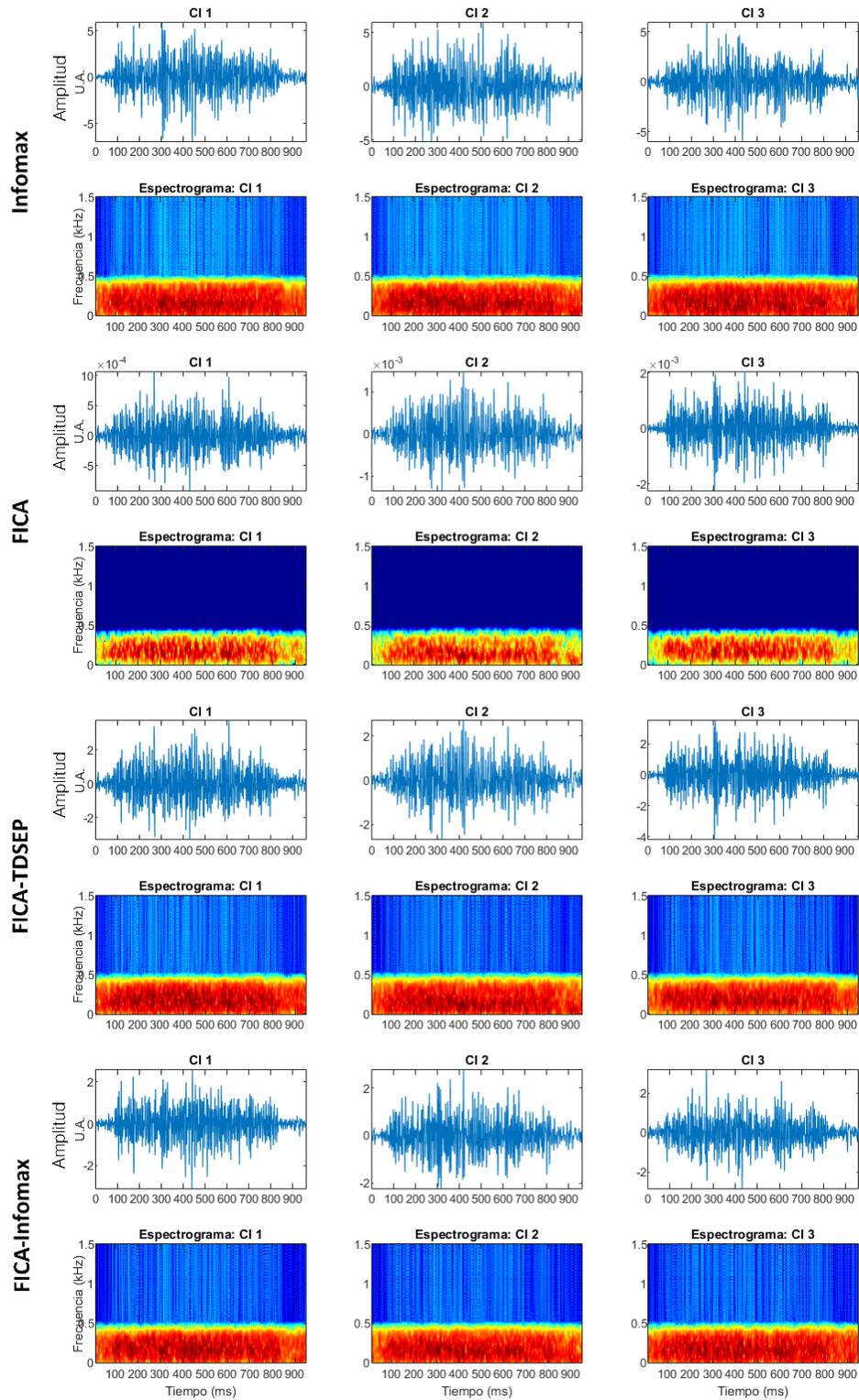
**Figura 11.** Fuente simulada de 10 ECf (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 10 ECf se emplearon en la prueba 1f.



**Figura 12.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 1f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



**Figura 13.** CIs presentados en la figura 12 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 1f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

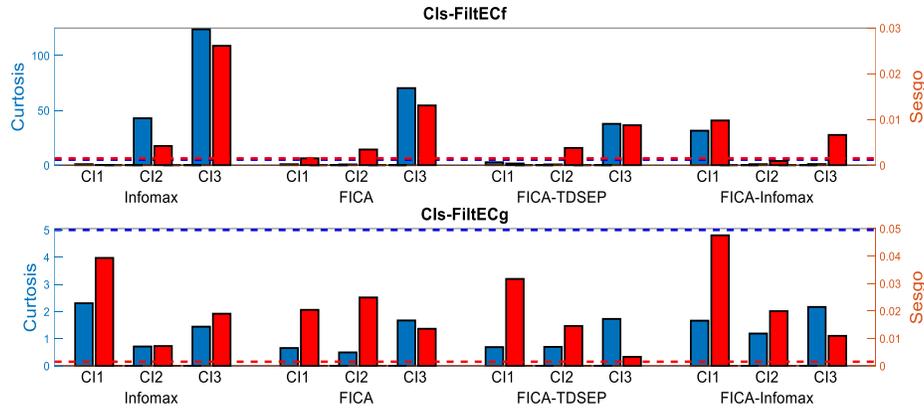


**Figura 14.** CIs presentados en la figura 12 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 1f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

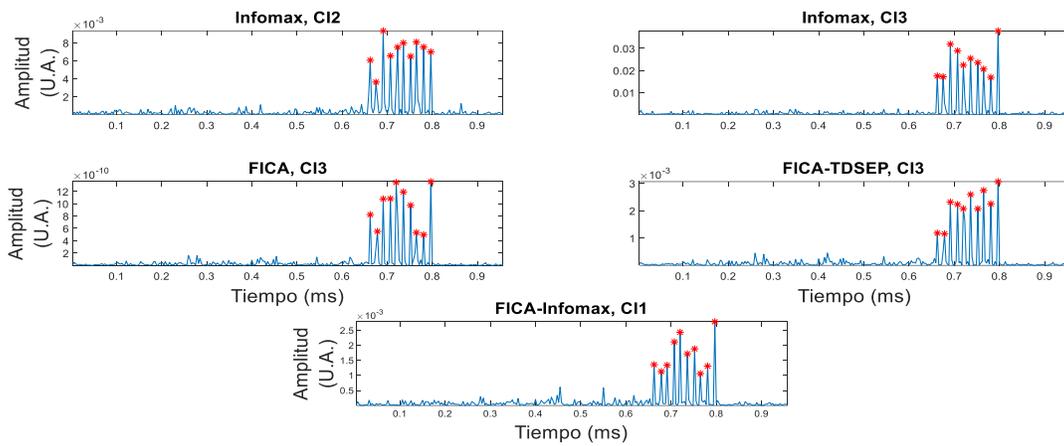
Finalmente, el desempeño de los algoritmos de ICA medido a través del índice SIR se muestra en la **figura 17**. En la parte superior de esta figura se muestran los índices SIR calculados entre las representaciones temporales de los CIs filtrados (correspondientes al tipo de CI detectado) y la fuente simulada de EC; estos índices simbolizan la semejanza morfológica entre los CIs filtrados con la fuente simulada de EC. En la parte inferior de esta figura se encuentran los índices SIR calculados entre los espectrogramas de los CIs filtrados correspondientes y de la fuente simulada de EC, índices que simbolizan la semejanza en el contenido en frecuencia de los CIs con la fuente simulada de EC. Aquí, se observa que FICA obtuvo el mayor índice SIR de los cuatro algoritmos de ICA en la recuperación morfológica de la fuente simulada, es decir, logró el mejor desempeño en la BSS, seguido por Infomax en su CI 3, FICA-Infomax y, finalmente, FICA-TDSEP. En relación a la recuperación del contenido en frecuencia de la fuente simulada, Infomax obtuvo el mejor desempeño en la BSS en su CI 3 de acuerdo al índice SIR calculado, seguido de FICA, FICA-TDSEP y, por último, FICA-Infomax. El índice SIR calculado entre los CI 2 y CI 3 de Infomax es de 0.0757. En conjunto, los resultados indican que estos CIs de Infomax poseen información redundante de la fuente simulada de 10 ECf, teniendo ésta mayor semejanza con el CI 3 de acuerdo a los índices SIR mostrados en la **figura 17**.

#### VI.4.1.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

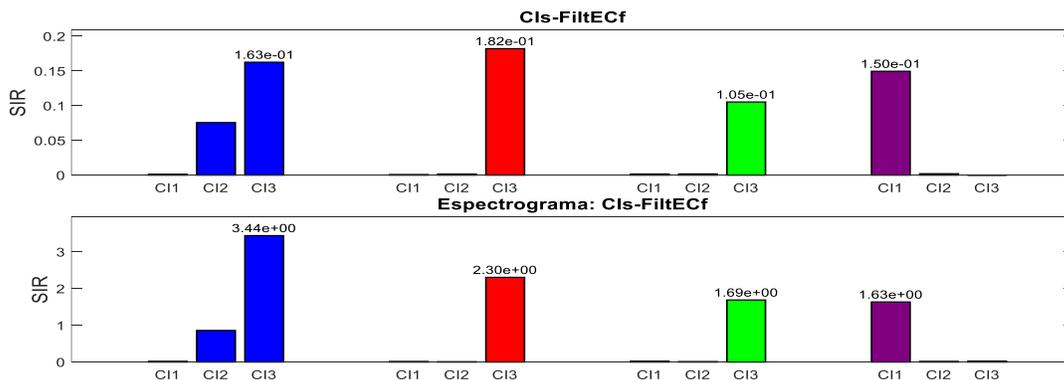
En la **figura 18** se muestra la fuente simulada de ECg empleada en esta prueba, definida como prueba 1g, en la generación de mezclas convolutivas junto a su espectrograma. En las **figuras 19, 20 y 21** se encuentran respectivamente los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA a partir de las mezclas convolutivas, y los correspondientes CIs-FiltECf y CIs-FiltECg. En la **figura 19** se observa el patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales del CI 1 de Infomax, del CI 3 de FICA y de los CI 2 de FICA-TDSEP y FICA-Infomax, mientras que en los espectrogramas se observa este patrón en los CI 1 y CI 3 de Infomax, en el CI 3 de Infomax y en los CI 2 de FICA-TDSEP y FICA-Infomax. En la **figura 20** no es posible visualizar el patrón de espigas en las representaciones de los CIs-FiltECf, mientras que en la **figura 21** se aprecia este patrón en los CI 1 y CI 3 de Infomax, en el CI 3 de FICA y en los CI 2 de FICA-TDSEP y FICA-Infomax tanto en la representación temporal como en el espectrograma. Este patrón de espigas se encuentra entre 600 y 800 ms con contenido en frecuencia alrededor de 200 Hz, lo que coincide con las características de los ECg de la fuente simulada.



**Figura 15.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los CIs filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 1f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 16.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los CIs con presencia de EC en la prueba 1f y se limitó el análisis a la banda de ECf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los CIs se detectaron 10 ECf.



**Figura 17.** Índices SIR obtenidos en la prueba 1f. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los CIs-FiltECf y como señal de referencia la fuente simulada de 10 ECf mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los CIs-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los CIs de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

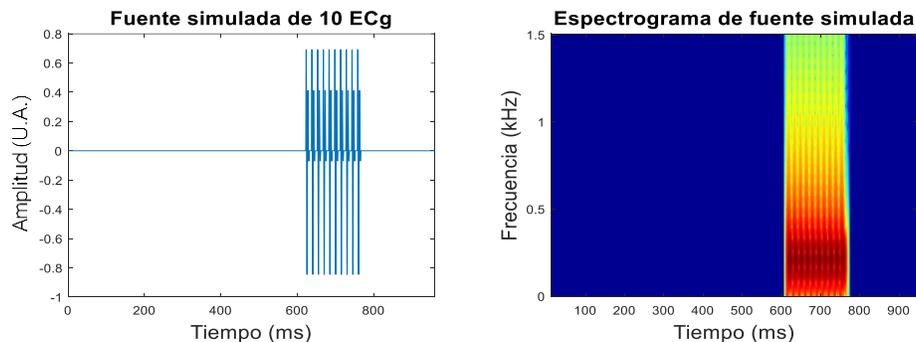
Los valores de curtosis y sesgo calculados a partir de los CIs filtrados mediante FiltECf y FiltECg, mostrados en la **figura 22**, indican que no se detectaron EC en los CIs-FiltECf. Sin embargo, en los resultados de los CIs-FiltECg se detectaron EC en los CI 1 y CI 3 de Infomax, en el CI 3 de FICA y en los CI 2 de FICA-TDSEP y FICA-Infomax, por lo tanto, el tipo de estertor es determinado como grueso. En cada uno de estos CIs se detectaron 10 ECg, como se muestra en la **figura 23**, generando una cuenta total de 20 ECg en los CIs estimados mediante Infomax. Lo anterior se podría interpretar como la obtención de falsos positivos por parte de Infomax. Los índices SIR calculados (**figura 24**) muestran que Infomax obtuvo el mejor desempeño en la recuperación de fuentes tanto morfológicamente como en contenido en frecuencia, sin embargo, este algoritmo estimó dos CIs con presencia de EC los cuales se asocian a la fuente simulada de ECg al considerar tanto las posiciones de los estertores encontrados en los componentes como el índice SIR de 0.0197 calculado entre estos dos componentes. Entre los CIs de Infomax, fue el CI 1 el que obtuvo una mayor semejanza con la fuente simulada de acuerdo a los índices SIR mostrados en la **figura 24**. En cuanto a los algoritmos que involucran a ICA<sub>F</sub>, FICA-Infomax obtuvo el mejor desempeño en la BSS, seguido por FICA-TDSEP y FICA.

#### VI.4.2 Prueba 2 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional

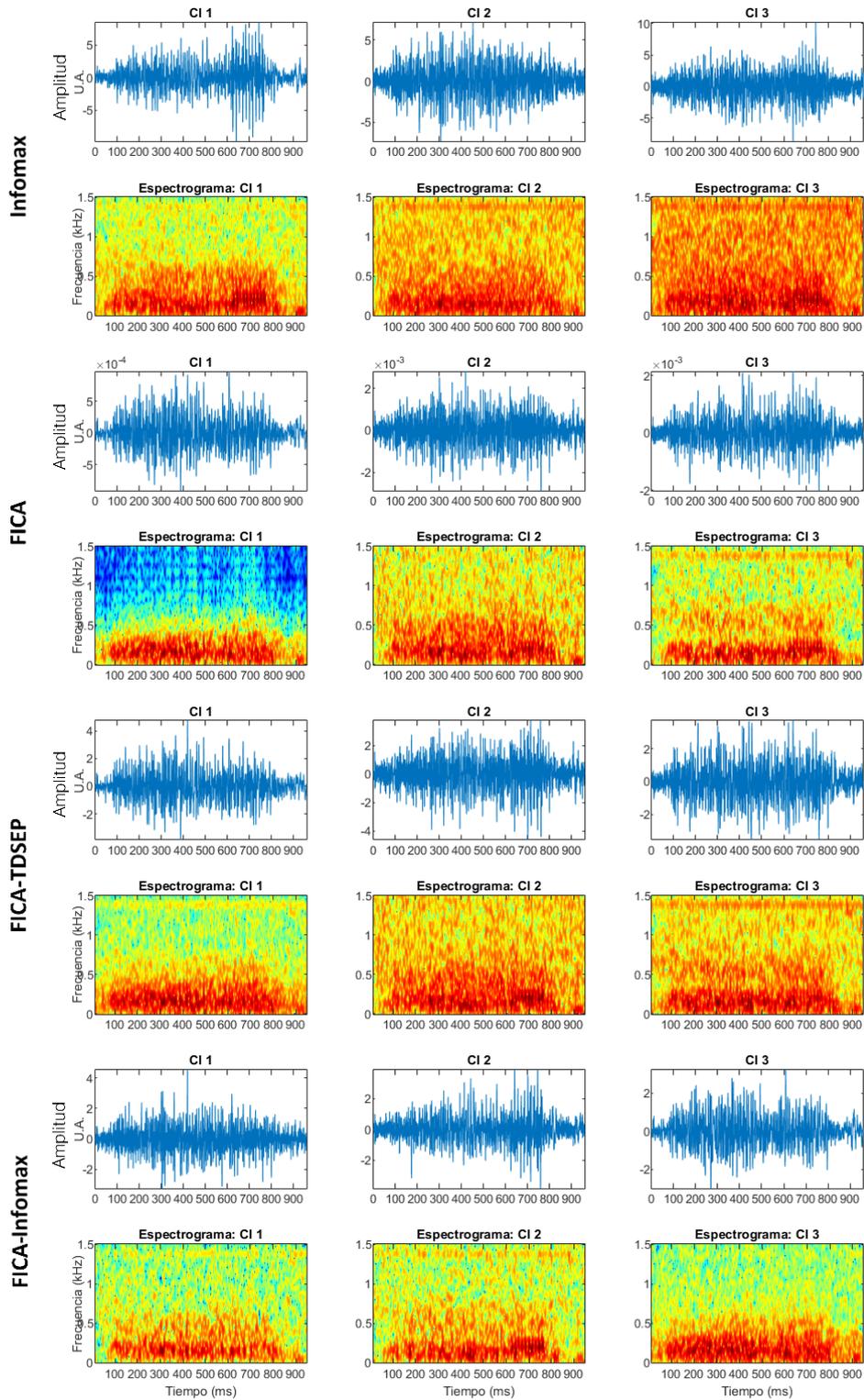
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC en la fase de inspiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó unidireccionalmente hacia los micrófonos PM3 y PRX3.

##### VI.4.2.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

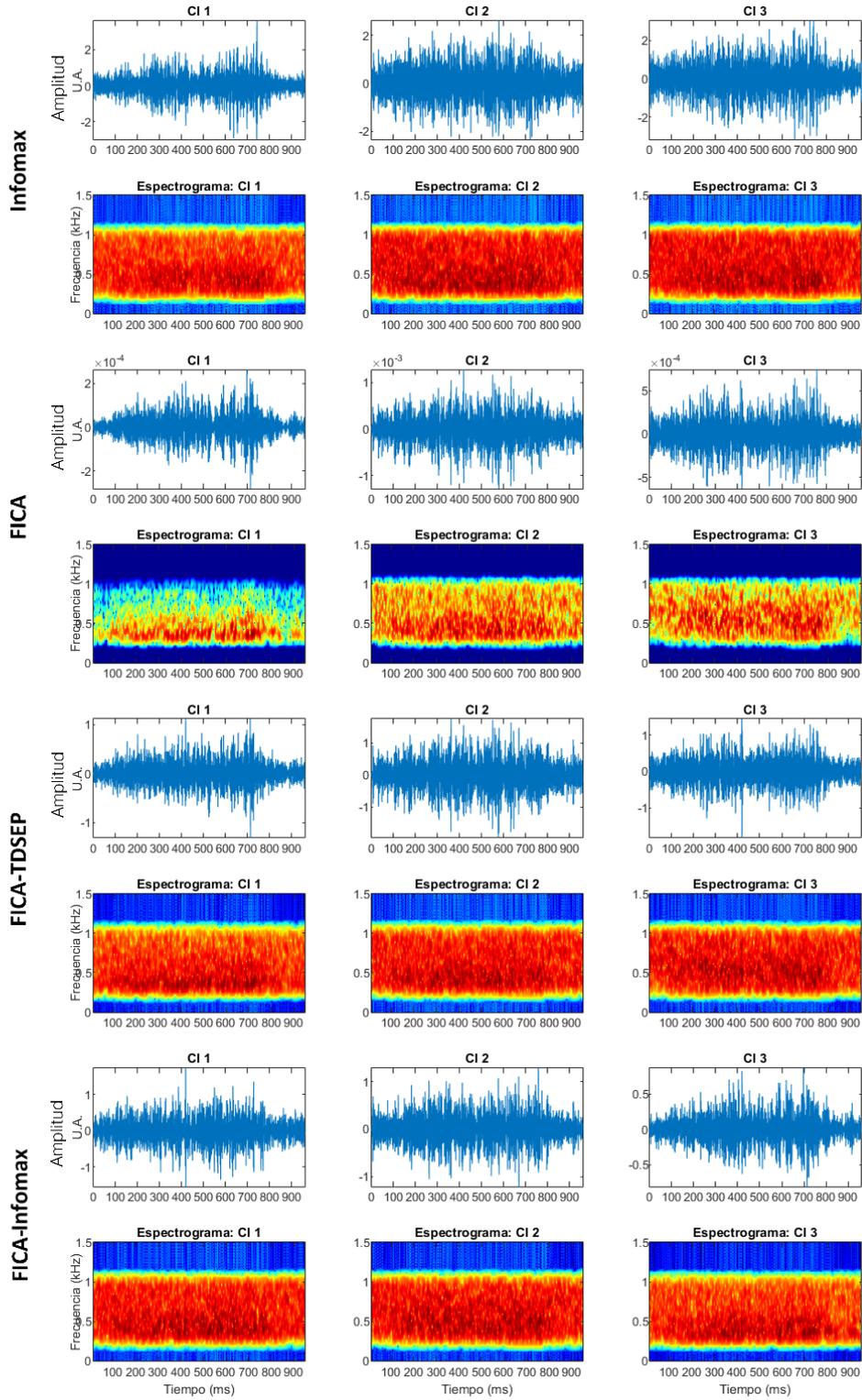
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 2f, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo, mostrados en la **figura 25**, identifican a los



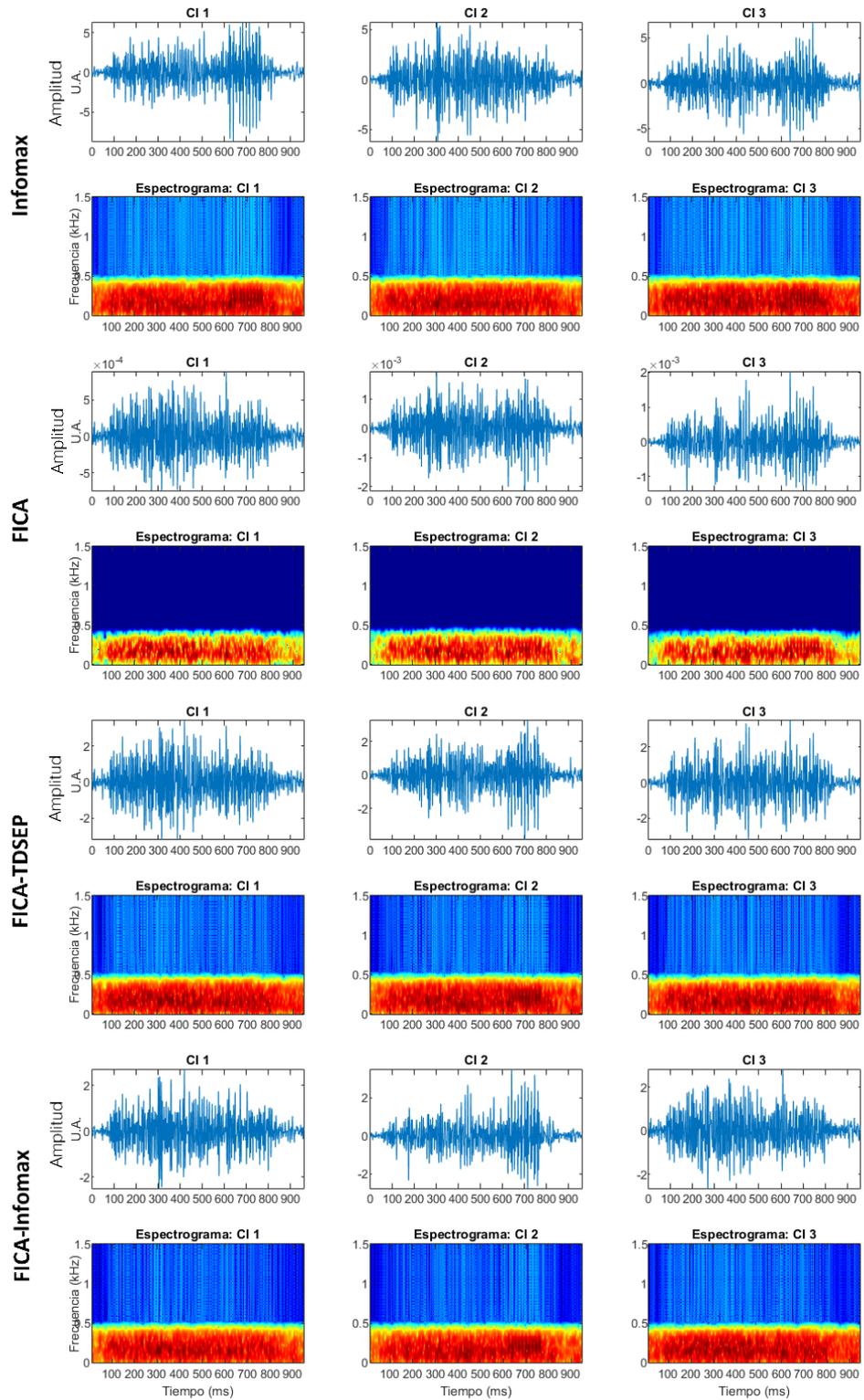
**Figura 18.** Fuente simulada de 10 ECg (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 10 ECg se emplearon en la prueba 1g.



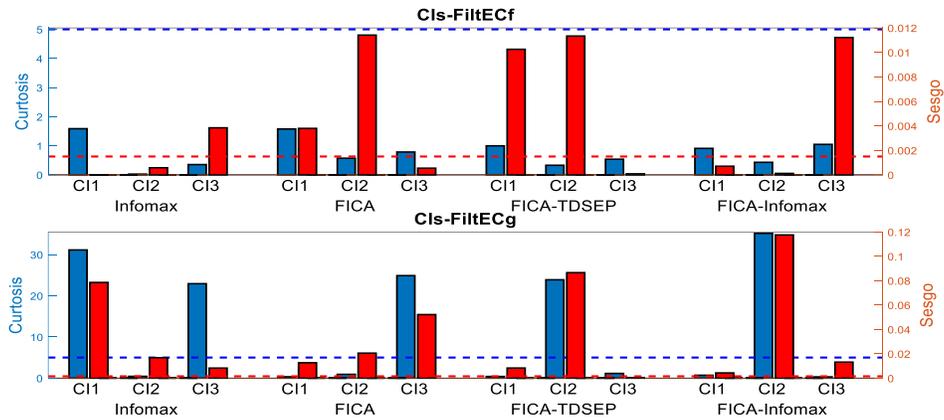
**Figura 19.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 1g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.



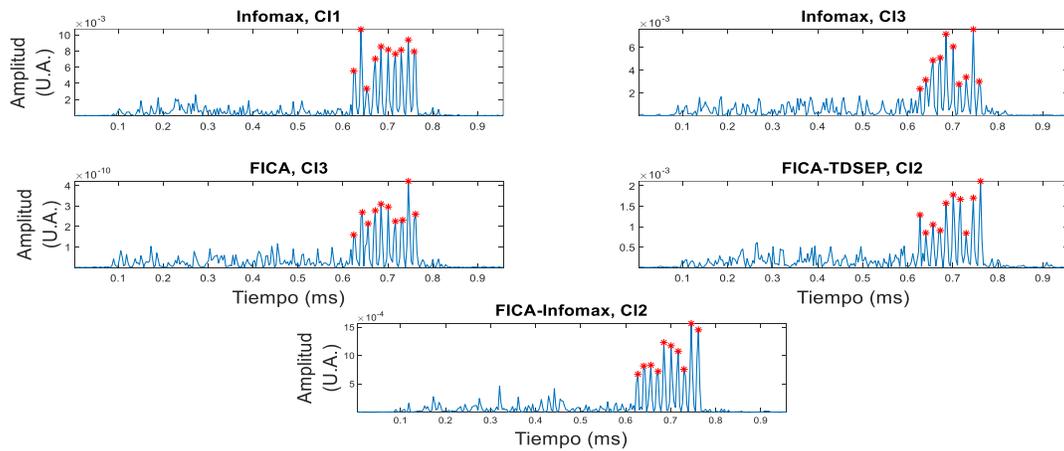
**Figura 20.** CIs presentados en la figura 19 y filtrados con FiltEcF (CIs-FiltEcF) en la prueba 1g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.



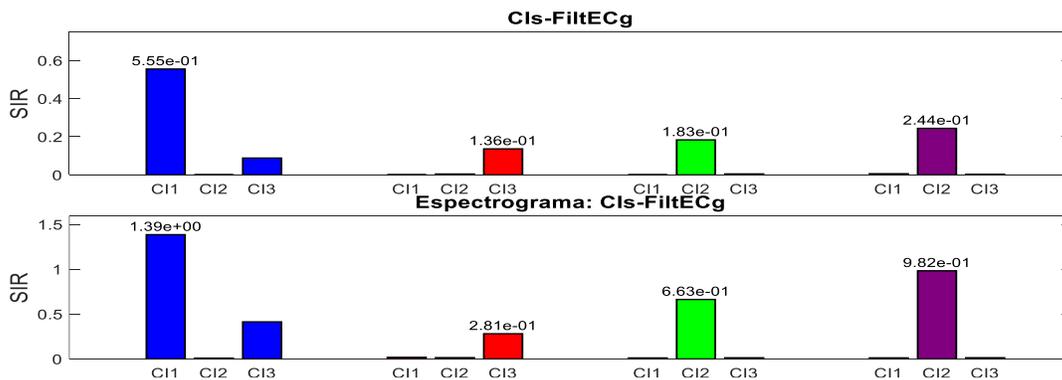
**Figura 21.** CIs presentados en la figura 19 y filtrados con FilteCg (CIs-FilteCg) en la prueba 1g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.



**Figura 22.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 1g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 23.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 1g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 10 ECg.



**Figura 24.** Índices SIR obtenidos en la prueba 1g. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y como señal de referencia la fuente simulada de 10 ECg mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax y a los CIs 3 de FICA y FICA-TDSEP como componentes con presencia de EC de tipo fino. En cada uno de estos CIs se detectaron 8 ECf, como se muestra en la **figura 26**. En total, se detectaron 24 ECf en los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax. De acuerdo a los índices SIR calculados tanto en la representación temporal como en la representación tiempo-frecuencia de los CIs-FiltECf, mostrados en la **figura 27**, FICA fue el algoritmo con mejor desempeño en la recuperación de fuentes, seguido por FICA-TDSEP, FICA- Infomax e Infomax. Considerando los índices SIR calculados entre los CIs con EC de Infomax ( $0.0230 \pm 0.0179$ ) y las posiciones de los EC recuperados, se asocian, con redundancia, los tres CIs estimados por este algoritmo a la fuente simulada de ECf, siendo el CI 3 aquel componente con mayor semejanza a la fuente simulada, seguido por el CI 1 y, por último, el CI 2, de acuerdo a los índices SIR calculados.

#### VI.4.2.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

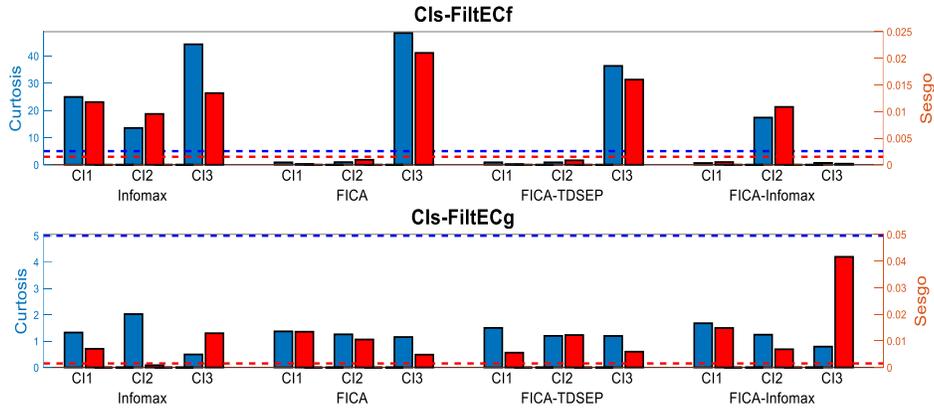
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 2g, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo, mostrados en la **figura 28**, indican la detección de EC de tipo grueso en el CI 1 de Infomax, en los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax. De acuerdo al conteo automático, mostrado en la **figura 29**, se detectaron 8 ECg en cada uno de estos CIs. En cuanto al desempeño obtenido por los algoritmos de ICA, Infomax logró el mejor desempeño en la BSS tanto morfológicamente como en contenido en frecuencia de acuerdo a los índices SIR calculados y mostrados en la **figura 30**, seguido por FICA-Infomax, FICA-TDSEP y FICA.

#### VI.4.3 Prueba 3 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional

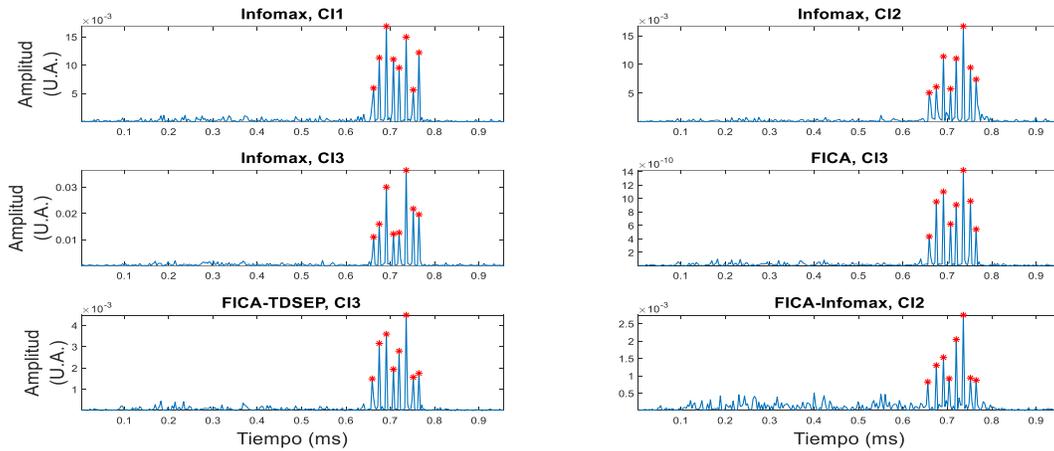
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC en la fase de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC3 y se propagó unidireccionalmente hacia los micrófonos PLX3 y PM3.

##### VI.4.3.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

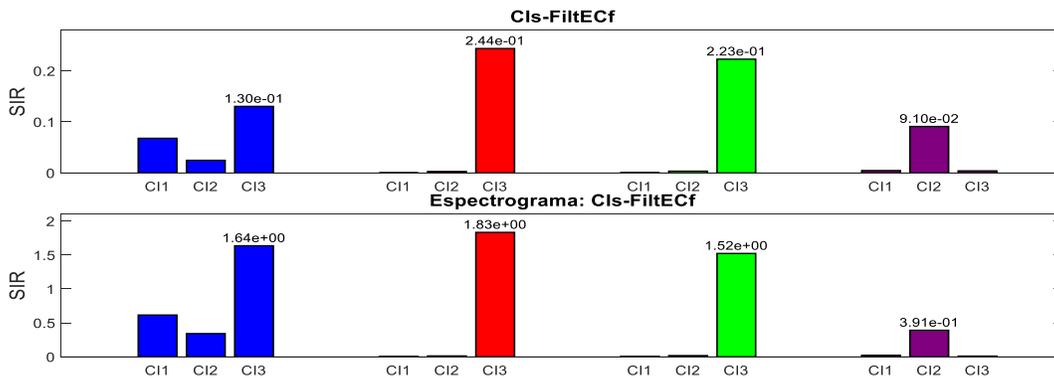
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 3f, se encuentran en el anexo para su revisión. De acuerdo a la curtosis y el sesgo calculados, se tiene que los CI 1 y CI 2 de Infomax, los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP, y el CI 2 de FICA-Infomax contienen EC de tipo fino (**figura 31**). También, en cada uno de estos CIs se detectaron 8 ECf mediante el cálculo de máximos locales en las respectivas bandas de frecuencia, de acuerdo a lo mostrado en la **figura 32**. Infomax, en total, recuperó 16 ECf en sus CIs. Los índices SIR de desempeño se muestran en la **figura 33**, donde se



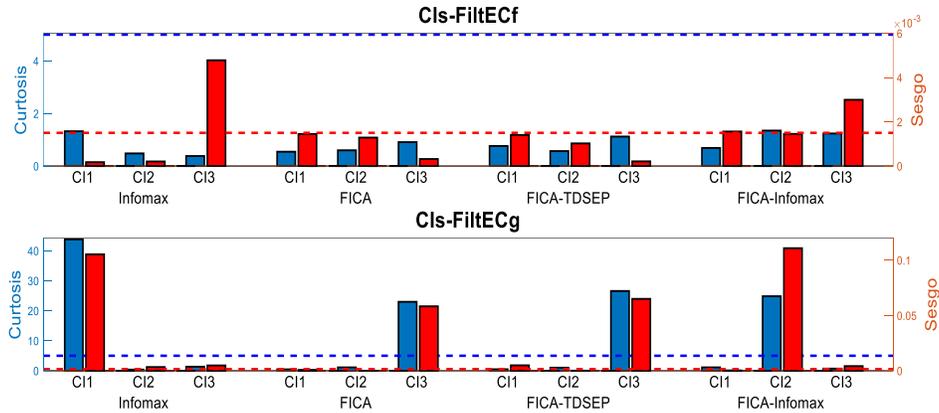
**Figura 25.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 2f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



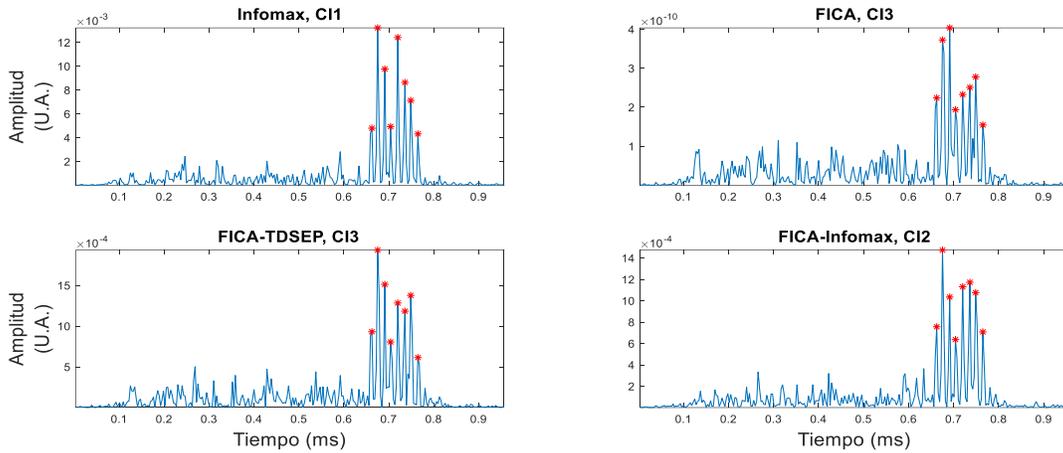
**Figura 26.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los Ecf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 2f y se limitó el análisis a la banda de Ecf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 8 ECf.



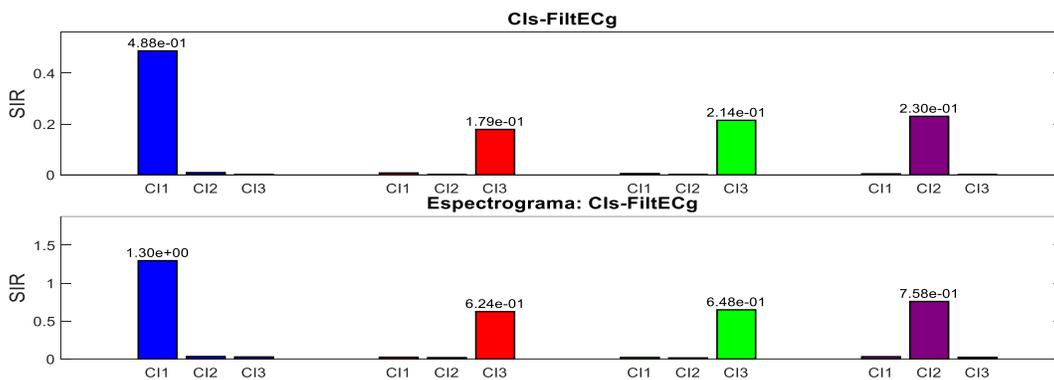
**Figura 27.** Índices SIR obtenidos en la prueba 2f. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y como señal de referencia la fuente simulada de 8 Ecf mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 28.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 2g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 29.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 2g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 8 ECg.



**Figura 30.** Índices SIR obtenidos en la prueba 2g. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y como señal de referencia la fuente simulada de 8 ECg mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

observa que Infomax obtuvo el mejor desempeño en la BSS en cuanto a la morfología de los CIs, seguido por FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. En cambio, de acuerdo al contenido en frecuencia, FICA-TDSEP obtuvo el mejor desempeño seguido por FICA, Infomax y FICA- Infomax. Entre los CIs estimados de Infomax, el CI 1 fue aquel con mayor semejanza a la fuente simulada de EC de acuerdo a los índices SIR calculados. El índice SIR calculado entre los CI 1 y CI 3 de Infomax fue de 0.0577, lo que indica, junto a las posiciones de los EC encontrados, que ambos CIs contienen información redundante de la fuente simulada de ECf. Con respecto a los algoritmos que involucran a ICA<sub>F</sub>, se lograron desempeños similares en las representaciones temporales, mientras que en la representación tiempo-frecuencia FICA-TDSEP y FICA obtuvieron desempeños mayores a FICA-Infomax.

#### VI.4.3.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

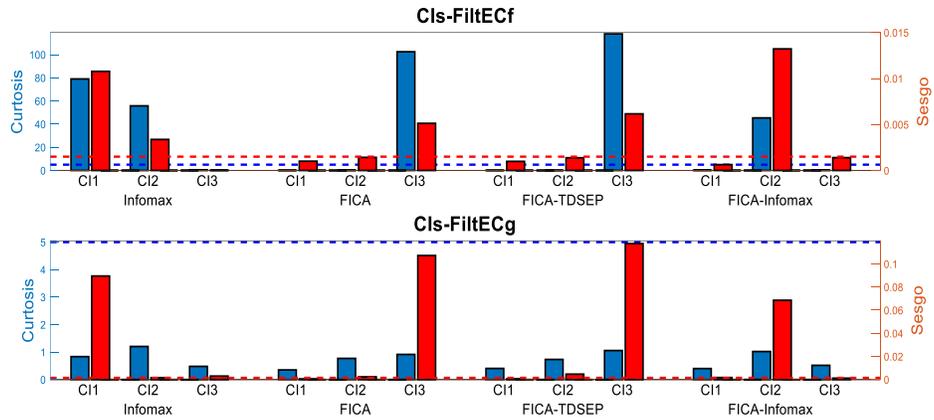
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 3g, se encuentran en el anexo para su revisión. En la **figura 34** se observa, a través de los valores de curtosis y sesgo calculados, que el CI 1 de Infomax, el CI 3 de FICA, los CI 2 y CI 3 de FICA-TDSEP y el CI 2 de FICA-Infomax contienen EC de tipo grueso. También, se encontró que cada uno de estos CIs cuenta con 8 ECg al calcular los máximos locales, mostrados en la **figura 35**, en la banda de frecuencia del espectrograma asociada a los ECg. FICA-TDSEP estimó, en total, 16 ECg. Los índices SIR calculados, señalados en la **figura 36**, indican que Infomax obtuvo la mejor recuperación de fuentes tanto morfológicamente como en el contenido en frecuencia, seguido por FICA-Infomax, FICA y FICA-TDSEP. El CI 3 de FICA-TDSEP fue aquel componente de este algoritmo con mayor semejanza a la fuente simulada de acuerdo a los índices SIR calculados. Se considera que existe información redundante de la fuente simulada de ECg en los CI 2 y CI 3 de FICA-TDSEP debido al índice SIR calculado entre estos componentes (0.0098) y a la ubicación de los EC recuperados.

#### **VI.4.4 Prueba 4 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional**

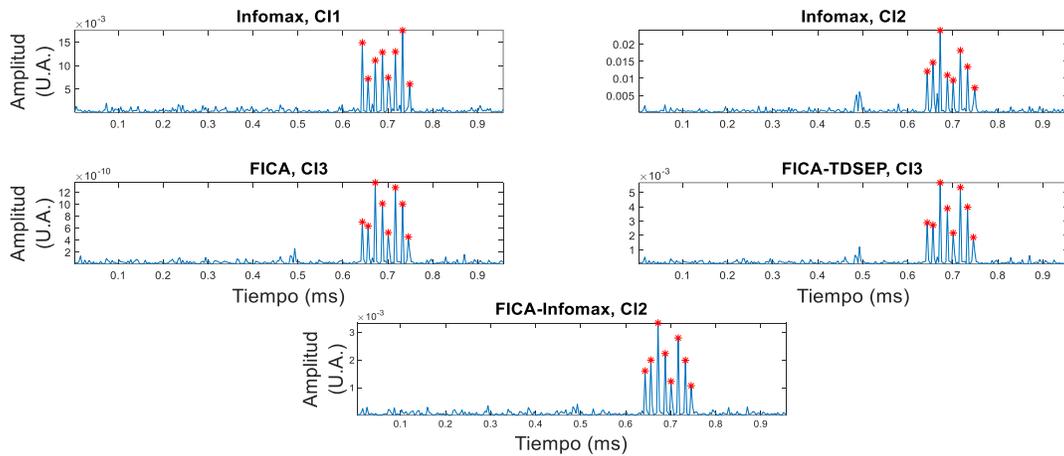
Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC en la fase de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC2 y se propagó unidireccionalmente hacia los micrófonos PLX2 y PM2.

##### VI.4.4.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

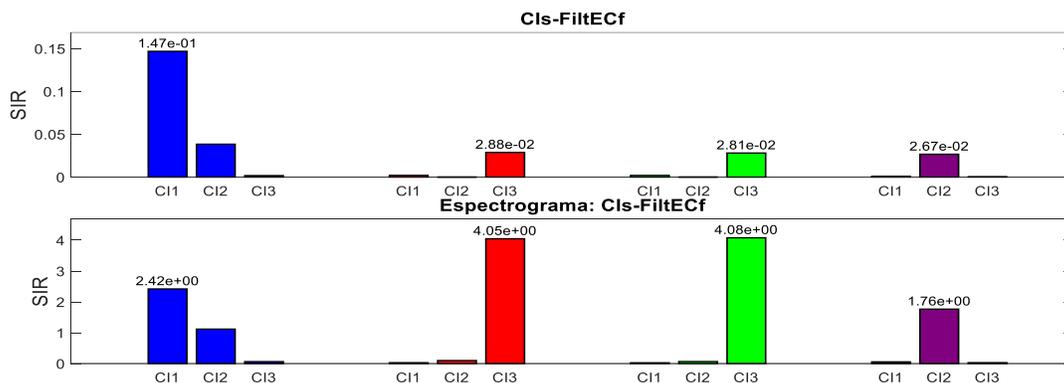
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 4f, se encuentran en el anexo para su revisión. Mediante la detección automática de CIs con EC, mostrada en la **figura 37**,



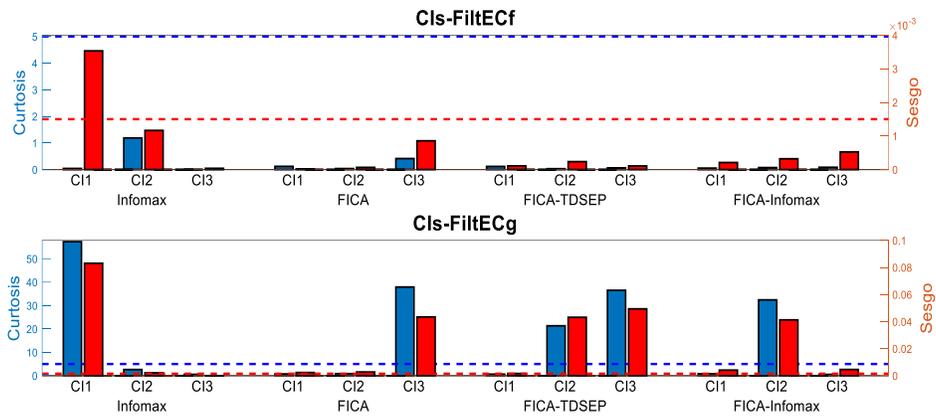
**Figura 31.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 3f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



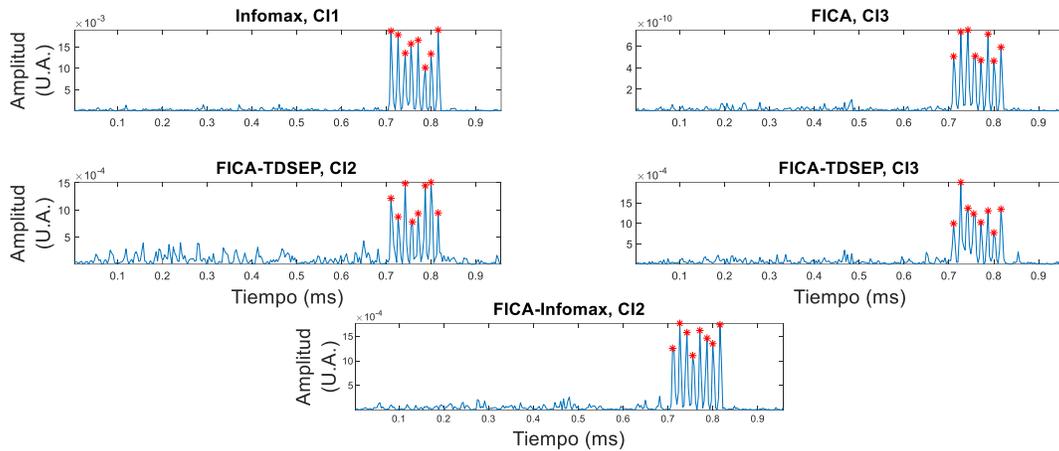
**Figura 32.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los Ecf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 3f y se limitó el análisis a la banda de ECF. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 8 ECF.



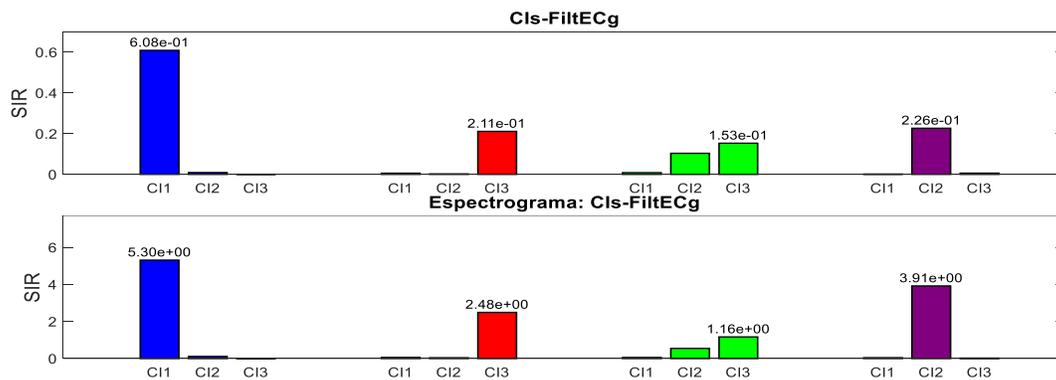
**Figura 33.** Índices SIR obtenidos en la prueba 3f. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y como señal de referencia la fuente simulada de 8 Ecf mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 34.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los CIs filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 3g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 35.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los CIs con presencia de EC en la prueba 3g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los CIs se detectaron 8 ECg.



**Figura 36.** Índices SIR obtenidos en la prueba 3g. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los CIs-FiltECg y como señal de referencia la fuente simulada de 8 ECg mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los CIs-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los CIs de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

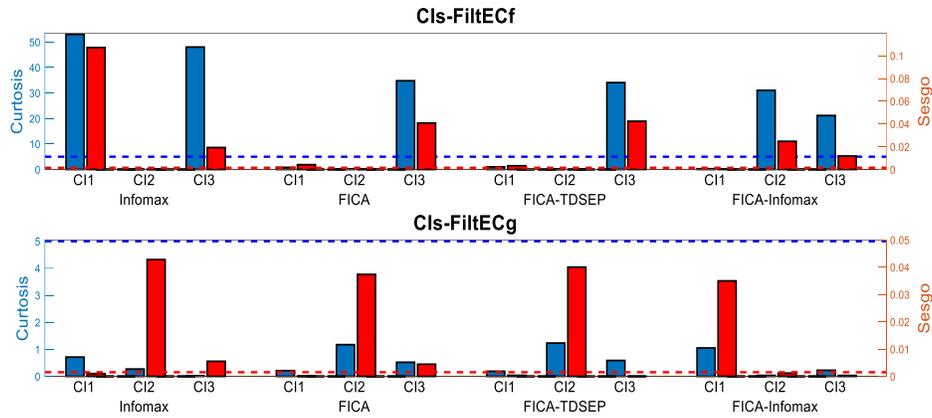
se determinó que los CI 1 y CI 3 de Infomax, los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP, y los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax poseen EC de tipo fino. El conteo de EC, mostrado en la **figura 38**, obtiene como resultado que cada uno de estos CIs contiene 10 ECf. En esta prueba, tanto Infomax como FICA-Infomax recuperaron 20 ECf. Los índices SIR mostrados en la **figura 39** indican que Infomax obtuvo, en su CI 3, la mejor recuperación de la fuente simulada tanto morfológicamente como en su contenido en frecuencia, seguido por FICA, FICA-Infomax (CI 2) y FICA-TDSEP en la representación temporal, y seguido por FICA-TDSEP, FICA y FICA-Infomax (CI 2) en el contenido en frecuencia. El índice SIR calculado entre los CIs con presencia de EC de Infomax y de FICA-Infomax es de 0.0013 y de 0.0337, respectivamente. Dados estos índices SIR y la posición de los EC recuperados, se considera que existe información redundante de la fuente simulada de 10 ECf en los CIs con EC de Infomax y de FICA-Infomax.

#### VI.4.4.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

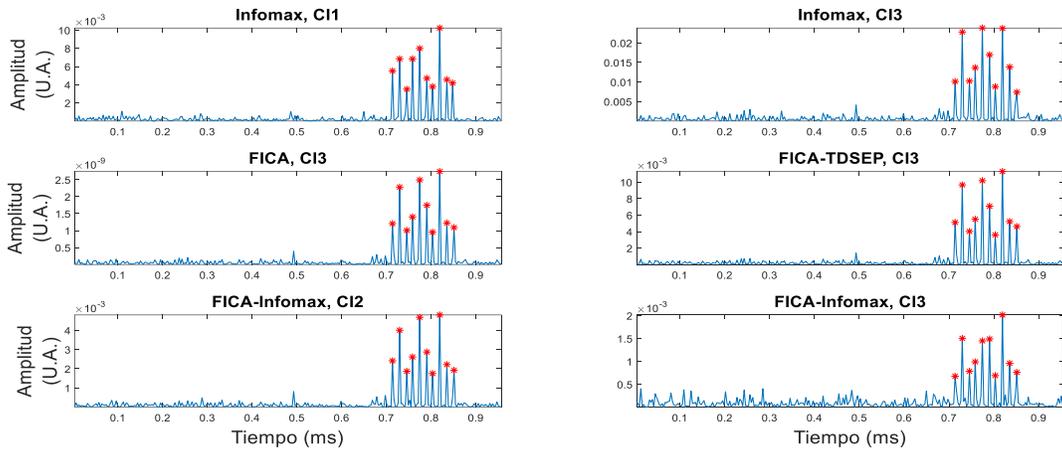
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 4g, se encuentran en el anexo para su revisión. La detección automática de CIs con EC mediante la curtosis y el sesgo muestra, en la **figura 40**, que los CI 1 y CI 2 de Infomax, los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP, y el CI 1 de FICA-Infomax contienen EC de tipo grueso. Como se muestra en la **figura 41**, se determinó que cada uno de estos CIs contiene 10 ECg mediante el proceso de conteo de EC. En total, Infomax estimó 20 ECg entre sus CIs. Los índices SIR mostrados en la **figura 42** muestran que Infomax (CI 1) recuperó la fuente simulada de ECg con mayor semejanza morfológica y en el contenido en frecuencia, seguido por FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax en los mismos rubros. El índice SIR calculado entre los CIs con EC de Infomax es de 0.0078, lo que indica, junto a las posiciones de los EC recuperados en estos componentes, que la fuente simulada de 10 ECg fue recuperada redundantemente en ambos CIs de este algoritmo.

#### VI.4.5 Prueba 5 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN

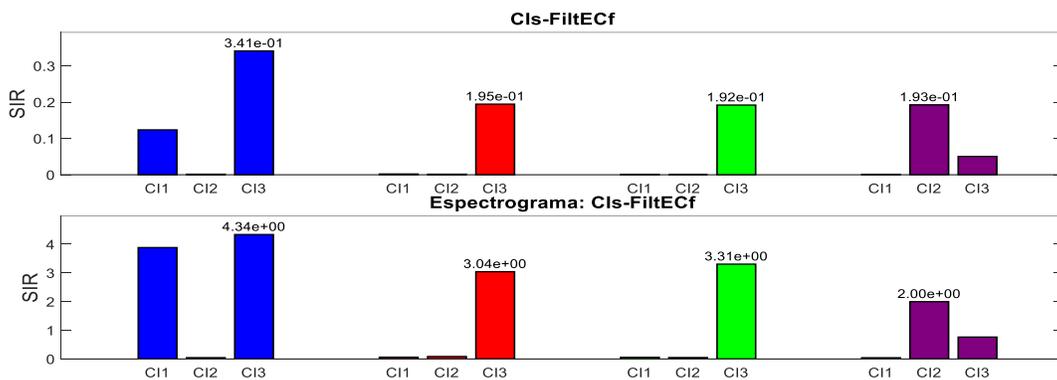
Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC en la fase de inspiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRX4. Además, se consideraron las señales de SRN de los canales PRC5 y PRX5 para la BSS.



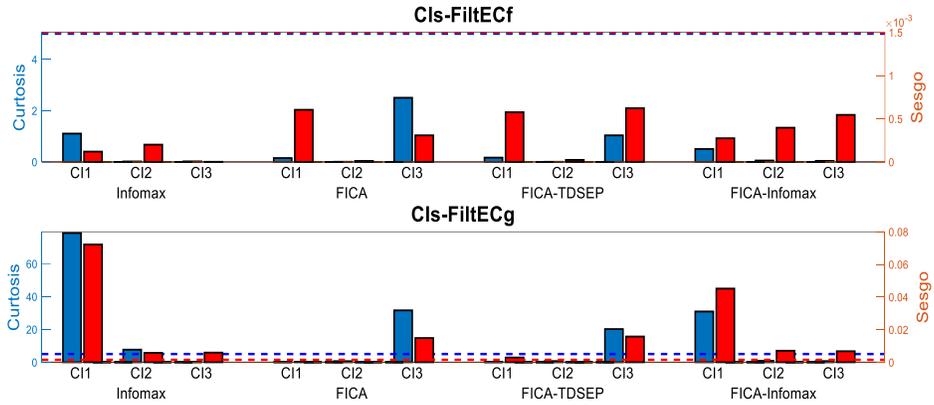
**Figura 37.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 4f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



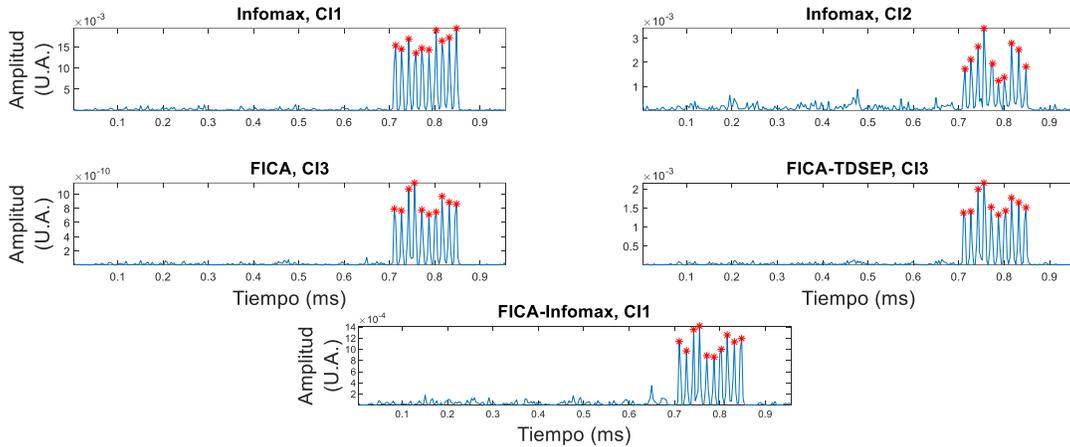
**Figura 38.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los Ecf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 4f y se limitó el análisis a la banda de ECF. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 10 ECF.



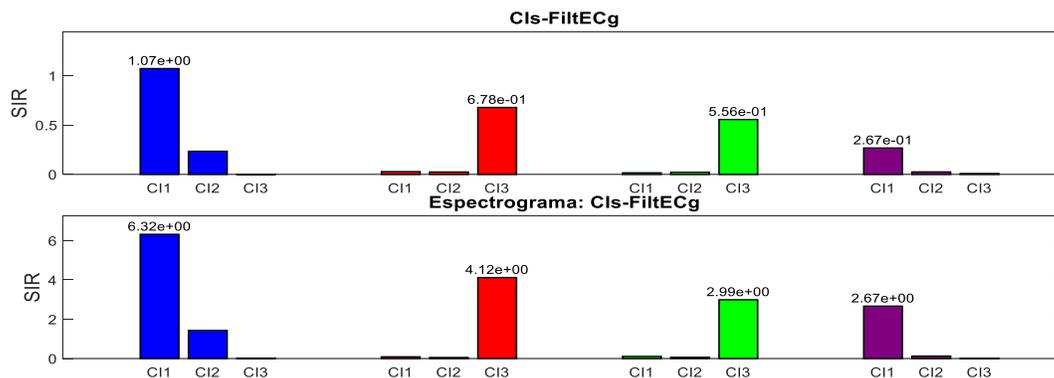
**Figura 39.** Índices SIR obtenidos en la prueba 4f. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y como señal de referencia la fuente simulada de 10 ECF mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 40.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 4g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 41.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 4g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 10 ECg.



**Figura 42.** Índices SIR obtenidos en la prueba 4g. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y como señal de referencia la fuente simulada de 10 ECg mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

#### VI.4.5.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

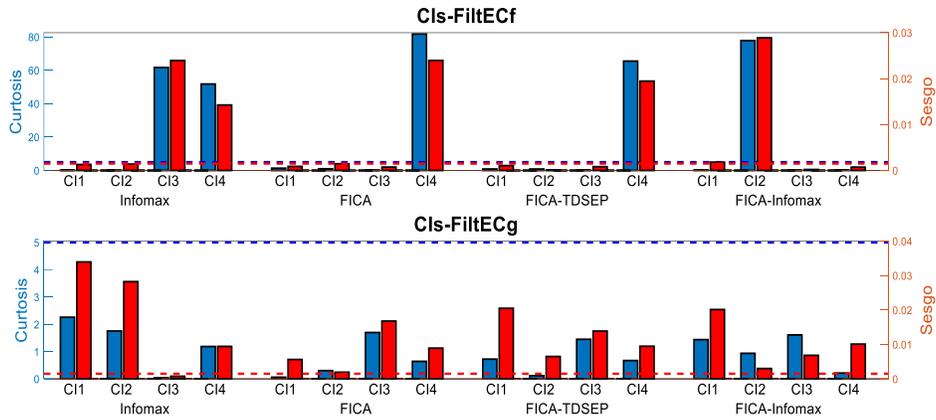
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, llamada prueba 5g, se encuentran en el anexo para su revisión. La detección automática de EC en los componentes estimados por los algoritmos de ICA mediante sus valores de curtosis y sesgo (**figura 43**) indica la presencia de EC de tipo fino en los CI 3 y CI 4 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax. El conteo de EC en estos componentes revela la existencia de 10 ECf en cada uno de ellos (**figura 44**). Los tres algoritmos asociados a ICA<sub>F</sub> recuperaron 10 ECf, mientras que Infomax estimó 20 EC de tipo fino entre sus componentes. Los índices SIR mostrados en la **figura 45** muestran que Infomax (CI 4) recuperó con mayor semejanza morfológica a la fuente simulada de ECf, seguida por FICA, FICA-Infomax y FICA-TDSEP. En cuanto al contenido en frecuencia, FICA recuperó con mejor calidad la fuente simulada de estertores seguido por FICA-Infomax, FICA-TDSEP e Infomax (CI 4). El índice SIR calculado entre los CI 3 y CI 4 de Infomax es de 0.0259. Este índice y las posiciones de los EC encontrados en los componentes de Infomax indican que se recuperó información redundante de la fuente simulada de 10 ECf en ambos CIs de este algoritmo.

#### VI.4.5.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

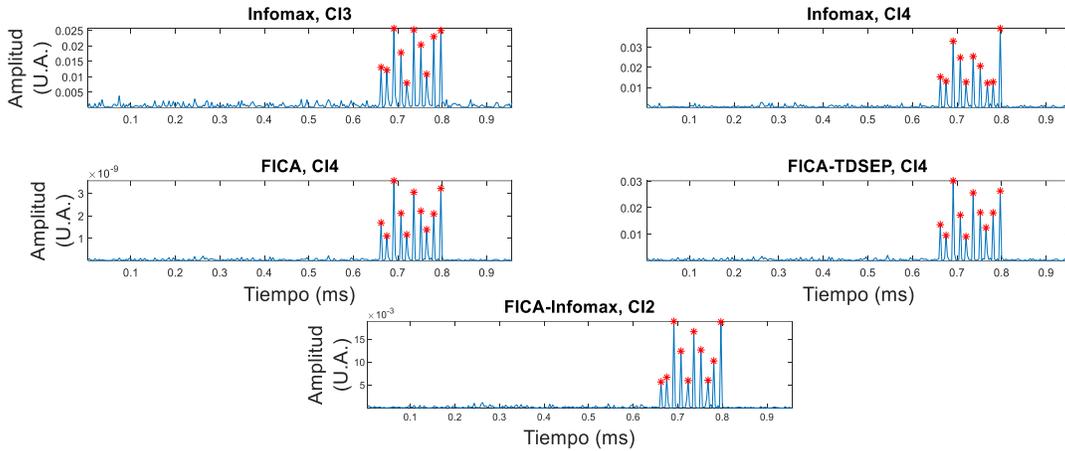
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 5g, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo mostrados en la **figura 46** indican que el CI 4 de Infomax, los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP, y el CI 1 de FICA-Infomax contienen EC de tipo grueso. El conteo de estertores, mostrado en la **figura 47**, señala la detección de 10 ECg en cada uno de estos componentes. Los índices SIR mostrados en la **figura 48** indican que Infomax recuperó la fuente simulada de 10 ECg con mayor fidelidad en la morfología y en el contenido en frecuencia. En cuanto a los algoritmos que involucran a ICA<sub>F</sub>, FICA obtuvo el mejor desempeño en la recuperación de fuentes en cuanto a la morfología de los CIs, seguido por FICA-TDSEP y FICA-Infomax, mientras que en referencia al contenido en frecuencia de los componentes, FICA-Infomax obtuvo el mejor desempeño seguido por FICA y FICA-TDSEP.

#### VI.4.6 Prueba 6 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN

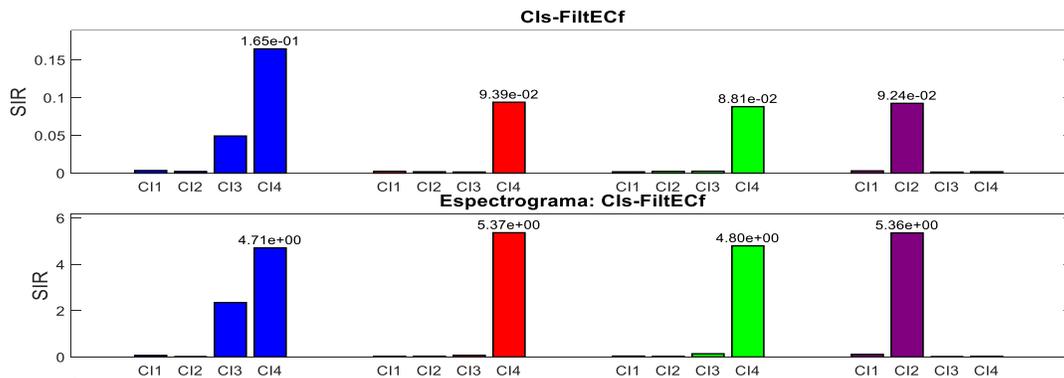
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC en la fase de inspiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRX3. Además, se consideraron las señales de SRN de los canales PRC2 y PRX2 para la BSS.



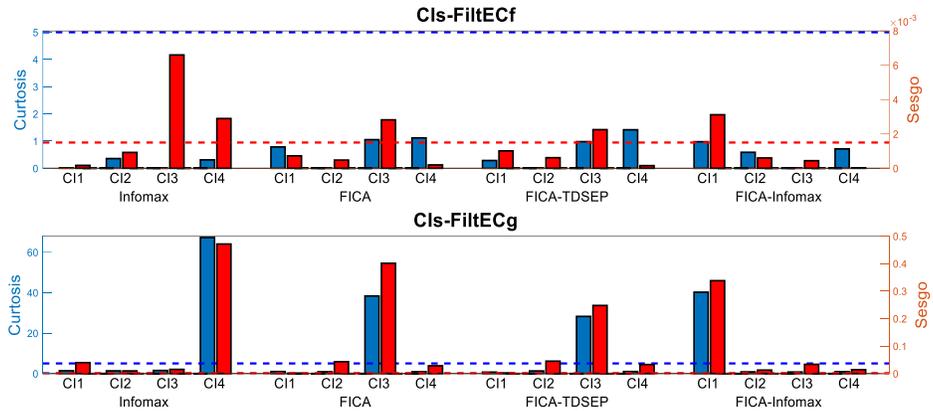
**Figura 43.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 5f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



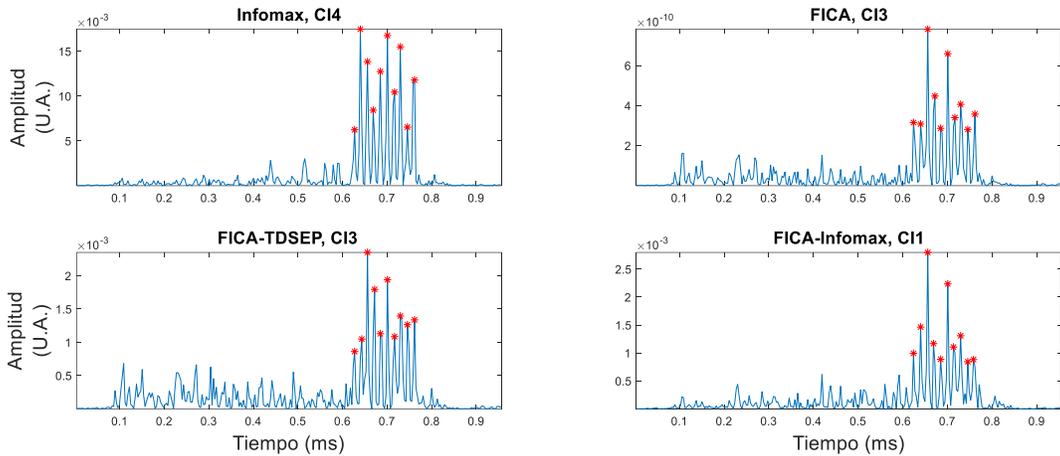
**Figura 44.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los Ecf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 5f y se limitó el análisis a la banda de Ecf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 10 Ecf.



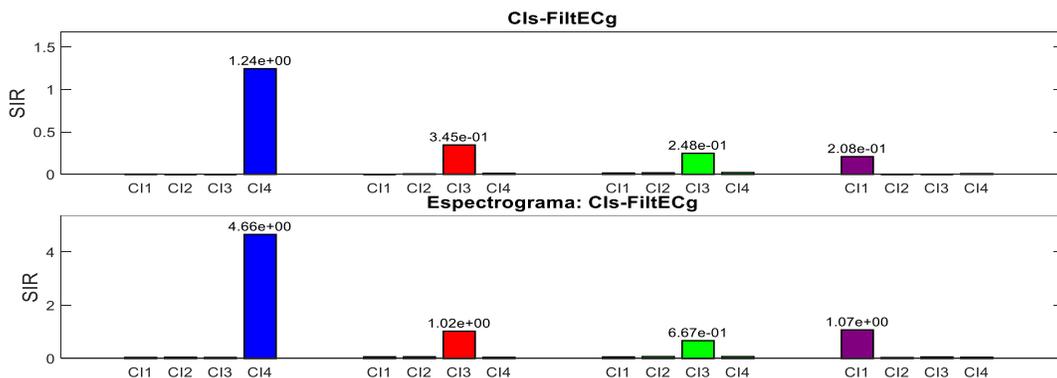
**Figura 45.** Índices SIR obtenidos en la prueba 5f. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y como señal de referencia la fuente simulada de 10 Ecf mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 46.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 5g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 47.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 5g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 10 ECg.



**Figura 48.** Índices SIR obtenidos en la prueba 5g. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y como señal de referencia la fuente simulada de 10 ECg mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

#### VI.4.6.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

Las figuras de la fuente simulada, de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA y de los CIs filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 6f, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo, mostrados en la **figura 49**, indican la presencia de EC de tipo fino en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP, y en los CI 2 y CI 4 de FICA-Infomax. El conteo automático de EC mostrado en la **figura 50** muestra que cada CI contiene 8 ECf; en total, Infomax y FICA-Infomax recuperaron, cada uno, 16 ECf. Los índices SIR de la **figura 51** indican que Infomax recuperó con mayor eficiencia la morfología de la fuente simulada en su CI 1, seguido por FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax (CI 2), mientras que el CI 4 de FICA obtuvo la mayor semejanza en el contenido en frecuencia de la fuente simulada de ECf, seguido por FICA-TDSEP, FICA-Infomax (CI 2) e Infomax (CI 1). El índice SIR calculado entre los CI 1 y CI 2 de Infomax fue de 0.0464, mientras que el SIR calculado entre los CI 2 y CI 4 de FICA-Infomax fue de 0.3440. Estos resultados indican que tanto Infomax como FICA-Infomax recuperaron redundantemente la fuente simulada de 8 ECf.

#### VI.4.6.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

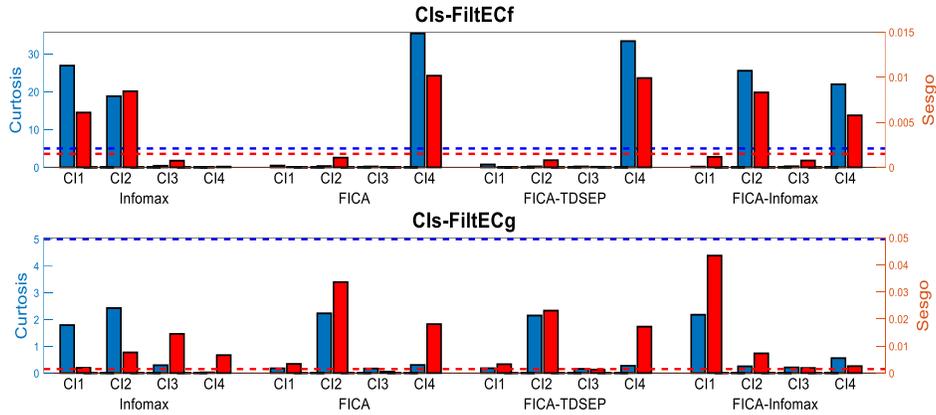
Las figuras de la fuente simulada, de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA y de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 6g, se encuentran en el anexo para su revisión. En la **figura 52** se muestran los valores de curtosis y sesgo calculados para la detección de EC en los CIs, éstos indican la presencia de EC de tipo grueso en el CI 1 de Infomax, en los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP y en el CI 3 de FICA-Infomax. El conteo de EC mostrado en la **figura 53** muestra que cada uno de estos componentes contiene 8 ECg. Los índices SIR mostrados en la **figura 54** indican que tanto morfológicamente como en contenido en frecuencia, Infomax obtuvo el mejor desempeño en la recuperación de la fuente, seguido por FICA-Infomax, FICA y FICA-TDSEP.

### VI.4.7 Prueba 7 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN

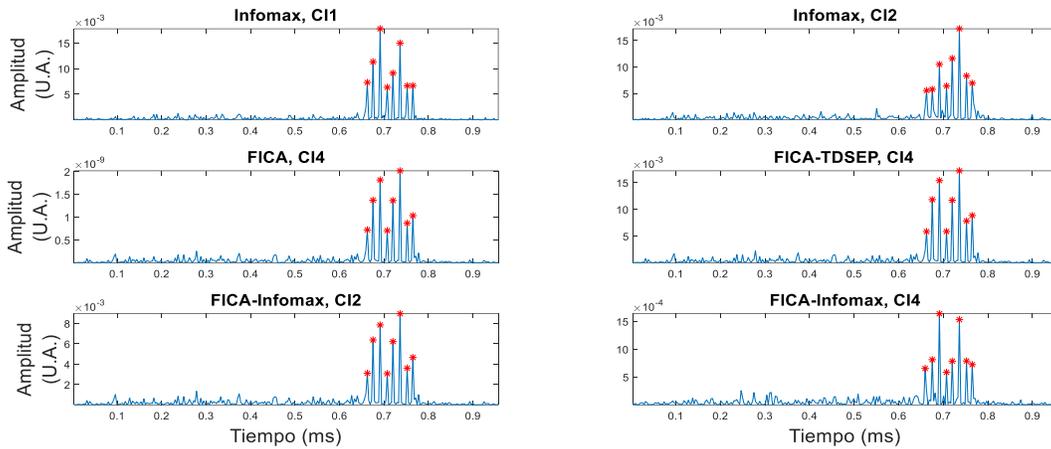
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC en la fase de espiración del CR insertada en el micrófono PLC3 y propagada unidireccionalmente hacia el micrófono PM3. Además, se consideraron las señales de SRN de los canales PLC4 y PM4 para la BSS.

#### VI.4.7.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

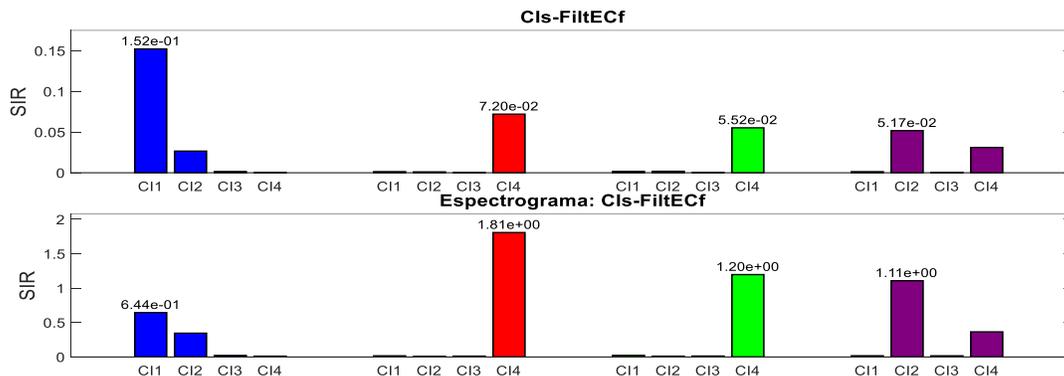
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 7f, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados a partir de los CIs-FiltECf,



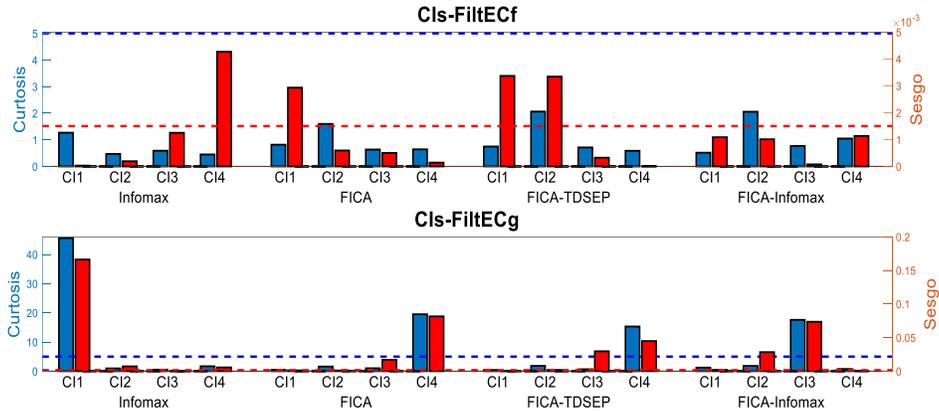
**Figura 49.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 6f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



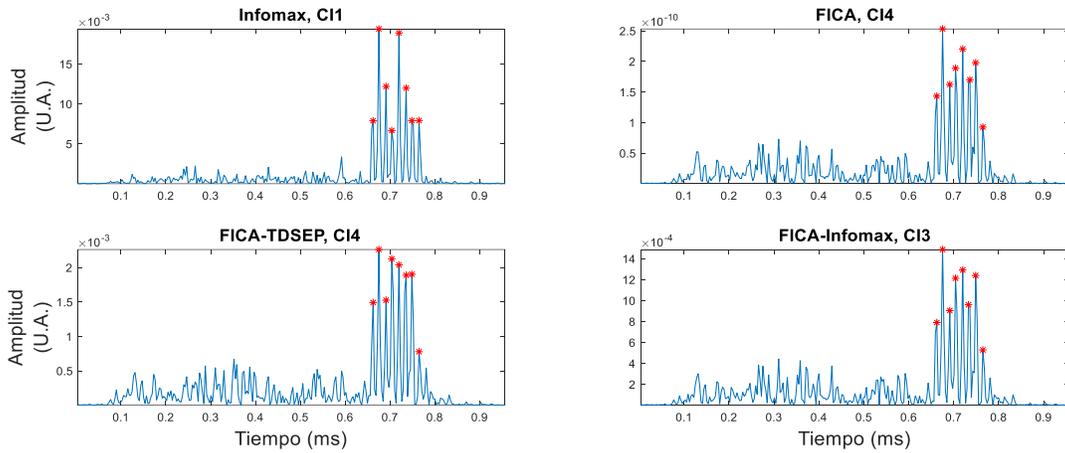
**Figura 50.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los Ecf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 6f y se limitó el análisis a la banda de Ecf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 8 Ecf.



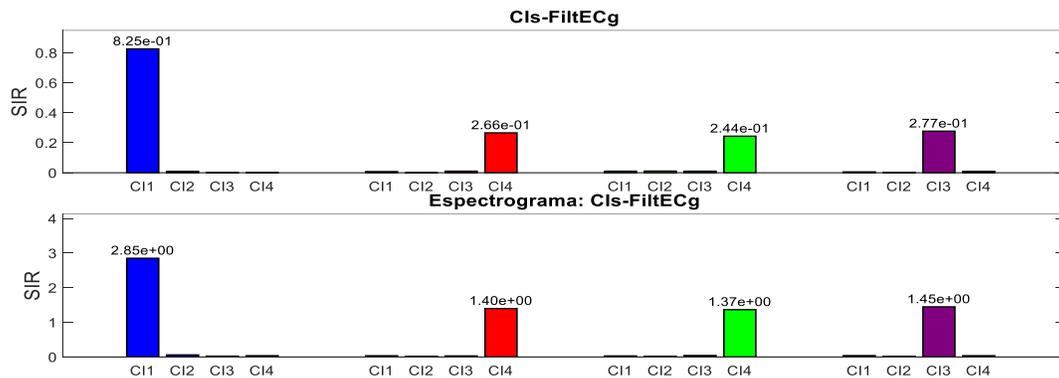
**Figura 51.** Índices SIR obtenidos en la prueba 6f. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y como señal de referencia la fuente simulada de 8 Ecf mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 52.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los CIs filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 6g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 53.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los CIs con presencia de EC en la prueba 6g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los CIs se detectaron 8 ECg.



**Figura 54.** Índices SIR obtenidos en la prueba 6g. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los CIs-FiltECg y como señal de referencia la fuente simulada de 8 ECg mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los CIs-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los CIs de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

mostrados en la **figura 55**, indican que los CI 1 y CI 2 de Infomax, los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y el CI 3 de FICA-Infomax, contienen EC de tipo fino. El conteo de EC indica, en la **figura 56**, que en cada componente se encuentran 8 ECf. En total, Infomax detectó 16 ECf. Los índices SIR mostrados en la **figura 57** indican que Infomax obtuvo el mejor desempeño en la recuperación morfológica de la señal en su CI 1, seguido por FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. En cuanto a la recuperación del contenido en frecuencia de la fuente simulada, FICA obtuvo el mejor desempeño, seguido por FICA-TDSEP, Infomax (CI 1) y FICA-Infomax. El índice SIR calculado entre los CI 1 y CI 2 de Infomax es de 0.0931, lo que indica, junto a la ubicación de los EC detectados, que ambos componentes recuperaron redundantemente información de la fuente simulada de 8 ECf.

#### VI.4.7.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

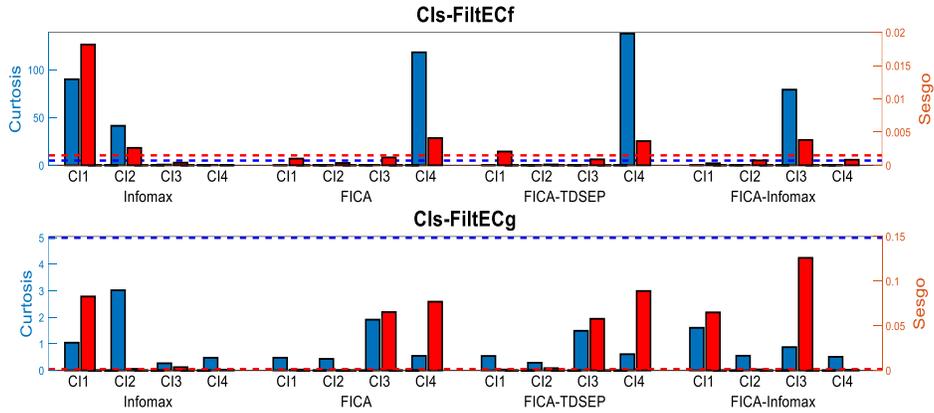
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 7g, se encuentran en el anexo para su revisión. La detección automática de EC en los CIs mediante los valores de curtosis y sesgo, mostrados en la **figura 58**, revela que el CI 1 de Infomax, los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y el CI 2 de FICA-Infomax, contienen EC de tipo grueso. Además, cada uno de estos componentes contiene 8 ECg de acuerdo al proceso de conteo de EC en los componentes, mostrado en la **figura 59**. Los índices SIR de la **figura 60** muestran que Infomax recuperó con mayor fidelidad morfológica y en contenido en frecuencia la fuente simulada de 8 ECg. Entre los algoritmos de ICA<sub>F</sub>, FICA-TDSEP obtuvo el mayor índice SIR en cuanto a la recuperación morfológica de la fuente, seguido por FICA y FICA-Infomax, y de acuerdo al contenido en frecuencia recuperado, FICA obtuvo el mejor desempeño, seguido por FICA-Infomax y FICA-TDSEP.

#### **VI.4.8 Prueba 8 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN**

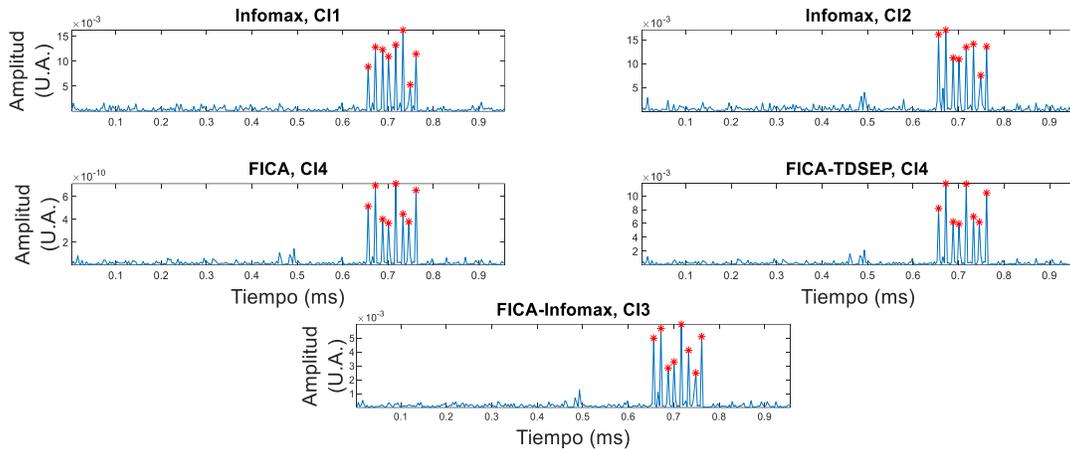
Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC en la fase de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC2 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PM2. Además, se consideraron las señales de SRN de los canales PLC1 y PM1 para la BSS.

#### VI.4.8.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

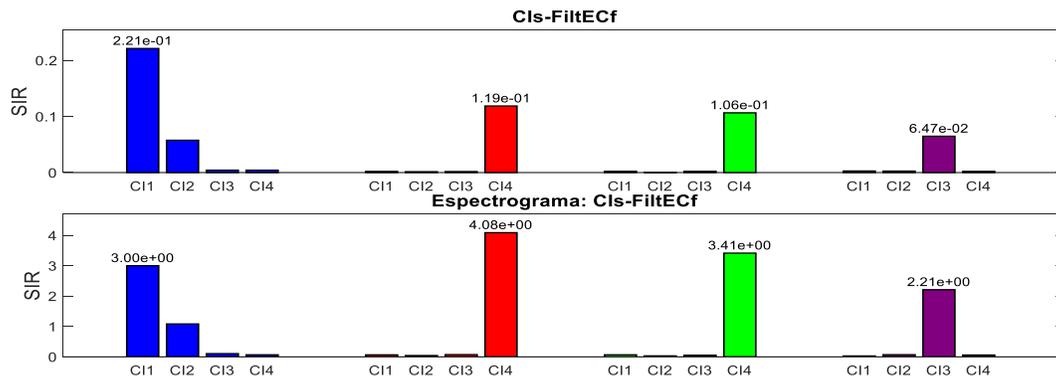
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 8f, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados, mostrados en la **figura 61**, indican



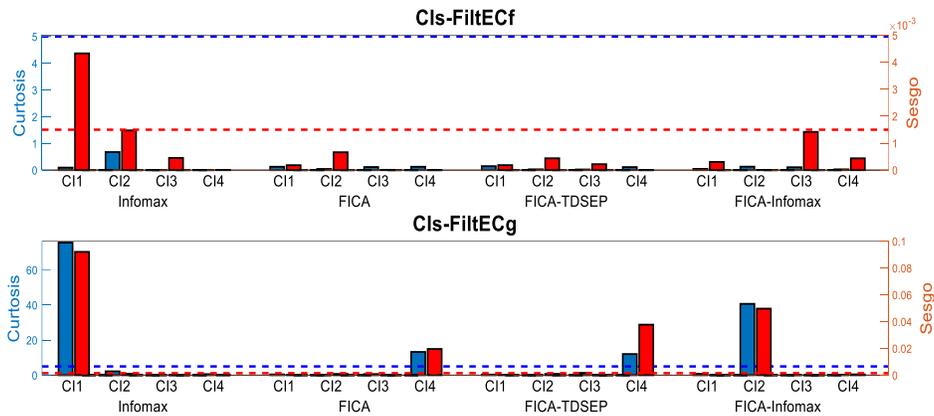
**Figura 55.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 7f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



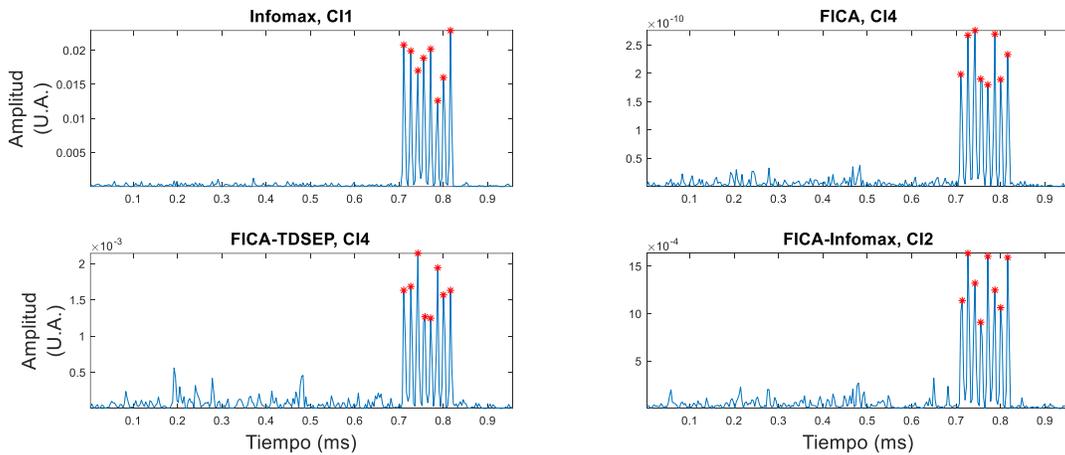
**Figura 56.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 7f y se limitó el análisis a la banda de ECf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 8 ECf.



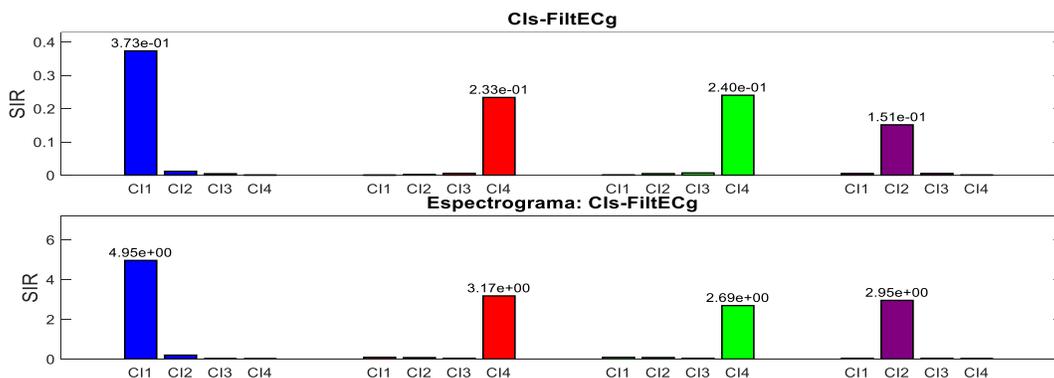
**Figura 57.** Índices SIR obtenidos en la prueba 7f. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y como señal de referencia la fuente simulada de 8 ECf mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 58.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 7g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 59.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 7g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 8 ECg.



**Figura 60.** Índices SIR obtenidos en la prueba 7g. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y como señal de referencia la fuente simulada de 8 ECg mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

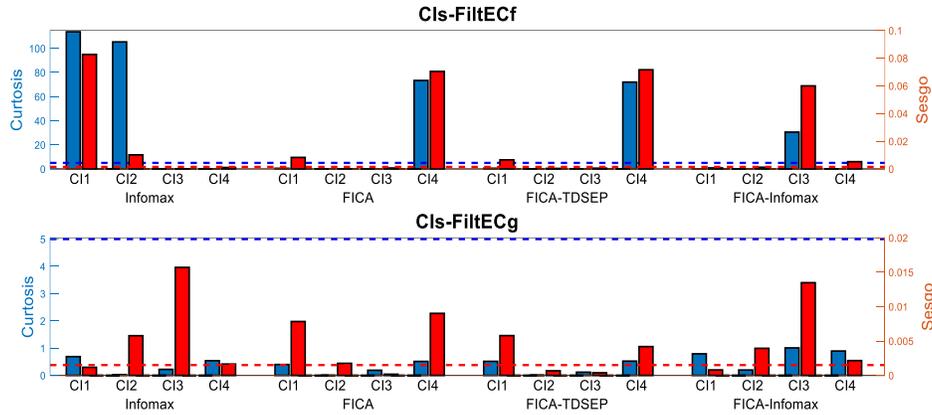
que los CI 1 y CI 2 de Infomax, los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP y el CI 3 de FICA-Infomax contienen EC de tipo fino. El conteo de EC en estos componentes, mostrado en la **figura 62**, señala que cada uno de ellos contiene 10 ECf, lo que implica que Infomax recuperó un total de 20 ECf entre sus CI 1 y CI 2. Los índices SIR mostrados en la **figura 63** indican que Infomax (CI 1) obtuvo los mejores índices SIR en la recuperación morfológica y en el contenido en frecuencia de la fuente simulada con ECf, seguido en ambos rubros por FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El índice SIR calculado entre los CI 1 y CI 2 de Infomax es de 0.0201, lo que indica, en conjunto con la posición de los EC encontrados en los CIs, una redundancia de la recuperación de la fuente simulada en estos componentes.

#### VI.4.8.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

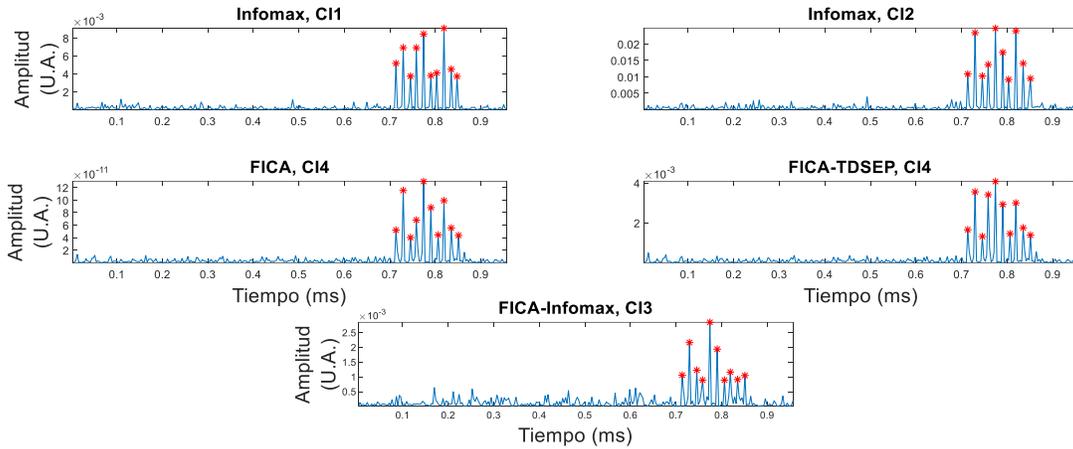
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, llamada prueba 8g, se encuentran en el anexo para su revisión. En los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax, se detectaron EC de tipo grueso dados los valores de curtosis y de sesgo calculados en estos CIs, como se muestra en la **figura 64**. En la **figura 65** se muestra el conteo de EC, el cual indica que cada uno de estos componentes contiene 10 ECg. En total, Infomax recuperó 20 ECg entre sus CI 1 y CI 2. Los índices SIR mostrados en la **figura 66** indican que el CI 1 de Infomax fue el componente con mayor semejanza morfológica y en contenido en frecuencia con la fuente simulada de EC. Entre los algoritmos de ICA<sub>F</sub>, FICA obtuvo el mejor desempeño en cuanto a la recuperación morfológica de la fuente simulada, seguido por FICA-Infomax y FICA-TDSEP, mientras que en relación al contenido en frecuencia de la fuente simulada fue FICA-Infomax el algoritmo con mejor desempeño, seguido por FICA y FICA-TDSEP. El índice SIR calculado entre los CI 1 y CI 2 de Infomax es de 0.0035. Dado este índice y la ubicación de los EC detectados en los componentes, se determina que ambos CIs de Infomax recuperaron redundantemente la fuente simulada de 10 ECg.

#### VI.4.9 Prueba 9 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

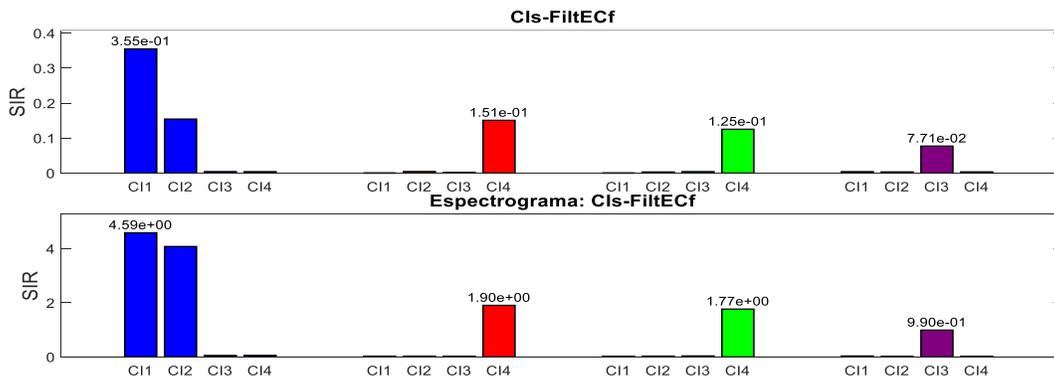
Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC finos en la fase de inspiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECf en esta prueba se encuentran en el anexo para su revisión. De acuerdo a los valores de curtosis y sesgo, mostrados en la **figura 67**, se determinó que cada uno de los CIs mencionados anteriormente posee EC de tipo fino. El conteo de



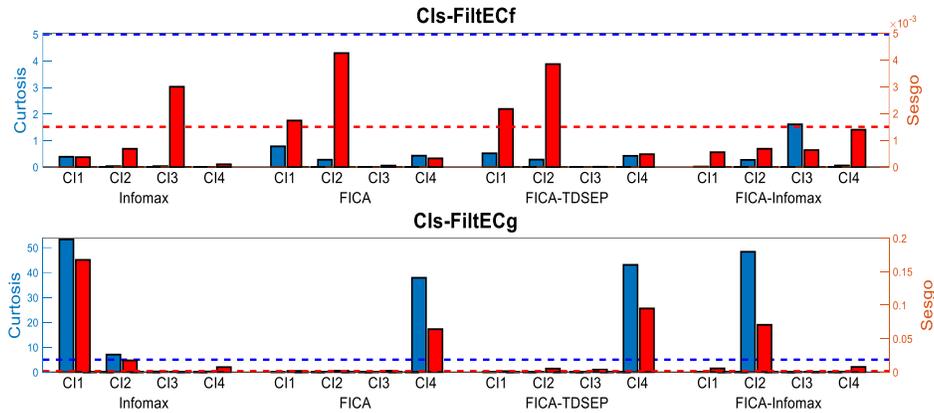
**Figura 61.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los CIs filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 8f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



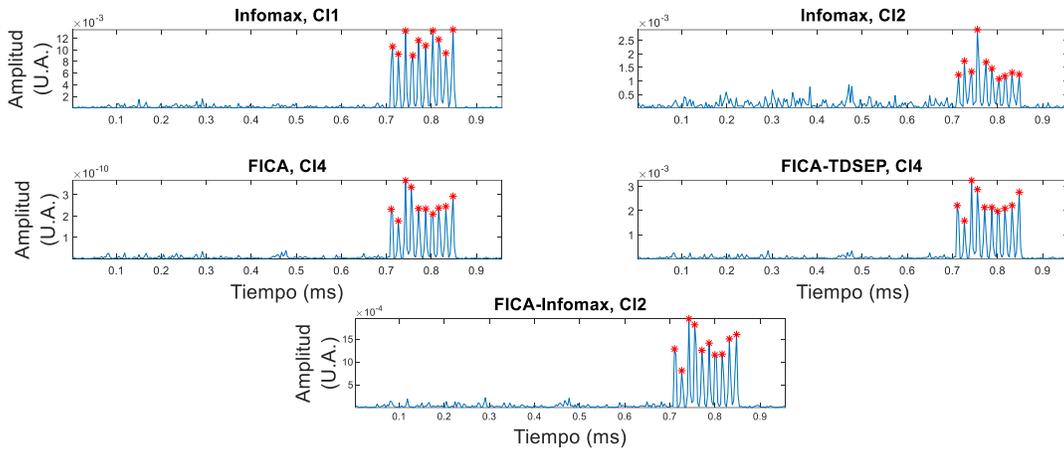
**Figura 62.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los Ecf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los CIs con presencia de EC en la prueba 8f y se limitó el análisis a la banda de Ecf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los CIs se detectaron 10 Ecf.



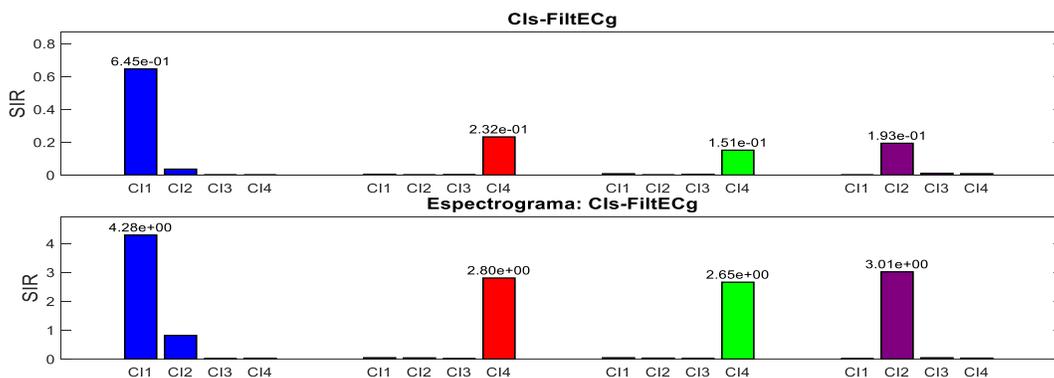
**Figura 63.** Índices SIR obtenidos en la prueba 8f. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los CIs-FiltECf y como señal de referencia la fuente simulada de 10 Ecf mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los CIs-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los CIs de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 64.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 8g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 65.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 8g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 10 ECg.



**Figura 66.** Índices SIR obtenidos en la prueba 8g. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y como señal de referencia la fuente simulada de 10 ECg mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

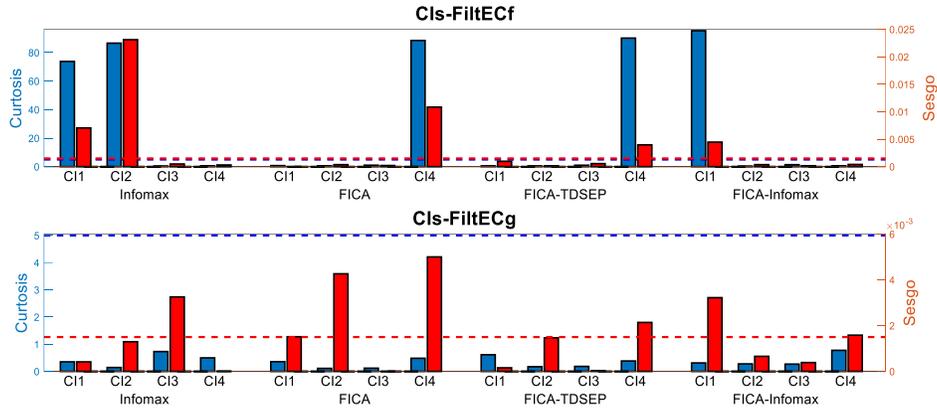
ECf, mostrado en la **figura 68**, indica que cada componente contiene 10 ECf; cada algoritmo estimó únicamente 10 ECf a excepción de Infomax, el cual estimó la presencia de 20 ECf entre sus CI 1 y CI 2. Los índices SIR mostrados en la **figura 69** indican que los cuatro algoritmos obtuvieron un desempeño similar en la recuperación morfológica de la fuente, siendo Infomax (CI 2) el algoritmo con el mejor desempeño logrado, seguido por FICA-Infomax, FICA y FICA-TDSEP. En cuanto a la recuperación del contenido en frecuencia de la fuente simulada, los algoritmos de ICA<sub>F</sub> lograron un desempeño superior al obtenido por Infomax (CI 2), siendo FICA-Infomax el algoritmo con mejor índice SIR obtenido, seguido por FICA y FICA-TDSEP. El índice SIR calculado entre los CI 1 y CI 2 de Infomax es de 0.0925, y junto a las posiciones de los EC detectados en los componentes, se determinó la recuperación redundante de la fuente simulada de 10 ECf en estos CIs de Infomax.

#### VI.4.10 Prueba 10 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

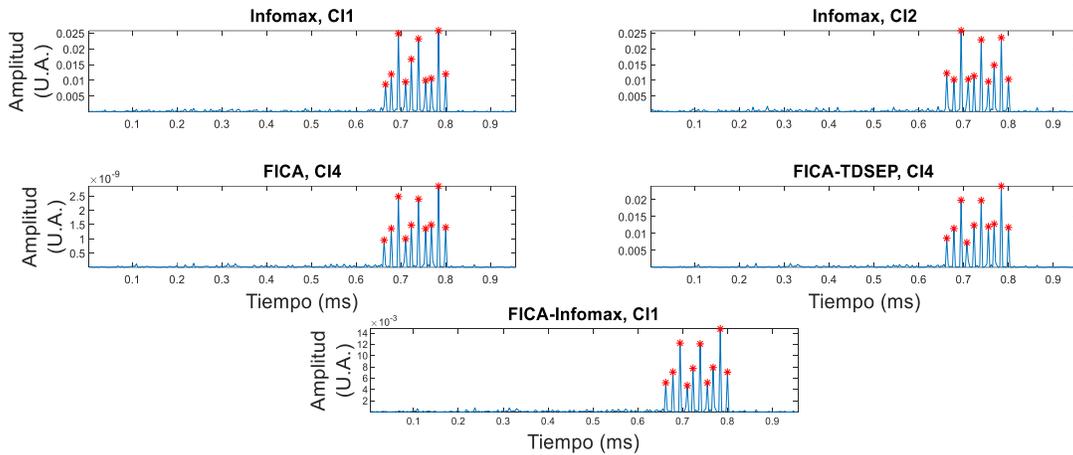
Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC finos en la fase de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Las figuras de la fuente simulada, de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA y de los CIs filtrados por FiltECf en esta prueba se encuentran en el anexo para su revisión. Se determinó que los CI 1 y CI 2 de Infomax, los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y el CI 1 de FICA-Infomax contienen, cada uno, 10 EC de tipo fino mediante la detección y el conteo automático de EC, mostrados en las **figuras 70 y 71**, respectivamente. En total, Infomax recuperó 20 ECf. Los índices SIR de la **figura 72** muestran que Infomax (CI 2) tuvo el mejor desempeño en la recuperación morfológica de la fuente simulada de ECf, seguido por FICA, FICA-Infomax, y FICA-TDSEP. En cambio, FICA obtuvo el mejor desempeño en la recuperación del contenido en frecuencia de la fuente simulada de ECf, seguido por FICA-Infomax, FICA-TDSEP e Infomax (CI 2). El índice calculado entre los CI 1 y CI 2 de Infomax es de 0.0370. Considerando este índice, la ubicación de los EC recuperados en los CIs y el número de EC detectados, se determinó que el CI 1 y el CI 2 de Infomax poseen información redundante de la fuente simulada de 10 ECf.

#### VI.4.11 Prueba 11 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

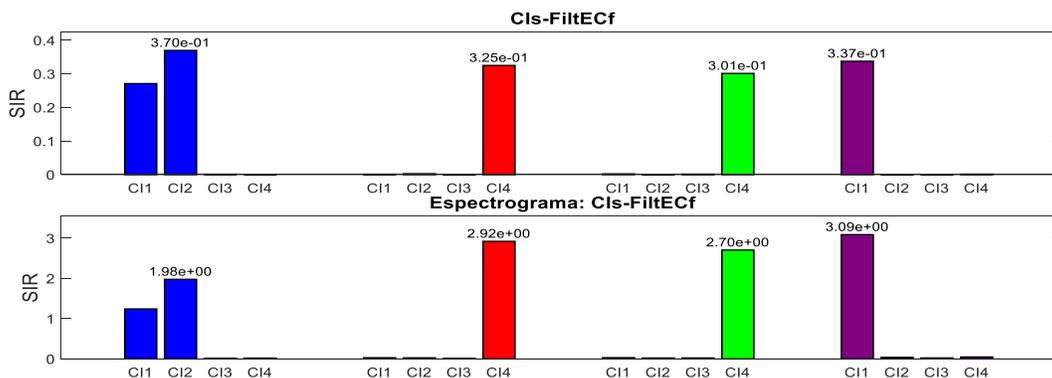
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC gruesos en la fase de inspiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PLC2, PM2 y PM3. Las figuras de la fuente simulada, de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA y de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba se encuentran en el anexo para su revisión. De acuerdo



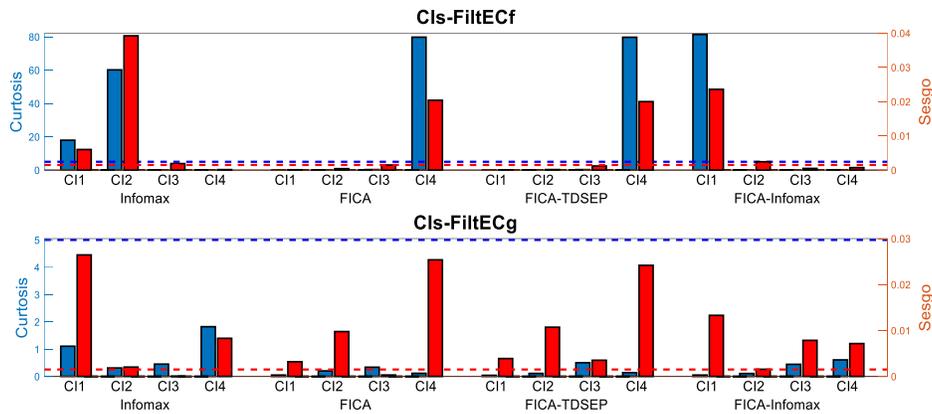
**Figura 67.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 9. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



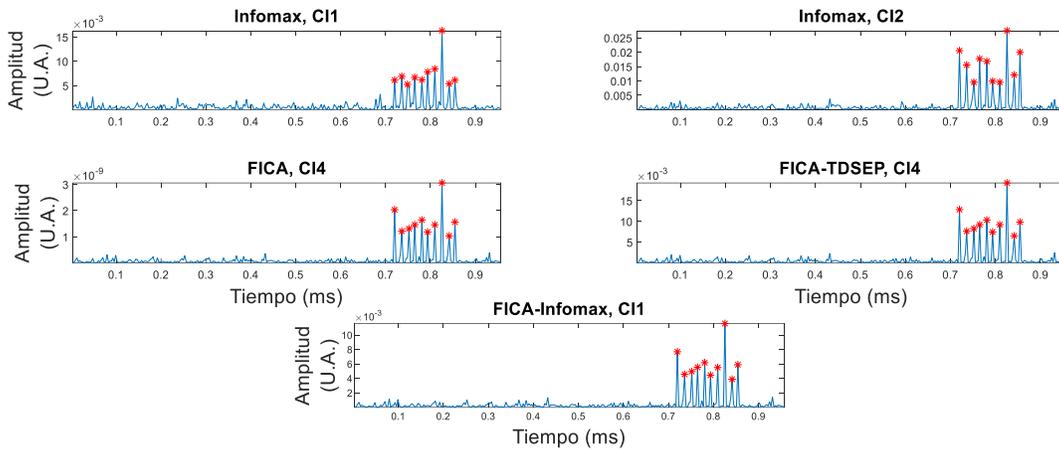
**Figura 68.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los Ecf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 9 y se limitó el análisis a la banda de Ecf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 10 Ecf.



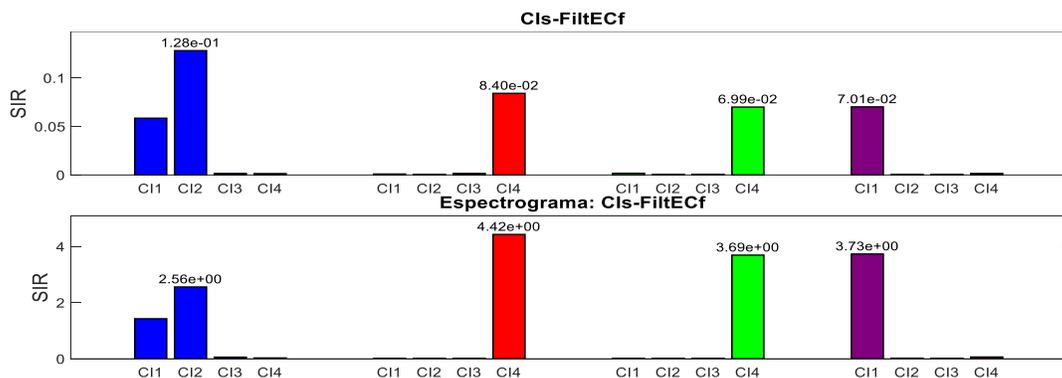
**Figura 69.** Índices SIR obtenidos en la prueba 9. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y como señal de referencia la fuente simulada de 10 Ecf mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 70.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 10. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 71.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los Ecf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 10 y se limitó el análisis a la banda de ECF. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cls se detectaron 10 ECF.



**Figura 72.** Índices SIR obtenidos en la prueba 10. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y como señal de referencia la fuente simulada de 10 Ecf mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

a la detección automática de EC en los CIs estimados mediante los valores de curtosis y sesgo, mostrada en la **figura 73**, se determinó que el CI 1 de Infomax, los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y el CI 1 de FICA-Infomax, poseen EC de tipo grueso. Además, en cada uno de estos CIs se encuentran 8 ECg, de acuerdo al conteo automático de EC mostrado en la **figura 74**. Los índices SIR de la **figura 75** indican que Infomax obtuvo el mejor desempeño en la recuperación morfológica y del contenido en frecuencia de la fuente simulada de ECg, seguido por FICA-Infomax, FICA y FICA-TDSEP.

#### VI.4.12 Prueba 12 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

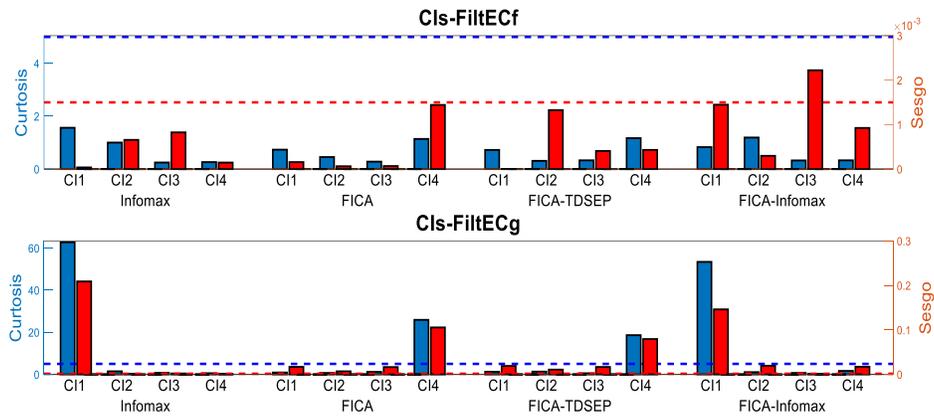
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC gruesos en la fase de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PLC2, PM2 y PM3. La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados a partir de los CIs filtrados, mostrados en la **figura 76**, indican que los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax, los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y el CI 3 de FICA-Infomax, contienen EC de tipo grueso. El conteo de EC mostrado en la **figura 77** revela que en cada uno de estos componentes existen 8 ECg. Considerando este conteo, se determinó que Infomax estimó en total la presencia de 24 ECg. Los índices SIR de la **figura 78** indican que Infomax (CI 1) recuperó la fuente simulada de ECg con mayor fidelidad tanto morfológicamente como en el contenido en frecuencia, seguido por FICA, FICA-Infomax y FICA-TDSEP. El índice SIR medio calculado entre los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax fue de  $0.0201 \pm 0.0121$ . Considerando este índice y la posición de los EC encontrados en los CIs, se determinó que estos tres componentes de Infomax recuperaron redundantemente la fuente simulada de 8 ECg.

#### VI.4.13 Prueba 13 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación unidireccional

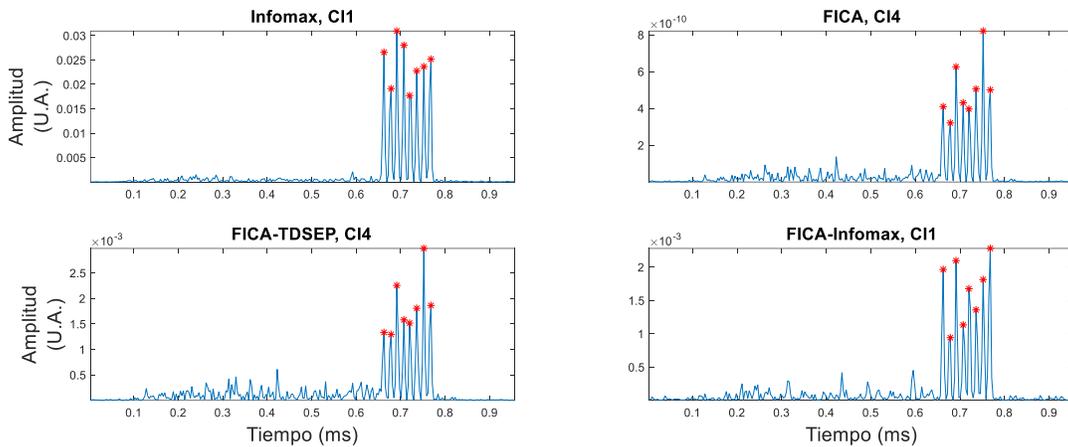
Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de inspiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRX4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRX3.

##### VI.4.13.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

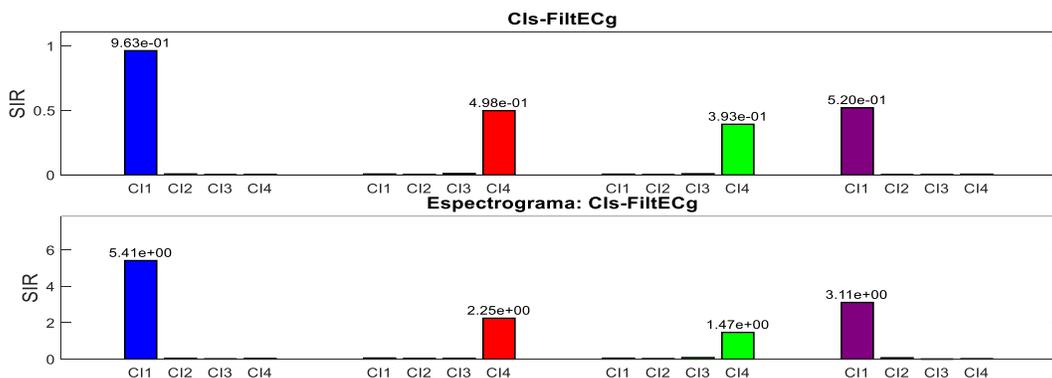
Las figuras de la fuente simulada, de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA y de los CIs filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 13f, se encuentran en el anexo para su revisión. La detección automática de EC a través de los valores de curtosis y sesgo de los componentes,



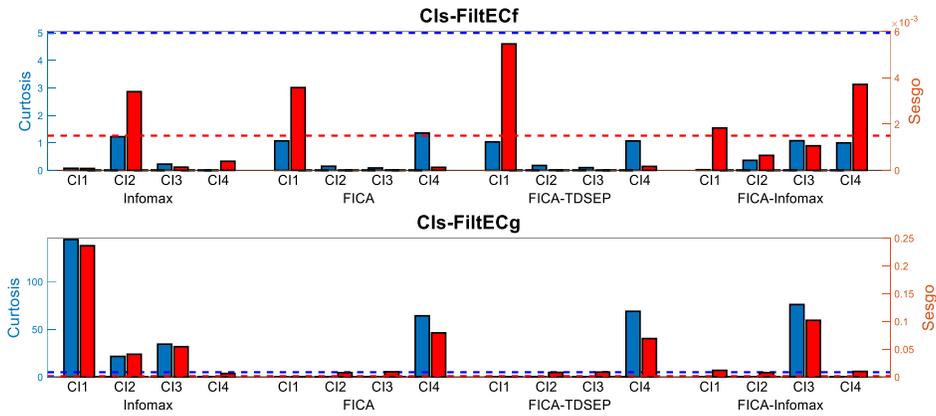
**Figura 73.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los CIs filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 11. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



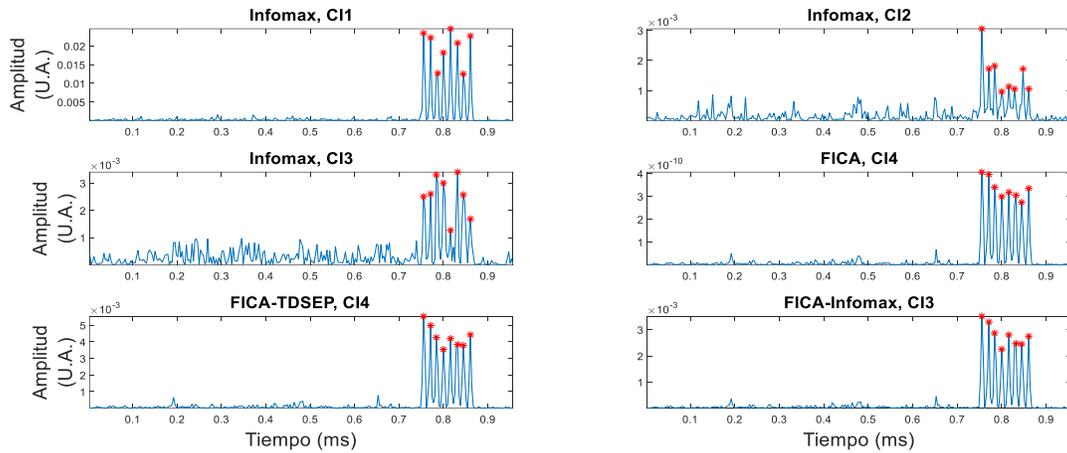
**Figura 74.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los CIs con presencia de EC en la prueba 11 y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los CIs se detectaron 8 ECg.



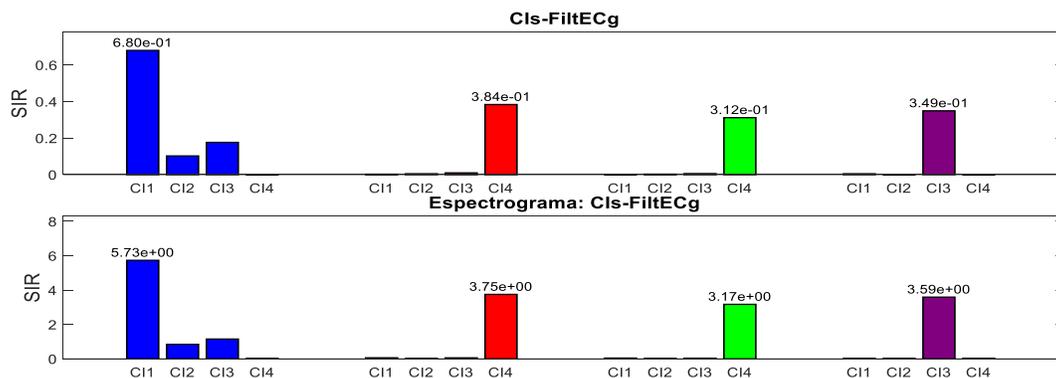
**Figura 75.** Índices SIR obtenidos en la prueba 11. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los CIs-FiltECg y como señal de referencia la fuente simulada de 8 ECg mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los CIs-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los CIs de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 76.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los CIs filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 12. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 77.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los CIs con presencia de EC en la prueba 12 y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los CIs se detectaron 8 ECg.

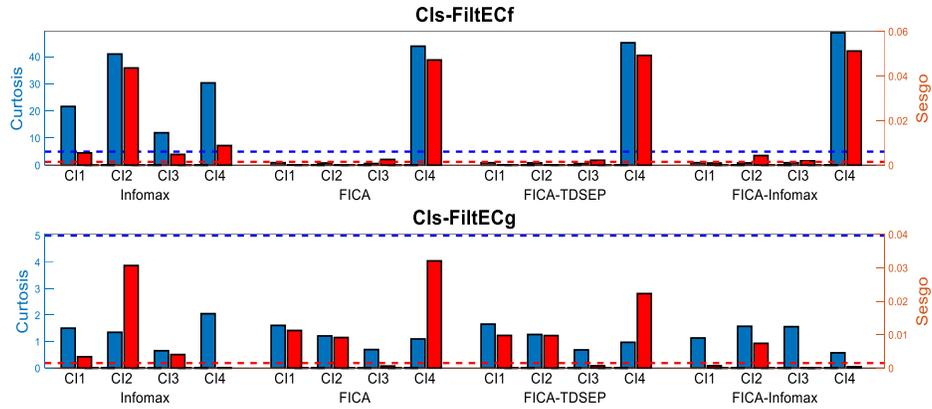


**Figura 78.** Índices SIR obtenidos en la prueba 12. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los CIs-FiltECg y como señal de referencia la fuente simulada de 8 ECg mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los CIs-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los CIs de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

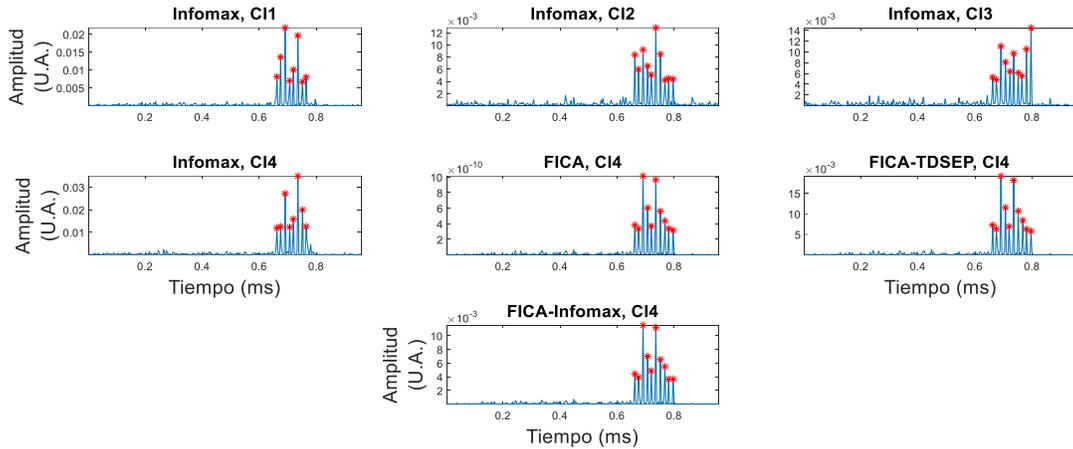
mostrados en la **figura 79**, determinó que los CI 1, CI 2, CI 3 y CI 4 de Infomax, y los CI 4 de FICA, FICA- TDSEP y FICA-Infomax, poseen EC de tipo fino. El conteo de EC mostrado en la **figura 80** indica que cada uno de los CI 1 y CI 4 de Infomax, y de los CI 4 de FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax, poseen 10 ECf. También, tanto el CI 2 como el CI 3 de Infomax contienen 8 ECf. En total, Infomax detectó 32 ECf mientras que los demás algoritmos identificaron únicamente 10 ECf. Los índices SIR calculados con F1 como señal de referencia, mostrados en la **figura 81**, indican que Infomax (CI 2) obtuvo el mejor desempeño en la recuperación de la morfología y contenido en frecuencia de F1, seguido por FICA, FICA-Infomax y FICA-Infomax y FICA-TDSEP. Los índices SIR calculados con F2 como señal de referencia se encuentran en la **figura 82** e indican que únicamente los CI 1 y CI 4 de Infomax asemejan a F2, siendo el CI 4 aquel componente con mayor semejanza morfológica y en contenido en frecuencia a F4. Los índices SIR calculados entre los CI 2 y CI 3 y entre los CI 1 y CI 4 de Infomax fueron de 0.1227 y de 0.0404, respectivamente. Estos índices muestran la recuperación redundante de F1 en los CI 2 y CI 3 de Infomax y de F2 en los CI 1 y CI 4 de este mismo algoritmo.

#### VI.4.13.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

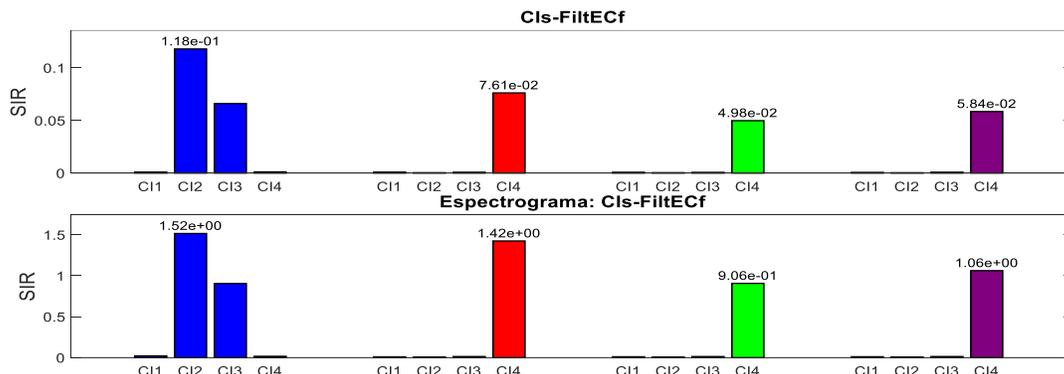
Las figuras de la fuente simulada, de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA y de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 13g, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados a partir de los CIs filtrados, mostrados en la **figura 83**, indican que los CI 1 y CI 2 de Infomax, el CI 2 de FICA, los CI 2 y CI 4 de FICA-TDSEP y los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax, contienen EC de tipo grueso. Por su parte, el conteo automático de EC mostrado en la **figura 84** señala que los CI 2 de Infomax, FICA y FICA-TDSEP, y del CI 1 de FICA-Infomax contienen 10 ECg, mientras que el CI 1 de Infomax, el CI 4 de FICA-TDSEP y el CI 2 de FICA-Infomax poseen 8 ECg. En total, cada uno de los algoritmos de Infomax, FICA-TDSEP y FICA-Infomax recuperaron 18 ECg, en cambio, FICA recuperó 10 ECg. Los índices SIR asociados a la recuperación de la fuente simulada F1, mostrados en la **figura 85**, indican que tanto morfológicamente como en el contenido en frecuencia, Infomax obtuvo el mejor desempeño en la recuperación de fuentes, seguido por FICA-Infomax, FICA-TDSEP y FICA. Los índices SIR asociados a la recuperación de la fuente simulada F2, mostrados en la **figura 86**, revelan que FICA-Infomax obtuvo el mejor desempeño en la recuperación de la morfología y del contenido en frecuencia de F2, seguido por Infomax y FICA-TDSEP; FICA no estimó algún CI con información de F2.



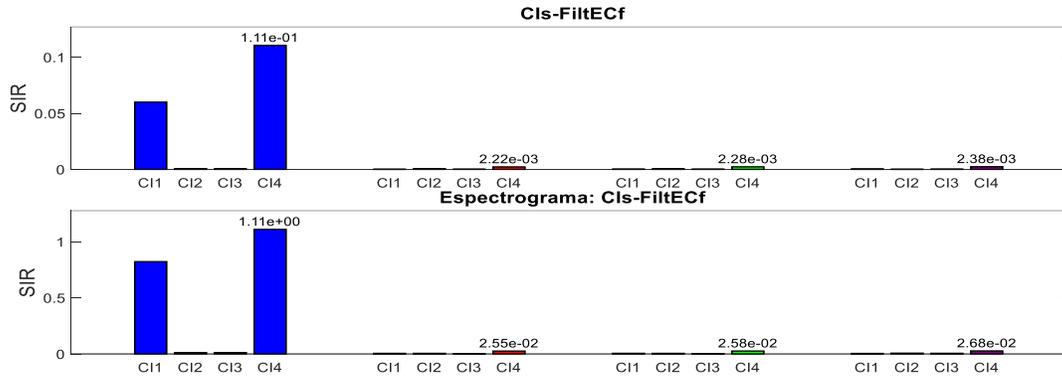
**Figura 79.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 13f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



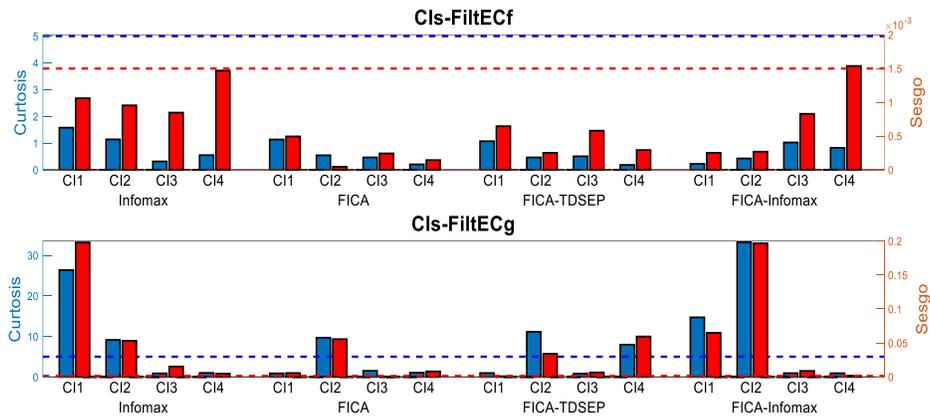
**Figura 80.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 13f y se limitó el análisis a la banda de EC. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En los Cl 2 y Cl 3 de Infomax y en los Cl 4 de FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se detectaron 10 ECf. En los Cl 1 y Cl 4 de Infomax se detectaron 8 ECf.



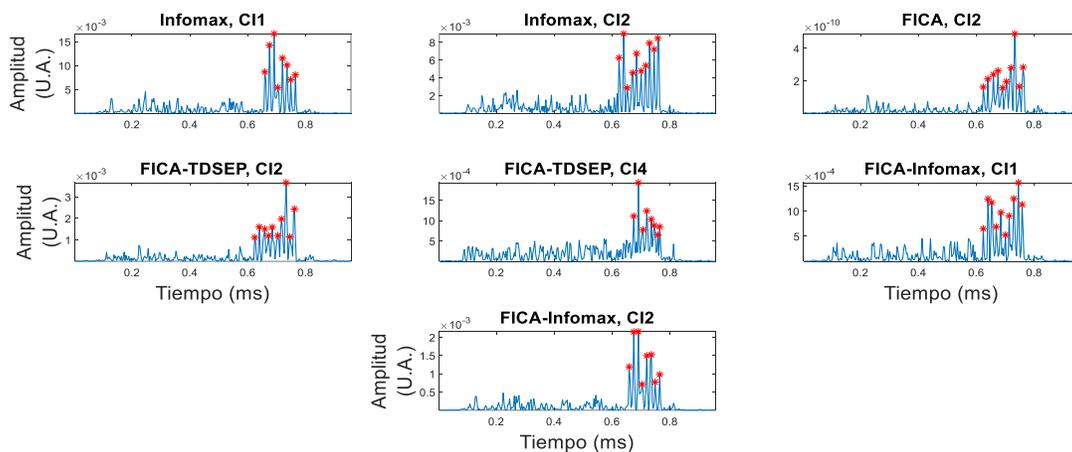
**Figura 81.** Índices SIR obtenidos en la prueba 13f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



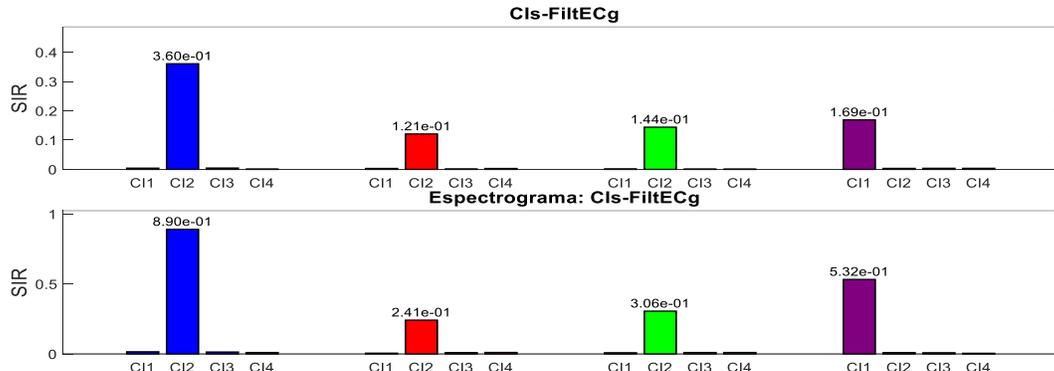
**Figura 82.** Índices SIR obtenidos en la prueba 13f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



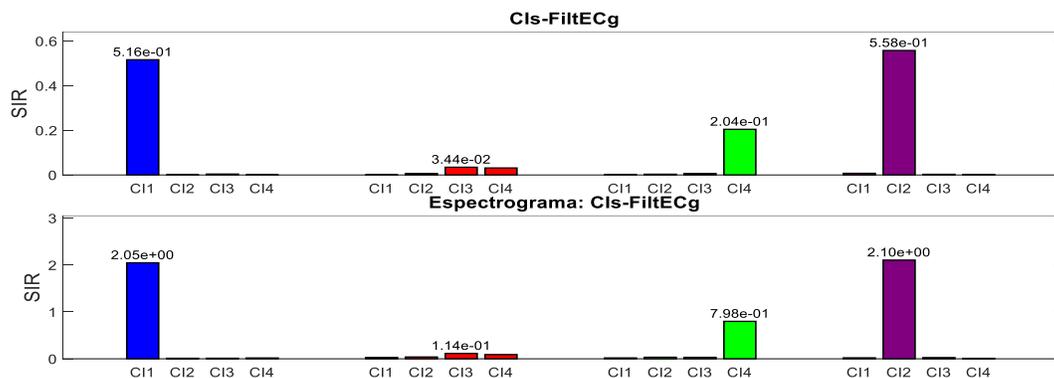
**Figura 83.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 13g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 84.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 13g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En cada uno de los Cl 2 de Infomax, FICA y FICA-TDSEP, y en el Cl 1 de FICA-Infomax se detectaron 10 ECg, mientras que en el Cl 1 de Infomax, en el Cl 4 de FICA-TDSEP y en el Cl 2 de FICA-Infomax se detectaron, individualmente, 8 ECg.



**Figura 85.** Índices SIR obtenidos en la prueba 13g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 86.** Índices SIR obtenidos en la prueba 13g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

#### VI.4.14 Prueba 14 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación unidireccional

Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de espiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 8 EC, se insertó en el micrófono PLC2 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PM2. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 10 EC, se insertó en el micrófono PLC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PM3.

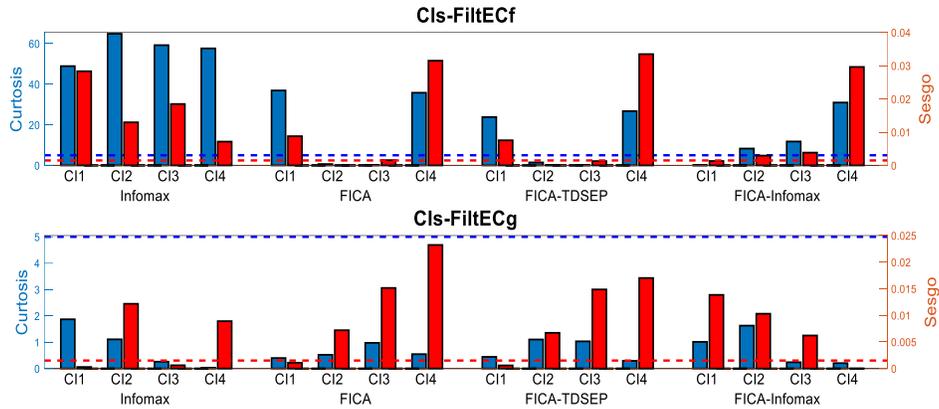
##### VI.4.14.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los Cls obtenidos por los algoritmos de ICA como de los Cls filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 14f, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados en esta prueba y mostrados en la **figura 87**, revelan la presencia de EC de tipo fino en los cuatro Cls de Infomax, en los CI 1 y CI 4 de FICA y FICA-TDSEP y en los CI 2, CI 3 y CI 4 de FICA-Infomax. El conteo automático de EC mostrado

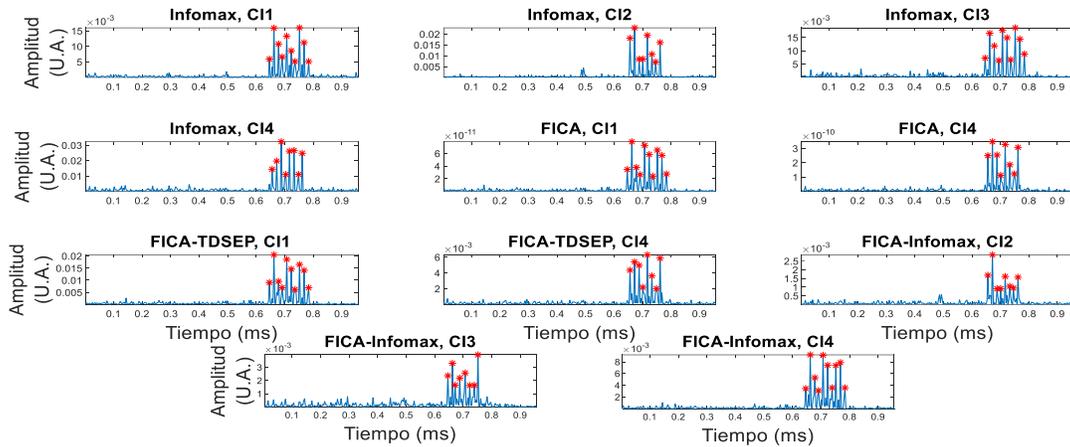
en la **figura 88** indica que los CI 2 y CI 4 de Infomax, los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP y los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax, contienen individualmente 8 ECf, señalando la recuperación de la fuente simulada F1. Además, cada uno de los CI 1 y CI 3 de Infomax, de los CI 1 de FICA y FICA-TDSEP y del CI 4 de FICA-Infomax recuperaron 10 ECf, indicando la recuperación de la fuente simulada F2. En total, Infomax recuperó 36 ECf, FICA y FICA-TDSEP estimaron 18 ECf, y FICA-Infomax recuperó 26 ECf. Los índices SIR calculados entre las fuentes simuladas y los CIs estimados señalan que Infomax recuperó la morfología y el contenido en frecuencia de F1 y de F2, como se muestra respectivamente en las **figuras 89 y 90**, con mejor eficiencia en sus CI 4 y CI 1, respectivamente, seguidos por FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax (CI 3 en la recuperación de F1). Los índices SIR calculados entre los CIs con presencia de EC del mismo algoritmo indican una recuperación redundante de F1 en los CI 2 y CI 4 de Infomax (SIR: 0.0180) y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax (SIR: 0.0132), mientras que F2 fue recuperada con redundancia en los CI 1 y CI 3 de Infomax (SIR: 0.0104).

#### VI.4.14.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

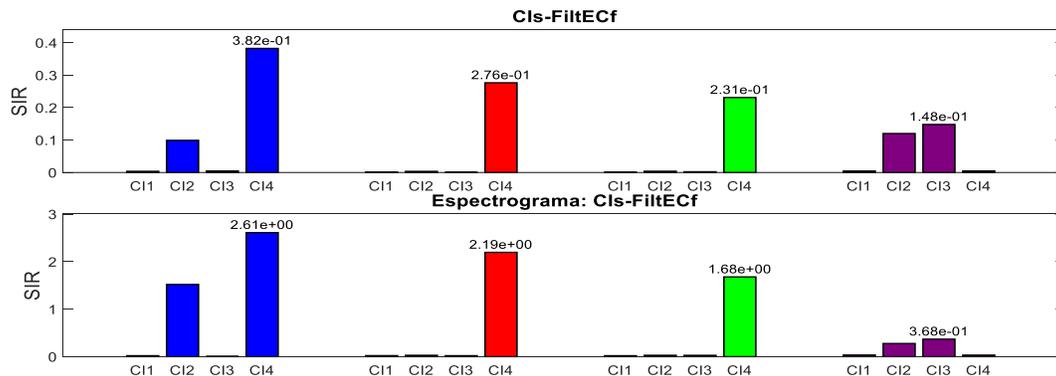
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, llamada prueba 14g, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados a partir de los CIs filtrados, mostrados en la **figura 91**, indican la presencia de EC de tipo grueso en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP y en el CI 1 de FICA-Infomax. El conteo automático de EC mostrado en la **figura 92** revela que el CI 2 de Infomax recuperó 8 ECg, mientras que el resto de los CIs con presencia de EC contienen individualmente 10 ECg. En total, Infomax recuperó 18 ECg mientras que los algoritmos de ICA<sub>f</sub> estimaron individualmente 10 ECg. Los índices SIR calculados entre los CIs con EC y las fuentes simuladas F1 y F2, mostrados respectivamente en las **figuras 93 y 94**, indican que Infomax recuperó F1 adecuadamente en cuanto a su morfología y al contenido en frecuencia. Referente a la recuperación de F2, Infomax fue el algoritmo con mejor eficiencia, seguido por FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. Estos resultados indican que Infomax fue el único algoritmo en recuperar ambas fuentes simuladas, mientras que FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax recuperaron únicamente la fuente simulada F2.



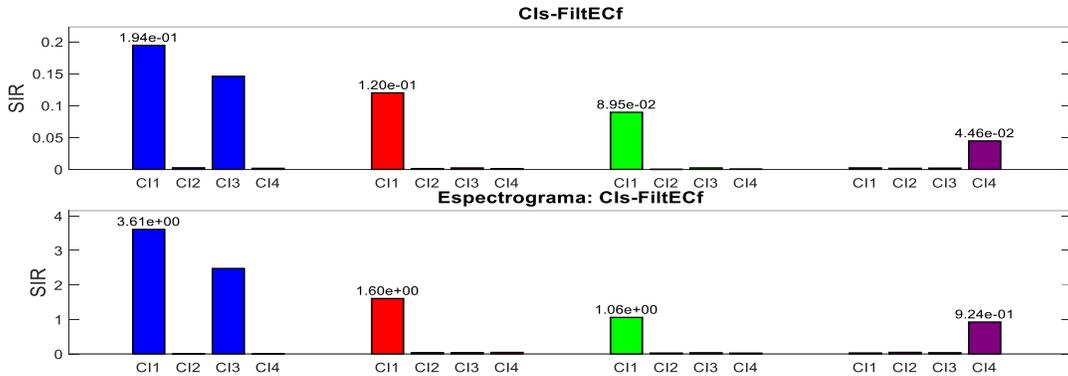
**Figura 87.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 14f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



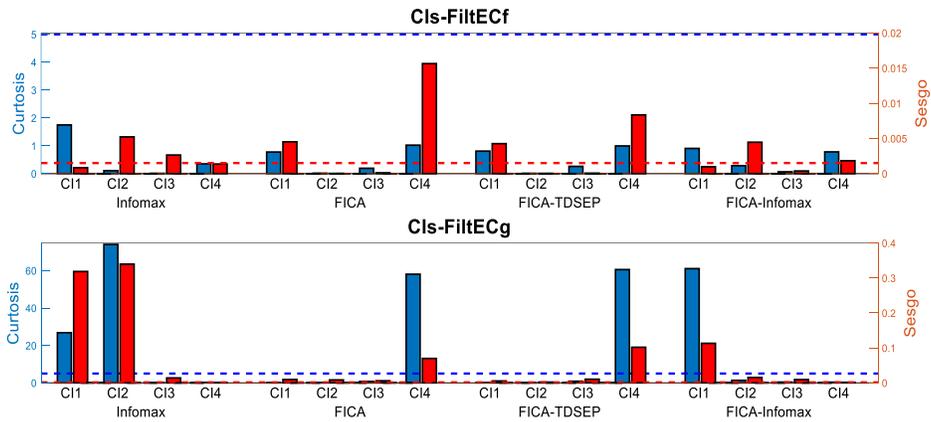
**Figura 88.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 14f y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECf en los CI 2 y CI 4 de Infomax, en los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax, y 10 ECf en los CI 1 y CI 3 de Infomax, en los CI 1 de FICA y FICA-TDSEP y en el CI 4 de FICA-Infomax.



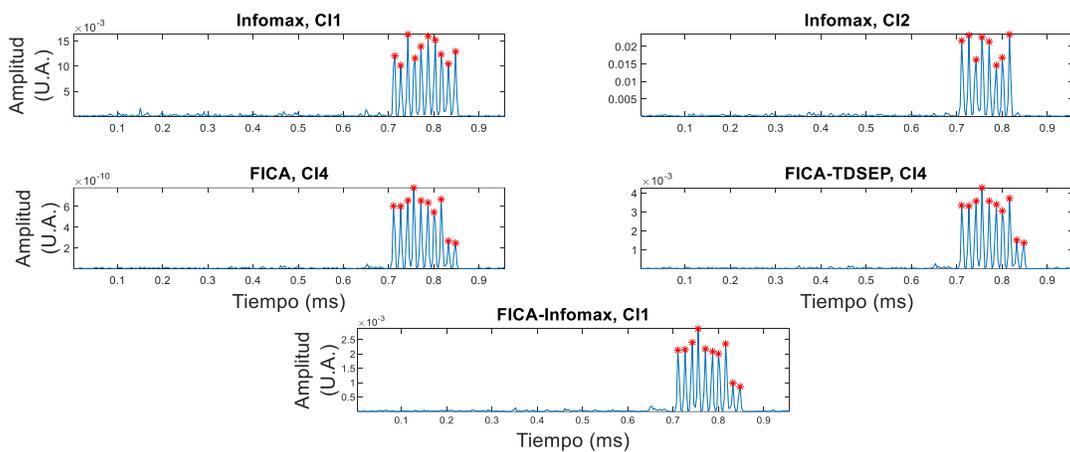
**Figura 89.** Índices SIR obtenidos en la prueba 14f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señales de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



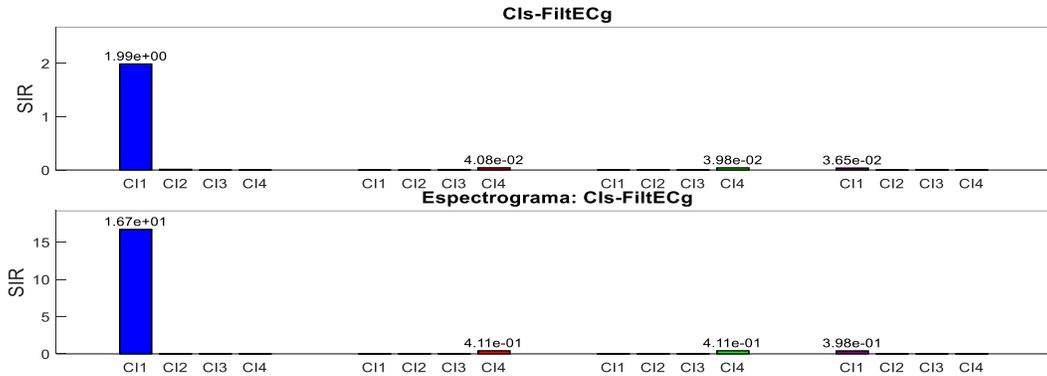
**Figura 90.** Índices SIR obtenidos en la prueba 14f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señales de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



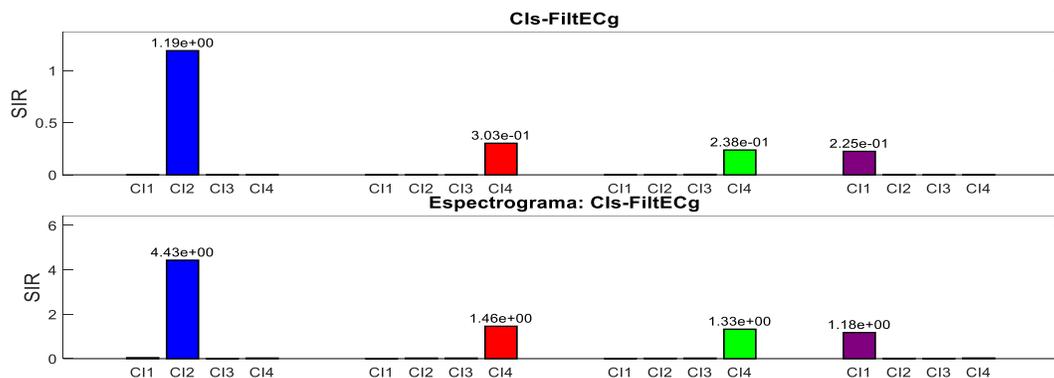
**Figura 91.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 14g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 92.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 14g y se limitó el análisis a la banda de EC. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En el Cl 2 de Infomax se detectaron 8 ECg, mientras que en el resto de los Cls se detectaron 10 ECg.



**Figura 93.** Índices SIR obtenidos en la prueba 14g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 94.** Índices SIR obtenidos en la prueba 14g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

#### VI.4.15 Prueba 15 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de inspiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PM3, PM4 y PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRC3. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

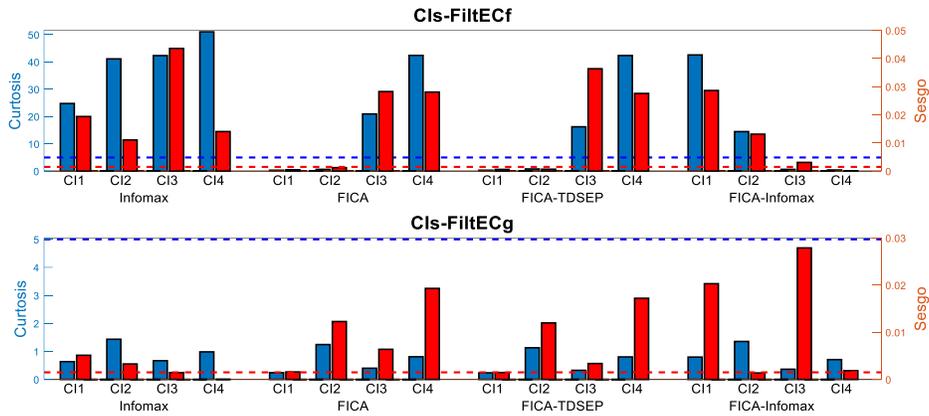
##### VI.4.15.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

Las figuras de la fuente simulada, de los Cls obtenidos por los algoritmos de ICA y de los Cls filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 15f, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados en esta prueba y mostrados en la **figura 95** indican que los CI 1, CI 2, CI 3 y CI 4 de Infomax, los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y los CI 1 y CI 2 de FICA-

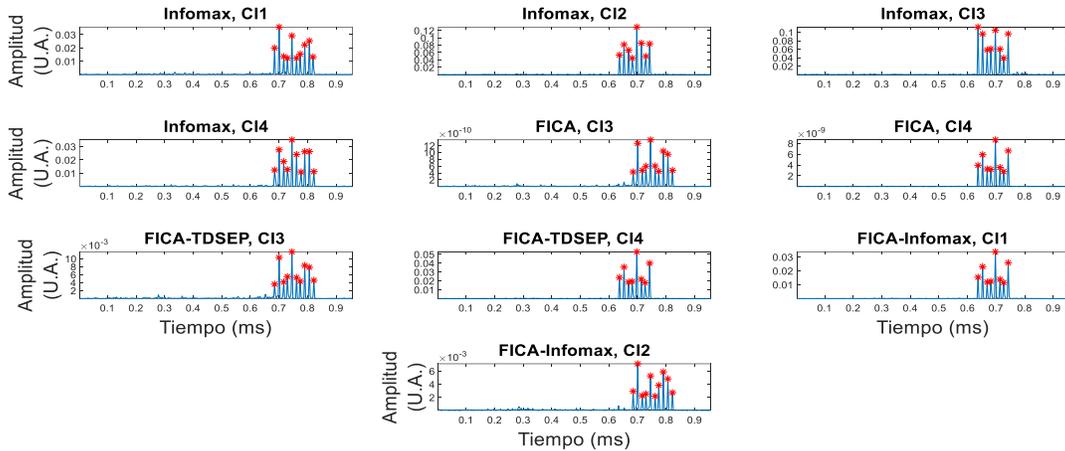
Infomax contienen EC de tipo fino. El conteo automático de EC mostrado en la **figura 96** indica que los CI 1 y CI 4 de Infomax, los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y el CI 1 de FICA-Infomax contienen cada uno 10 ECf, mientras que los CI 2 y CI 3 de Infomax, los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP y el CI 1 de FICA-Infomax poseen individualmente 8 ECf. En total, Infomax recuperó 36 ECf mientras que cada uno de los algoritmos de ICA<sub>F</sub> estimó 18 ECf. Los índices SIR de la recuperación de F1, mostrados en la **figura 97** indican que FICA obtuvo el mejor desempeño en la recuperación morfológica y del contenido en frecuencia de esta fuente simulada, seguido por FICA-Infomax, FICA-TDSEP e Infomax (CI 1). Los índices SIR de la recuperación de F2, mostrados en la **figura 98**, señalan que Infomax (CI 3) estimó con mejor eficiencia la morfología e información en frecuencia de esta fuente simulada, seguido por FICA, FICA-Infomax y FICA-TDSEP. Dadas las características de los EC recuperados y los índices SIR calculados entre los CIs de Infomax, se determinó la estimación redundante de F1 en los CI 1 y CI 4 (SIR: 0.0280) y de F2 en los CI 2 y CI 3 (SIR: 0.0381) de este algoritmo.

#### VI.4.15.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

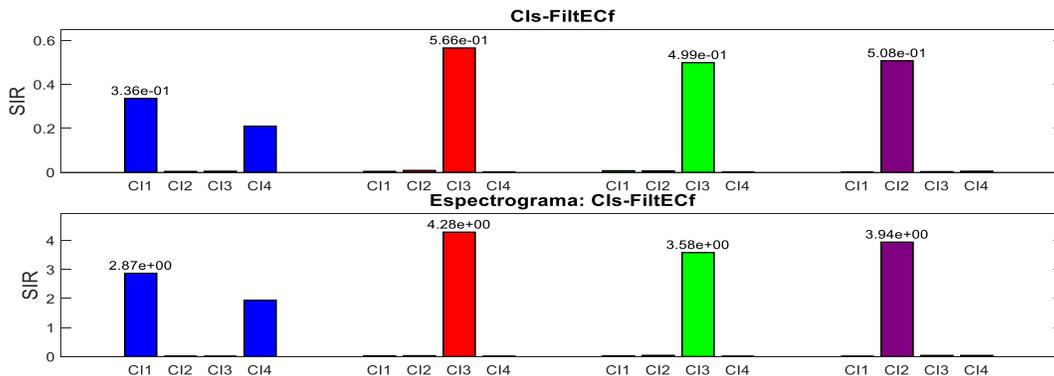
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 15g, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados a partir de los CIs filtrados, mostrados en la **figura 99**, indican la presencia de EC de tipo grueso en los CI 1, CI 2 y CI 4 de Infomax, en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 1 y CI 2 de FICA- Infomax. El conteo automático de EC mostrado en la **figura 100** revela la presencia de 8 ECg en los CI 1 y CI 4 de Infomax, y en el CI 2 de FICA-Infomax, de 10 ECg en el CI 2 de Infomax y en el CI 1 de FICA-Infomax, de 15 ECg en el CI 4 de FICA y en los CI 3 y CI 4 de FICA-TDSEP, y de 16 ECg en el CI 3 de FICA. En total, Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax estimaron 26 ECg, 31 ECg, 30 ECg y 18 ECg, respectivamente. Los índices SIR calculados entre los CIs con presencia de EC y las fuentes simuladas se encuentran en las **figuras 101 y 102**. En la **figura 101** se observa que Infomax recuperó la morfología y el contenido en frecuencia de F1 con mejor eficiencia, seguido por FICA-Infomax. En cuanto a la recuperación de F2, mostrado en la **figura 102**, Infomax, en su CI 1, también obtuvo el mejor desempeño, seguido por FICA-Infomax. Considerando la posición de los EC detectados, el conteo de ECg y los valores del índice SIR calculados con los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP se determina que estos componentes recuperaron una mezcla de las fuentes simuladas F1 y F2. El índice SIR calculado entre los CI 1 y CI 4 de Infomax es de 0.0126; este índice y los ECg detectados en cada componente indican que la fuente simulada F2 fue recuperada redundantemente en estos CIs de Infomax.



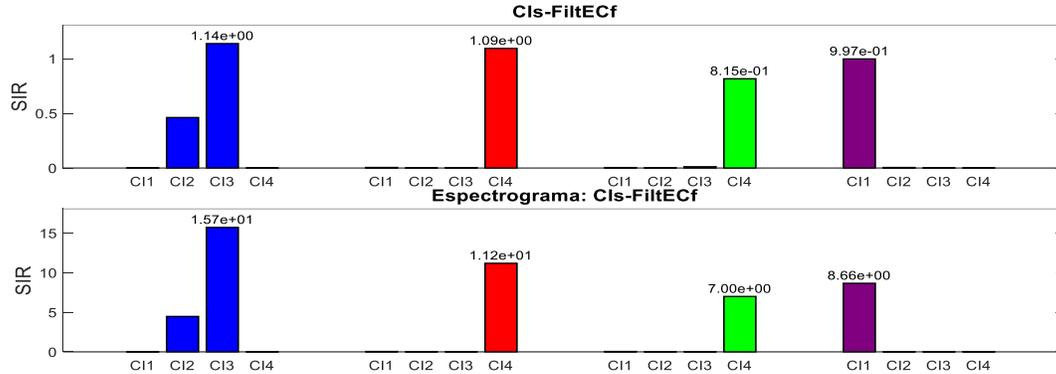
**Figura 95.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 15f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



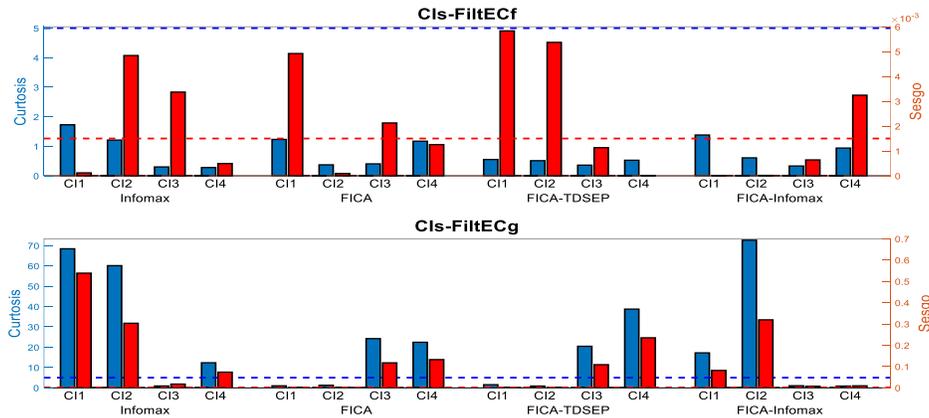
**Figura 96.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los Ecf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 15f y se limitó el análisis a la banda de ECf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. En los Cl 1 y Cl 4 de Infomax, en el Cl 3 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el Cl 2 de FICA-Infomax se recuperaron 10 Ecf, mientras que cada uno de los Cl 2 y Cl 3 de Infomax, en los Cl 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el Cl 1 de FICA-Infomax contienen 8 Ecf.



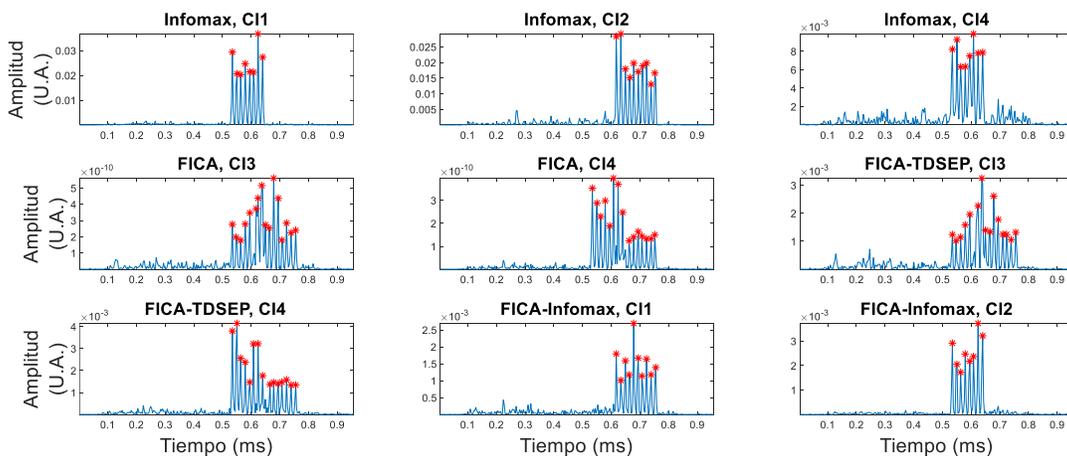
**Figura 97.** Índices SIR obtenidos en la prueba 15f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



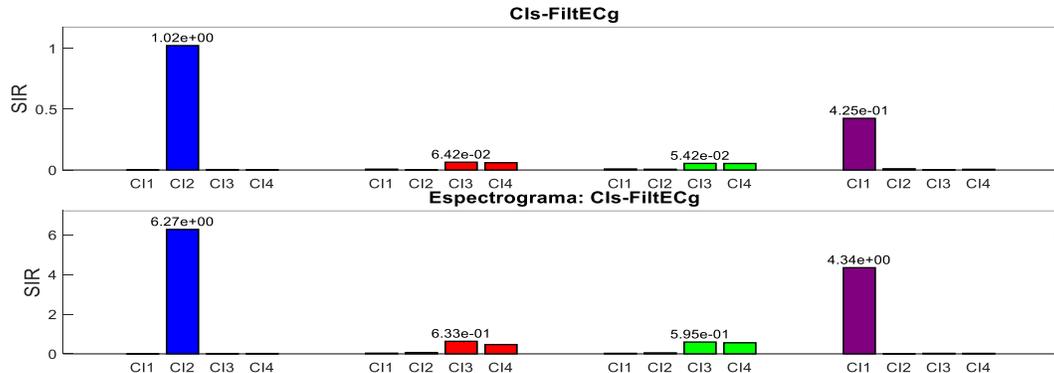
**Figura 98.** Índices SIR obtenidos en la prueba 15f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



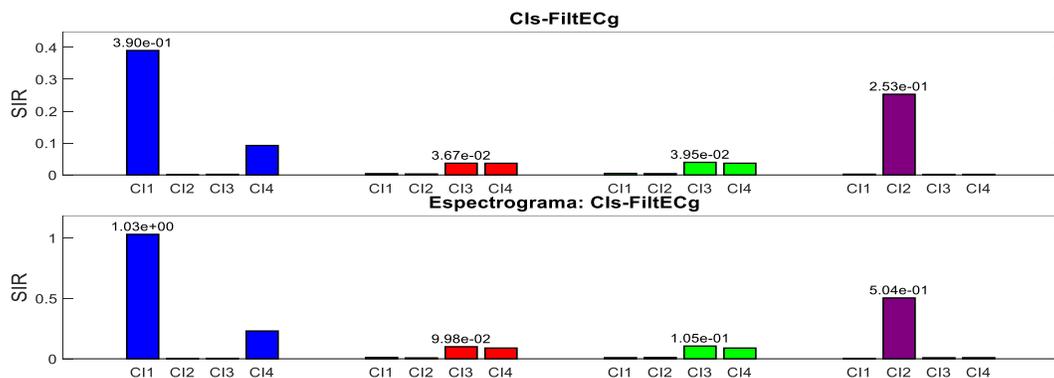
**Figura 99.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 15g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 100.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECG. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 15g y se limitó el análisis a la banda de ECG. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECG en los C1 y C4 de Infomax, y en el C2 de FICA-Infomax; 10 ECG en el C2 de Infomax y en el C1 de FICA-Infomax; 15 ECG en el C4 de FICA y en los C3 y C4 de FICA-TDSEP; y 16 ECG en el C3 de FICA.



**Figura 101.** Índices SIR obtenidos en la prueba 15g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 102.** Índices SIR obtenidos en la prueba 15g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

#### VI.4.16 Prueba 16 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de espiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PM3, PM4 y PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRC3. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

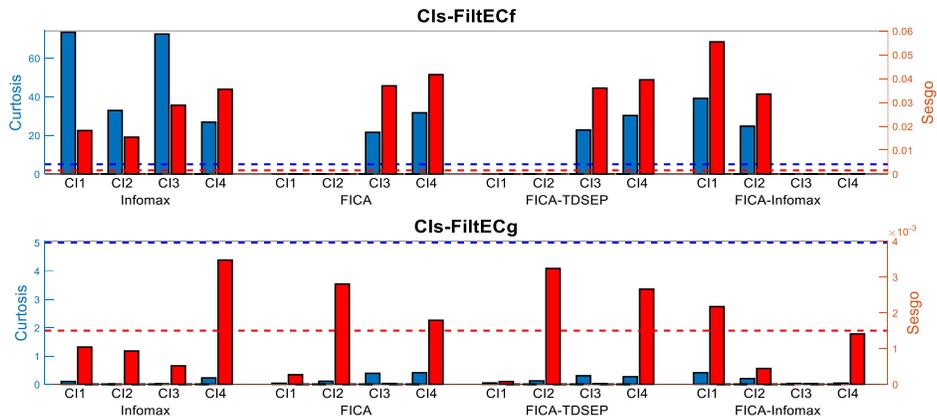
##### VI.4.16.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los Cls obtenidos por los algoritmos de ICA como de los Cls filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 16f, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados en esta prueba, mostrados en la **figura 103**, indican la presencia de EC de tipo fino en los cuatro Cls de Infomax, en los Cl 3 y Cl 4 de

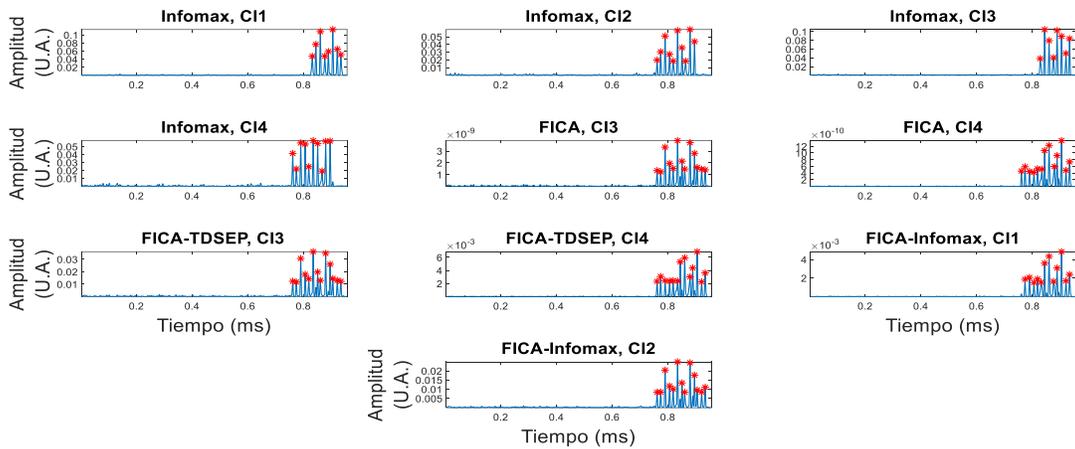
FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. El conteo automático de EC, mostrado en la **figura 104** revela la presencia de 8 ECf en los CI 1 y CI 3 de Infomax, de 10 ECf en los CI 2 y CI 4 de Infomax, de 12 ECf en el CI 1 de FICA-Infomax, y de 13 ECf en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax. En total, Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax estimaron 36 ECf, 26 ECf, 26 ECf y 25 ECf, respectivamente. Los índices SIR calculados entre los CIs-FiltECf y la fuente simulada F1 se muestran en la **figura 105** mientras que los índices SIR calculados entre los CIs filtrados mediante FiltECf y la fuente simulada F2 se encuentran en la **figura 106**. De acuerdo a estos índices, Infomax obtuvo el mejor desempeño en la recuperación de ambas fuentes simuladas, siendo los CI 2 y el CI 3 de este algoritmo aquellos con mayor semejanza morfológica y en contenido en frecuencia a F1 y F2, respectivamente. Los resultados obtenidos indican, en conjunto, que los CI 2 y CI 4 de Infomax recuperaron a F1, mientras que los CI 1 y CI 3 de este mismo algoritmo recuperaron a F2. A su vez, se determinó que tanto FICA como FICA-TDSEP y FICA-Infomax recuperaron una mezcla de ambas fuentes simuladas en sus CIs con presencia de EC. El índice SIR calculado entre los CI 2 y CI 4 (SIR: 0.0150) y entre los CI 1 y CI 3 (SIR: 0.0247) de Infomax indican, también, la recuperación redundante de F1 y de F2 en respectivos pares de CIs.

#### VI.4.16.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

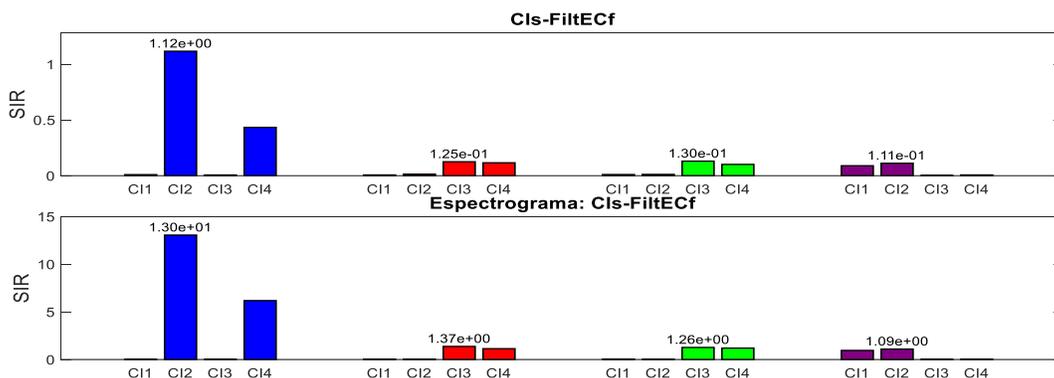
Las figuras de la fuente simulada, de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA y de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 16g, se encuentran en el anexo para su revisión. La curtosis y el sesgo calculados en esta prueba, mostrados en la **figura 107**, indican la existencia de EC de tipo grueso en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 3 y CI 4 de FICA, en los CI 2 y CI 3 de FICA-TDSEP y en los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. El conteo automático de EC mostrado en la **figura 108** señala la presencia de 8 ECg en el CI 1 de Infomax, de 10 ECg en el CI 2 de Infomax, en el CI 4 de FICA y en el CI 1 de FICA-Infomax, de 13 ECg en el CI 2 de FICA-TDSEP y en el CI 2 de FICA-Infomax, y de 14 ECg en el CI 3 de FICA y en el CI 3 de FICA-TDSEP. En total, Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax recuperaron 18 ECg, 24 ECg, 27 ECg y 23 ECg, respectivamente. Los índices SIR calculados entre la fuente simulada F1 y los CIs con presencia de ECg y los índices SIR calculados entre la fuente simulada F2 y los CIs que contienen ECg se muestran en la **figura 109** y **110**, respectivamente. En cuanto a la recuperación de la morfología y del contenido en frecuencia de F1, Infomax fue el algoritmo con mejor desempeño, seguido por FICA, FICA-Infomax, y FICA-TDSEP. En relación a la recuperación de F2, Infomax fue el único algoritmo que separó esta fuente simulada. Considerando los resultados obtenidos, se determinó que el CI 2 de Infomax, el CI 4 de FICA y el CI



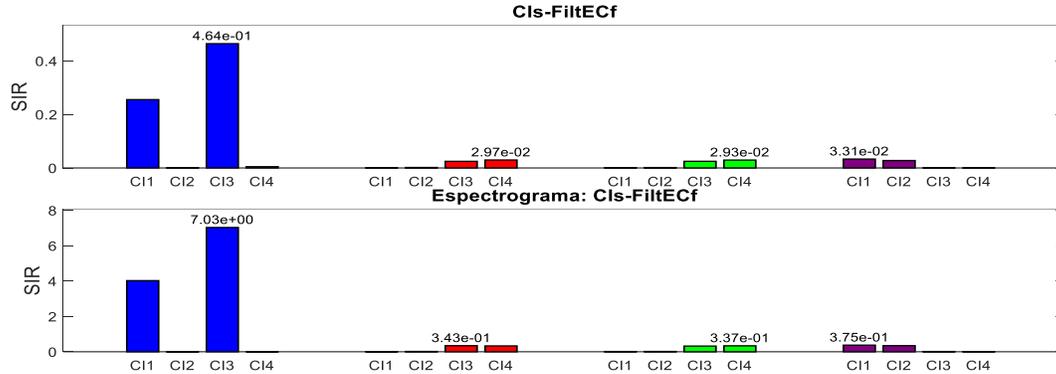
**Figura 103.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 16f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



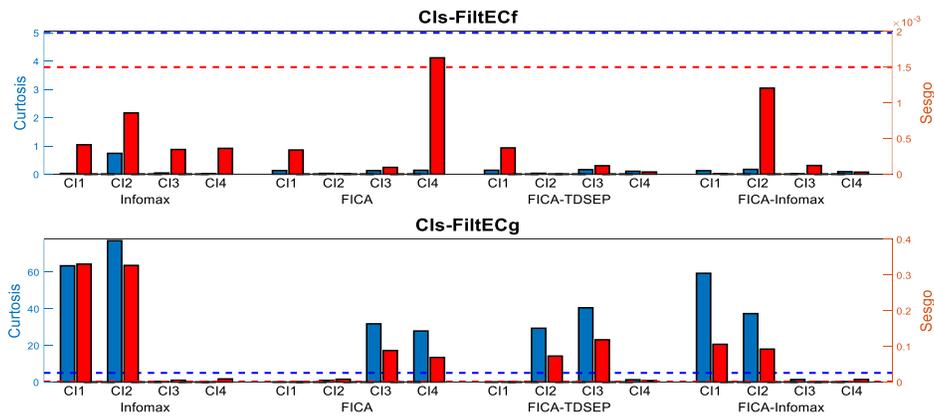
**Figura 104.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 16f y se limitó el análisis a la banda de ECf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECf en los CI 1 y CI 3 de Infomax, 10 ECf en los CI 2 y CI 4 de Infomax, 12 ECf en el CI 1 de FICA-Infomax, y 13 ECf en los CI 3 y CI 4 de FICA y FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax.



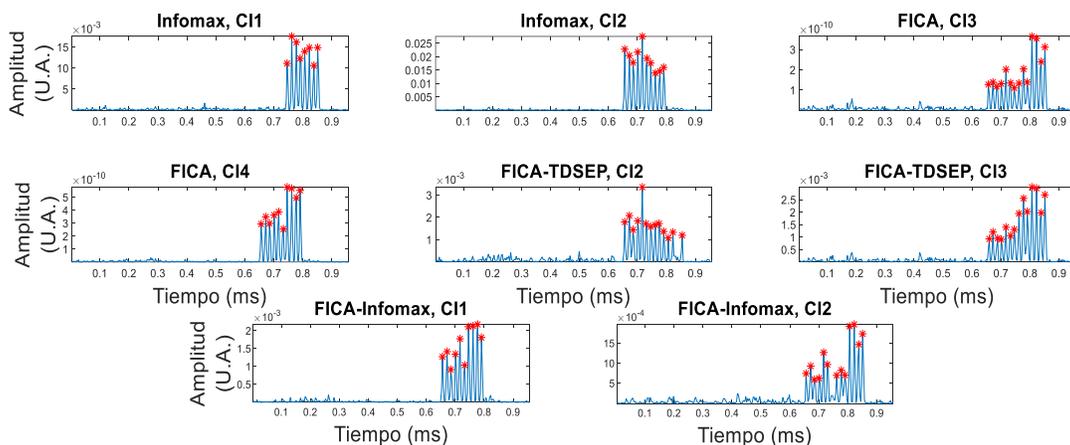
**Figura 105.** Índices SIR obtenidos en la prueba 16f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



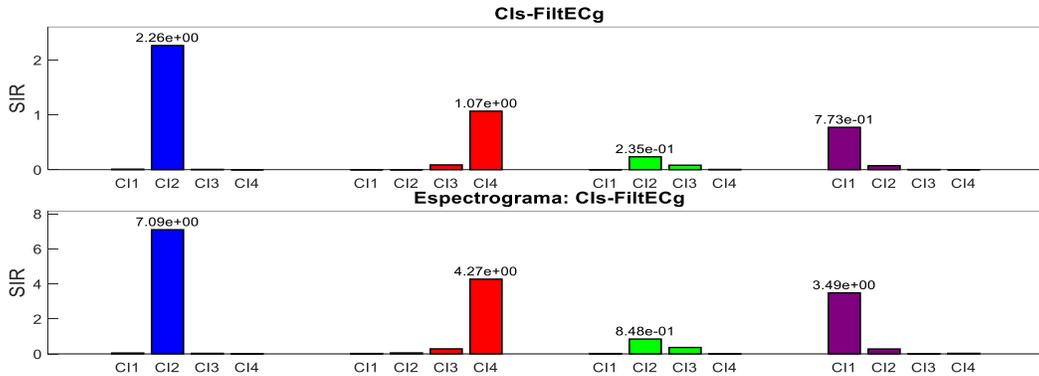
**Figura 106.** Índices SIR obtenidos en la prueba 16f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



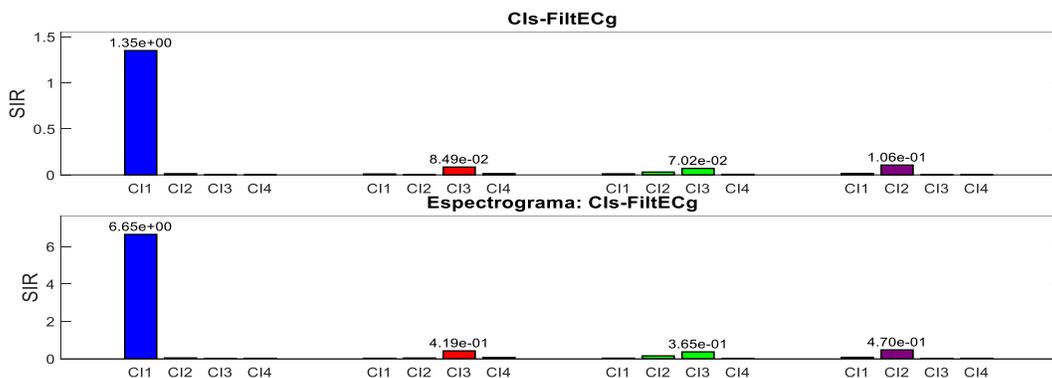
**Figura 107.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 16g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 108.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 16g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECg en el C1 1 de Infomax, 10 ECg en el C1 2 de Infomax, en el C1 4 de FICA y en el C1 1 de FICA-Infomax, 13 ECg en el C1 2 de FICA-TDSEP y en el C1 2 de FICA-Infomax, y 14 ECg en el C1 3 de FICA y en el C1 3 de FICA-TDSEP.



**Figura 109.** Índices SIR obtenidos en la prueba 16g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 110.** Índices SIR obtenidos en la prueba 16g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

1 de FICA-Infomax recuperaron la fuente simulada F1, mientras que la fuente simulada F2 fue recuperada únicamente en el CI 1 de Infomax. Estos resultados también señalan que el CI 3 de FICA, los CI 2 y CI 3 de FICA-TDSEP y el CI 2 de FICA-Infomax recuperaron una mezcla de las fuentes simuladas F1 y F2.

#### VI.4.17 Prueba 17 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

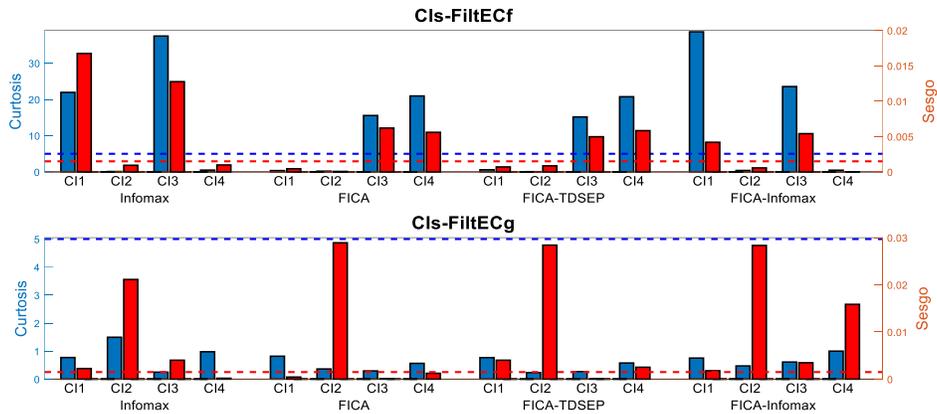
Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de inspiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

#### VI.4.17.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

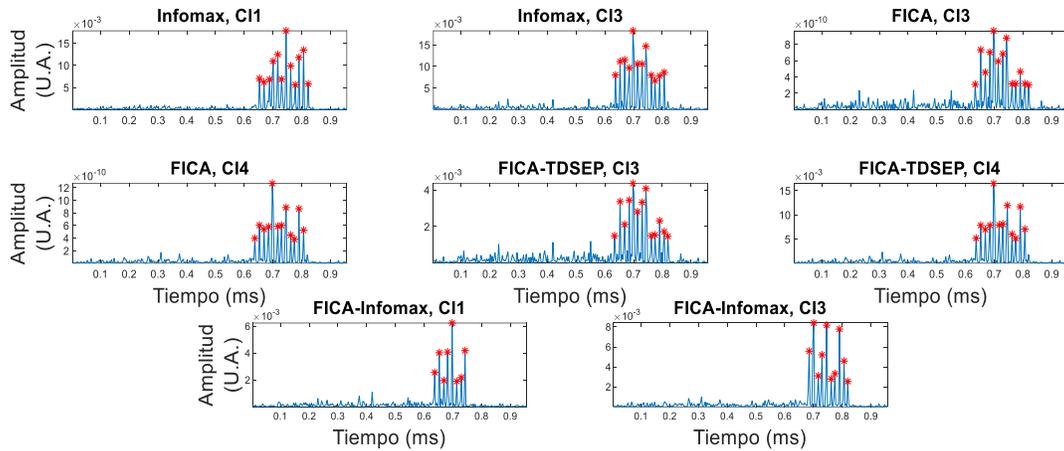
Las figuras de la fuente simulada, de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA y de los CIs filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 17f, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores calculados de curtosis y sesgo, mostrados en la **figura 111**, señalan la presencia de EC de tipo fino en los CI 1 y CI 3 de Infomax, en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y en los CI 1 y CI 3 de FICA-Infomax. El conteo automático de EC, mostrado en la **figura 112**, indica la existencia de 8 ECf en el CI 1 de FICA-Infomax, de 10 ECf en el CI 3 de este mismo algoritmo, de 12 ECf en los CI 1 y CI 3 de Infomax y en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y de 13 ECf en los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP. En total, Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax recuperaron 24 ECf, 25 ECf, 25 ECf y 18 ECf, respectivamente. Los índices SIR calculados entre los CIs-FiltECf que poseen EC y la fuente simulada F1 se muestran en la **figura 113** mientras que los índices SIR calculados entre estos mismos componentes y la fuente simulada F2 se encuentran en la **figura 114**. Aquí, se observa que FICA-Infomax obtuvo el mejor desempeño en la recuperación morfológica y del contenido en frecuencia de ambas fuentes simuladas. De acuerdo a los resultados obtenidos en esta prueba, se determinó que FICA-Infomax fue el único algoritmo en recuperar ambas fuentes simuladas de manera independiente mientras que Infomax, FICA y FICA-TDSEP contienen mezclas de ambas fuentes simuladas en sus CIs con presencia de ECf.

#### VI.4.17.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

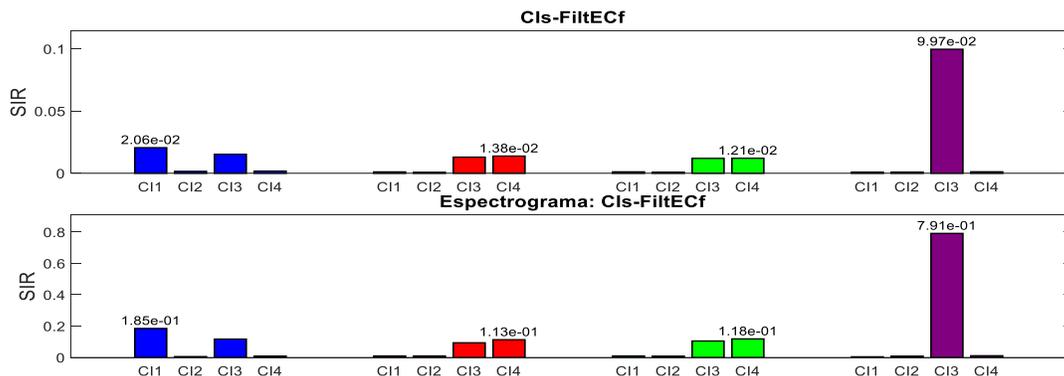
Las figuras de la fuente simulada, de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA y de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 17g, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados se muestran en la **figura 115**, indicando la presencia de EC gruesos en los CI 1 y CI 2 de FICA, en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax. El conteo automático de ECg en estos CIs mostrado en la **figura 116** reveló la existencia de 8 ECg en los CI 2 de los cuatro algoritmos de ICA y de 10 ECg en el CI 1 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 3 de FICA-Infomax. En total, los cuatro algoritmos de ICA estimaron 18 ECg. Los índices SIR asociados a la recuperación de las fuentes simuladas F1 y F2, mostrados respectivamente en las **figuras 117 y 118**, indican que Infomax obtuvo el mejor desempeño en la estimación de ambas morfologías y contenidos en frecuencia, seguido por FICA-Infomax, FICA-TDSEP y FICA-Infomax.



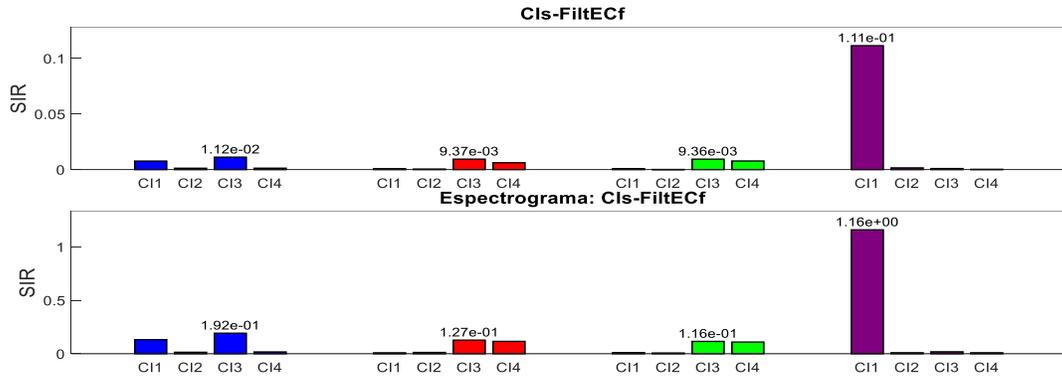
**Figura 111.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los CIs filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 17f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



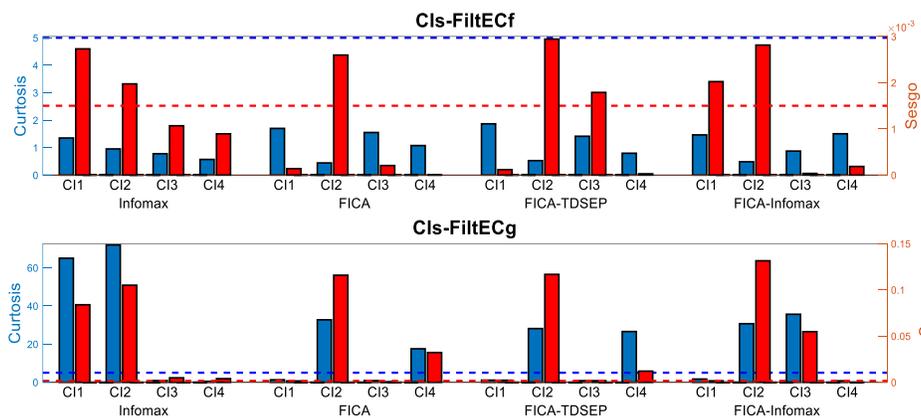
**Figura 112.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los CIs con presencia de EC en la prueba 17f y se limitó el análisis a la banda de ECf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 y 10 Ecf, respectivamente, en los CI 1 y CI 3 de FICA-Infomax, 12 Ecf en los CI 1 y CI 3 de Infomax y en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y 13 Ecf en los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP.



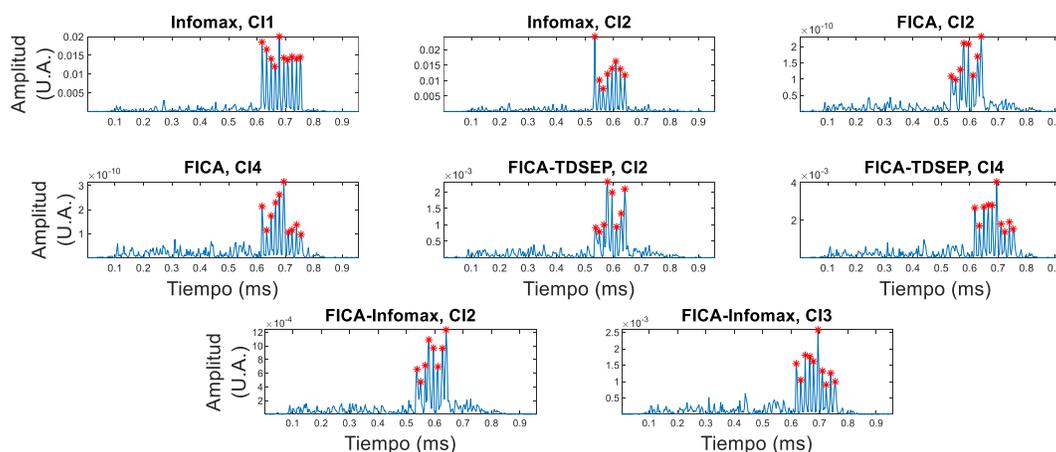
**Figura 113.** Índices SIR obtenidos en la prueba 17f entre los CIs-FiltECf y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los CIs-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los CIs-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los CIs de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



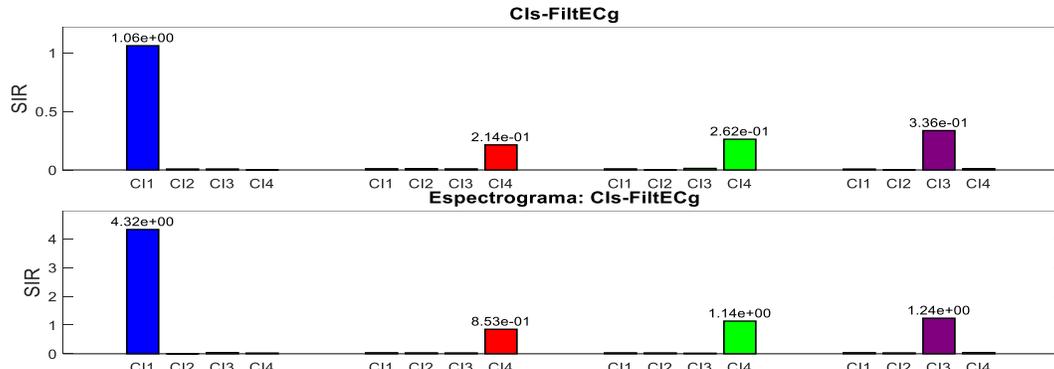
**Figura 114.** Índices SIR obtenidos en la prueba 17f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



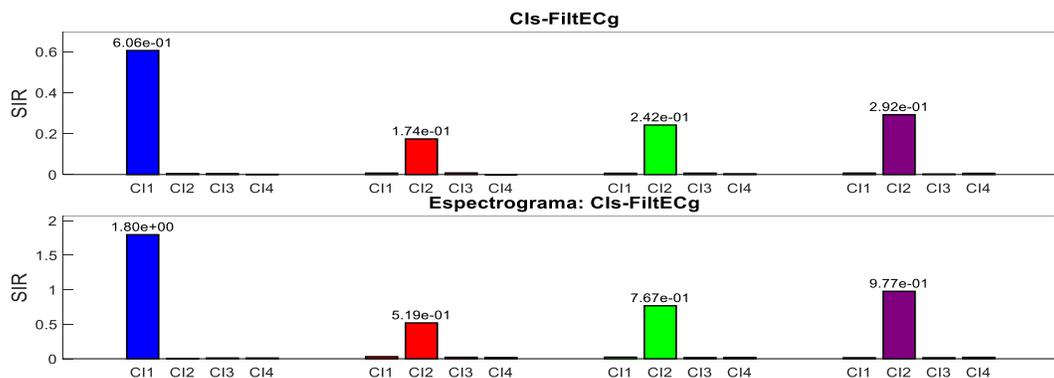
**Figura 115.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 17g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 116.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECG. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 17g y se limitó el análisis a la banda de ECG. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECG en los CI 2 de Infomax, de FICA, de FICA-TDSEP y de FICA-Infomax, y de 10 ECG en el CI 1 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 3 de FICA-Infomax.



**Figura 117.** Índices SIR obtenidos en la prueba 17g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 118.** Índices SIR obtenidos en la prueba 17g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

#### VI.4.18 Prueba 18 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de espiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

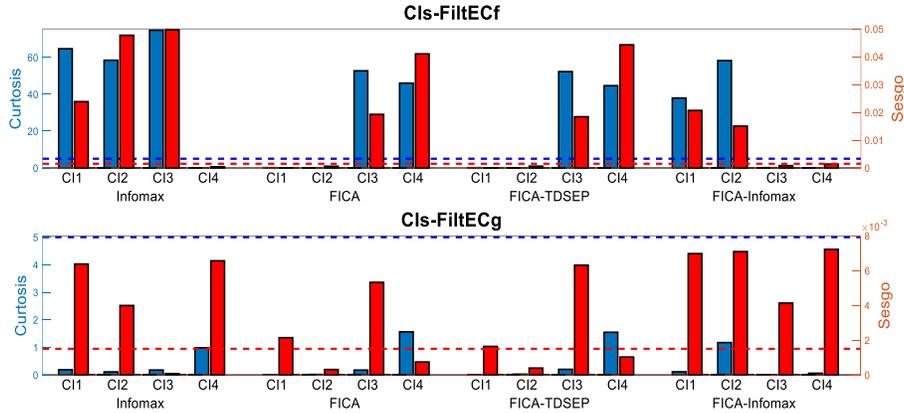
##### VI.4.18.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los Cls obtenidos por los algoritmos de ICA como de los Cls filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 18f, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo, mostrados en la **figura 119**, indican la presencia de EC de tipo fino en los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax, en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-

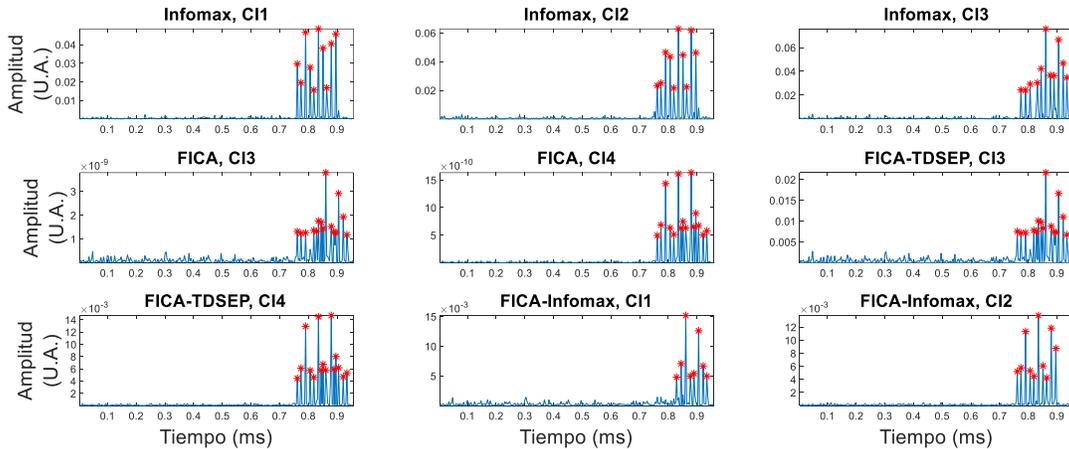
TDSEP y en los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. En la **figura 120** se encuentra el conteo de EC, el cual indica la existencia de 8 ECf en el CI 1 de FICA-Infomax, de 10 ECf en los CI 1 y CI 2 de Infomax y en el CI 2 de FICA-Infomax, de 11 ECf en el CI 3 de Infomax, y de 15 ECf en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP. En total, Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax estimaron 28 ECf, 30 ECf, 30 ECf y 18 ECf, respectivamente. Los índices SIR calculados entre los componentes filtrados con presencia de ECf y la fuente simulada F1, mostrados en la **figura 121**, señalan que Infomax (CI 1) recuperó la morfología de F1 con mejor eficiencia, seguido por FICA-Infomax, sin embargo, FICA-Infomax superó a Infomax en la recuperación del contenido en frecuencia de esta fuente simulada. Los índices SIR calculados entre los CIs-FiltECf con presencia de EC y la fuente simulada F2, mostrados en la **figura 122**, indican que FICA-Infomax fue superior a Infomax en la recuperación de la morfología y del contenido en frecuencia de esta fuente simulada. Dado el índice SIR calculado entre los CI 1 y CI 2 de Infomax (0.0568) y las posiciones de los ECf en estos componentes, se determina la recuperación redundante de F1 en estos componentes. En conjunto, los resultados obtenidos en esta prueba indican que el CI 3 de Infomax y los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP recuperaron mezclas de las fuentes simuladas F1 y F2.

#### VI.4.18.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

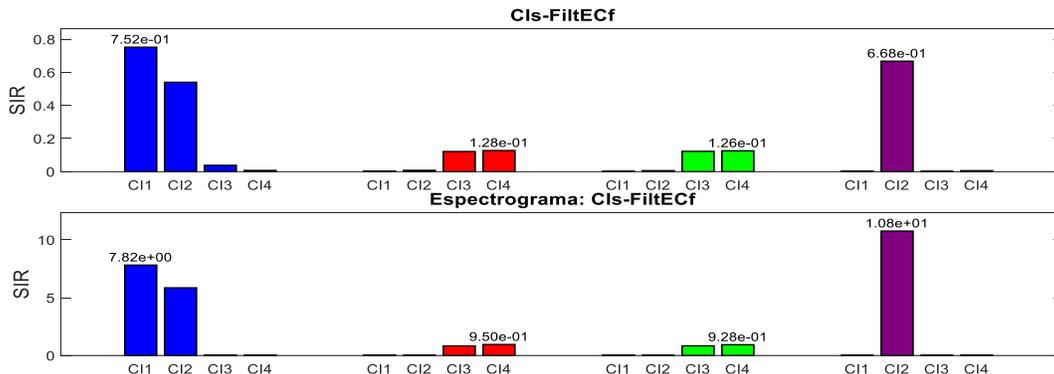
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, denominada prueba 18g, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados, mostrados en la **figura 123**, indican la presencia de EC de tipo grueso en los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax, en los CI 2 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax. El conteo automático de ECg mostrado en la **figura 124** señalan la detección de 8 ECg en el CI 3 de FICA-Infomax, de 10 ECg en el CI 4 de FICA, de 12 ECg en el CI 3 de Infomax y en los CI 2 de FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax, y de 14 ECg en los CI 1 y CI 2 de Infomax, y en el CI 4 de FICA-TDSEP. En total, Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax estimaron 40 ECg, 22 ECg, 26 ECg y 20 ECg, respectivamente. Los índices SIR de la **figura 125** indican que la fuente simulada F1 fue recuperada con mejor eficiencia por FICA mientras que los índices SIR de la **figura 126** muestran que FICA-Infomax fue el algoritmo con mejor desempeño en la recuperación de la fuente simulada F2. Considerando los resultados obtenidos en esta prueba, se determinó que los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax, el CI 2 de FICA, los CI 2 y CI 4 de FICA-TDSEP, y el CI 2 de FICA-Infomax contienen ECg que representan una mezcla de las fuentes simuladas F1 y F2.



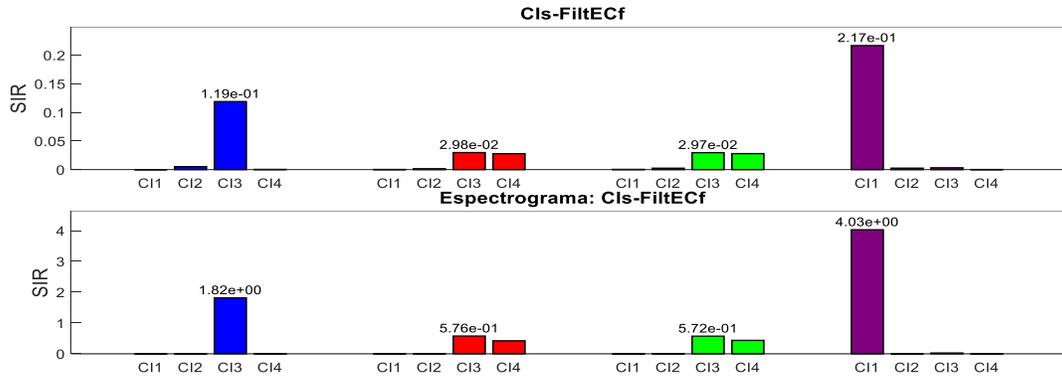
**Figura 119.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los CIs filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 18f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



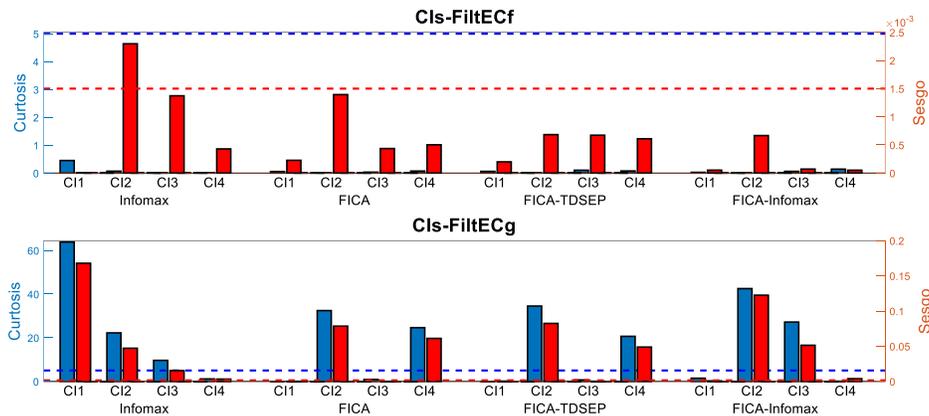
**Figura 120.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los CIs con presencia de EC en la prueba 18f y se limitó el análisis a la banda de EC. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECf en el CI 1 de FICA-Infomax, 10 ECf en los CI 1 y CI 2 de Infomax y en el CI 2 de FICA-Infomax, 11 ECf en el CI 3 de Infomax, y 15 ECf en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP.



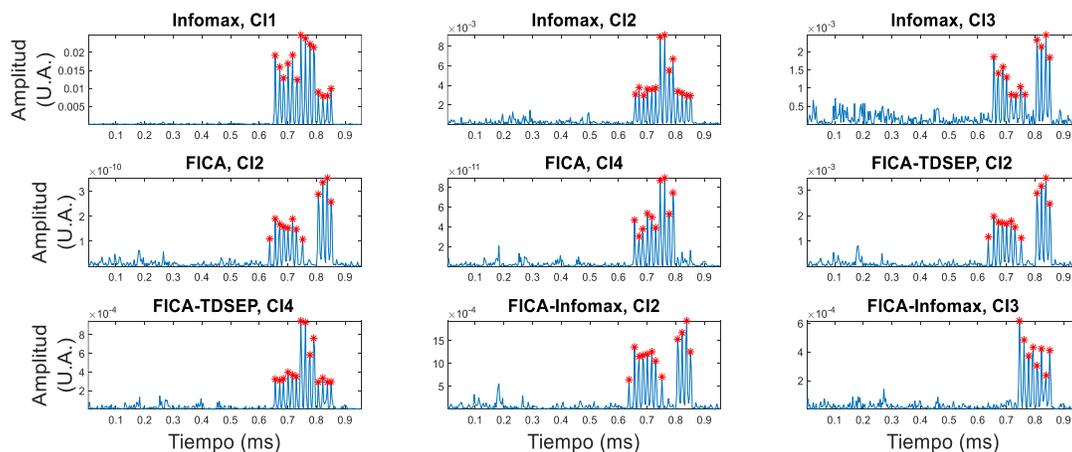
**Figura 121.** Índices SIR obtenidos en la prueba 18f entre los CIs-FiltECf y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los CIs-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los CIs-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los CIs de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



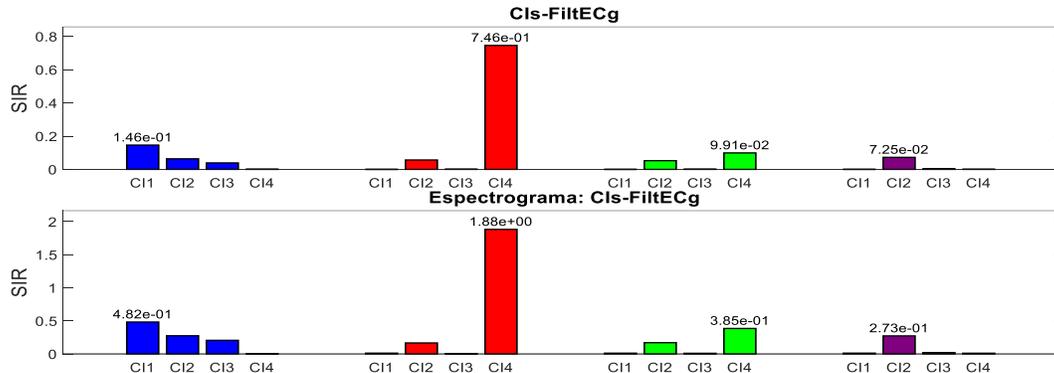
**Figura 122.** Índices SIR obtenidos en la prueba 18f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



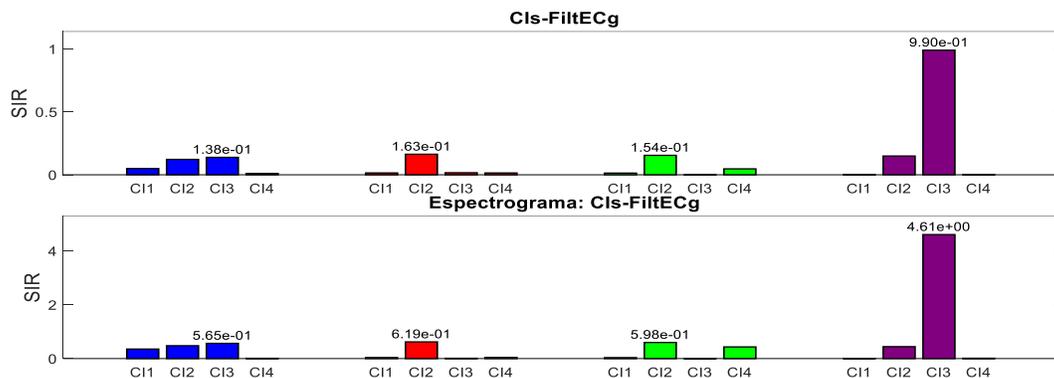
**Figura 123.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 18g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 124.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECG. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 18g y se limitó el análisis a la banda de ECG. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECG en el CI 3 de FICA-Infomax, 10 ECG en el CI 4 de FICA, 12 ECG en el CI 3 de Infomax y en los CI 2 de FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax, y 14 ECG en los CI 1 y CI 2 de Infomax, y en el CI 4 de FICA-TDSEP.



**Figura 125.** Índices SIR obtenidos en la prueba 18g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F1. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 126.** Índices SIR obtenidos en la prueba 18g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F2. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

#### VI.4.19 Prueba 19 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación bidireccional

Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de inspiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PM3, PM4 y PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

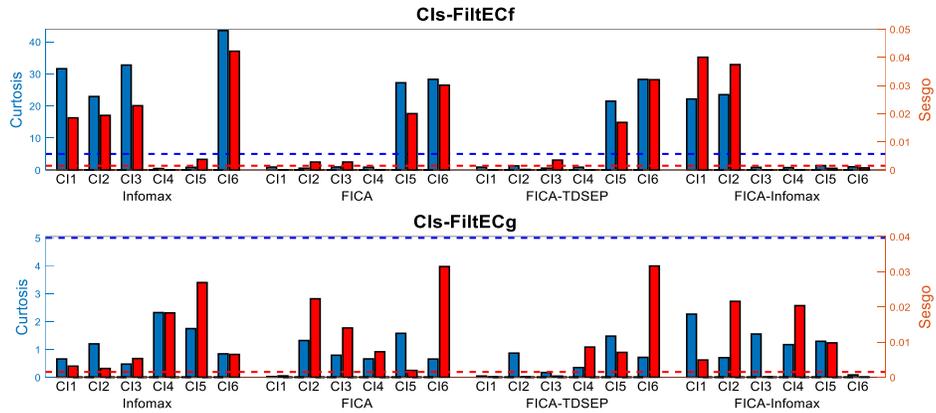
##### VI.4.19.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los Cls obtenidos por los algoritmos de ICA como de los Cls filtrados por FiltECf en esta prueba, llamada prueba 19f, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados a partir de los Cls filtrados, mostrados en la **figura 127**, indican la presencia de EC de tipo fino en los CI 1, CI 2, CI 3 y CI 6 de

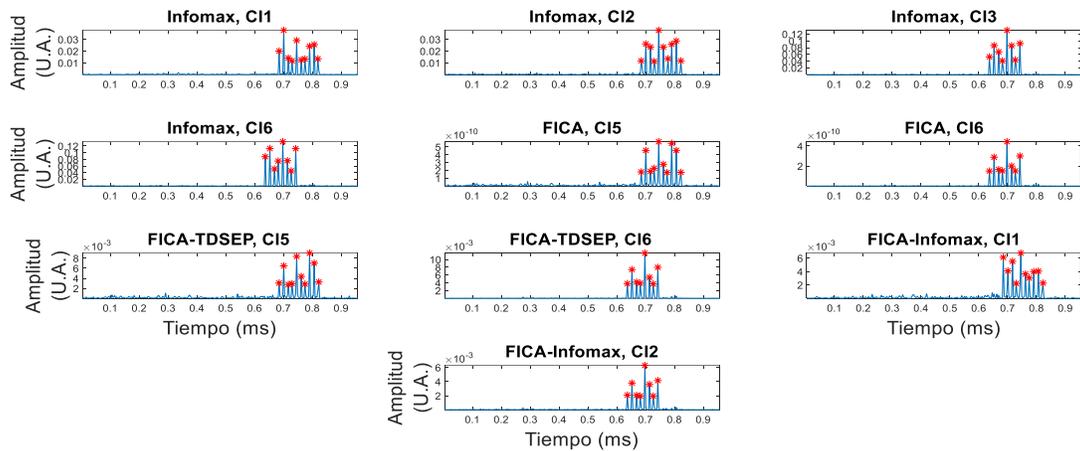
Infomax, en los CI 5 y CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. El conteo de EC mostrado en la **figura 128** indica la detección de 8 ECf en los CI 3 y CI 6 de Infomax, en los CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 2 de FICA-Infomax, y de 10 ECf en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 1 de FICA-Infomax. En total, Infomax recuperó 36 ECf mientras que cada uno de los algoritmos de ICA<sub>f</sub> estimó la presencia de 18 ECf. Los índices SIR calculados entre los CIs-FiltECf con presencia de ECf y la fuente simulada F1, mostrados en la **figura 129**, indican que FICA recuperó con mejor eficiencia la morfología y el contenido en frecuencia de esta fuente simulada, seguido de Infomax (CI 1), TDSEP y FICA-Infomax. Los índices SIR calculados entre estos mismos CIs-FiltECf y la fuente simulada F2, encontrados en la **figura 130**, indican que Infomax (CI 6) recuperó con mejor eficiencia esta fuente simulada, seguido por FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. Los índices SIR calculados entre los CI 1 y CI 2 y entre los CI 3 y CI 6 de Infomax son de 0.0121 y de 0.0670. En conjunto, los resultados obtenidos en esta prueba indican la recuperación redundante de la fuente simulada F1 en los CI 1 y CI 2 de Infomax y de la fuente simulada F2 en los CI 3 y CI 6 de este mismo algoritmo.

#### VI.4.19.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

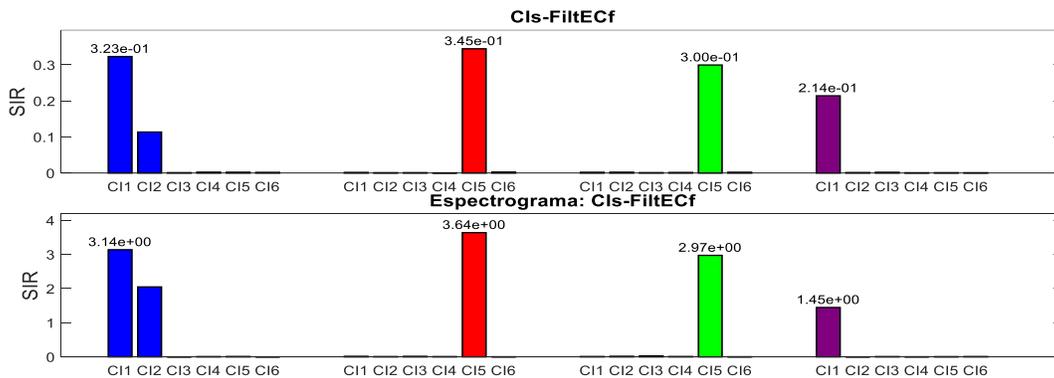
Los valores de curtosis y sesgo de los CIs filtrados se muestran en la **figura 131** y señalan la presencia de EC de tipo de grueso en los CI 1, CI 2 y CI 6 de Infomax, en los CI 3 y CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax. La detección automática de ECg, mostrada en la **figura 132**, señala la detección de 8 ECg en los CI 2 y CI 3 de Infomax y en el CI 3 de FICA-Infomax, de 10 ECg en el CI 1 de Infomax y en el CI 2 de FICA-Infomax, de 15 ECg en los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP, y de 16 ECg en los CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP. En total, Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax estimaron 26 ECg, 31 ECg, 31 ECg y 18 ECg, respectivamente. Los índices SIR calculados entre los CIs-FiltECg y la fuente simulada F1 se muestran en la **figura 133**, mientras que los índices SIR calculados entre estos mismos componentes filtrados y la fuente simulada F2 se encuentran en la **figura 134**. Ambas figuras indican que Infomax fue el algoritmo que recuperó con mayor eficiencia la morfología y el contenido en frecuencia de estas fuentes simuladas, seguido por FICA-Infomax. El índice SIR calculados entre los CI 2 y CI 6 de Infomax es de 0.0666. En conjunto, estos resultados indican que los CI 2 y CI 6 de Infomax estimaron redundantemente la fuente simulada F2, mientras que los CI 3 y CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP recuperaron mezclas de las fuentes simuladas F1 y F2.



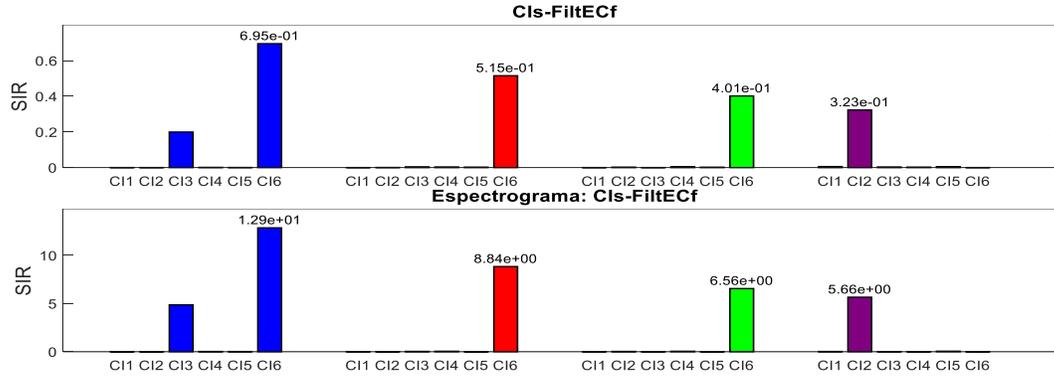
**Figura 127.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 19f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



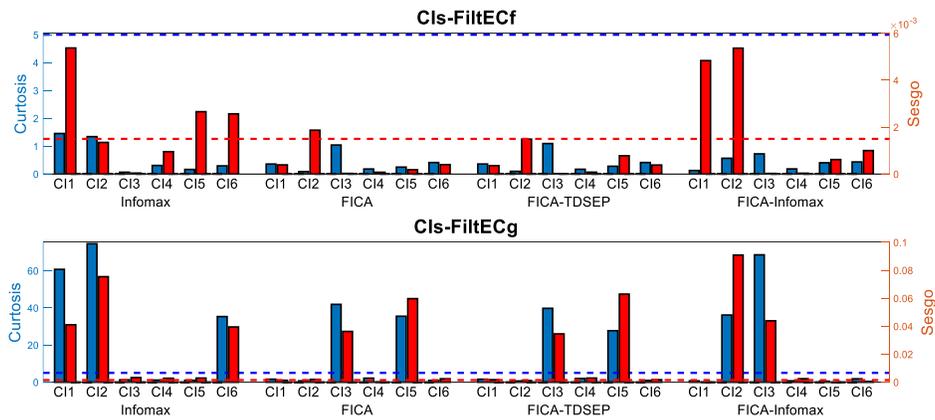
**Figura 128.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 19f y se limitó el análisis a la banda de ECf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECf en los CI 3 y CI 6 de Infomax, en los CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 2 de FICA-Infomax, y 10 ECf en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 1 de FICA-Infomax.



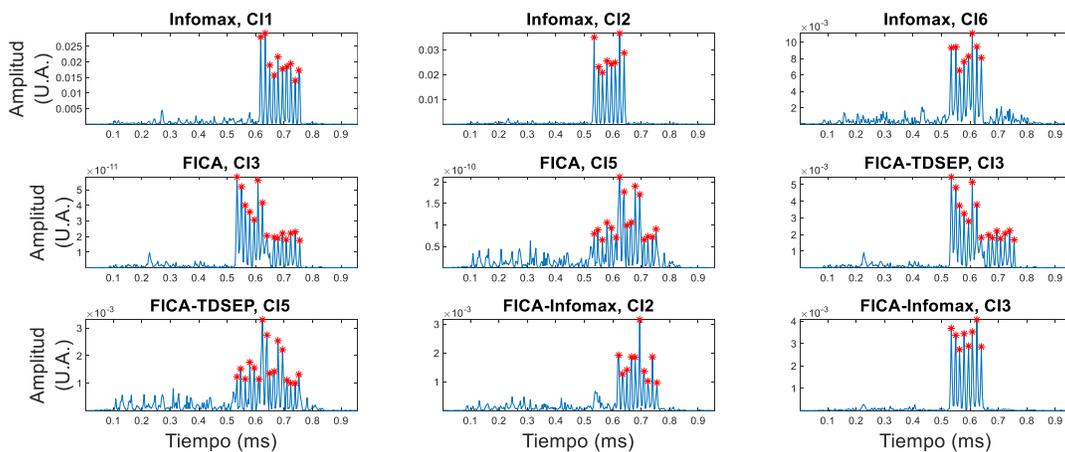
**Figura 129.** Índices SIR obtenidos en la prueba 19f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F1 como señal de referencia. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F1 como señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



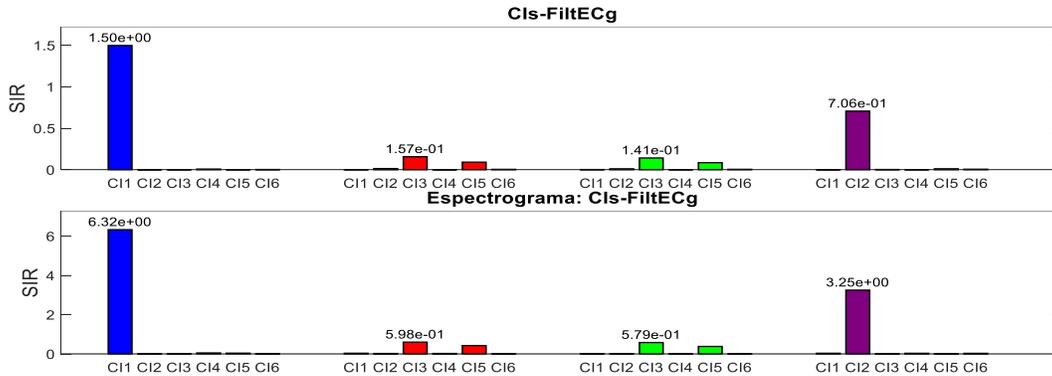
**Figura 130.** Índices SIR obtenidos en la prueba 19f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F2 como señal de referencia. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



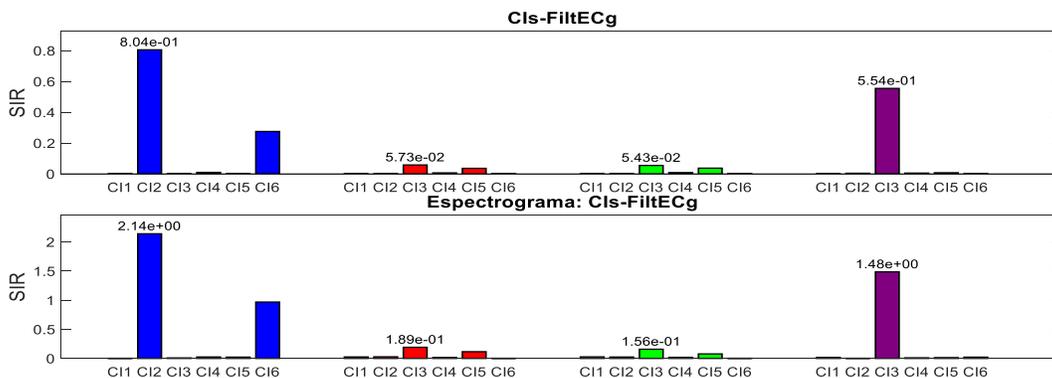
**Figura 131.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 19g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



**Figura 132.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. Se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 19g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECg en los Cl 2 y Cl 6 de Infomax y en el Cl 3 de FICA-Infomax, 10 ECg en el Cl 1 de Infomax y en el Cl 2 de FICA-Infomax, 15 ECg en los Cl 3 de FICA y de FICA-TDSEP, y 16 ECg en los Cl 5 de FICA y de FICA-TDSEP.



**Figura 133.** Índices SIR obtenidos en la prueba 19g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F1 como señal de referencia. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 134.** Índices SIR obtenidos en la prueba 19g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F2 como señal de referencia. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

#### VI.4.20 Prueba 20 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación bidireccional

Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de espiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PM3, PM4 y PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

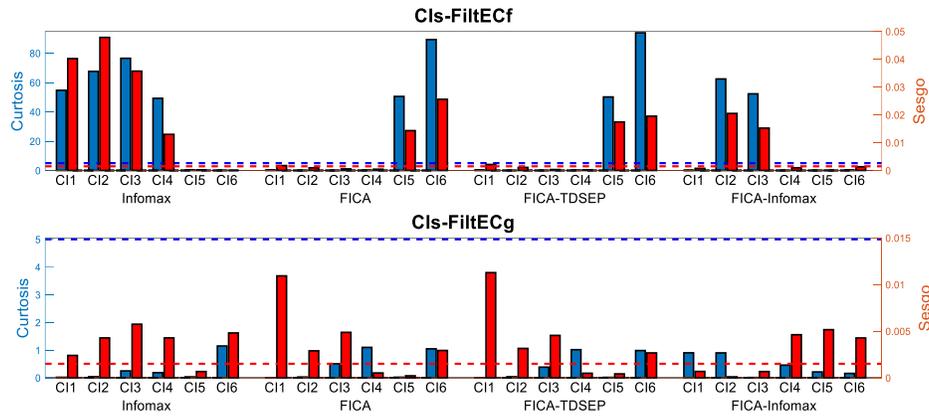
##### VI.4.20.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los Cls obtenidos por los algoritmos de ICA como de los Cls filtrados por FiltECf en esta prueba, denominada prueba 20f, se encuentran en el anexo para su revisión. En la **figura 135** se encuentran los valores de curtosis y sesgo calculados a partir de los componentes filtrados e indican la presencia de EC de tipo fino en los CI 1, CI 2, CI 3 y

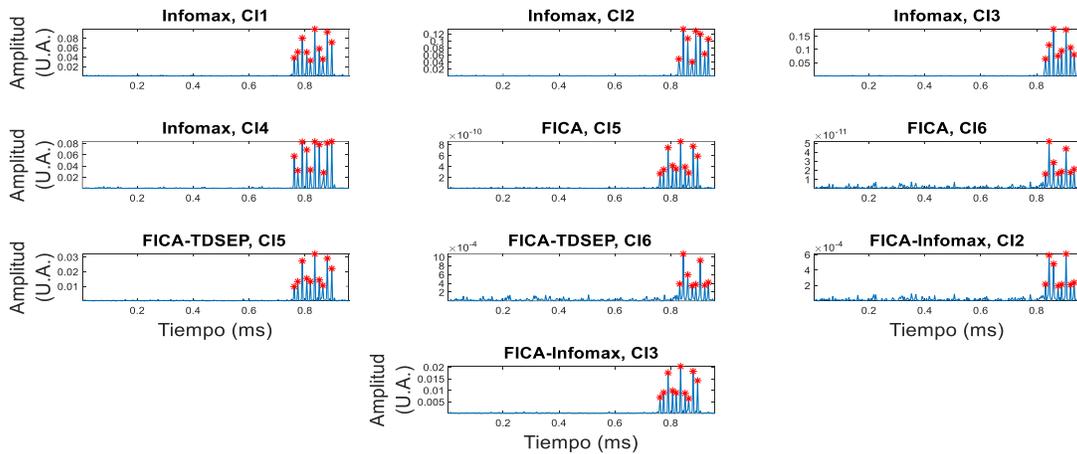
CI 4 de Infomax, en los CI 5 y CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax. El conteo de EC, mostrado en la **figura 136**, señala la detección de 8 ECf en los CI 2 y CI 3 de Infomax, en los CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 2 de FICA-Infomax, y la detección de 10 ECf en los CI 1 y CI 4 de Infomax, en los CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 3 de FICA-Infomax. En total, Infomax recuperó 36 ECf mientras que los algoritmos de ICA<sub>F</sub> detectaron, cada uno, 18 ECf. Los índices SIR calculados entre la fuente simulada F1 y los CIs-FiltECf con presencia de EC se encuentran en la **figura 137**. Estos índices muestran que Infomax (CI 1) recuperó la morfología y el contenido en frecuencia con mejor eficiencia, seguido por FICA, FICA-Infomax y FICA-TDSEP. Por su parte, los índices SIR calculados entre la fuente simulada F2 y los componentes filtrados se muestran en la **figura 138**. Aquí, se observa de nueva cuenta que Infomax (CI 2) obtuvo el mejor desempeño en la recuperación de esta fuente simulada, seguido por FICA, FICA-Infomax y FICA-TDSEP. Los índices SIR calculados entre los CI 1 y CI 4 y entre los CI 2 y CI 3 de Infomax son de 0.0192 y de 0.0189, respectivamente. Los resultados obtenidos en esta prueba indican, en conjunto, la recuperación redundante de F1 en los CI 1 y CI 4 de Infomax, y de F2 en los CI 2 y CI 3 de este mismo algoritmo.

#### VI.4.20.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

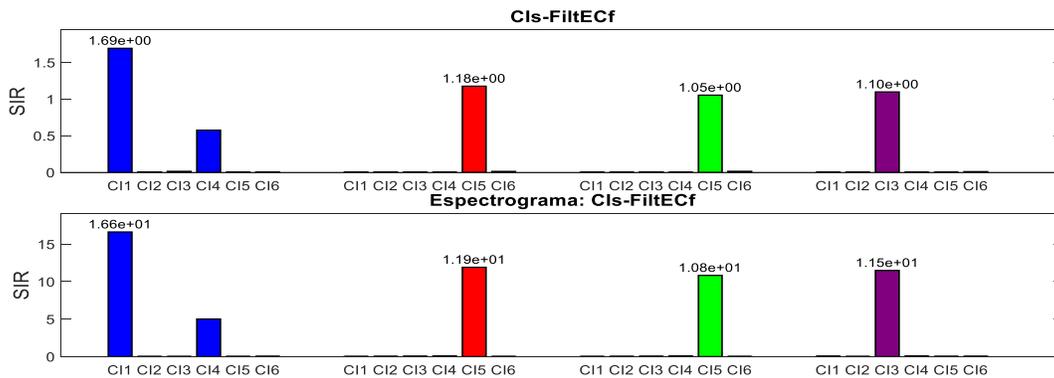
La figura de la fuente simulada y las figuras tanto de los CIs obtenidos por los algoritmos de ICA como de los CIs filtrados por FiltECg en esta prueba, llamada prueba 20g, se encuentran en el anexo para su revisión. Los valores de curtosis y sesgo calculados a partir de los componentes filtrados se muestran en la **figura 139**. Aquí, se muestra la presencia de EC de tipo grueso en los CI 1, CI 2, CI 5 y CI 6 de Infomax, en los CI 4, CI 5 y CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. El conteo automático de EC mostrado en la **figura 140** señala la detección de 8 ECg en los CI 2 y CI 5 de Infomax, de 10 ECg en los CI 1 y CI 6 de Infomax, en los CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 1 de FICA-Infomax, de 12 ECg en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y de 14 ECg en los CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 2 de FICA-Infomax. En total, Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax recuperaron 36 ECg, 26 ECg, 26 ECg y 24 ECg, respectivamente. Los índices SIR calculados con la fuente simulada F1 como señal de referencia, mostrados en la **figura 141**, indican que Infomax (CI 1) recuperó con mayor eficiencia la morfología y el contenido en frecuencia de esta fuente simulada, seguido por FICA-Infomax (CI 1). Los índices SIR calculados con la fuente simulada F2 como señal de referencia, mostrados en la **figura 142**, señalan, de nueva cuenta, que Infomax (CI 2) recuperó con mayor eficiencia esta fuente simulada tanto morfológicamente como en contenido en frecuencia. Los índices SIR calculados entre los CI 1 y CI 6 y entre los CI 2 y CI 5 de Infomax fueron



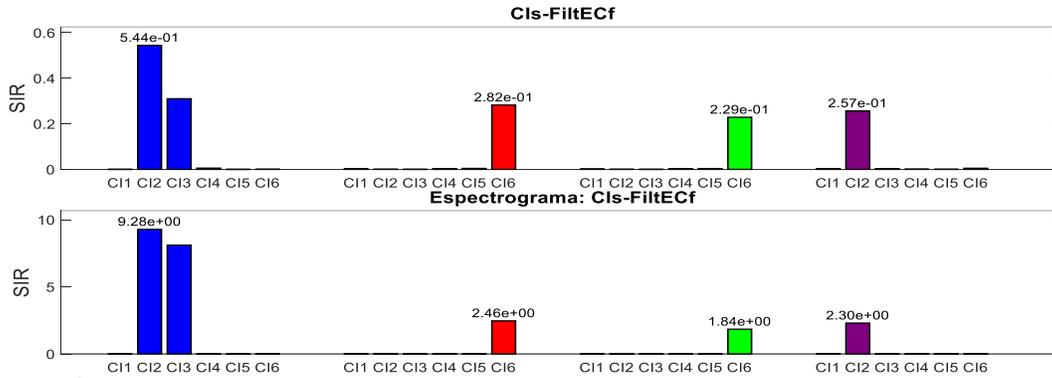
**Figura 135.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 20f. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.



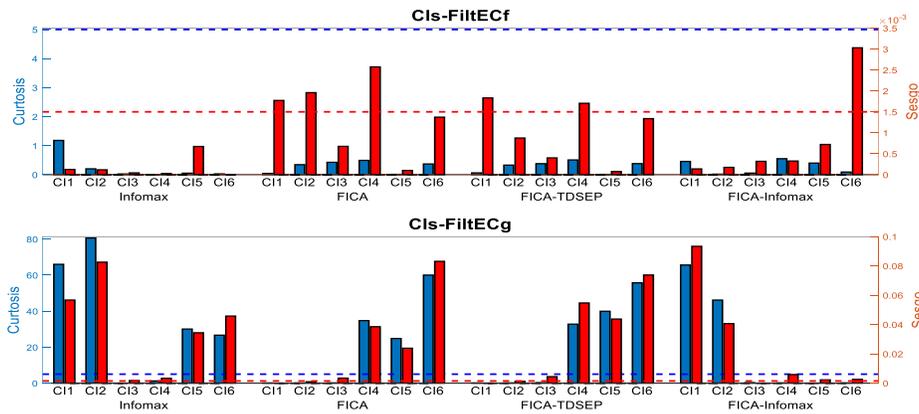
**Figura 136.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECf. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 20f y se limitó el análisis a la banda de ECf. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECf en los Cl 2 y Cl 3 de Infomax, en los Cl 6 de FICA y de FICA-TDSEP y en el Cl 2 de FICA-Infomax, y 10 ECf en los Cl 1 y Cl 4 de Infomax, en los Cl 5 de FICA y de FICA-TDSEP y en el Cl 3 de FICA-Infomax.



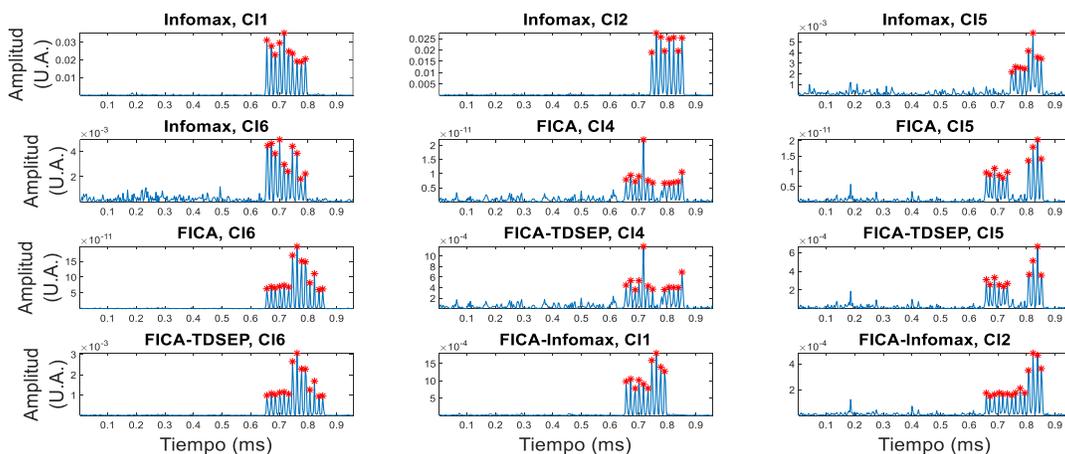
**Figura 137.** Índices SIR obtenidos en la prueba 20f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F1 como señal de referencia. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F1 como señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 138.** Índices SIR obtenidos en la prueba 20f entre los Cls-FiltECf y la fuente simulada F2 como señal de referencia. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECf y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECf y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

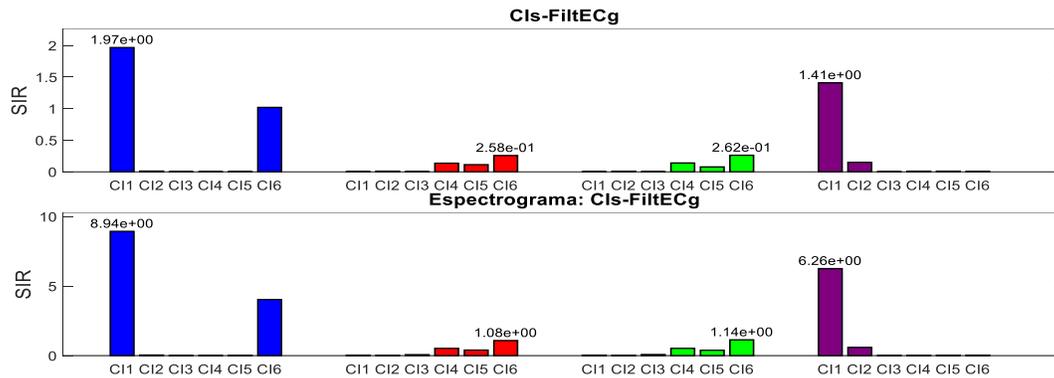


**Figura 139.** Valores de curtosis (color azul) y sesgo (color rojo) calculados a partir de los Cls filtrados mediante FiltECf (gráfica superior) y FiltECg (gráfica inferior) en la prueba 20g. Los umbrales requeridos para definir la presencia de EC se encuentran representados por líneas punteadas.

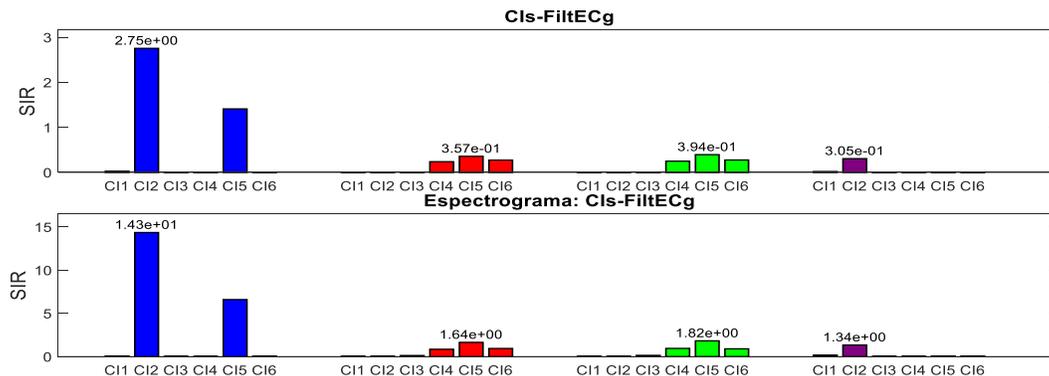


**Figura 140.** Conteo de EC por bandas de frecuencia asociadas a los ECg. De cada algoritmo se seleccionaron los espectrogramas de los Cls con presencia de EC en la prueba 20g y se limitó el análisis a la banda de ECg. Un asterisco rojo indica la presencia de un EC. Se detectaron 8 ECg en los CI 2 y CI 5 de Infomax, 10 ECg en los CI 1 y CI 6 de Infomax, en los CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 1 de FICA-Infomax, 12 ECg en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y 14 ECg en los CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 2 de FICA-Infomax.

de 0.0227 y de 0.0245, respectivamente. Los resultados obtenidos en esta prueba indican en conjunto la recuperación redundante de F1 en los CI 1 y CI 6 de Infomax y de F2 en los CI 2 y CI 5 de este mismo algoritmo. También, se determinó que los CI 4, CI 5 y CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y el CI 2 de FICA-Infomax recuperaron mezclas de ambas fuentes simuladas.



**Figura 141.** Índices SIR obtenidos en la prueba 20g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F1 como señal de referencia. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.



**Figura 142.** Índices SIR obtenidos en la prueba 20g entre los Cls-FiltECg y la fuente simulada F2 como señal de referencia. En la gráfica superior se despliega el valor del índice entre los Cls-FiltECg y la señal de referencia mientras que en la gráfica inferior se presentan los SIR obtenidos entre el espectrograma de los Cls-FiltECg y el espectrograma de la señal de referencia. Los índices calculados con los Cls de los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax se muestran en color azul, rojo, verde y morado, respectivamente.

## VII. DISCUSIÓN

En este trabajo de tesis se exploró el modelo de mezcla convolutivo para la separación ciega de fuentes. Se consideró que este modelo refleja en mayor medida el fenómeno que se origina cuando el sonido respiratorio viaja por el parénquima pulmonar generando los registros obtenidos en comparación con el modelo de mezcla instantáneo, dado que incluye retrasos temporales entre los registros de los sensores y la propagación de las fuentes [42]. La metodología propuesta en este trabajo de tesis involucró distintos pasos para realizar la separación ciega de fuentes mediante distintos algoritmos de ICA y para la detección automática de EC en los componentes independientes estimados. Primero, la simulación matemática de EC finos y gruesos permitió analizar el efecto de la propagación bajo el esquema convolutivo de los sonidos adventicios discontinuos en la BSS. También, los escenarios de simulación permitieron evaluar la extracción de EC de sonidos respiratorios mediante distintos algoritmos de ICA, incluyendo métodos implementados en los dominios del tiempo y frecuencia, además de la combinación de métodos de ICA, es decir, la aplicación de métodos en cascada.

La implementación de ICA<sub>F</sub> incluyó la resolución de las indeterminaciones de escalamiento y permutación. Se comprobó que estas ambigüedades fueron corregidas correctamente dados los resultados obtenidos y la capacidad de obtener componentes independientes con información congruente en sus representaciones temporales y espectrogramas. La proyección de los CIs al dominio de los sensores, en este caso micrófonos, permitió obtener una escala congruente en cada uno de los *bins* de frecuencia durante la reconstrucción de los componentes. Esto es debido a que este mapeo incluye información proveniente de la estimación de la matriz de mezcla acerca de la contribución de las fuentes que se desean recuperar en cada una de las mezclas registradas por los sensores. Es necesario enfatizar que la indeterminación de permutación se resolvió con el método propuesto en este trabajo al modificar la versión móvil de K-means de Chen [41]. El criterio descrito en la ecuación (42) permitió reagrupar correctamente los *bins* de frecuencia de más de dos componentes independientes al basar la reasignación de etiquetas en las distancias mínimas entre centroides de lotes contiguos.

Una vez obtenidos los componentes independientes mediante los algoritmos de ICA, se planteó la detección automática de EC en estos CIs. El primer paso en la detección es filtrar, por separado, los componentes utilizando el ancho de banda de los EC de tipo fino y de tipo grueso mediante FiltEC<sub>f</sub> y FiltEC<sub>g</sub>, respectivamente. Posteriormente, se calculan los valores de curtosis y

sesgo para identificar aquellos CIs filtrados con presencia de EC y dependiendo del filtro usado en el componente identificado, se reconoce el tipo del estertor. Finalmente, el conteo de EC se basó en el conteo de máximos locales en la banda de frecuencia correspondiente al tipo de EC detectado. Esta metodología resultó viable ya que los resultados indican que la detección de EC, el reconocimiento del tipo del estertor y el conteo de estos SA fueron correctos en cada EC de tipo fino o grueso estimado por los algoritmos de ICA en las pruebas realizadas.

Por su parte, los algoritmos de Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax lograron distintos niveles de desempeño en las pruebas planteadas vía los escenarios de simulación. Los índices SIR calculados entre los CIs filtrados y las fuentes simuladas permitieron analizar el desempeño de los cuatro algoritmos de ICA desde el enfoque de recuperación de la fuente, es decir, la semejanza morfológica y en contenido en frecuencia. En contraste, los índices SIR calculados entre los CIs estimados de un mismo algoritmo hacen referencia a la separación de fuentes en un enfoque global, es decir, cuantifica la recuperación redundante (falsos positivos) de las fuentes simuladas. El índice SIR ideal en la recuperación de la fuente, i.e. estimar correctamente la morfología de la fuente, es infinito mientras que el índice SIR ideal en la separación de fuentes, i.e. sin redundancia en los CIs estimados, es cero.

Los resultados obtenidos por los algoritmos de ICA al estimar ECf se resumen en la **tabla 4**, mientras que en la **tabla 5** se muestran los resultados logrados al estimar ECg. Aquí, se desglosan los resultados de acuerdo al porcentaje de pruebas donde se recuperaron todas las fuentes simuladas, al porcentaje de pruebas con estimación redundante cuando se recuperó al menos una fuente de EC, y al porcentaje de pruebas donde no se recuperaron fuentes de EC. En general, Infomax recuperó todas las fuentes simuladas en 33 de las 36 pruebas realizadas, mientras que FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax, recuperaron todas las fuentes en 25, 27, y 30 de las 36 pruebas, respectivamente. Particularmente, Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax recuperaron cuando menos una de las dos fuentes simuladas en 14, 9, 7 y 14 de las 16 pruebas que involucran dos fuentes de EC simuladas, respectivamente. En cuanto a los falsos positivos obtenidos, Infomax estimó CIs con información redundante de las fuentes simuladas en 17 pruebas con EC de tipo fino y en 7 pruebas con EC de tipo grueso, de un total de 17 pruebas de cada tipo estertor donde este algoritmo recuperó al menos una fuente simulada. Por su parte, FICA no obtuvo redundancia de fuentes en las pruebas donde recuperó al menos una fuente simulada sin importar el tipo de EC. FICA-TDSEP obtuvo redundancia en sus componentes estimados únicamente en 1 de 12 pruebas donde

recuperó al menos una fuente con ECg. En cambio, FICA-Infomax obtuvo componentes con información redundante en 4 de 17 pruebas donde recuperó al menos una fuente con ECf. Estos resultados indican que Infomax recuperó con mayor regularidad las fuentes simuladas, sin embargo, tiene una alta tasa de falsos positivos, principalmente al intentar recuperar fuentes simuladas de ECf. FICA no obtuvo redundancia en las pruebas, sin embargo, en 7 pruebas (3 con ECf y 4 con ECg) no logró recuperar alguna de las fuentes simuladas. A pesar que FICA-TDSEP solo obtuvo falsos positivos en una prueba, este algoritmo tuvo el mayor número de casos donde no detectó ninguna fuente de EC (9 pruebas, 3 con ECf y 6 con ECg). FICA-Infomax no logró recuperar al menos una fuente de EC en solo dos pruebas, una con ECf y otra con ECg y, además, obtuvo únicamente CIs con información redundante en la estimación de fuentes con ECf.

**Tabla 4.** Resultados obtenidos por los algoritmos de ICA al estimar EC de tipo fino.

Algoritmo de ICA	Recuperación de todas las FS (%)	Pruebas con estimación redundante (%)	Pruebas con una FS de EC	Pruebas con dos FS de EC		
			Recuperación de la FS de EC (%)	Estimar mezclas de las FS (%)	Recuperación de una sola FS de EC (%)	Recuperación de ninguna FS de EC (%)
Infomax	88.88	100	0.00	25.00	12.50	12.50
FICA	77.77	0.00	0.00	37.50	12.50	37.50
FICA-TDSEP	77.77	0.00	0.00	37.50	12.50	37.50
FICA-Infomax	88.88	16.66	0.00	12.50	12.50	12.50

FS: Fuente simulada.

**Tabla 5.** Resultados obtenidos por los algoritmos de ICA al estimar EC de tipo grueso.

Algoritmo de ICA	Recuperación de todas las FS (%)	Pruebas con estimación redundante (%)	Pruebas con una FS de EC	Pruebas con dos FS de EC		
			Recuperación de la FS de EC (%)	Estimar mezclas de las FS (%)	Recuperación de una sola FS de EC (%)	Recuperación de ninguna FS de EC (%)
Infomax	94.44	38.88	0.00	12.50	0.00	12.50
FICA	61.11	0.00	0.00	62.50	50.00	37.50
FICA-TDSEP	66.66	5.55	0.00	62.50	12.50	62.50
FICA-Infomax	77.77	0.00	0.00	37.50	50.00	0.00

FS: Fuente simulada.

La redundancia en la estimación de fuentes simuladas, es decir, la aparición de falsos positivos implica una mayor cantidad de EC recuperados por el algoritmo. Mientras mayor sea el número de EC detectados se asumirá más avanzado el avance de alguna patología [2], [8]–[12], por lo que una detección errónea de la cantidad de EC presentes en el sonido respiratorio generaría una aseveración equivocada del grado de la enfermedad. Otro factor que altera el número de EC detectados en los algoritmos de ICA es la recuperación de mezclas de fuentes, ya que de esta forma se puede subestimar o sobreestimar la cantidad correcta de EC presentes.

En las pruebas de escenarios simulados con EC de tipo fino se obtuvo un patrón característico en el desempeño de los algoritmos. Infomax logró recuperar las fuentes simuladas en todas las pruebas a excepción de la prueba 17f, donde no recuperó ninguna fuente, y de la prueba 18f, donde solo recuperó una fuente simulada. Generalmente, Infomax obtuvo los mejores índices SIR en el enfoque de recuperación de la fuente. Sin embargo, Infomax generó falsos positivos en todas las pruebas en las que recuperó una fuente simulada de EC, es decir, estimó redundantemente la fuente recuperada. Esto puede deberse a que este algoritmo detecta como distintas fuentes las señales de EC simuladas insertadas en los micrófonos fuente y de propagación al presentarse éstas en tiempos diferentes. También, Infomax estimó mezclas de las fuentes simuladas en las pruebas 17f y 18f. A pesar de la redundancia, Infomax recuperó ambas fuentes de EC en las pruebas 13f y 16f donde el resto de los algoritmos de ICA no lograron estimar alguna de las dos fuentes simuladas. Por su parte, FICA obtuvo índices de desempeño adecuados en el 83.33% de las pruebas bajo los enfoques de recuperación y separación de fuentes. Sin embargo, FICA recuperó una sola fuente simulada en la prueba 13f mientras que en las pruebas 16f, 17f y 18f FICA no logró recuperar alguna de las fuentes simuladas, obteniendo en su lugar mezclas de las fuentes a recuperar. FICA-TDSEP logró un desempeño similar a FICA al obtener índices de desempeño adecuados bajo ambos enfoques analizados. Sin embargo, los índices SIR obtenidos por FICA-TDSEP resultaron menores a los de FICA en el 88.88% de las pruebas y, además, recuperó una sola fuente simulada en la prueba 13f y obtuvo mezclas de las fuentes simuladas en las pruebas 16f, 17f y 18f. FICA-Infomax logró un desempeño adecuado en los enfoques de recuperación y separación de fuentes en el 94.44% de las pruebas. Sin embargo, FICA-Infomax recuperó con redundancia las fuentes simuladas en las pruebas 4f, 6f y 14f y una mezcla de fuentes en la prueba 16f. También, FICA-Infomax mostró una mejora en la BSS en relación a los otros algoritmos de ICA en algunas pruebas. A diferencia de Infomax, FICA y FICA-TDSEP, FICA-Infomax recuperó ambas fuentes simuladas sin redundancia en las pruebas 17f y 18f.

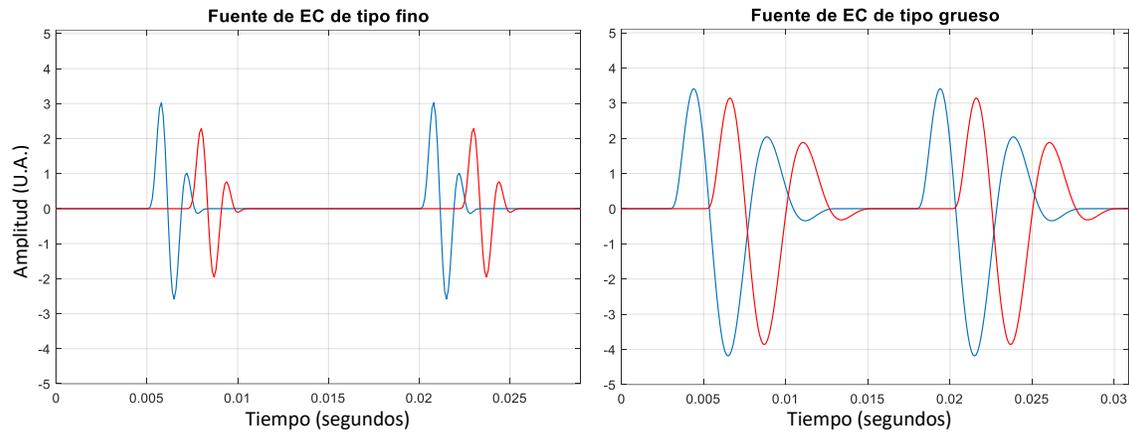
En las pruebas de escenarios simulados con EC de tipo grueso se obtuvieron distintos resultados con cada algoritmo de ICA. Infomax logró los mejores índices de desempeño en la recuperación de fuentes en todas las pruebas a excepción de la prueba 13g y 18g. También, recuperó todas las fuentes simuladas excepto en la prueba 18g, donde únicamente recuperó mezclas de estas fuentes. La redundancia en la estimación de fuentes de Infomax fue menor con los EC de tipo grueso que la observada con los EC de tipo fino, sin embargo, se presentan aún falsos positivos en las pruebas 1g, 4g, 8g, 12, 15g, 19g y 20g. En las pruebas 14g, 16g y 20g Infomax fue el único algoritmo de ICA en recuperar la fuente simulada F2 de cada prueba. Por su parte, FICA obtuvo índices de desempeño adecuados en la recuperación de fuentes en el 83.33% de las pruebas sin estimaciones redundantes. Sin embargo, este algoritmo de ICA<sub>F</sub> no logró recuperar alguna fuente simulada en las pruebas 14g, 15g, 19g y 20g, estimando únicamente mezclas de estas fuentes. En las pruebas 13g, 16g, y 18g, FICA solo recuperó una de las dos fuentes simuladas y, en las pruebas 16g y 18g, también se obtuvieron mezclas de las fuentes. En la prueba 18g, FICA fue el único algoritmo en recuperar la fuente simulada F1. FICA-TDSEP obtuvo, en general, un desempeño adecuado en la recuperación de fuentes. No obstante, el desempeño logrado por FICA-TDSEP fue menor al obtenido con FICA al considerar la totalidad de los resultados. FICA-TDSEP obtuvo redundancia de la fuente simulada en la prueba 3g y no logró recuperar ninguna de las dos fuentes simuladas en las pruebas 14g, 15g, 16g, 18g, 19g y 20g, obteniendo únicamente mezclas de fuentes en estas seis pruebas. FICA-Infomax también obtuvo índices SIR adecuados en cuanto a la recuperación de fuentes además de no obtener redundancia de las fuentes simuladas en ninguna de las pruebas. FICA-Infomax únicamente logró recuperar una de las dos fuentes simuladas en las pruebas 16g, 18g y 20g, además de mezclas de estas fuentes. Este algoritmo no fue capaz de recuperar ninguna de las dos fuentes simuladas en la prueba 14g, obteniendo únicamente mezclas de las fuentes. En las pruebas 15g y 19g FICA-Infomax fue el único algoritmo de ICA<sub>F</sub> en recuperar ambas fuentes simuladas y, a diferencia de Infomax, las obtuvo sin redundancia. También, FICA-Infomax fue el único algoritmo de ICA en recuperar la fuente simulada F2 en la prueba 18g.

Los resultados indican que al intentar recuperar dos fuentes de EC, con un fuerte traslape temporal entre ellas, los algoritmos de ICA tuvieron más problemas en la BSS. En las pruebas 13 a 20, donde se cumple esta condición, existen casos donde los algoritmos no logran recuperar ambas fuentes simuladas o bien, recuperan mezclas de dichas fuentes. Esto puede deberse a que el problema es en mayor medida subdeterminado. También, aumentar el número de mezclas a procesar en la BSS produce un aumento del nivel de ruido existente en el modelo de separación de

fuentes. A su vez, los resultados muestran que los algoritmos de ICA<sub>F</sub> tuvieron más problemas en la BSS al intentar recuperar fuentes de EC de tipo grueso. Esto puede explicarse en términos de la morfología de los estertores gruesos y a la modificación del sonido por el parénquima pulmonar, el cual se ha demostrado que actúa como un filtro pasa-bajas de orden bajo. Dadas las características del filtro pasa bajas para lograr el efecto convolutivo en este trabajo de tesis, es decir, el orden y la frecuencia de corte, los EC<sub>f</sub> resultaron más afectados debido a su alto contenido en frecuencia en comparación con los EC<sub>g</sub>, cuyo ancho de banda es menor. En la **figura 143** se muestra una fuente de EC<sub>f</sub> (a la izquierda de la figura) y una fuente de EC<sub>g</sub> (a la derecha de la figura) en color azul junto a sus respectivas propagaciones en color rojo. Se observa que la propagación de la fuente de EC<sub>f</sub> sufrió un desfase temporal y una atenuación más importante que la propagación de la fuente de EC<sub>g</sub>, relativo a la duración de cada tipo de EC. En consecuencia, se puede considerar que el EC<sub>f</sub> propagado sí es producido por un modelo convolutivo mientras que, en contraste, el EC<sub>g</sub> propagado es producido por un modelo de mezcla instantáneo. En este sentido, se puede explicar por qué Infomax obtuvo una mayor recuperación de las fuentes simuladas y un menor grado de redundancia en las pruebas con EC<sub>g</sub> en comparación con las pruebas con EC<sub>f</sub>.

Los errores temporales de la detección de EC detectados se muestran en la **tabla 6**. Los algoritmos de ICA<sub>F</sub> tuvieron un menor error temporal en la detección de EC de tipo fino que Infomax, siendo FICA aquel con el menor error temporal seguido por FICA-Infomax y FICA-TDSEP. Por su parte, en la detección de los EC de tipo grueso, Infomax fue el algoritmo con el menor error temporal en la detección, seguido por FICA, FICA-Infomax y FICA-TDSEP. Esto coincide con los CIs estimados en las distintas pruebas, los algoritmos de ICA<sub>F</sub> tuvieron un mejor desempeño en la recuperación de EC<sub>f</sub> que Infomax mientras que en la recuperación de EC<sub>g</sub> fue al contrario. La estimación de los EC<sub>g</sub> obtuvo un menor error de detección temporal posiblemente debido a la mayor duración de su forma de onda en comparación con los EC<sub>f</sub>; los EC de tipo grueso proporcionan una mayor cantidad de datos por evento a los algoritmos de ICA, y éstos, al ser técnicas estadísticas, son más robustos mientras mayor sea la cantidad de información proporcionada por cada fuente [30].

Considerando los resultados obtenidos, FICA fue el algoritmo con el cual se recuperaron las fuentes simuladas de ambos tipos de EC con mejor eficiencia global debido a que este algoritmo no obtuvo CIs redundantes. También, obtuvo un desempeño adecuado en la recuperación de la morfología y del contenido en frecuencia de las fuentes simuladas. La principal afectación al emplear FICA es la posibilidad de no estimar correctamente el número de EC existentes ya que en distintas



**Figura 143.** Efecto del filtrado pasa bajas en las fuentes de ECf (izquierda) y de ECg (derecha). En color azul se encuentran las fuentes originales y en color rojo las respectivas propagaciones de estas fuentes.

**Tabla 6.** Errores de detección temporal en los EC entre las fuentes simuladas de cada prueba y los CIs obtenidos determinados con presencia de EC.

Tipo de EC simulado	Algoritmo de ICA	Error de detección temporal de los EC (media $\pm$ desviación estándar, ms)
EC finos	Infomax	4.029 $\pm$ 0.048
	FICA	3.789 $\pm$ 0.000
	FICA-TDSEP	3.829 $\pm$ 0.048
	FICA-Infomax	3.799 $\pm$ 0.031
EC gruesos	Infomax	0.579 $\pm$ 0.122
	FICA	0.740 $\pm$ 0.107
	FICA-TDSEP	1.169 $\pm$ 0.141
	FICA-Infomax	0.910 $\pm$ 0.128

pruebas, FICA recuperó a lo mucho una de las dos fuentes simuladas o bien, mezclas de estas fuentes. No obstante, esto solo sucedió cuando se intentaron recuperar dos fuentes de EC simultáneamente. En consecuencia, se sugiere analizar grupos pequeños de mezclas (sensores) para reducir la probabilidad de encontrar múltiples fuentes de EC así como la cantidad de ruido existente en las mezclas. Entre los algoritmos de ICA en cascada, FICA-Infomax fue el que logró el mejor desempeño. Si bien FICA-TDSEP tuvo menos resultados redundantes que FICA-Infomax, fue el algoritmo con el mayor número de pruebas en donde no se logró la recuperación de alguna fuente simulada. También, FICA-Infomax logró la recuperación de fuentes en pruebas donde FICA e Infomax no fueron capaces de lograrlo, indicando una mejora en la BSS mediante algoritmos de ICA en cascada. Considerando la debida precaución en el conteo de EC debido a falsos positivos en la separación de fuentes con ECf, FICA-Infomax también puede emplearse para una posible extracción de EC más robusta que FICA en cuanto a la recuperación de fuentes. Estos resultados indican que emplear un modelo de mezcla convolutivo para la BSS produce mejores resultados que aquellos

obtenidos mediante un modelo de mezcla instantáneo como se ha empleado en la literatura [25], [27], [28], [46].

El método propuesto para la detección automática de EC en los CIs estimados mostró una gran fiabilidad. La curtosis y el sesgo de los CIs filtrados en los respectivos anchos de banda de los ECf y los ECg permitieron diferenciar aquellos componentes con presencia de EC y distinguir el tipo de estertor existente en los CIs. Finalmente, el conteo de EC mediante la búsqueda de valores máximos en la banda de frecuencia asociada al tipo de EC detectado proporcionó un conteo confiable. Este método representa una alternativa confiable a lo propuesto en la literatura [28], [46].

Finalmente, es importante mencionar que la separación ciega de fuentes en el dominio de la frecuencia no se ha abordado anteriormente en el campo de la extracción de los sonidos crepitantes. Los algoritmos de ICA más empleados se limitan a aquellos del dominio del tiempo, sin una evaluación exhaustiva previa con señales simuladas. El empleo de señales simuladas permite un conocimiento *a priori* del desempeño de los algoritmos. Con base en lo anterior, se puede plantear que el objetivo del proyecto de investigación se cumplió de forma adecuada y fue además posible proponer una estrategia de procesamiento para generar los mejores resultados de extracción y definición del tipo de estertor crepitante presente.

Entre las limitaciones de este trabajo se encuentra el uso de umbrales dentro de la detección automática de EC y la selección heurística de parámetros. Como trabajo a futuro se propone emplear técnicas de inteligencia artificial para reemplazar el uso de umbrales en la detección automática y técnicas como la curva *Receiver Operating Characteristic* (ROC) para determinar los parámetros adecuados de los algoritmos de ICA. Además, se incorporará el SRN de más sujetos para la creación de los escenarios de simulación, de esta forma se analizaría el posible efecto sobre la BSS de sonidos respiratorios con distintas características. También, se evaluarán distintos métodos para resolver la indeterminación de permutación de ICA<sub>F</sub> y así identificar el método más adecuado para la reconstrucción de los CIs durante la recuperación de EC. De igual manera, es importante evaluar la metodología propuesta en este trabajo de tesis en pacientes reales y comprobar que, al igual que en los escenarios simulados, es viable para la recuperación de EC mediante ICA<sub>F</sub> y para la detección automática de EC.

## VIII. CONCLUSIONES

La detección de EC es de gran importancia clínica debido a la información que estos sonidos adventicios discontinuos proporcionan acerca de una patología. La ubicación temporal en el ciclo respiratorio, el nivel en la superficie torácica, el tipo y el número de EC ayudan en el diagnóstico de enfermedades e identificación del grado de severidad de éstas. En consecuencia, es importante diseñar procedimientos que proporcionen información acerca de estas características. En este trabajo de tesis se observó que los algoritmos de ICA<sub>F</sub> obtuvieron buenos resultados en la BSS y lograron recuperar las fuentes simuladas de EC en la mayoría de las pruebas diseñadas. FICA representó una mejora sobre el algoritmo de Infomax debido a que este algoritmo de ICA<sub>F</sub> no obtuvo estimaciones redundantes, es decir, falsos positivos. FICA obtuvo los mejores resultados al intentar recuperar una sola fuente de EC, por lo que se sugiere el análisis de grupos pequeños de micrófonos del sistema de registro multicanal. La curtosis y el sesgo de los CIs filtrados estimados por los algoritmos de ICA permitieron identificar automáticamente aquellos componentes con presencia de EC y posteriormente, definir su tipo. El conteo de máximos locales en las bandas de frecuencia correspondientes al tipo de EC detectado permitió definir el número de EC presentes en los componentes. La metodología propuesta en esta tesis demostró ser adecuada para la extracción de EC de sonidos respiratorios así como para su detección automática, lo cual podría aportar información clínica relevante y así apoyar en el diagnóstico de enfermedades pulmonares.

## LISTA DE NOMENCLATURA

<b>AR:</b>	Autorregresivo.
<b>BSS:</b>	Separación ciega de fuentes.
<b>CI:</b>	Componente independiente.
<b>CIs-FiltECf:</b>	Componentes independientes filtrados mediante FiltECf.
<b>CIs-FiltECg:</b>	Componentes independientes filtrados mediante FiltECg.
<b>CR:</b>	Ciclo respiratorio.
<b>EC:</b>	Estertores crepitantes.
<b>ECf:</b>	Estertores crepitantes finos.
<b>ECg:</b>	Estertores crepitantes gruesos.
<b>F-BSS:</b>	BSS en el dominio de la frecuencia.
<b>FICA:</b>	Algoritmo de ICA en el dominio de la frecuencia.
<b>FICA-Infomax:</b>	Algoritmo de ICA en cascada: FICA seguido por Infomax.
<b>FICA-TDSEP:</b>	Algoritmo de ICA en cascada: FICA seguido por TDSEP.
<b>FiltECf:</b>	Filtro pasa-bandas asociado al contenido en frecuencia de los ECf.
<b>FiltECg:</b>	Filtro pasa-bandas asociado al contenido en frecuencia de los ECg.
<b>ICA:</b>	Análisis por componentes independientes.
<b>ICA<sub>f</sub>:</b>	ICA en el dominio de la frecuencia.
<b>ICA<sub>t</sub>:</b>	ICA en el dominio del tiempo.
<b>IDW:</b>	Ancho de deflexión inicial.
<b>Infomax:</b>	Information maximization.
<b>JADE:</b>	Joint approximation diagonalization of eigenmatrices.
<b>PDF:</b>	Función de densidad de probabilidad.
<b>PFC:</b>	Problema de la fiesta de cóctel.
<b>SA:</b>	Sonidos adventicios.
<b>SIR:</b>	Índice señal a interferencia.
<b>SP:</b>	Sonidos pulmonares.
<b>SR:</b>	Sonidos respiratorios.
<b>SRN:</b>	Sonidos respiratorios normales.
<b>STFT:</b>	Transformada de Fourier de tiempo corto.
<b>TCD:</b>	Duración de dos ciclos.
<b>TDSEP:</b>	Temporal decorrelation separation.
<b>TLC:</b>	Teorema del límite central.
<b>TVAR:</b>	Modelo AR variante en el tiempo.
<b>VC:</b>	Vector de características.

## REFERENCIAS

- [1] Z. Moussavi, "Fundamentals of Respiratory Sounds and Analysis", *Synthesis Lectures on Biomedical Engineering*, vol. 1, núm. 1, pp. 1–68, ene. 2006, doi: 10.2200/S00054ED1V01Y200609BME008.
- [2] A. Sovijärvi *et al.*, "Characteristic of breath sounds and adventitious respiratory sounds", *Characteristics of Breath Sounds and Adventitious Respiratory Sounds*, vol. 10, pp. 591–596, ene. 2000.
- [3] S. Reichert, R. Gass, C. Brandt, y E. Andrés, "Analysis of Respiratory Sounds: State of the Art", *Clinical medicine. Circulatory, respiratory and pulmonary medicine*, vol. 2, p. CCRPM.S530, ene. 2008, doi: 10.4137/CCRPM.S530.
- [4] A. Sovijärvi, F. Dalmaso, J. Vanderschoot, L. Malmberg, y S. A. T. Stoneman, "Definition of Terms for Applications of Respiratory Sounds", *Eur Respir Rev*, vol. 10, nov. 1999.
- [5] B. A. Reyes, S. Charleston-Villalobos, R. González-Camarena, y T. Aljama-Corrales, "Assessment of time–frequency representation techniques for thoracic sounds analysis", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 114, núm. 3, pp. 276–290, may 2014, doi: 10.1016/j.cmpb.2014.02.016.
- [6] M. Bahoura y Xiaoguang Lu, "Separation of Crackles From Vesicular Sounds Using Wavelet Packet Transform", en *2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings*, Toulouse, France, 2006, vol. 2, pp. II-1076-II-1079, doi: 10.1109/ICASSP.2006.1660533.
- [7] P. Piirilä y A. R. A. Sovijärvi, "Crackles: recording, analysis and clinical significance", *European Respiratory Journal*, vol. 8, núm. 12, pp. 2139–2148, dic. 1995, doi: 10.1183/09031936.95.08122139.
- [8] A. R. Nath y L. H. Capel, "Inspiratory crackles and mechanical events of breathing", *Thorax*, vol. 29, núm. 6, pp. 695–698, nov. 1974, doi: 10.1136/thx.29.6.695.
- [9] P. Forgacs, "The Functional Basis of Pulmonary Sounds", *Chest*, vol. 73, núm. 3, pp. 399–405, mar. 1978, doi: 10.1378/chest.73.3.399.
- [10] F. Dalmaso, M. M. Guarene, R. Spagnolo, G. Benedetto, y G. Righini, "A computer system for timing and acoustical analysis of crackles: a study in cryptogenic fibrosing alveolitis", *Bull Eur Physiopathol Respir*, vol. 20, núm. 2, pp. 139–144, abr. 1984.
- [11] F. Shirai, S. Kudoh, A. Shibuya, K. Sada, y R. Mikami, "Crackles in asbestos workers: Auscultation and lung sound analysis", *British Journal of Diseases of the Chest*, vol. 75, núm. 4, pp. 386–396, oct. 1981, doi: 10.1016/0007-0971(81)90026-7.
- [12] P. Piirilä, A. R. A. Sovijärvi, T. Kaisla, H.-M. Rajala, y T. Katila, "Crackles in Patients with Fibrosing Alveolitis, Bronchiectasis, COPD, and Heart Failure", *Chest*, vol. 99, núm. 5, pp. 1076–1083, may 1991, doi: 10.1378/chest.99.5.1076.
- [13] V. I. Quandt, E. R. Pacola, S. F. Pichorim, H. R. Gamba, y M. A. Sovierzoski, "Pulmonary crackle characterization: approaches in the use of discrete wavelet transform regarding border effect, mother-wavelet selection, and subband reduction", *Res. Biomed. Eng.*, vol. 31, núm. 2, pp. 148–159, jun. 2015, doi: 10.1590/2446-4740.0639.
- [14] G. R. Epler, C. B. Carrington, y E. A. Gaensler, "Crackles (Rales) in the Interstitial Pulmonary Diseases", *Chest*, vol. 73, núm. 3, pp. 333–339, mar. 1978, doi: 10.1378/chest.73.3.333.
- [15] H. Pasterkamp, S. S. Kraman, y G. R. Wodicka, "Respiratory Sounds: Advances Beyond the Stethoscope", *Am J Respir Crit Care Med*, vol. 156, núm. 3, pp. 974–987, sep. 1997, doi: 10.1164/ajrccm.156.3.9701115.
- [16] D. Bardou, K. Zhang, y S. M. Ahmad, "Lung sounds classification using convolutional neural networks", *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 88, pp. 58–69, jun. 2018, doi: 10.1016/j.artmed.2018.04.008.

- [17] B. C. J. Moore, *An introduction to the psychology of hearing*, 6. ed. Leiden: Brill, 2013.
- [18] H. Kiyokawa, M. Greenberg, K. Shirota, y H. Pasterkamp, "Auditory Detection of Simulated Crackles in Breath Sounds", *Chest*, vol. 119, núm. 6, pp. 1886–1892, jun. 2001, doi: 10.1378/chest.119.6.1886.
- [19] S. Charleston-Villalobos, G. Dorantes-Méndez, R. González-Camarena, G. Chi-Lem, J. G. Carrillo, y T. Aljama-Corrales, "Acoustic thoracic image of crackle sounds using linear and nonlinear processing techniques", *Med Biol Eng Comput*, vol. 49, núm. 1, pp. 15–24, ene. 2011, doi: 10.1007/s11517-010-0663-5.
- [20] Y. P. Kahya y C. A. Yilmaz, "Modeling of respiratory crackles", en *Proceedings of the 22nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Cat. No.00CH37143)*, Chicago, IL, USA, 2000, vol. 1, pp. 632–634, doi: 10.1109/IEMBS.2000.900823.
- [21] Y. P. Kahya, S. Yerer, y O. Cerid, "A wavelet-based instrument for detection of crackles in pulmonary sounds", en *2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Istanbul, Turkey, 2001, vol. 4, pp. 3175–3178, doi: 10.1109/IEMBS.2001.1019496.
- [22] L. J. Hadjileontiadis y I. T. Rekanos, "Detection of explosive lung and bowel sounds by means of fractal dimension", *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 10, núm. 10, pp. 311–314, oct. 2003, doi: 10.1109/LSP.2003.817171.
- [23] T. Kaisia, A. Sovijärvi, P. Piirilä, H.-M. Rajala, S. Haltsonen, y T. Rosqvist, "Validated method for automatic detection of lung sound crackles", *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 29, núm. 5, pp. 517–521, sep. 1991, doi: 10.1007/BF02442324.
- [24] M. Munakata *et al.*, "Spectral and waveform characteristics of fine and coarse crackles.", *Thorax*, vol. 46, núm. 9, pp. 651–657, sep. 1991, doi: 10.1136/thx.46.9.651.
- [25] N. Castaneda-Villa, S. Charleston-Villalobos, R. Gonzalez-Camarena, y T. Aljama-Corrales, "Assessment of ICA algorithms for the analysis of crackles sounds", en *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, San Diego, CA, ago. 2012, pp. 605–608, doi: 10.1109/EMBC.2012.6346004.
- [26] G. Naik y D. Kumar, "An Overview of Independent Component Analysis and Its Applications", *Informatica*, vol. 35, pp. 63–81, ene. 2011.
- [27] S. Charleston-Villalobos, N. Castaneda-Villa, R. Gonzalez-Camarena, M. Mejia-Avila, y T. Aljama-Corrales, "Adventitious lung sounds imaging by ICA-TVAR scheme", en *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Osaka, jul. 2013, pp. 1354–1357, doi: 10.1109/EMBC.2013.6609760.
- [28] S. Charleston-Villalobos, N. Castaneda-Villa, R. Gonzalez-Camarena, M. Mejia-Avila, y T. Aljama-Corrales, "Automated clustering of independent components for discontinuous sounds thoracic imaging", en *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Milan, ago. 2015, pp. 4126–4129, doi: 10.1109/EMBC.2015.7319302.
- [29] S. Haykin y Z. Chen, "The Cocktail Party Problem", *Neural Computation*, vol. 17, núm. 9, pp. 1875–1902, sep. 2005, doi: 10.1162/0899766054322964.
- [30] A. Hyvärinen, J. Karhunen, y E. Oja, *Independent Component Analysis*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [31] J. H. McDermott, "The cocktail party problem", *Current Biology*, vol. 19, núm. 22, pp. R1024–R1027, dic. 2009, doi: 10.1016/j.cub.2009.09.005.
- [32] L. Mesin, A. Holohar, y R. Merletti, "Blind Source Separation: Application to Biomedical Signals", en *Advanced Methods of Biomedical Signal Processing*, S. Cerutti y C. Marchesi, Eds. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. 379–409.

- [33] A. Hyvärinen y E. Oja, "Independent component analysis: algorithms and applications", *Neural Networks*, vol. 13, núm. 4–5, pp. 411–430, jun. 2000, doi: 10.1016/S0893-6080(00)00026-5.
- [34] A. J. Bell y T. J. Sejnowski, "An Information-Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution", *Neural Computation*, vol. 7, núm. 6, pp. 1129–1159, nov. 1995, doi: 10.1162/neco.1995.7.6.1129.
- [35] A. Ziehe y K.-R. Müller, "TDSEP — an efficient algorithm for blind separation using time structure", en *ICANN 98*, L. Niklasson, M. Bodén, y T. Ziemke, Eds. London: Springer London, 1998, pp. 675–680.
- [36] Q. Pan y T. Aboulnasr, "Time-Domain Convolutional Blind Source Separation Employing Selective-Tap Adaptive Algorithms", *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, vol. 2007, pp. 1–11, 2007, doi: 10.1155/2007/92528.
- [37] S. Ikeda y N. Murata, *A method of ICA in time-frequency domain*. 1999.
- [38] S. Makino, "Blind Source Separation of Convolutional Mixtures of Speech in Frequency Domain", *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E88-A, núm. 7, pp. 1640–1655, jul. 2005, doi: 10.1093/ietfec/e88-a.7.1640.
- [39] P. Smaragdis, "Blind separation of convolved mixtures in the frequency domain", *Neurocomputing*, vol. 22, núm. 1–3, pp. 21–34, nov. 1998, doi: 10.1016/S0925-2312(98)00047-2.
- [40] F. Asano, S. Ikeda, M. Ogawa, H. Asoh, y N. Kitawaki, "A combined approach of array processing and independent component analysis for blind separation of acoustic signals", en *2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221)*, Salt Lake City, UT, USA, 2001, vol. 5, pp. 2729–2732, doi: 10.1109/ICASSP.2001.940210.
- [41] B.-Y. Chen, T.-C. Liu, y Y.-W. Liu, "Stereo Source Separation in the Frequency Domain: Solving the Permutation Problem by a Sliding K-means Method", en *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brighton, United Kingdom, may 2019, pp. 4250–4254, doi: 10.1109/ICASSP.2019.8683571.
- [42] A. Vyshedskiy, F. Bezares, R. Paciej, M. Ebril, J. Shane, y R. Murphy, "Transmission of Crackles in Patients With Interstitial Pulmonary Fibrosis, Congestive Heart Failure, and Pneumonia", *Chest*, vol. 128, núm. 3, pp. 1468–1474, sep. 2005, doi: 10.1378/chest.128.3.1468.
- [43] G. R. Wodicka, K. N. Stevens, H. L. Golub, y D. C. Shannon, "Spectral characteristics of sound transmission in the human respiratory system", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 37, núm. 12, pp. 1130–1135, dic. 1990, doi: 10.1109/10.64455.
- [44] G. R. Wodicka, K. N. Stevens, H. L. Golub, E. G. Cravalho, y D. C. Shannon, "A model of acoustic transmission in the respiratory system", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 36, núm. 9, pp. 925–934, sep. 1989, doi: 10.1109/10.35301.
- [45] V. Korenbaum y A. Shiriaev, "Sound propagation through human lungs, under transmission sounding with acoustic signal of 80-1000 Hz frequency band", presentado en 169th Meeting of the Acoustical Society of America, Pittsburgh, Pennsylvania, 2015, p. 020002, doi: 10.1121/2.0000077.
- [46] M. E. R. García, S. C. Villalobos, N. C. Villa, A. J. González, R. G. Camarena, y T. A. Corrales, "Automated extraction of fine and coarse crackles by independent component analysis", *Health Technol.*, sep. 2019, doi: 10.1007/s12553-019-00365-w.
- [47] T. Nishikawa, H. Saruwatari, y K. Shikano, "Comparison of time-domain ICA, frequency-domain ICA and multistage ICA", sep. 2002.
- [48] A. Kamiya, S. Murayama, H. Kamiya, T. Yamashiro, Y. Oshiro, y N. Tanaka, "Kurtosis and skewness assessments of solid lung nodule density histograms: differentiating malignant from

- benign nodules on CT”, *Jpn J Radiol*, vol. 32, núm. 1, pp. 14–21, ene. 2014, doi: 10.1007/s11604-013-0264-y.
- [49] A. Yadollahi y Z. M. K. Moussavi, “A Robust Method for Heart Sounds Localization Using Lung Sounds Entropy”, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 53, núm. 3, pp. 497–502, mar. 2006, doi: 10.1109/TBME.2005.869789.
- [50] R. Gribonval, E. Benaroya, E. Vincent, y C. Févotte, “Proposals for Performance Measurement in Source Separation”, *4th Int. Symp. on Independent Component Anal. and Blind Signal Separation (ICA2003)*, abr. 2003.
- [51] K. Nordhausen, E. Ollila, y H. Oja, “On the performance indices of ICA and blind source separation”, en *2011 IEEE 12th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, San Francisco, CA, USA, jun. 2011, pp. 486–490, doi: 10.1109/SPAWC.2011.5990458.

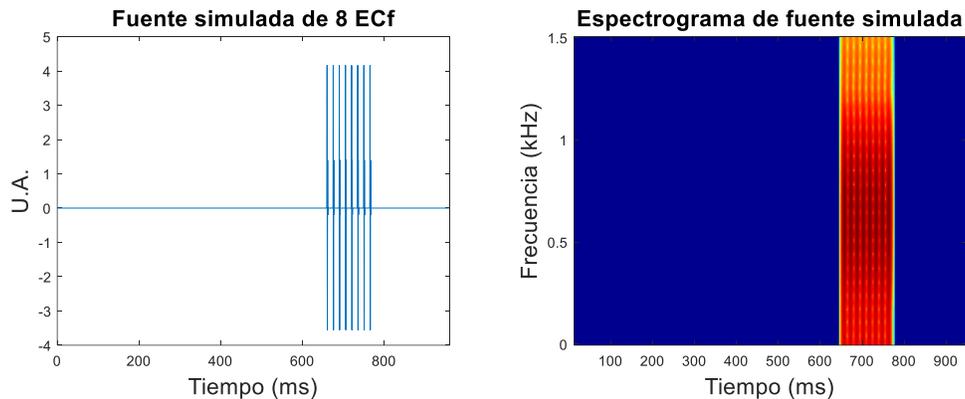
## ANEXO A

### A.1 Prueba 2 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional

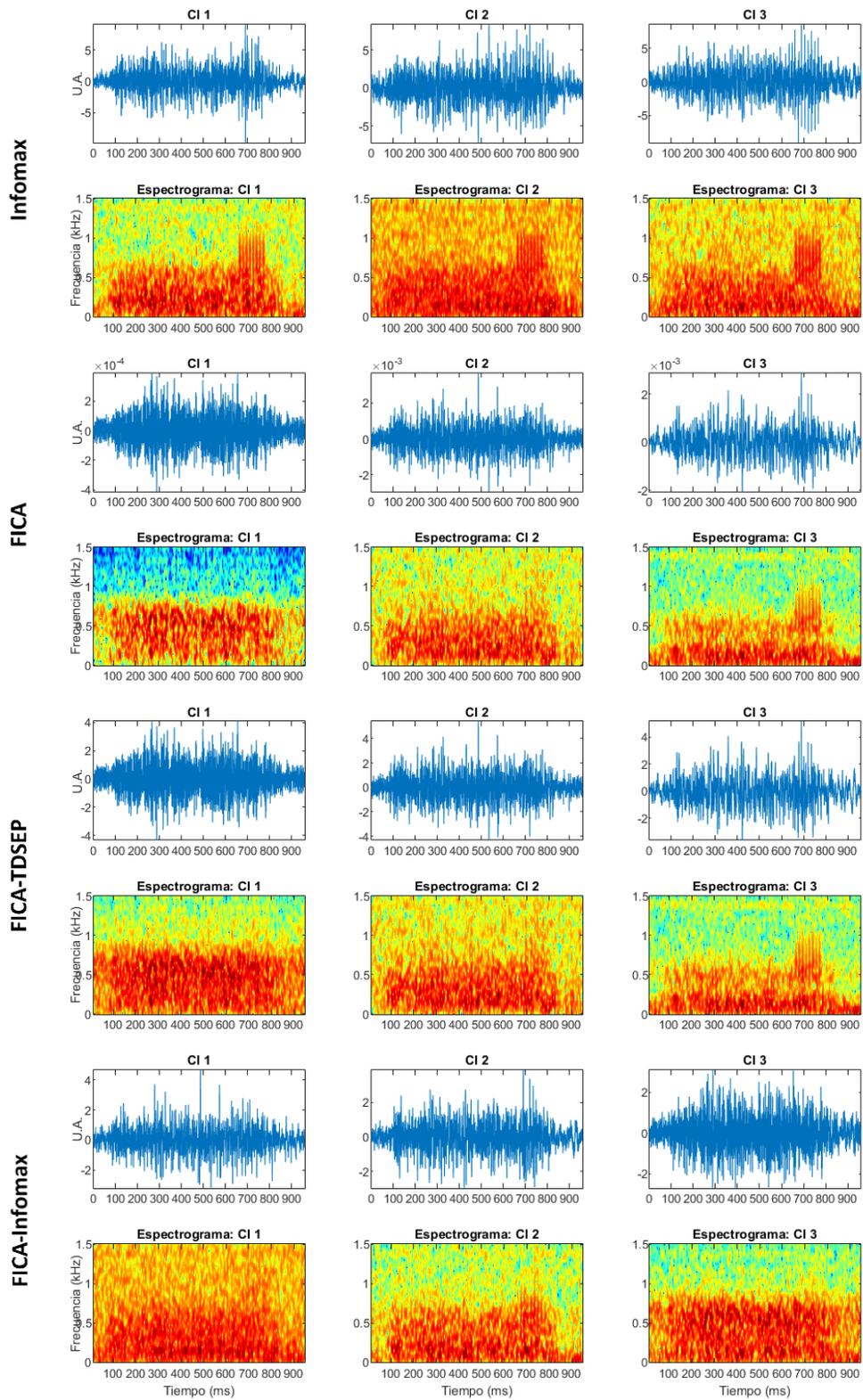
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC en la etapa de inspiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó unidireccionalmente hacia los micrófonos PM3 y PRX3.

#### A.1.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

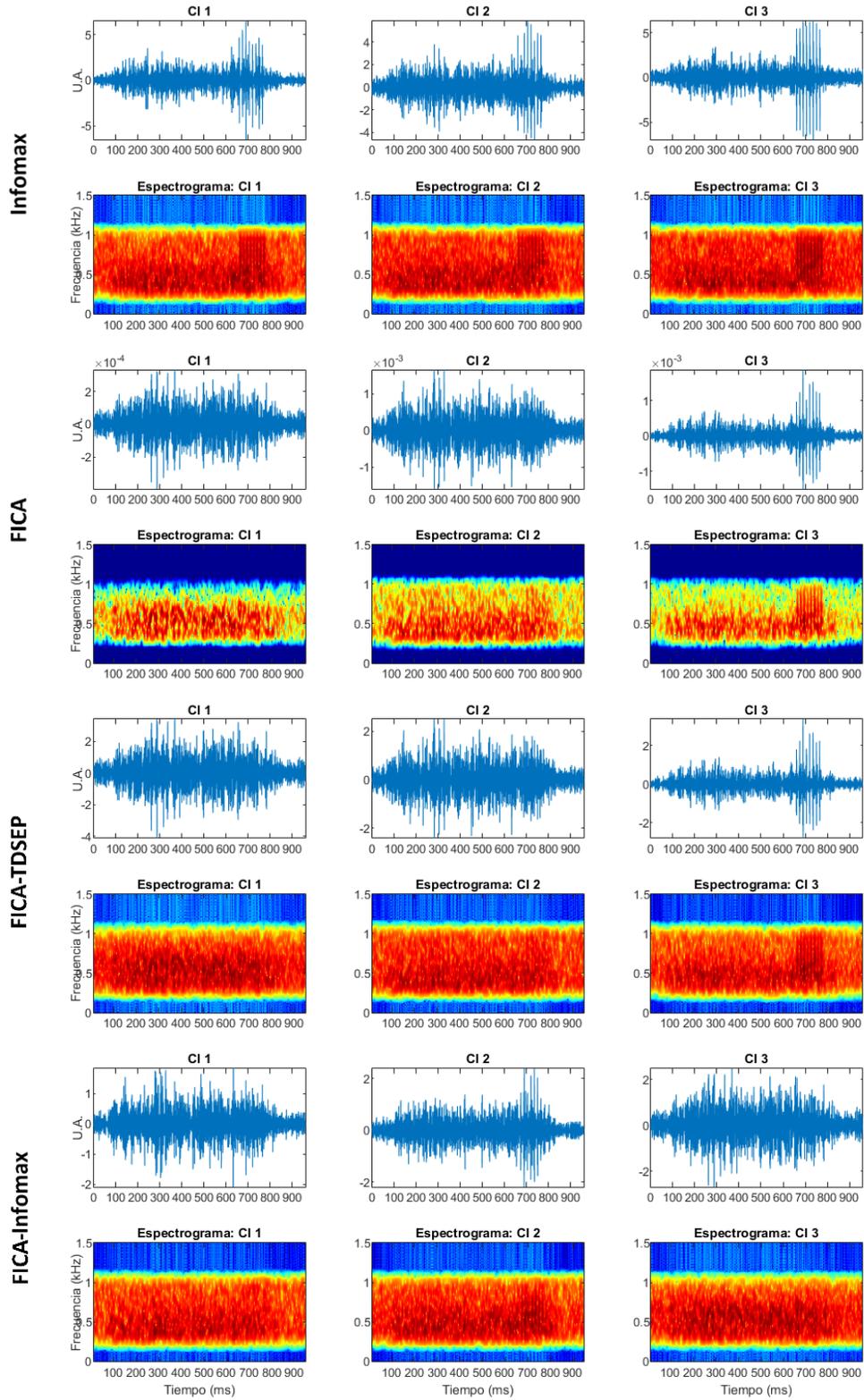
La fuente simulada de 8 ECf empleada en esta prueba, llamada prueba 2f, se muestra junto a su espectrograma en la **figura A1**. Los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA a partir de las mezclas convolutivas entre la fuente simulada de ECf y los canales seleccionados de SRN son mostrados en la **figura A2**, mientras que los CIs-FiltECf se muestran en la **figura A3**. En los CIs se observa el patrón de espigas asociado a EC en el CI 3 de Infomax en el dominio del tiempo mientras que en el dominio tiempo-frecuencia se observa este patrón en los espectrogramas de los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax, y en los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP. En los CIs-FiltECf se presenta el patrón de espigas en los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax, en los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP tanto en el dominio del tiempo como en el espectrograma. En el CI 2 de FICA-Infomax se observa este patrón apenas distinguible tanto en el dominio del tiempo como en el espectrograma. El patrón de espigas encontrado tanto en los CIs como en los CIs-FiltECf se asocia con los ECf de la fuente simulada ya que ambos se encuentran ubicados entre los 600 y 800 ms con contenido en frecuencia alrededor de los 650 Hz.



**Figura A1.** Fuente simulada de 8 ECf (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 8 ECf se emplearon en la prueba 2f.



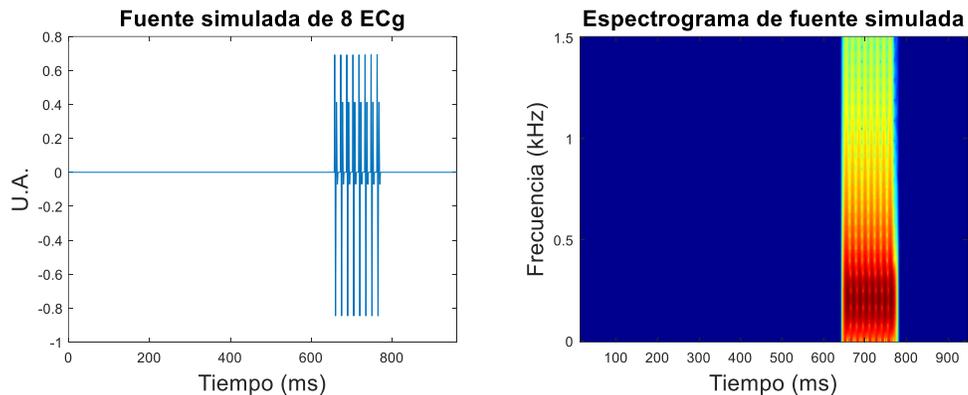
**Figura A2.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 2f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



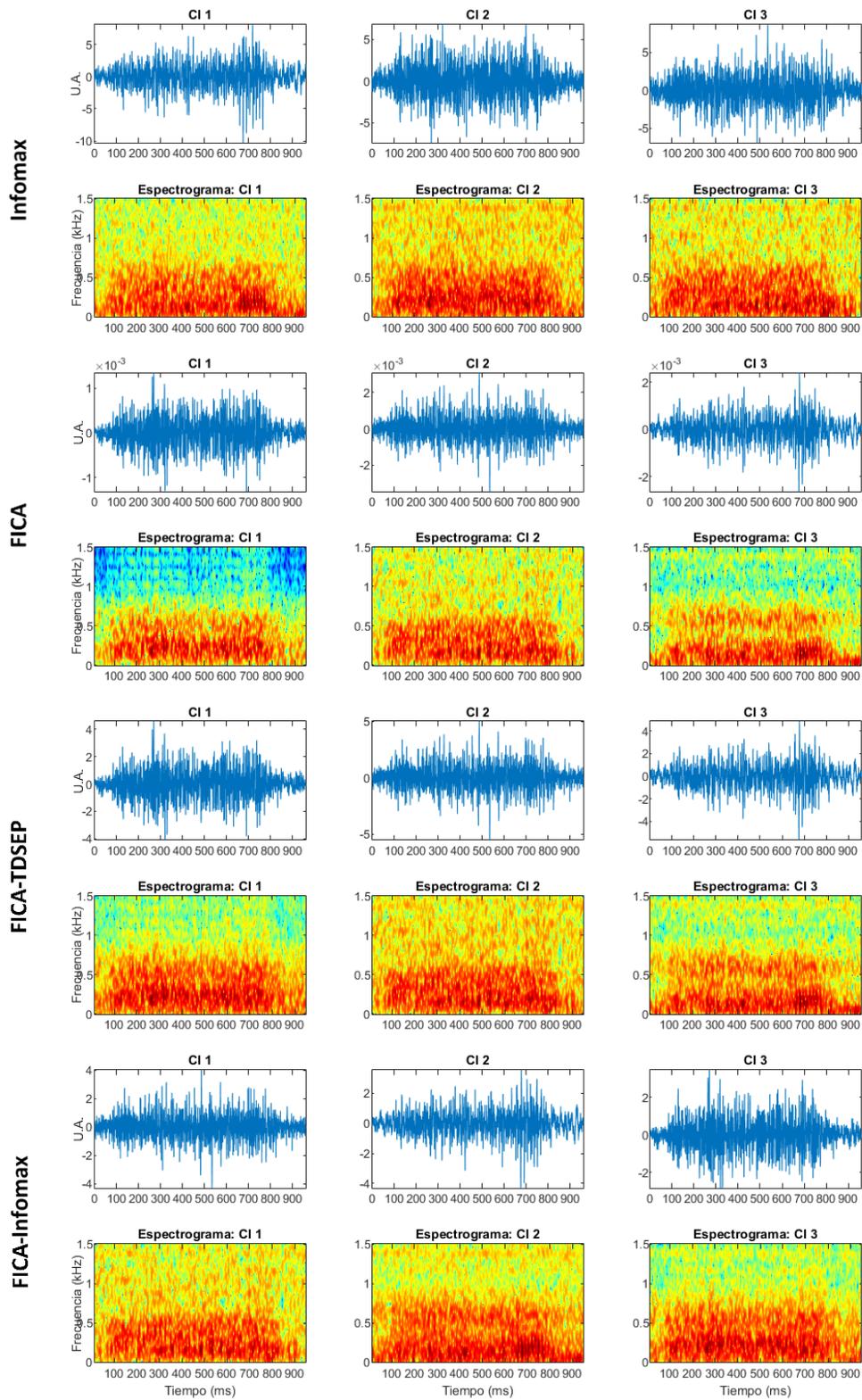
**Figura A3.** CIs presentados en la figura A2 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 2f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.1.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

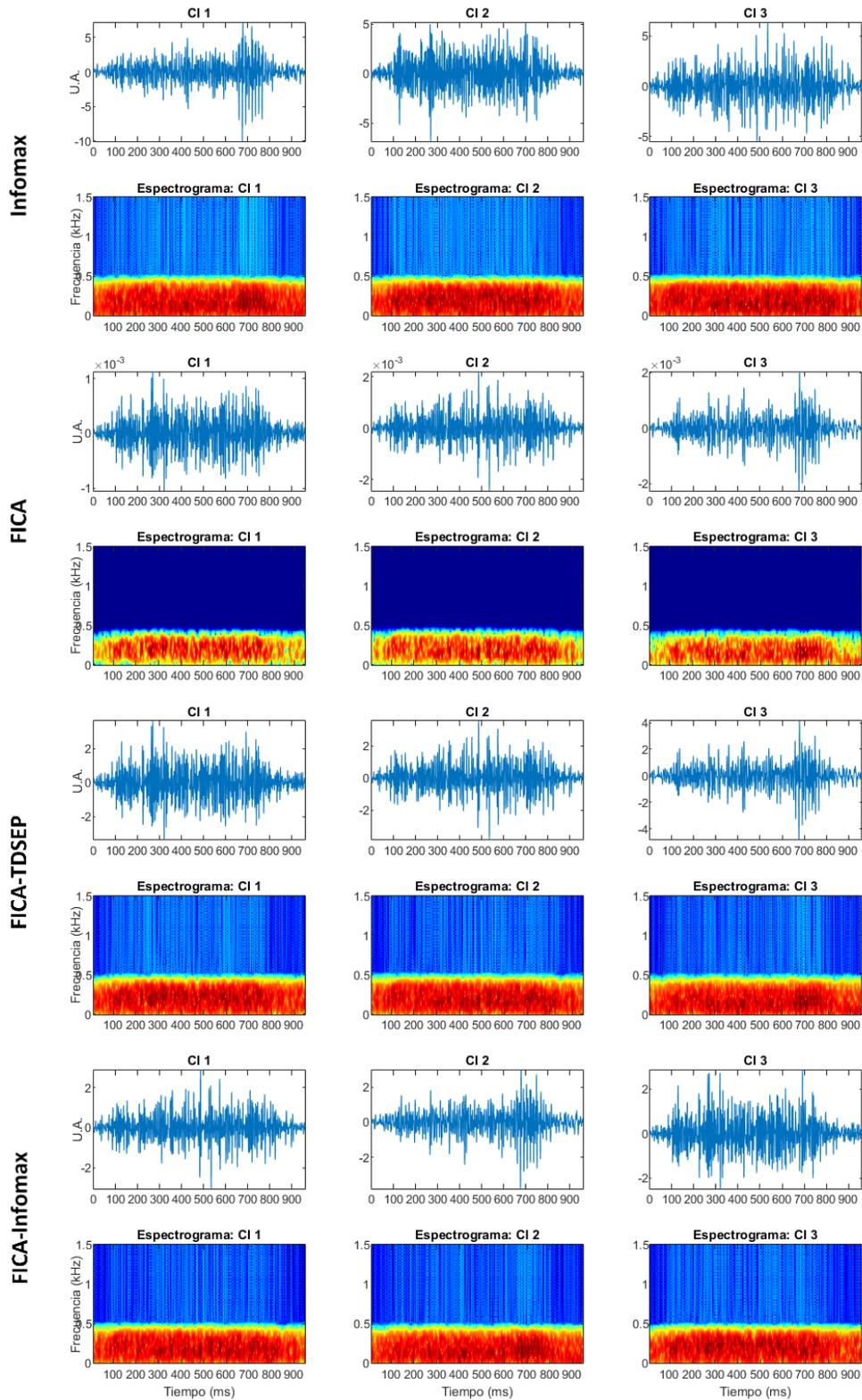
La fuente simulada de 8 ECg empleada en esta prueba, definida como prueba 2g, y su espectrograma se muestran en la **figura A4**. Los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA a partir de las mezclas convolutivas son mostrados en la **figura A5**, mientras que los CIs-FiltECf se muestran en la **figura A6**. En las gráficas del dominio del tiempo de los CIs únicamente se visualiza el patrón de espigas asociado a EC en el CI 1 de Infomax, mientras que en el espectrograma éste es visible en el CI 1 de Infomax, en los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax. En cuanto a los CIs-FiltECg, se observa este patrón en los CI 1 de Infomax, en los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax tanto en el dominio temporal como en los respectivos espectrogramas. Este patrón de espigas se localiza entre 650 y 800 ms con contenido en frecuencia alrededor de 200 Hz, tal y como sucede con los ECg de la fuente simulada.



**Figura A4.** Fuente simulada de 8 ECg (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 8 ECg se emplearon en la prueba 2g.



**Figura A5.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 2g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



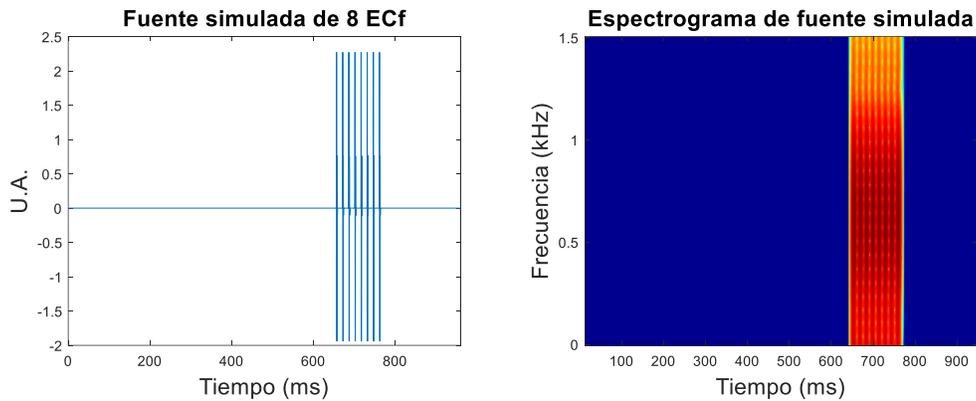
**Figura A6.** CIs presentados en la figura A5 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 2g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.2 Prueba 3 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional

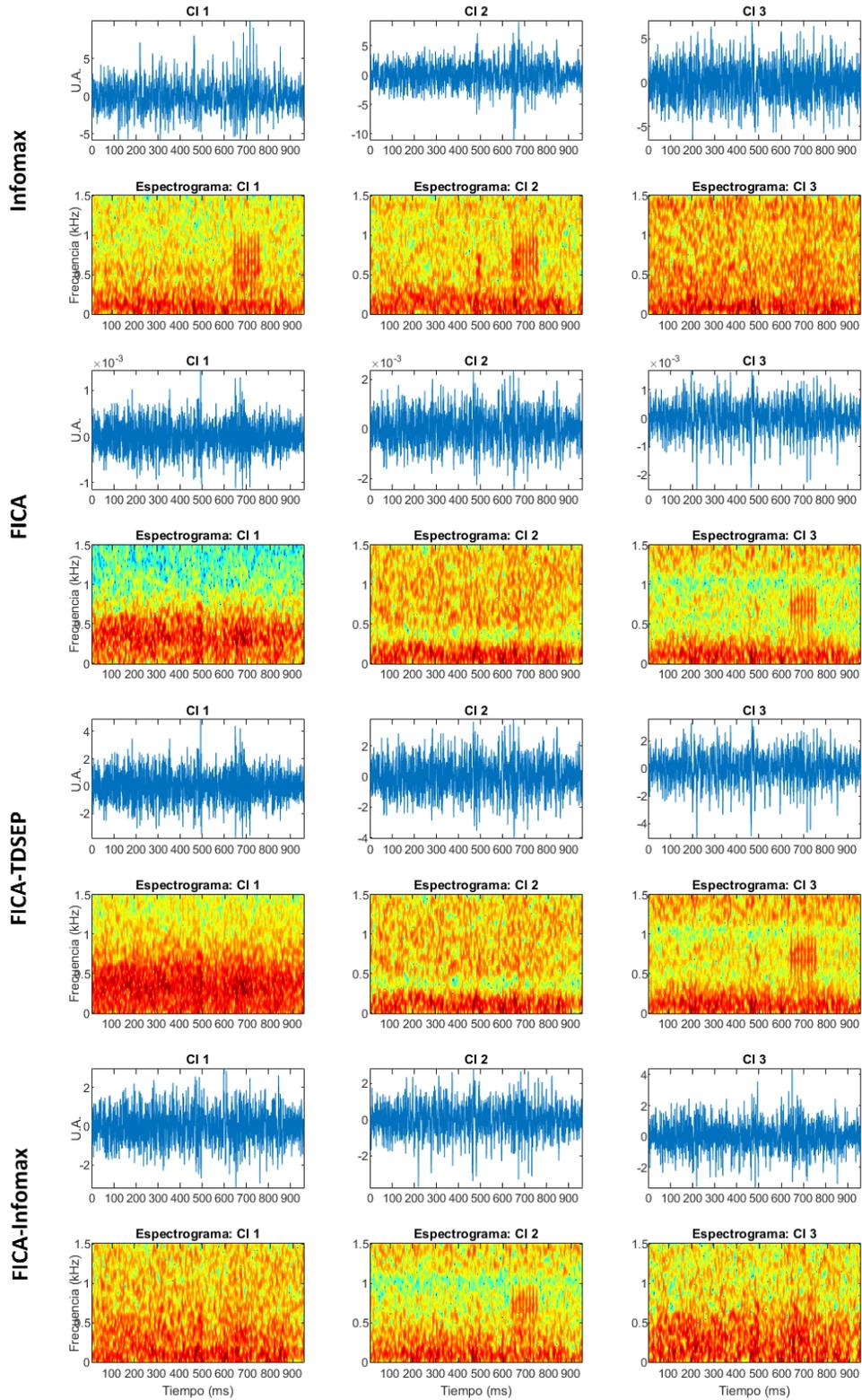
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC en la etapa de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC3 y se propagó unidireccionalmente hacia los micrófonos PLX3 y PM3.

### A.2.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

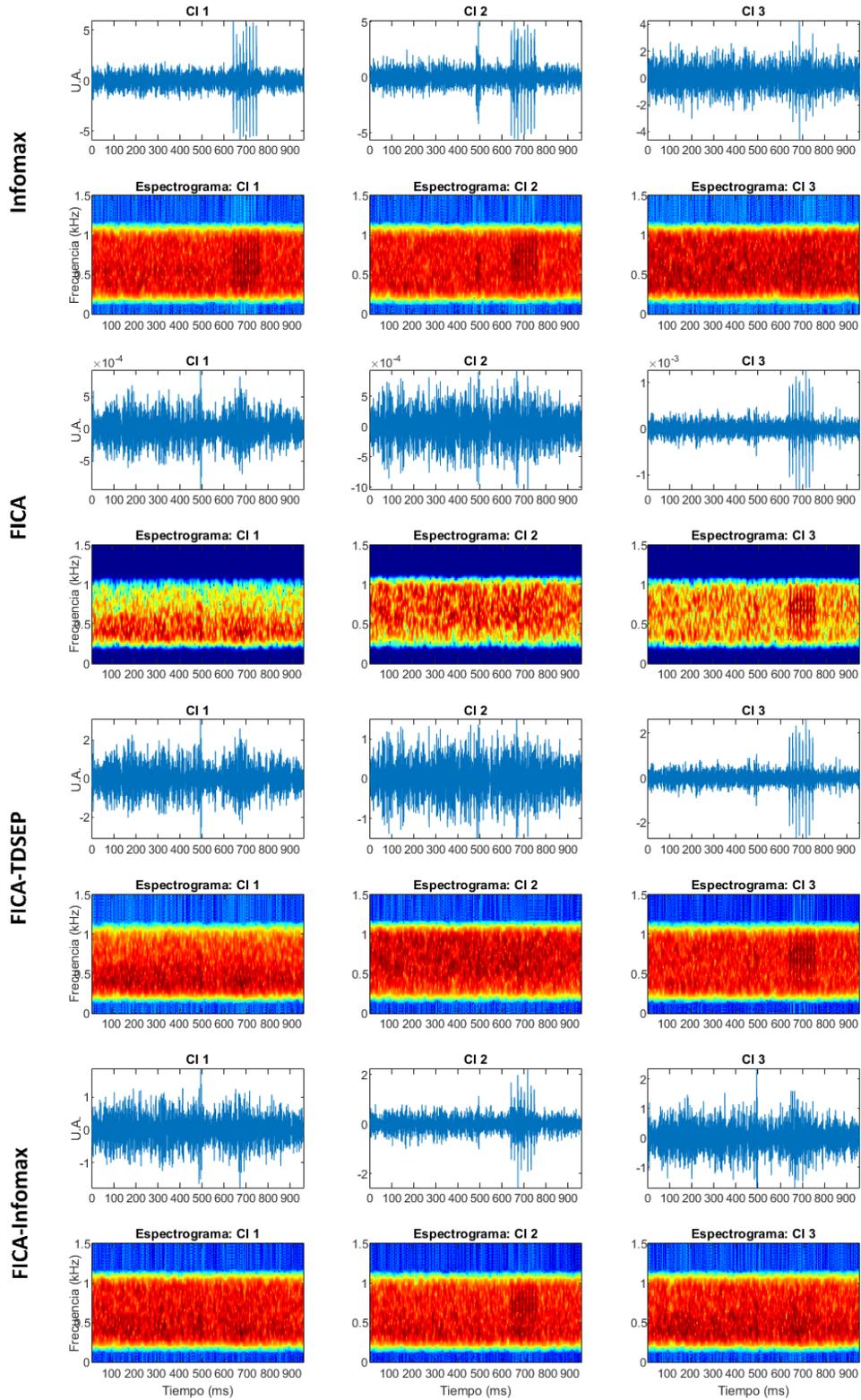
La fuente simulada de 8 ECf empleada en esta prueba, llamada prueba 3f, se muestra junto a su espectrograma en la **figura A7**. Como se observa, la mayor potencia de acuerdo a la escala de colores se encuentra entre 600 a 800 ms y de 0.5 a 1 kHz. En las **figuras A8 y A9** se encuentran respectivamente los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA y los CIs-FiltECf. En el dominio temporal de los CIs no es posible visualizar el patrón de espigas asociado a EC, sin embargo, en los espectrogramas se identifica este patrón en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax. En cuanto a los CIs-FiltECf, es posible observar el patrón de espigas en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax tanto en el dominio temporal como en el espectrograma. Al igual que los ECf de la fuente simulada, el patrón de espigas encontrado en los componentes se ubica entre los 600 y 800 ms con un contenido en frecuencia alrededor de 650 Hz.



**Figura A7.** Fuente simulada de 8 ECf (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 8 ECf se emplearon en la prueba 3f.



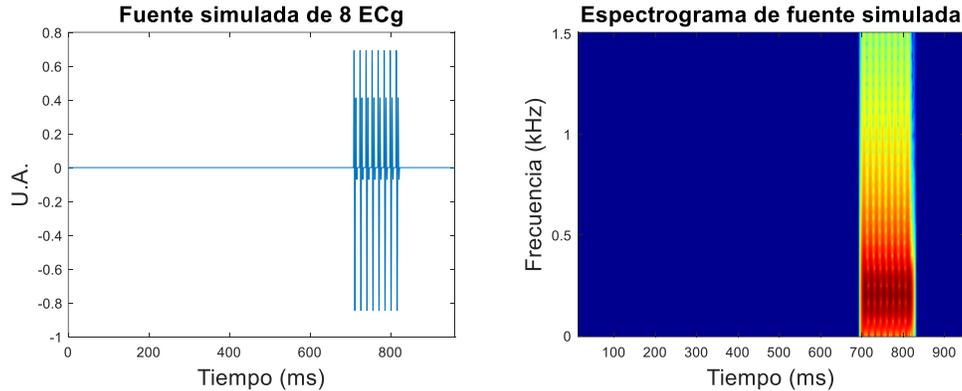
**Figura A8.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 3f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



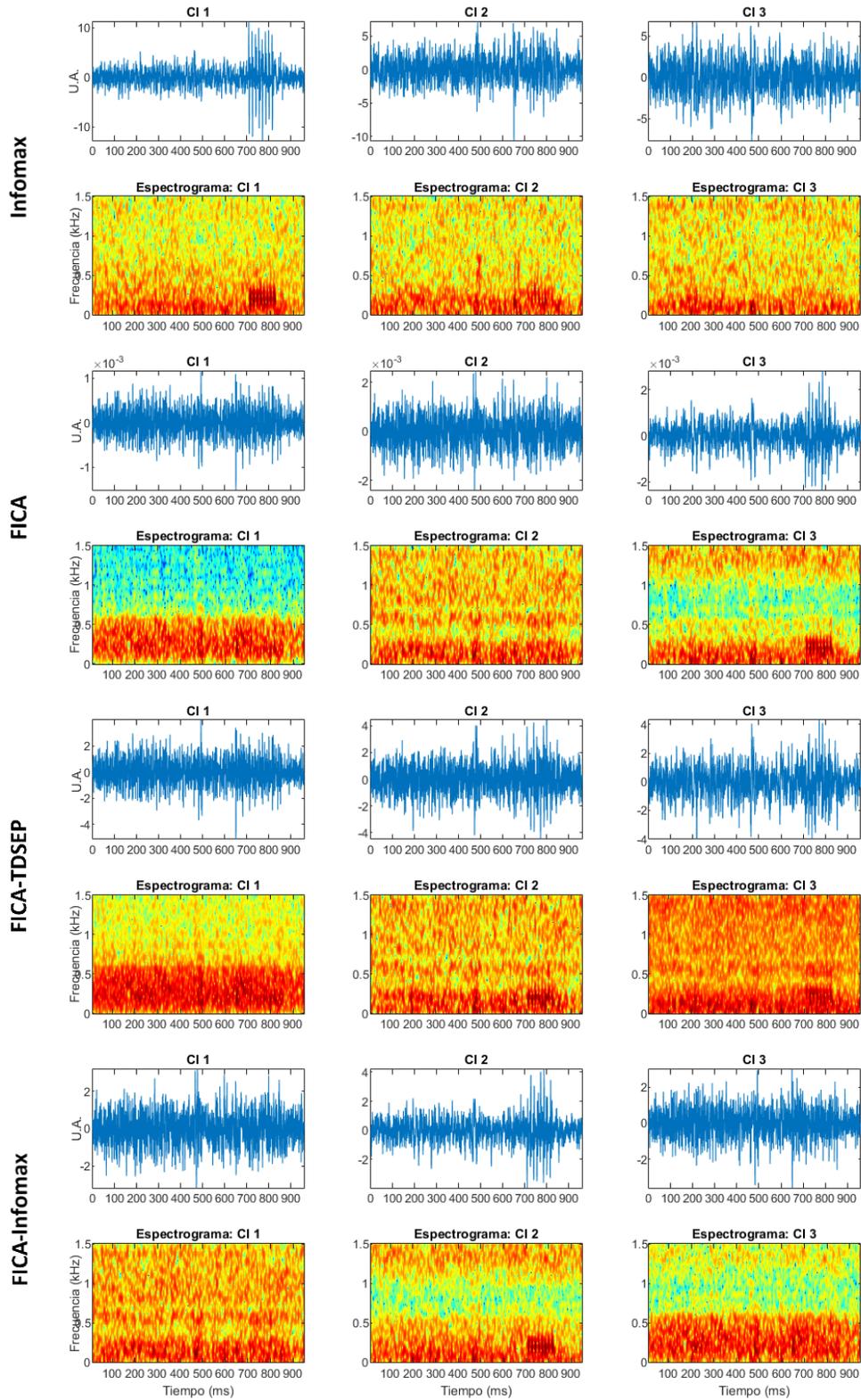
**Figura A9.** CIs presentados en la figura A8 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 3f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.2.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

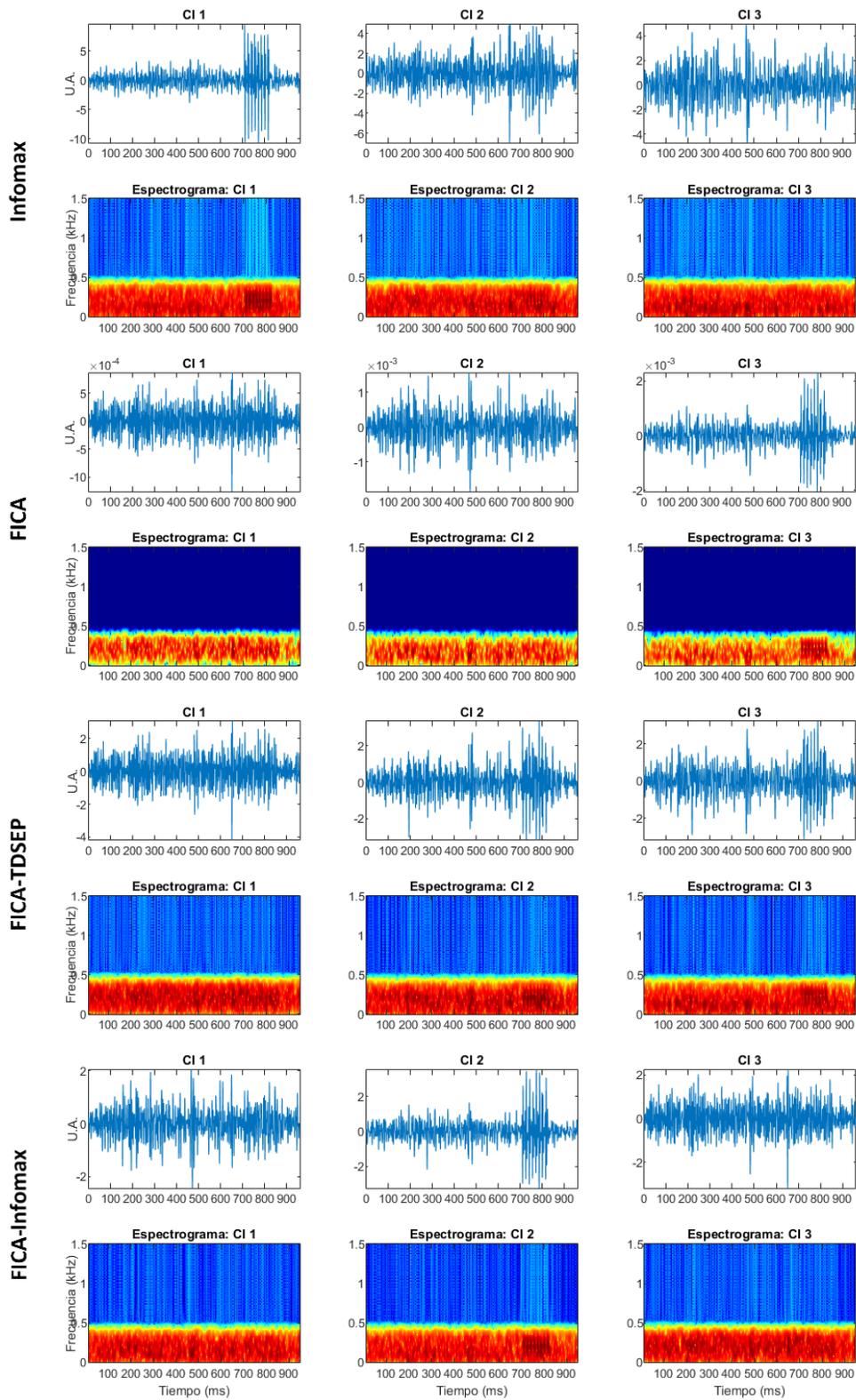
En la **figura A10** se muestra la fuente simulada de 8 ECg empleada en esta prueba, llamada prueba 3g, junto a su espectrograma. En las **figuras A11** y **A12** se muestran respectivamente los CIs estimados con los algoritmos de ICA y los correspondientes CIs-FiltECg. En los CIs observa un patrón de espigas asociado a EC en las gráficas del dominio temporal del CI 1 de Infomax, del CI 3 de FICA y del CI 2 de FICA-Infomax, mientras que en los espectrogramas se encuentra este patrón en el CI 1 de Infomax, en el CI 3 de FICA, en los CI 2 y CI 3 de FICA-TDSEP y en el CI 2 de FICA-Infomax. Los CIs-FiltECg muestran el patrón de espigas en el CI 1 de Infomax, en el CI 3 de FICA, en los CI 2 y CI 3 de FICA-TDSEP y en el CI 2 de FICA-Infomax tanto en el dominio temporal como en los espectrogramas. Las espigas del patrón observado se localizan, al igual que los ECg de la fuente simulada, entre los 700 y 850 ms con contenido en frecuencia alrededor de los 200 Hz.



**Figura A10.** Fuente simulada de 8 ECg (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 8 ECg se emplearon en la prueba 3g.



**Figura A11.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 3g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



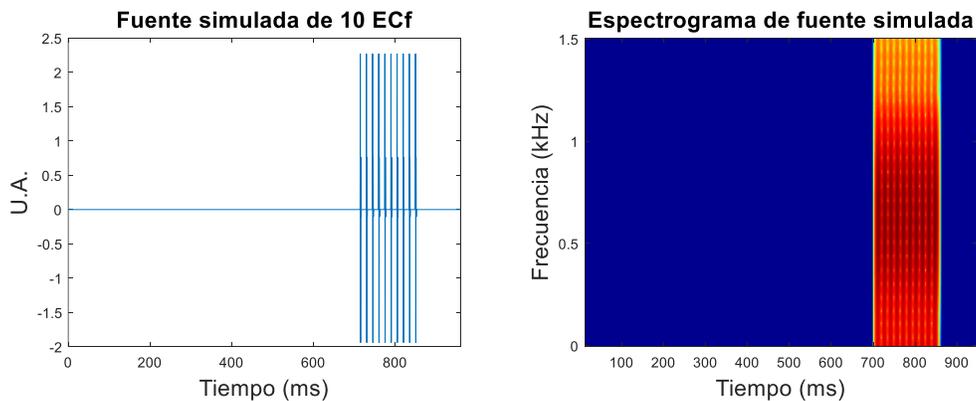
**Figura A12.** CIs presentados en la figura A11 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 3g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.3 Prueba 4 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional

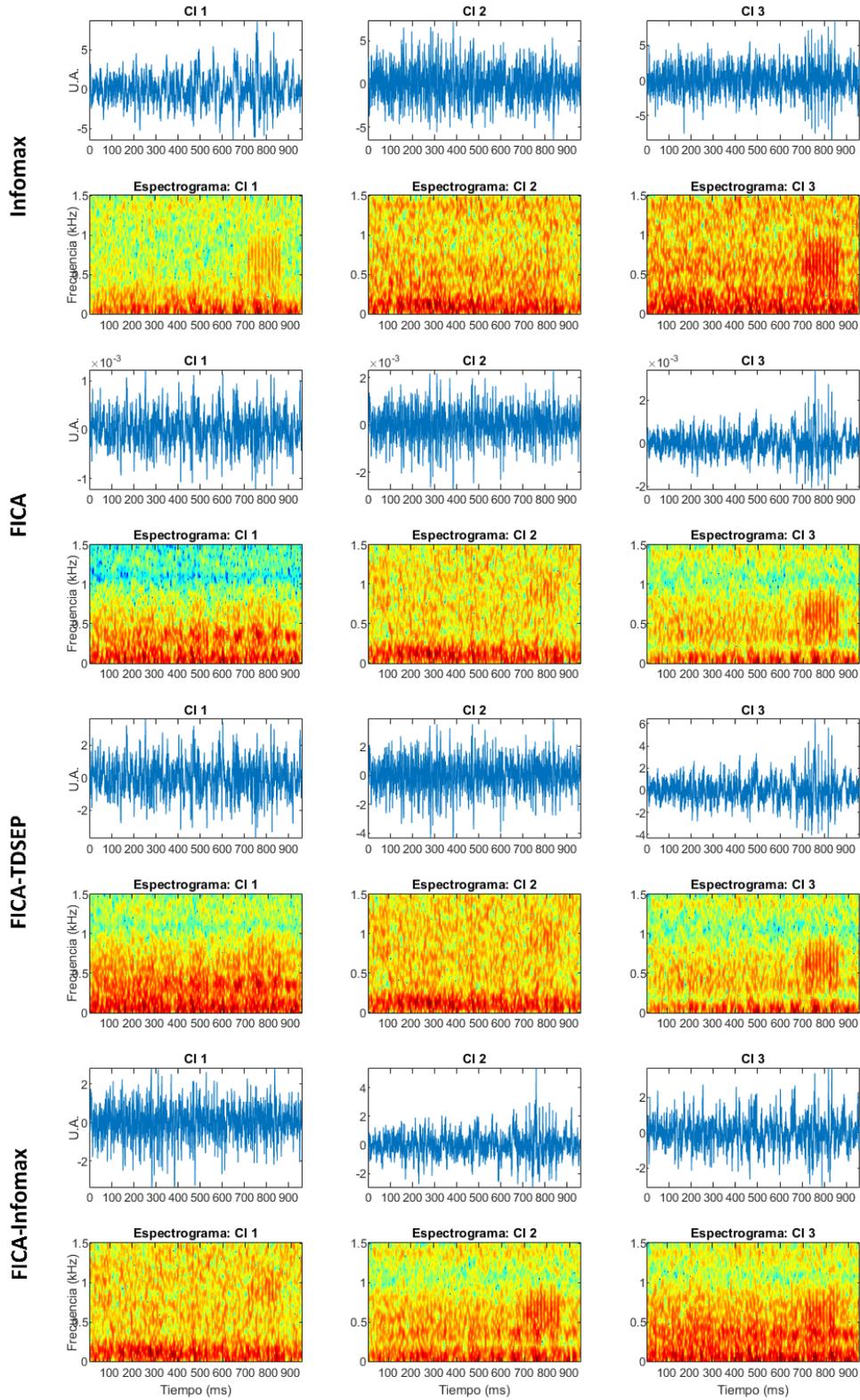
Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC en la etapa de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC2 y se propagó unidireccionalmente hacia los micrófonos PLX2 y PM2.

#### A.3.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

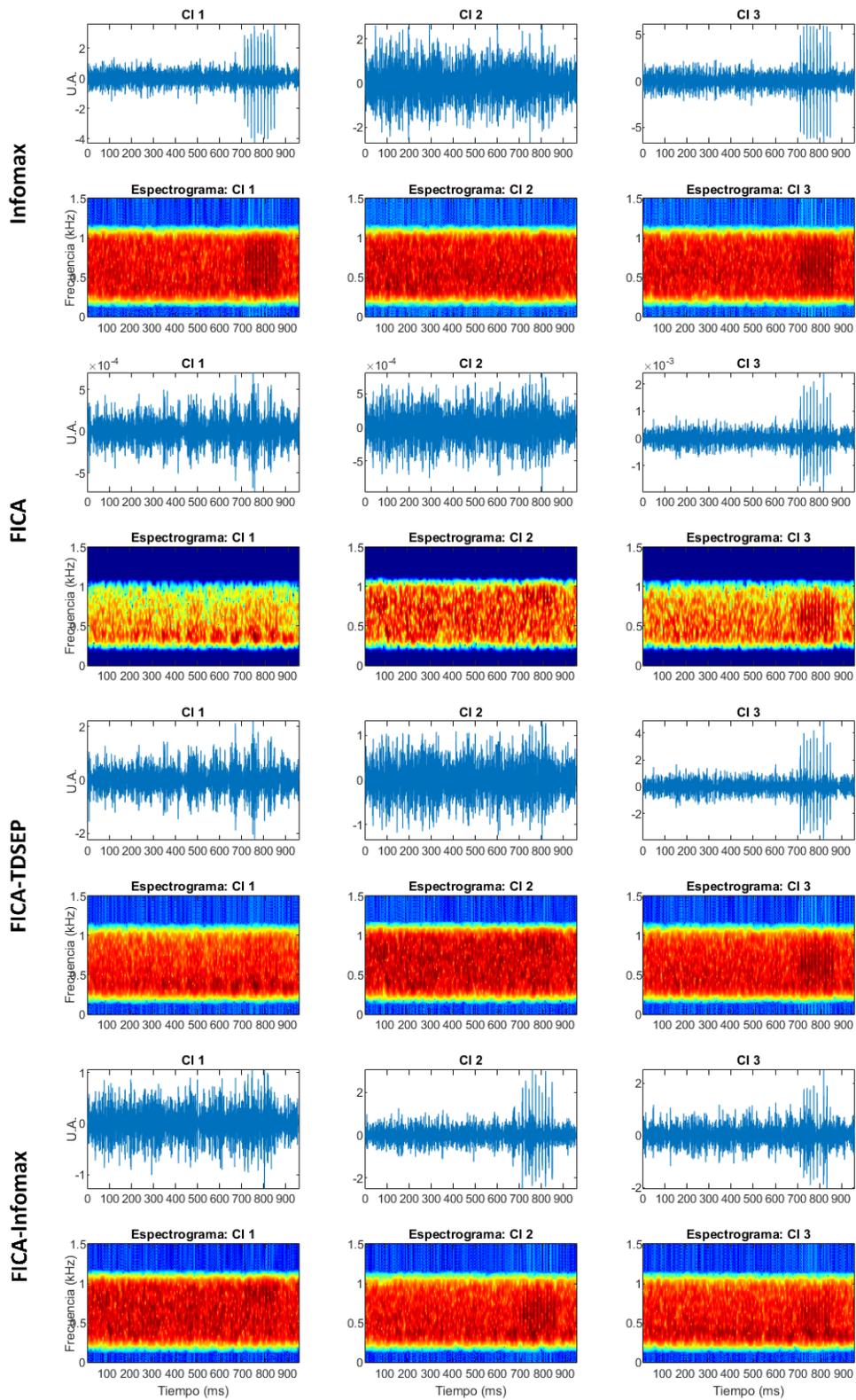
La fuente simulada de 10 ECf empleada en esta prueba, denominada prueba 4f, así como su espectrograma se muestran en la **figura A13**. En las **figuras A14** y **A15** se encuentran, respectivamente, los CIs estimados por los algoritmos de ICA y los CIs filtrados mediante FiltECf. En las gráficas de los CIs se observa el patrón de espigas asociado a EC en la representación temporal del CI 3 de Infomax, mientras que en los espectrogramas se observa este patrón en los CI 1 y CI 3 de Infomax, en los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax. En los CIs-FiltECf, se observa el patrón de espigas en los CI 1 y CI 3 de Infomax, en los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax tanto en las representaciones temporales como en las tiempo-frecuencia. La ubicación y características de las espigas del patrón coinciden con aquellas de los ECf insertados en esta prueba, es decir, se localizan alrededor de los 700 y 900 ms con contenido en frecuencia alrededor de los 650 Hz.



**Figura A13.** Fuente simulada de 10 ECf (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 10 ECf se emplearon en la prueba 4f.



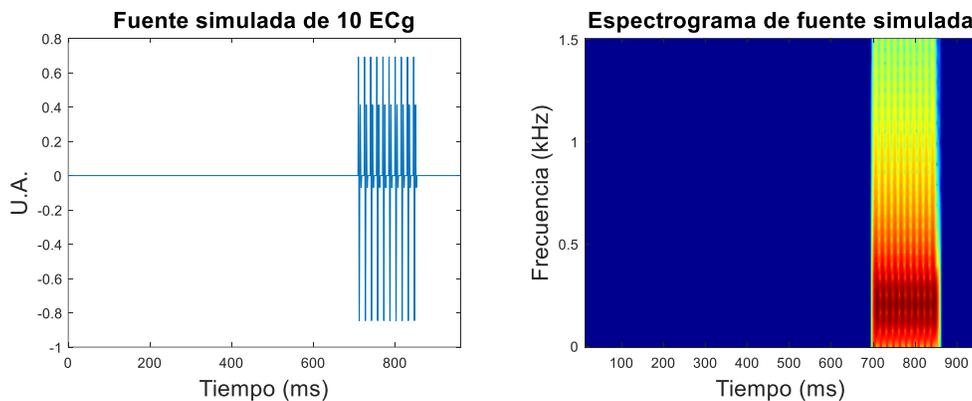
**Figura A14.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 4f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



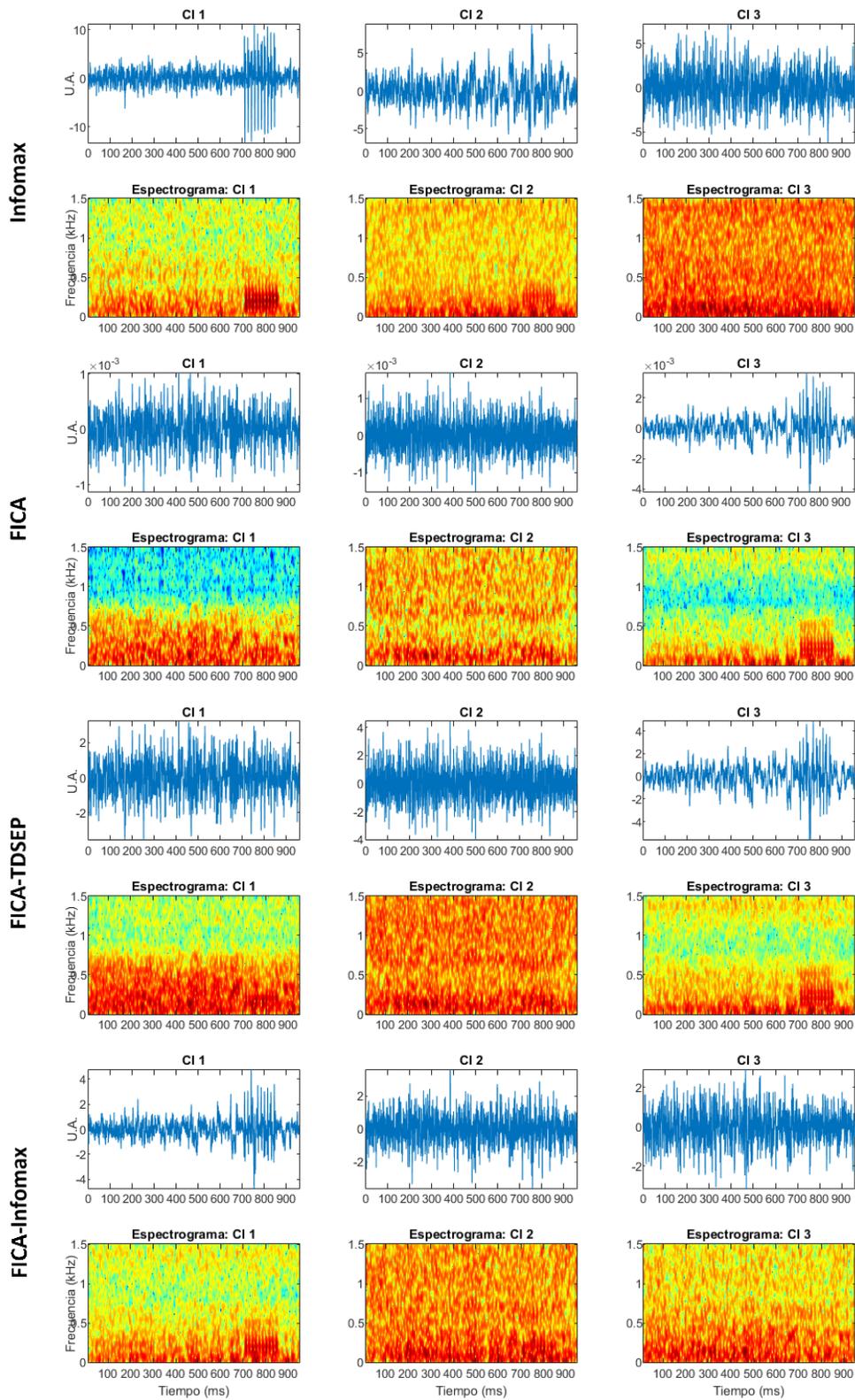
**Figura A15.** CIs presentados en la figura A14 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 4f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.3.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

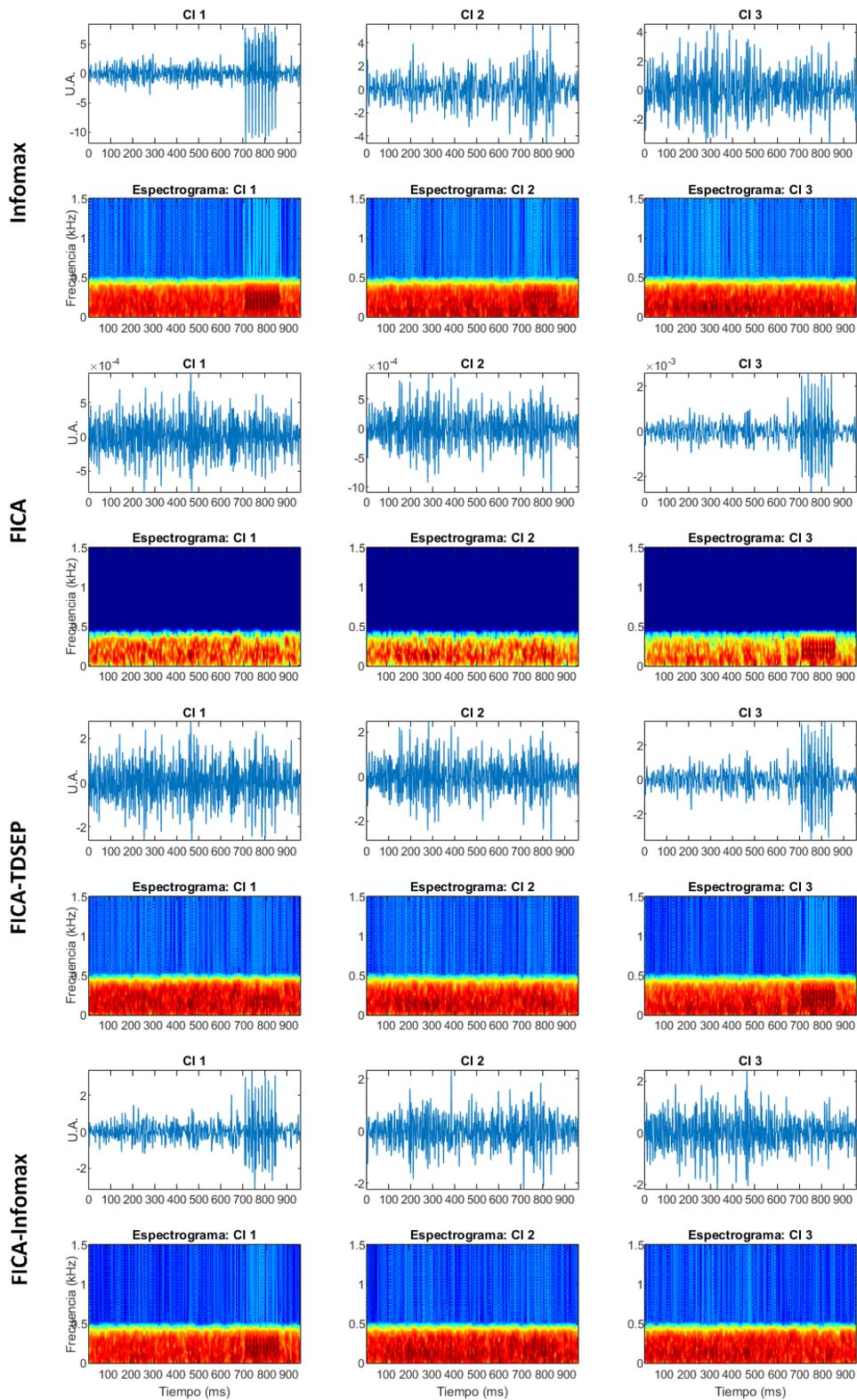
La fuente simulada de 10 ECg empleada en esta prueba, definida como prueba 4g, se muestra junto a su espectrograma en la **figura A16**. Los CIs obtenidos mediante los algoritmos de ICA y los CIs-FiltECg se encuentran en las **figuras A17 y A18**, respectivamente. En las gráficas de los CIs se aprecia el patrón de espigas asociadas a EC en las representaciones temporales del CI 1 de Infomax, de los CI 3 de FICA y FICA- TDSEP, y del CI 1 de FICA-Infomax, mientras que en los espectrogramas se observa este patrón en los CIs anteriormente mencionados junto al CI 2 de Infomax. Al igual que en los CIs, se logra visualizar el patrón de espigas en los CIs-FiltECg en la representación temporal del CI 1 de Infomax, de los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP, y del CI 1 de FICA-Infomax. En los espectrogramas, este patrón se encuentra en estos mismos CIs y, además, en el CI 2 de Infomax. Las espigas del patrón observado se asocian con los ECg insertados en esta prueba ya que ambos se localizan entre los 650 y los 900 ms y poseen un contenido en frecuencia alrededor de los 200 Hz.



**Figura A16.** Fuente simulada de 10 ECg (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 10 ECg se emplearon en la prueba 4g.



**Figura A17.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 4g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



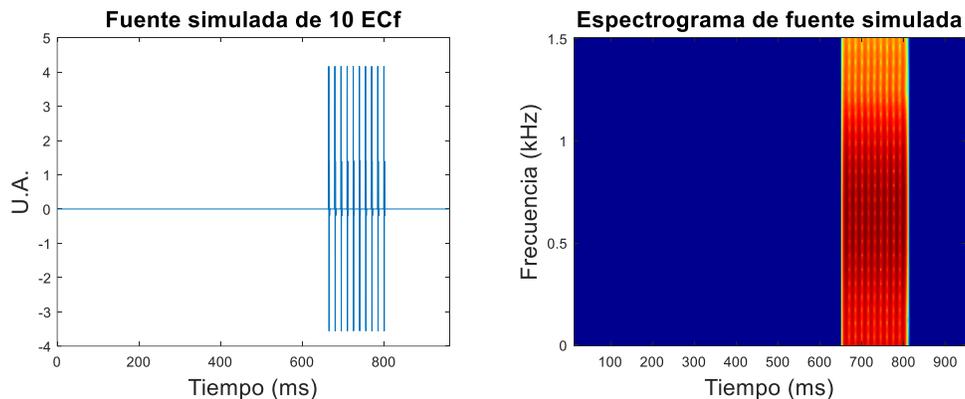
**Figura A18.** CIs presentados en la figura A17 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 4g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

#### A.4 Prueba 5 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN

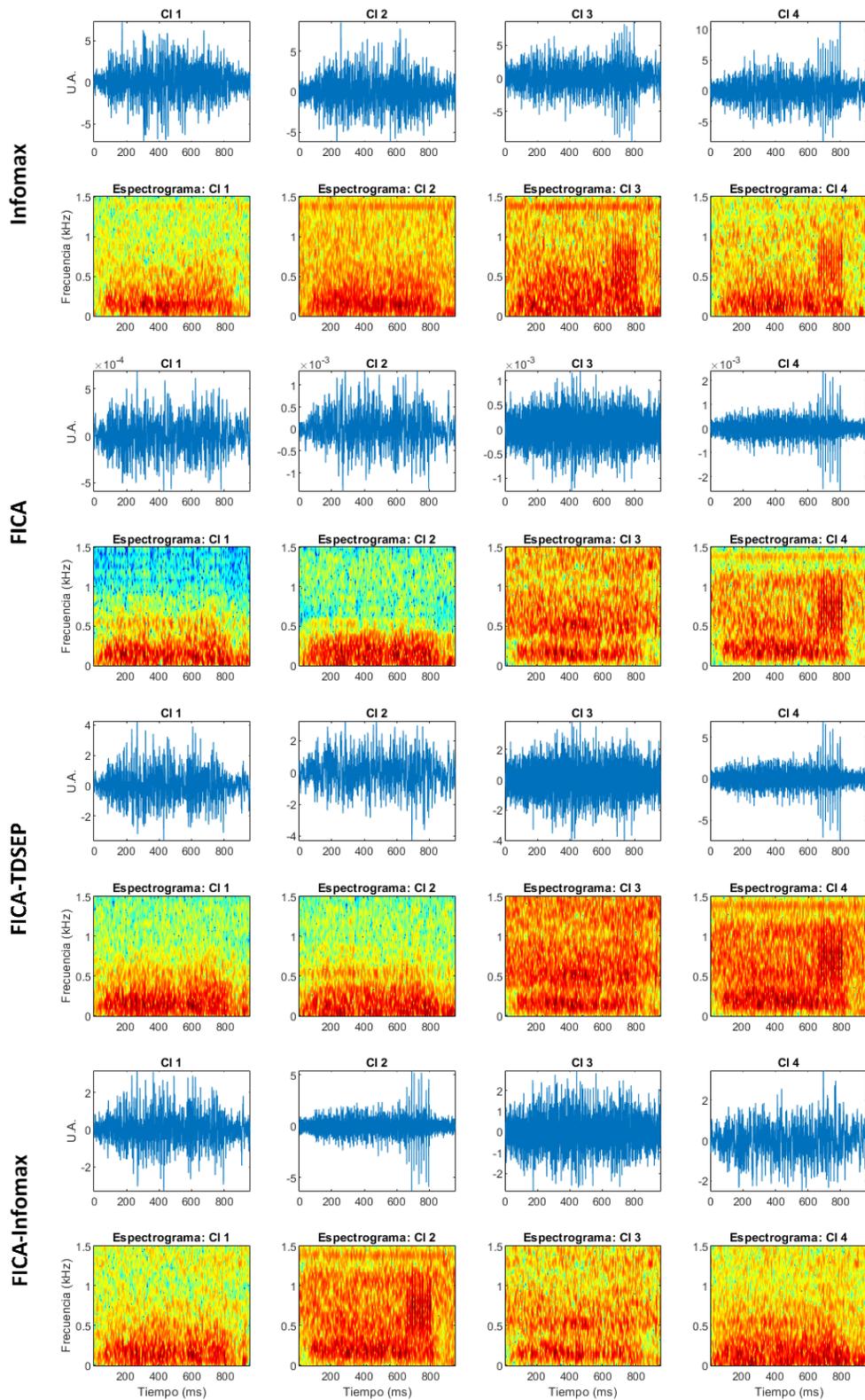
Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC en la etapa de inspiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRX4. Además, se consideraron las señales de SRN de los canales PRC5 y PRX5 para la BSS.

##### A.4.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

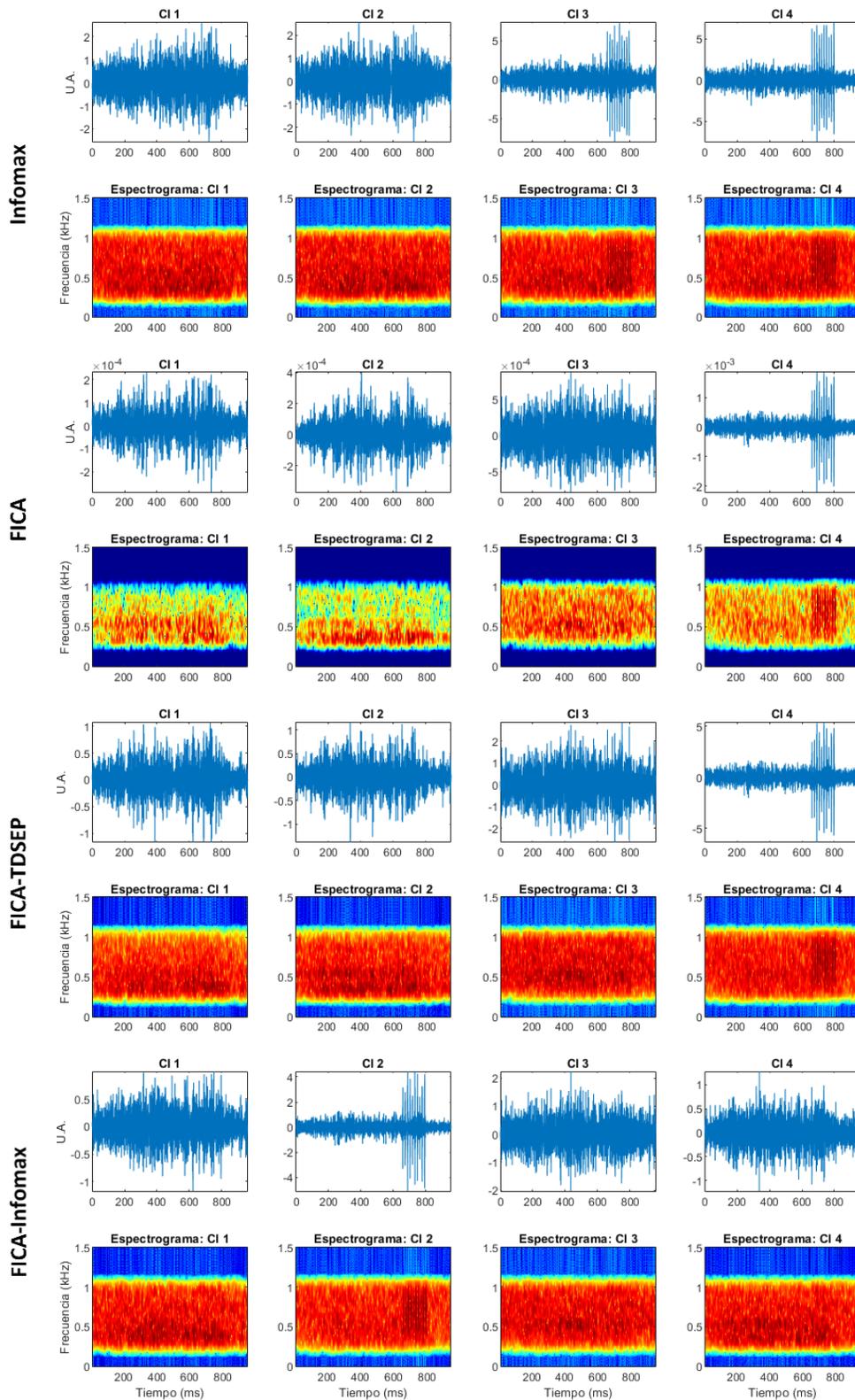
La fuente simulada de 10 ECf empleada en esta prueba, llamada prueba 5f, se muestra junto a su espectrograma en la **figura A19**. En las **figuras A20 y A21** contienen, respectivamente, a los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA y a los CIs filtrados por FiltECf. Tanto en las representaciones temporales como en los espectrogramas de los CIs se observa el patrón de espigas asociado a EC en los CI 3 y CI 4 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax. Los CIs-FiltECf muestran este patrón en estos mismos CIs en las representaciones temporales y en los espectrogramas. Al igual que los ECf de la fuente simulada, este patrón de espigas se encuentra ubicado entre los 600 y 850 ms y contiene información en frecuencia alrededor de los 650 Hz.



**Figura A19.** Fuente simulada de 10 ECf (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 10 ECf se emplearon en la prueba 5f.



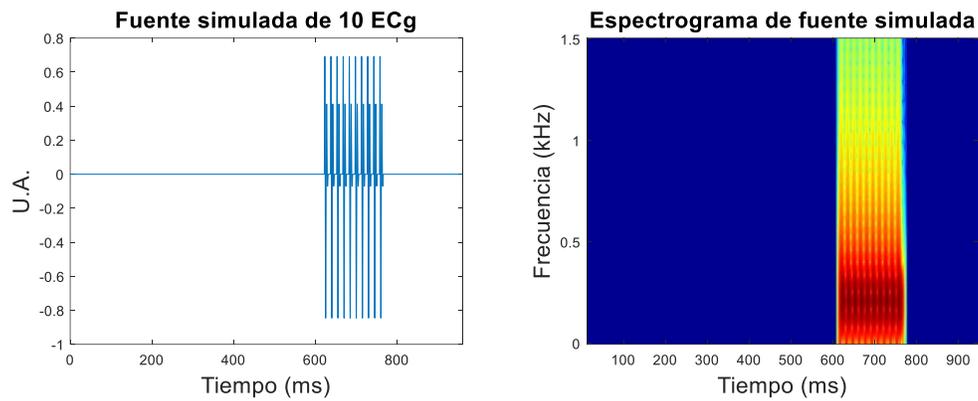
**Figura A20.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 5f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



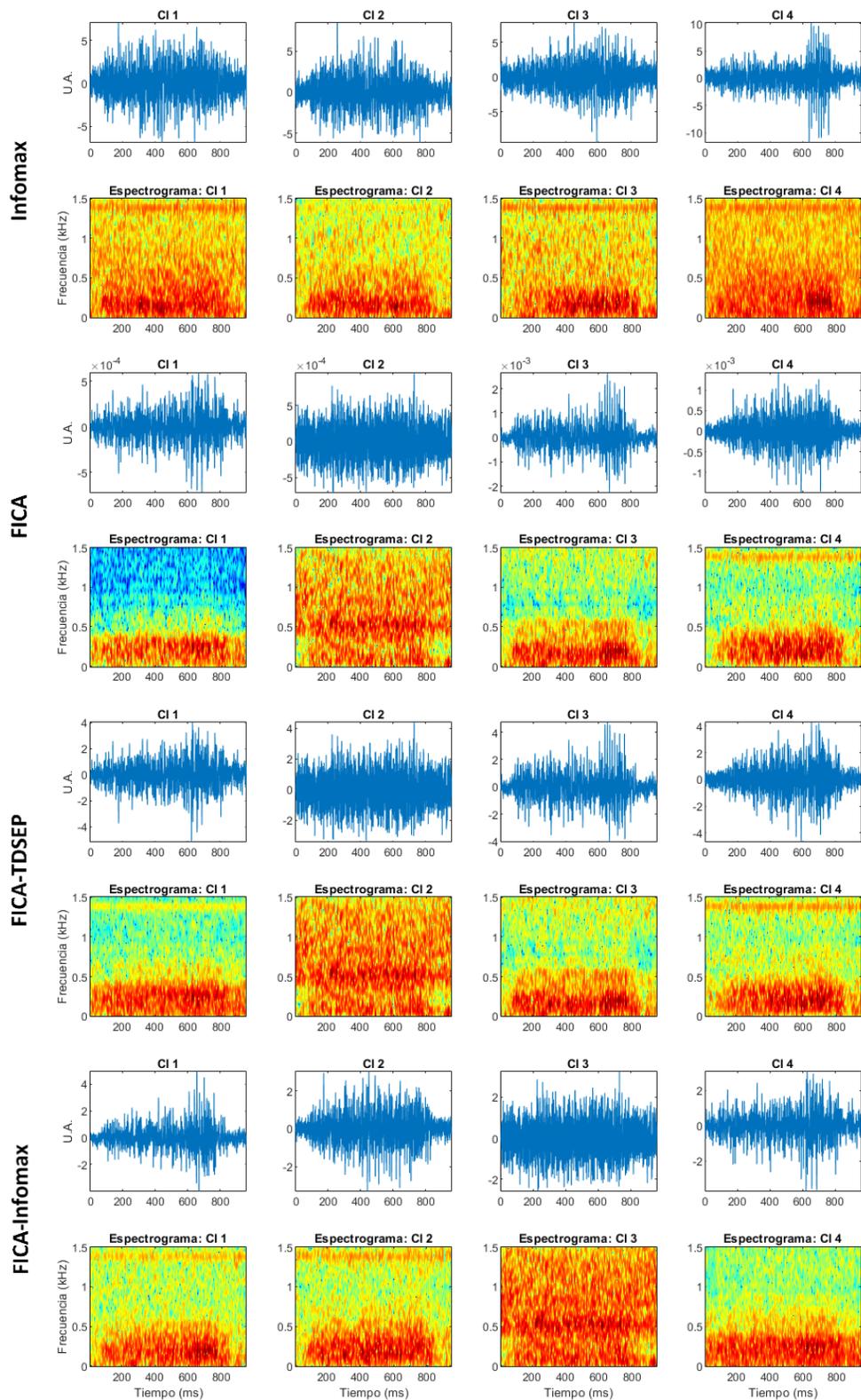
**Figura A21.** CIs presentados en la figura A21 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 5f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

#### A.4.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

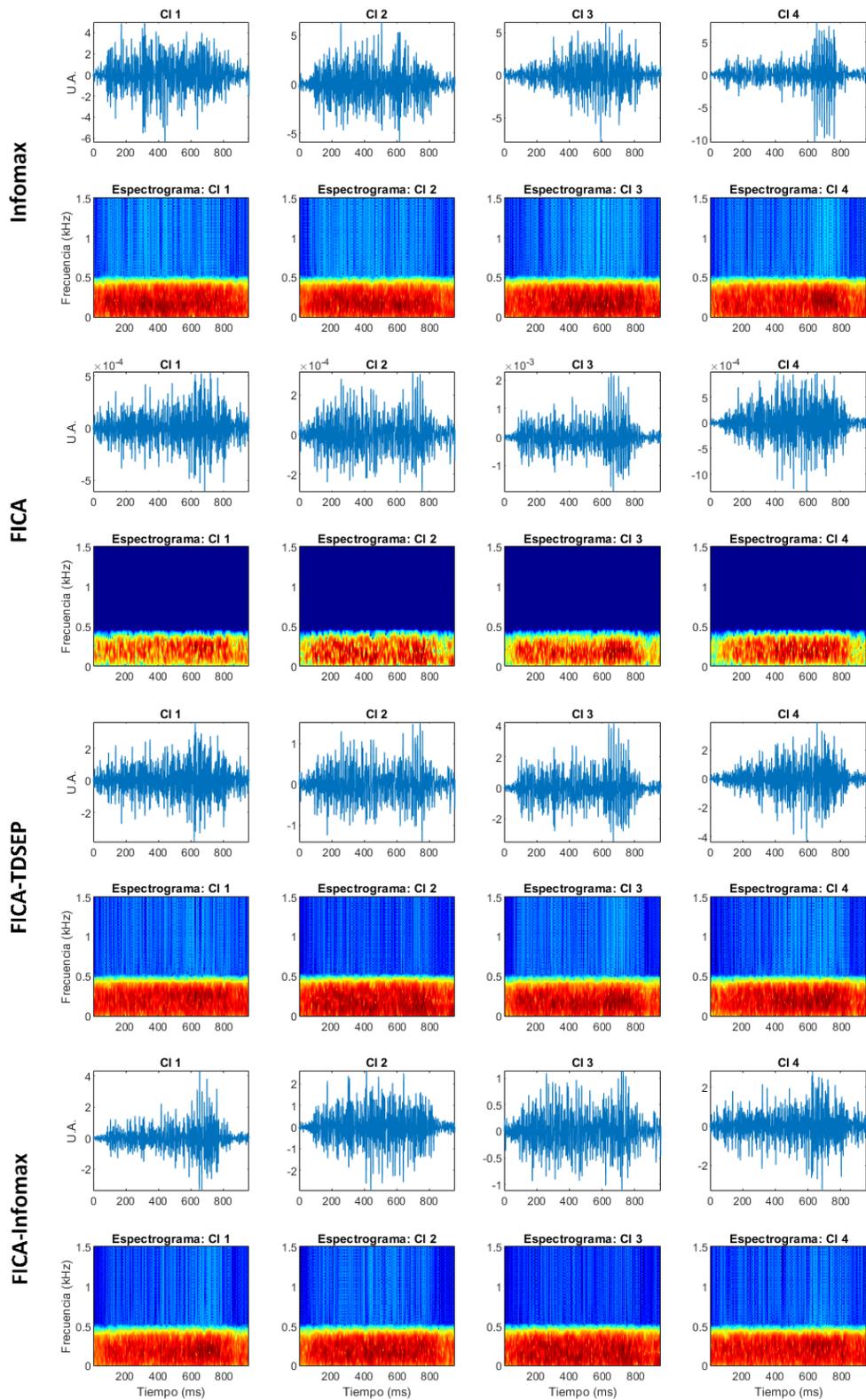
La fuente simulada de 10 ECF empleada en esta prueba, llamada prueba 5g, se muestra junto a su espectrograma en la **figura A22**. En las **figuras A23** y **A24** contienen, respectivamente, a los CIs y a los CIs-FiltECf. Tanto en los CIs como en los componentes filtrados por FiltECf se localiza el patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales y en tiempo-frecuencia en el CI 4 de Infomax, en los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP, y en el CI 1 de FICA-Infomax. Este patrón se ubica entre los 600 y 800 ms y contiene información en frecuencia alrededor de los 200 Hz, al igual que los ECG de la fuente simulada.



**Figura A22.** Fuente simulada de 10 ECG (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 10 ECG se emplearon en la prueba 5g.



**Figura A23.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 5g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



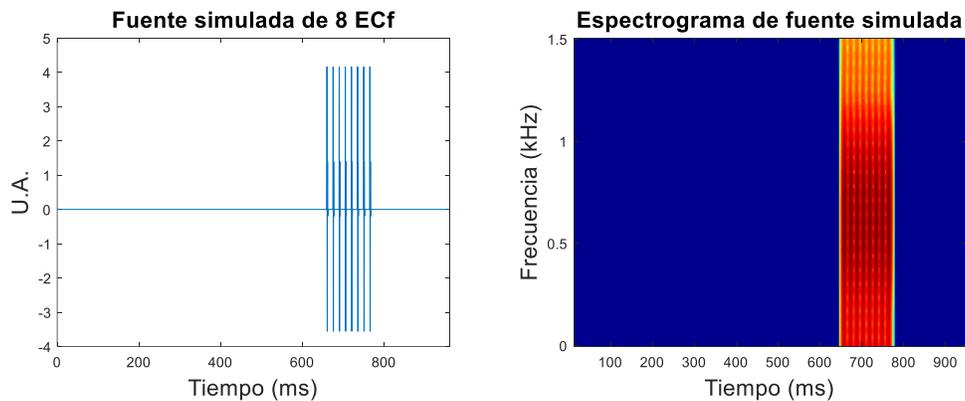
**Figura A24.** CIs presentados en la figura A23 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 5g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.5 Prueba 6 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN

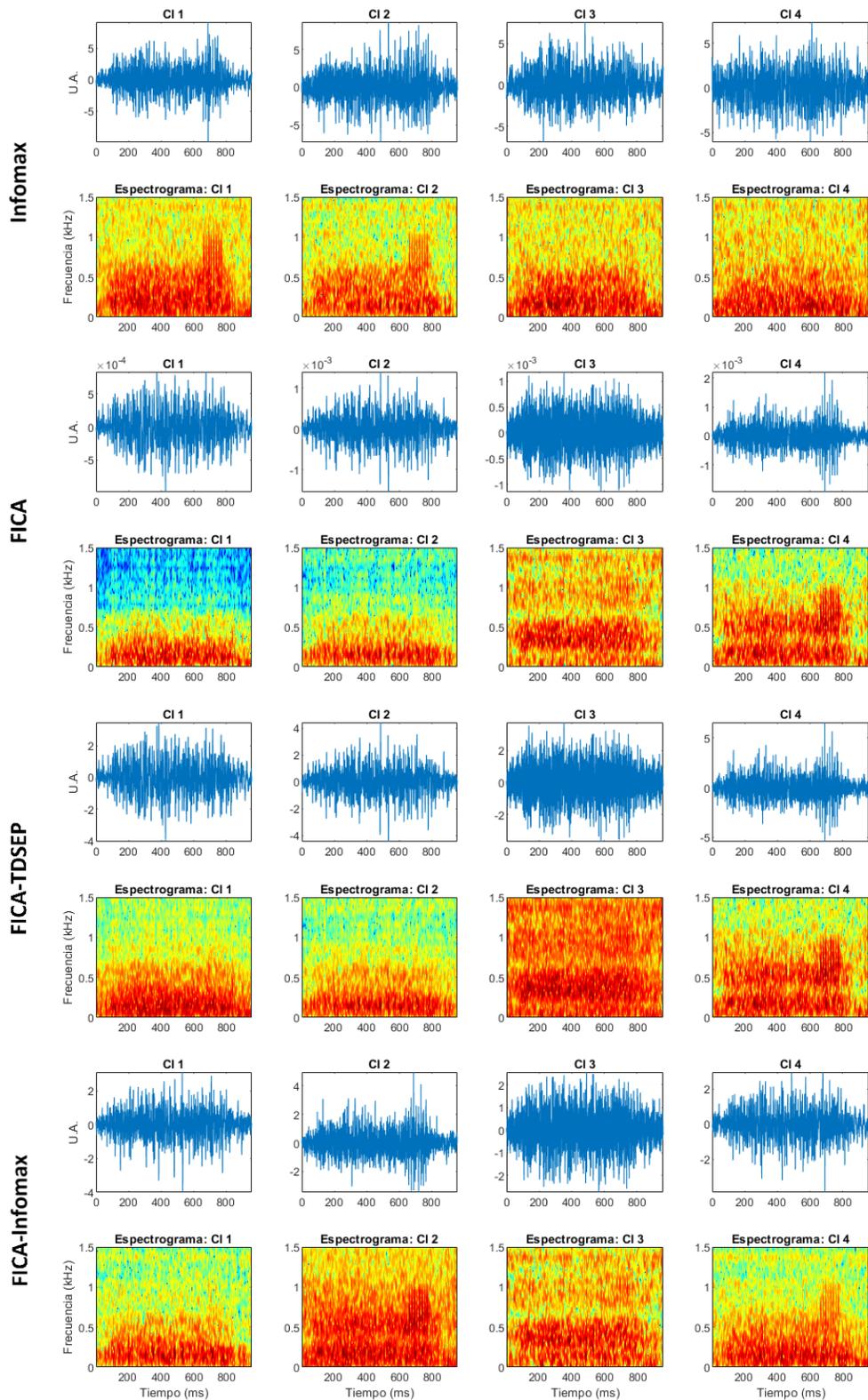
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC en la etapa de inspiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRX3. Además, se consideraron las señales de SRN de los canales PRC2 y PRX2 para la BSS.

### A.5.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

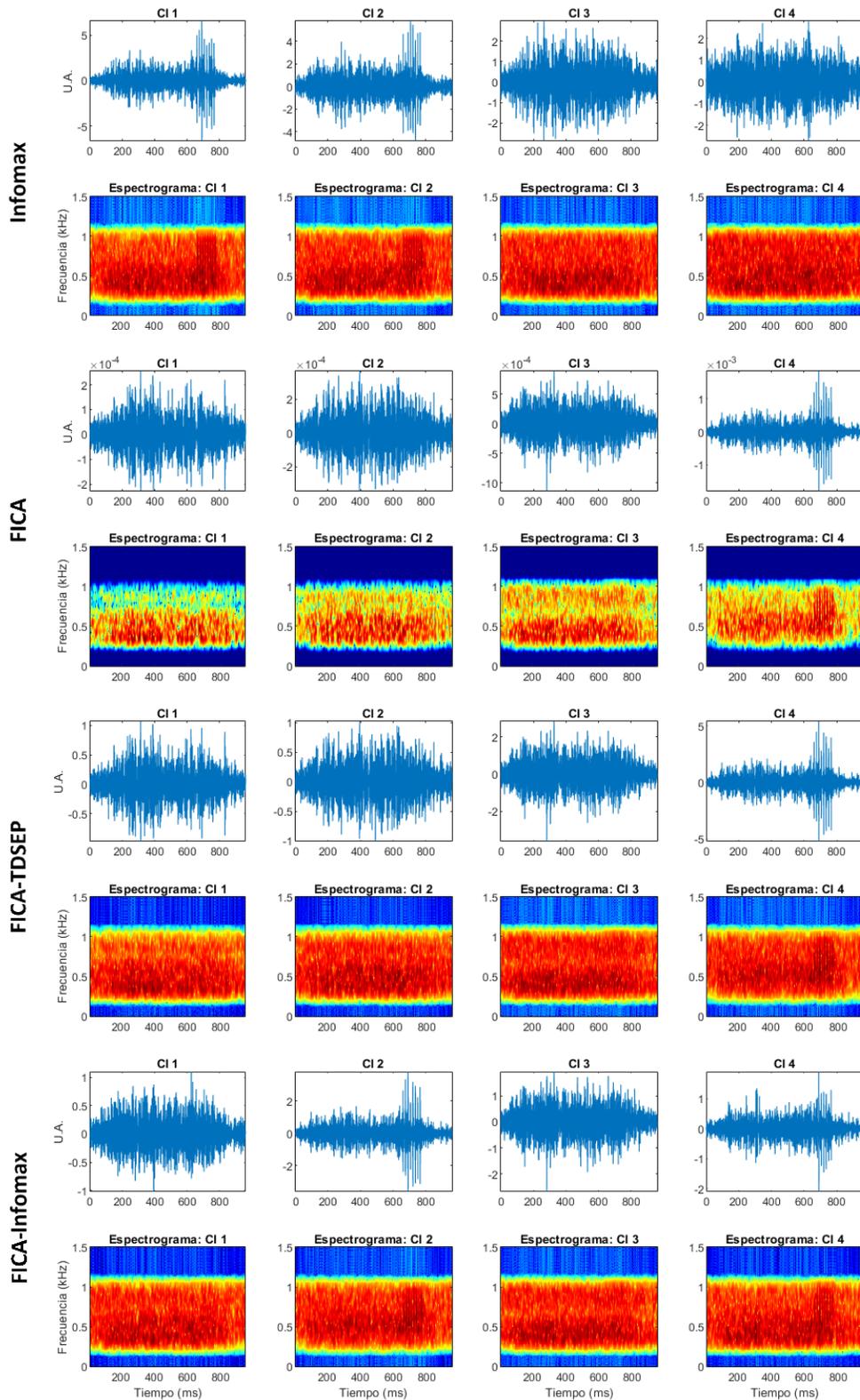
La fuente simulada de 8 ECf utilizada en esta prueba, denominada prueba 6f, se muestra en la **figura A25** junto a su espectrograma. En las **figuras A26** y **A27** se encuentran los CIs obtenidos mediante ICA y los correspondientes CIs-FiltECf, respectivamente. En los CIs se aprecia un patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales de los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax, mientras que en los espectrogramas se localiza este patrón en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP, y en los CI 2 y CI 4 de FICA-Infomax. Los CIs-FiltECf muestran el patrón de espigas en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP, y en los CI 2 y CI 4 de FICA-Infomax tanto en la representación temporal como en el espectrograma. Este patrón, análogamente a los ECf de la fuente simulada, se ubica entre los 600 y 800 ms y tiene un contenido en frecuencia alrededor de los 650 Hz.



**Figura A25.** Fuente simulada de 8 ECf (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 8 ECf se emplearon en la prueba 6f.



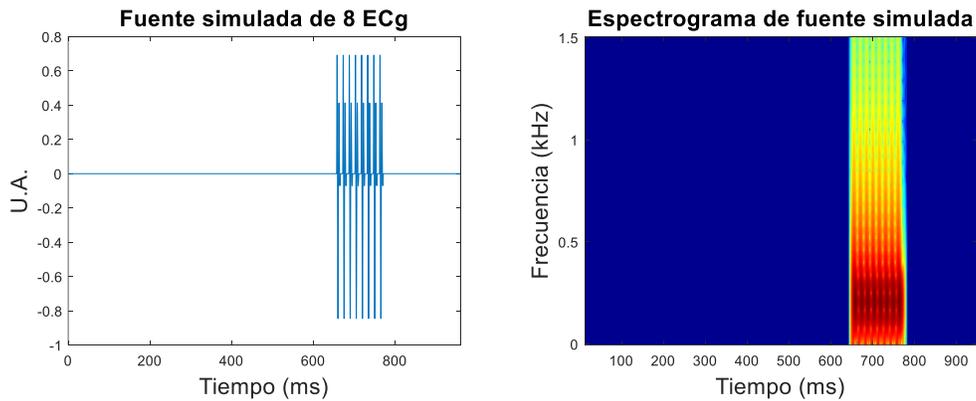
**Figura A26.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 6f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



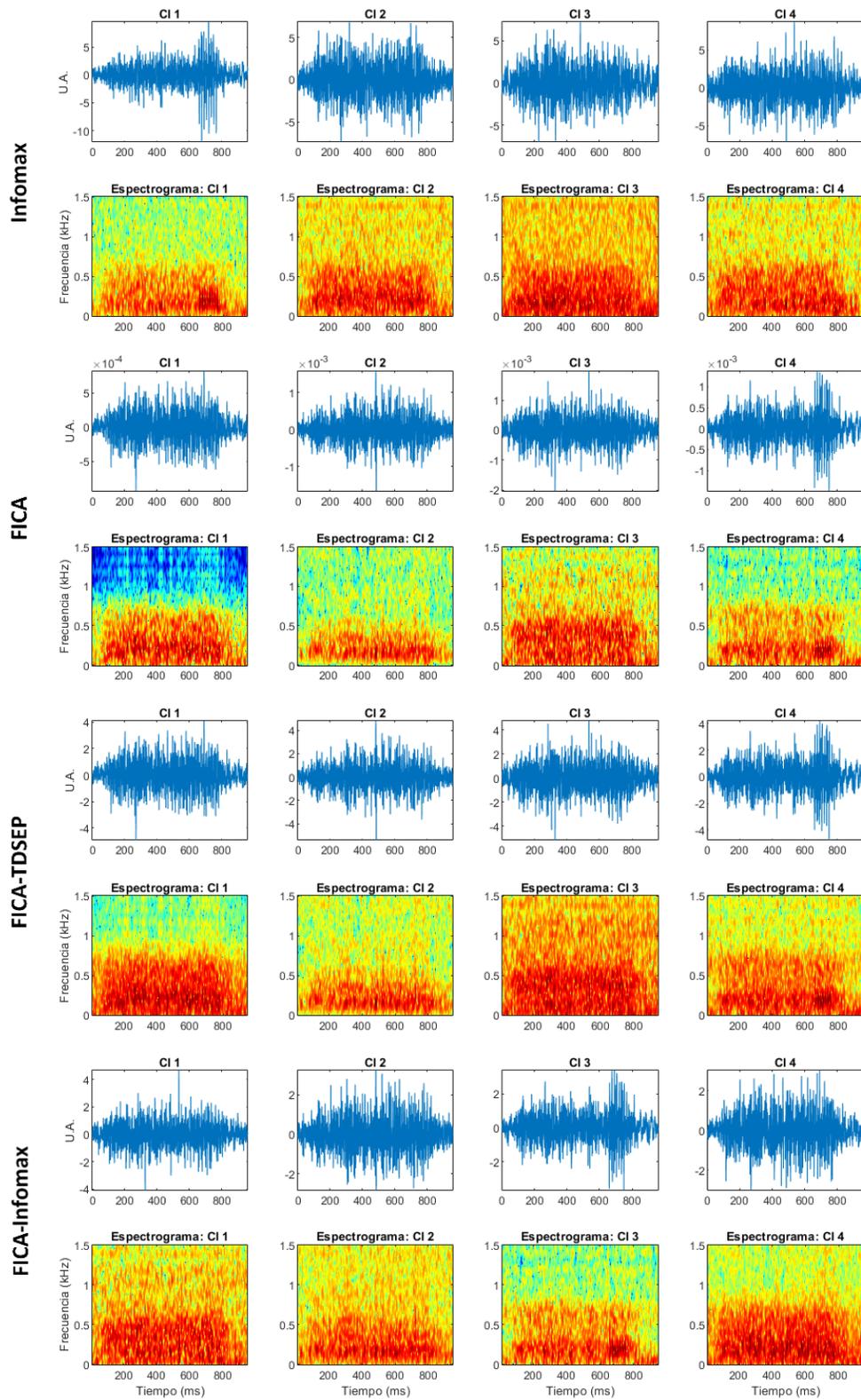
**Figura A27.** CIs presentados en la figura A26 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 6f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.5.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

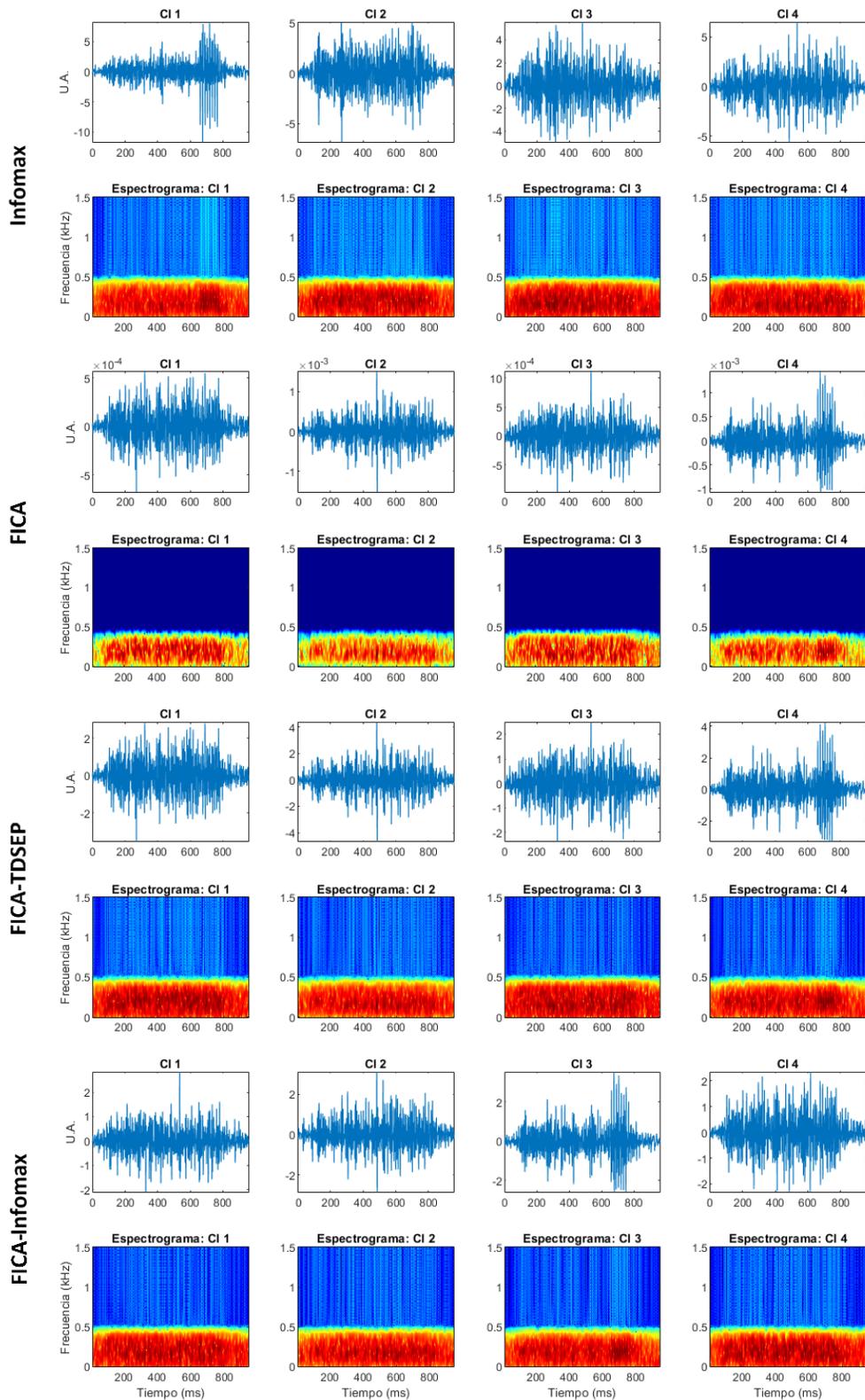
La fuente simulada de 8 ECg empleada en esta prueba, llamada prueba 6g, se muestra junto a su espectrograma en la **figura A28**. En las **figuras A29 y A30** se muestran respectivamente los CIs estimados y los componentes filtrados mediante FiltECg. Tanto los CIs como los CIs-FiltECg muestran un patrón de espigas asociado en la representación temporal y en el espectrograma en el CI 1 de Infomax, en los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP y en el CI 3 de FICA-Infomax. Este patrón, al igual que los ECg de la fuente simulada, se ubica entre los 600 y 800 ms y tiene un contenido en frecuencia alrededor de los 200 Hz.



**Figura A28.** Fuente simulada de 8 ECg (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 8 ECg se emplearon en la prueba 6g.



**Figura A29.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 6g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



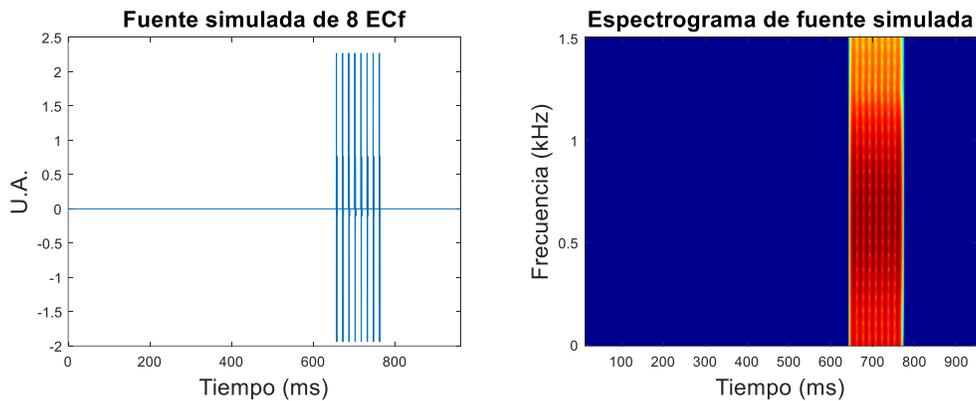
**Figura A30.** CIs presentados en la figura A29 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 6g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.6 Prueba 7 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN

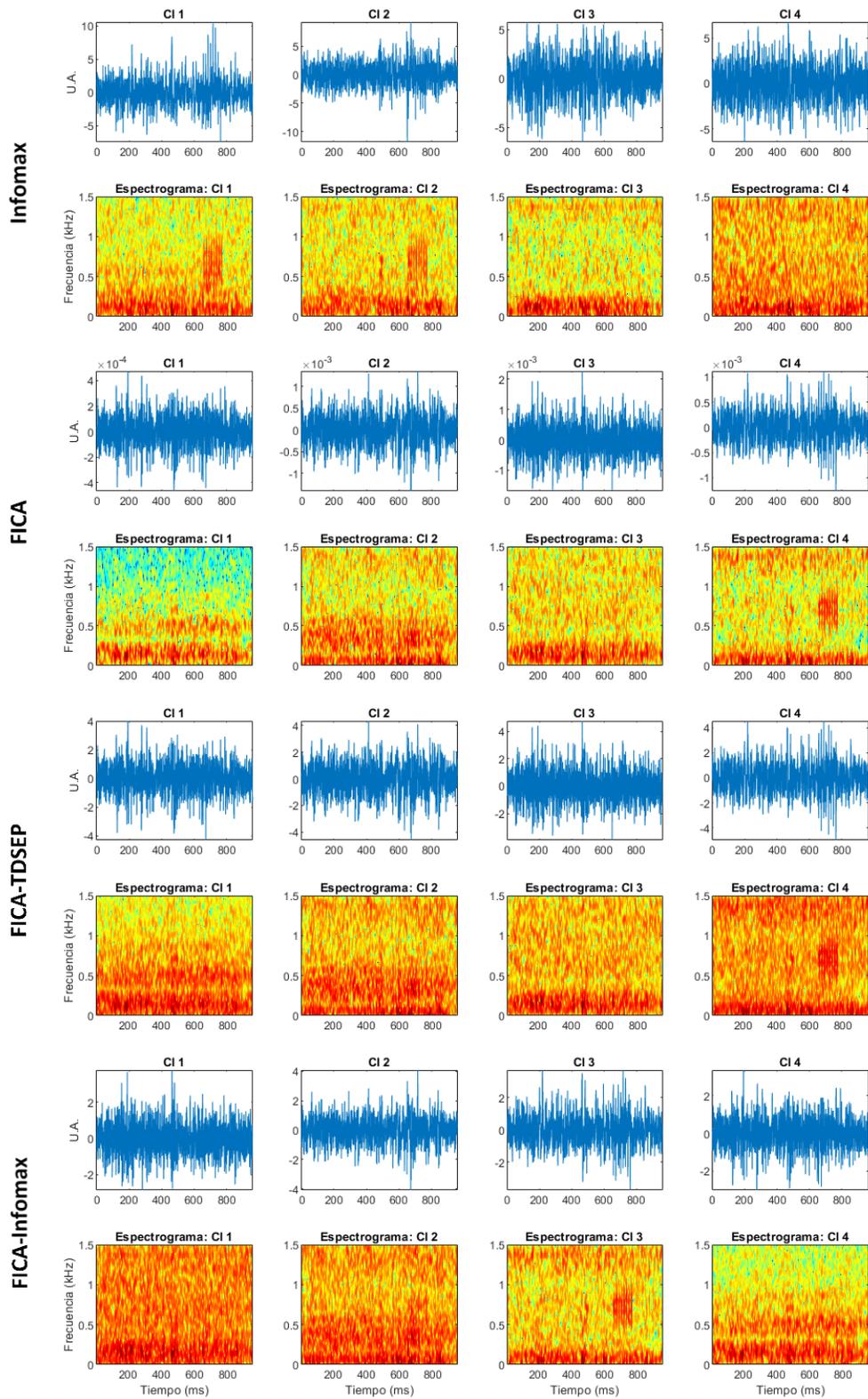
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC en la etapa de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PM3. Además, se consideraron las señales de SRN de los canales PLC4 y PM4 para la BSS.

### A.6.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

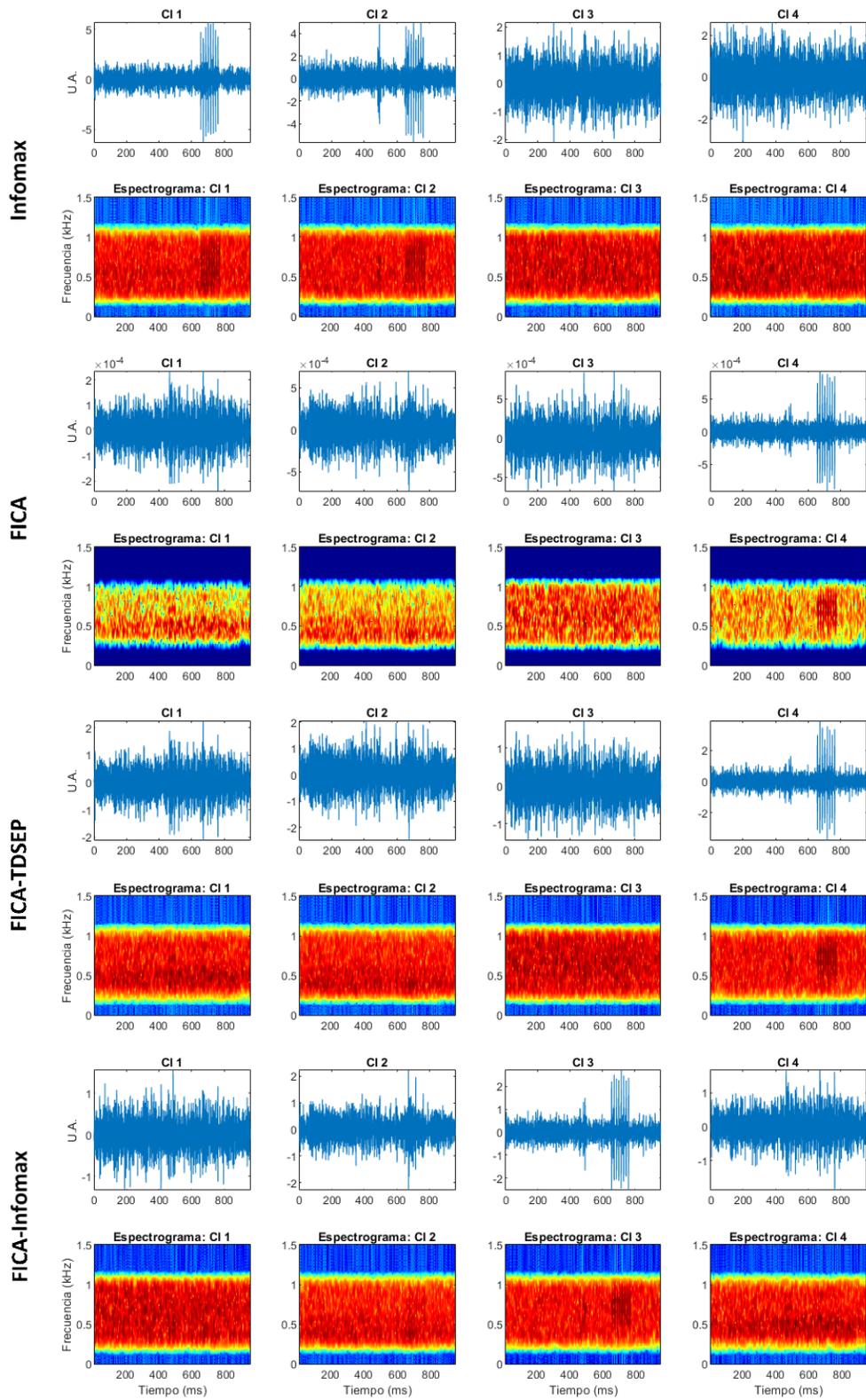
La fuente simulada de 8 ECf utilizada en esta prueba, definida como prueba 7f, se muestra en la **figura A31** junto a su espectrograma. Los CIs estimados se muestran en la **figura A32** mientras que los componentes filtrados por FiltECf se muestran en la **figura A33**. En los CIs se aprecia un patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales del CI 1 de Infomax, y en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP mientras que en los espectrogramas se aprecia este patrón en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 3 de FICA-Infomax. Los CIs-FiltECf muestran el patrón de espigas tanto en la representación temporal como en el espectrograma en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 3 de FICA-Infomax. Este patrón se localiza entre los 600 y 800 ms y tiene un contenido en frecuencia alrededor de 650 Hz. Se determinó la asociación entre las espigas del patrón observado y los ECf de la fuente simulada debido a que sus ubicaciones y sus contenidos en frecuencia son similares.



**Figura A31.** Fuente simulada de 8 ECf (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 8 ECf se emplearon en la prueba 7f.



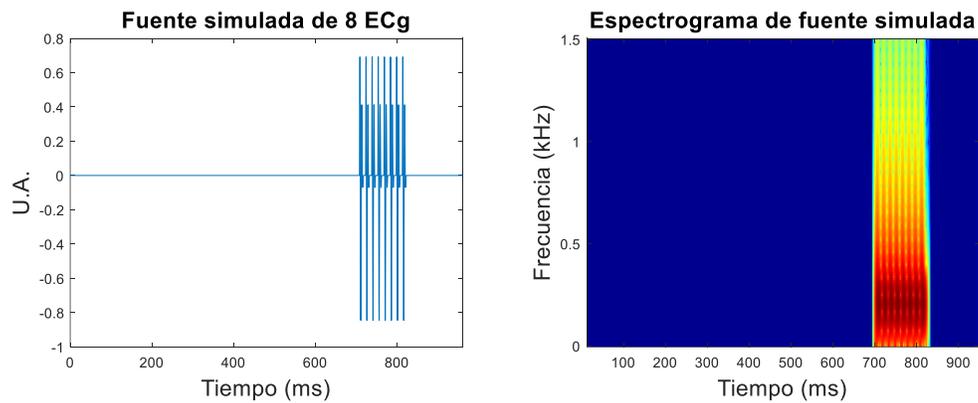
**Figura A32.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 7f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



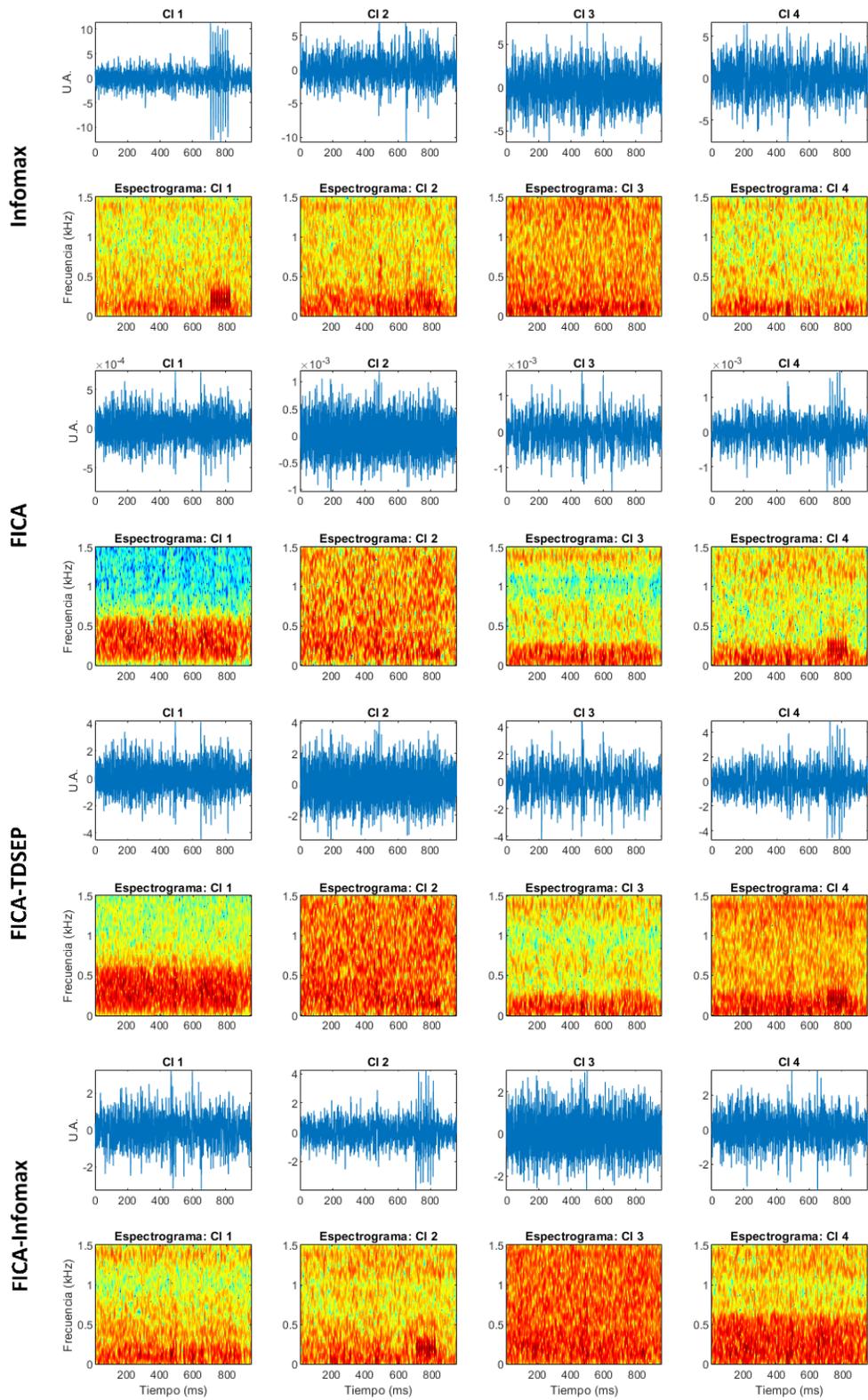
**Figura A33.** CIs presentados en la figura A32 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 7f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.6.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

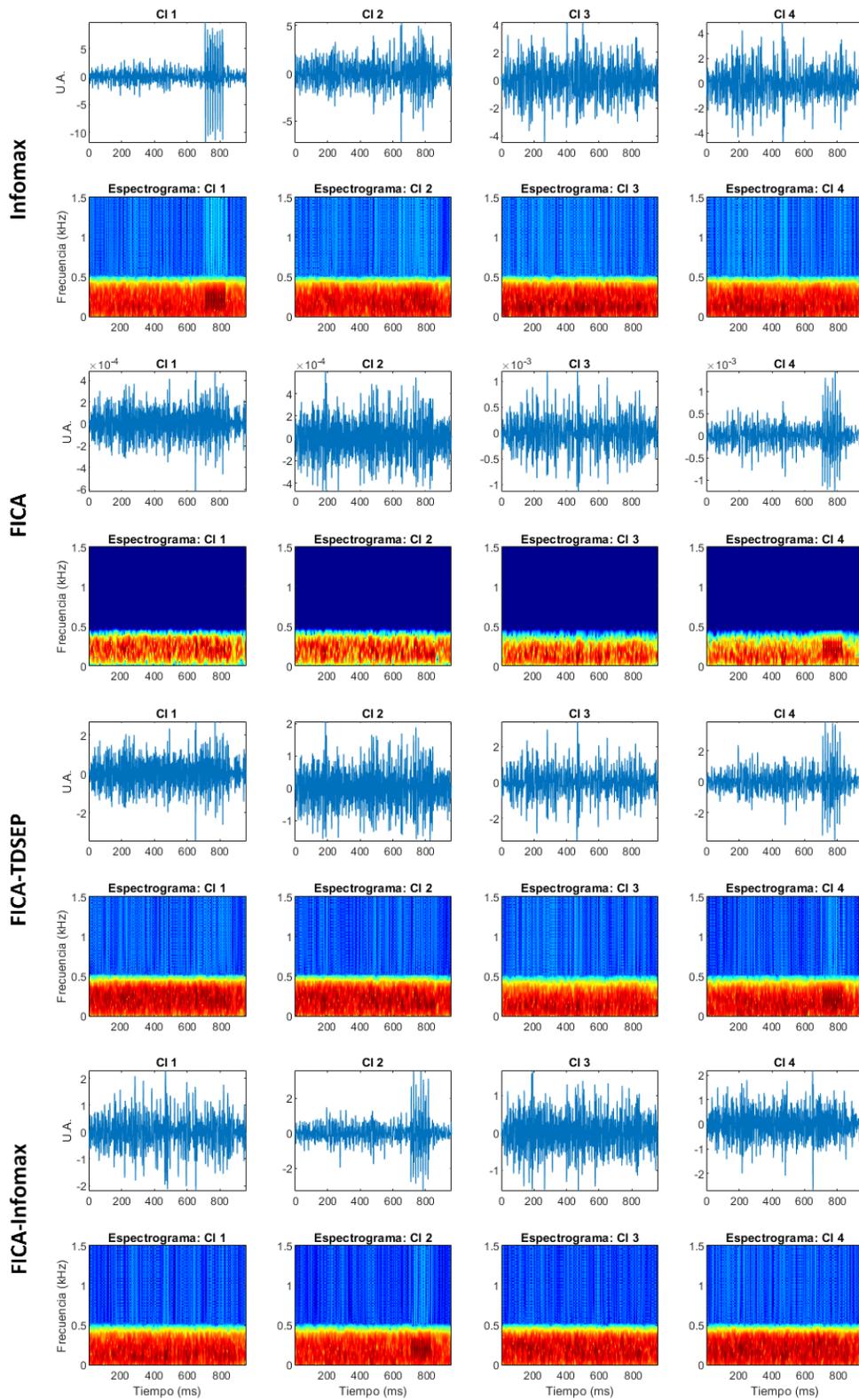
La fuente simulada de 8 ECg utilizada en esta prueba, denominada prueba 7g, se muestra junto a su espectrograma en la **figura A34**. En las **figuras A35** y **A36** se muestran respectivamente los CIs y los correspondientes componentes filtrados por FiltECg. Tanto los CIs como los CIs-FiltECg muestran un patrón de espigas asociado a EC en el CI 1 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax. El patrón de espigas tiene una ubicación temporal entre los 650 y 850 ms y un contenido en frecuencia se ubica alrededor de 200 Hz, características que corresponden a las aquellas de los ECg de la fuente simulada.



**Figura A34.** Fuente simulada de 8 ECg (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 8 ECg se emplearon en la prueba 7g.



**Figura A35.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 7g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



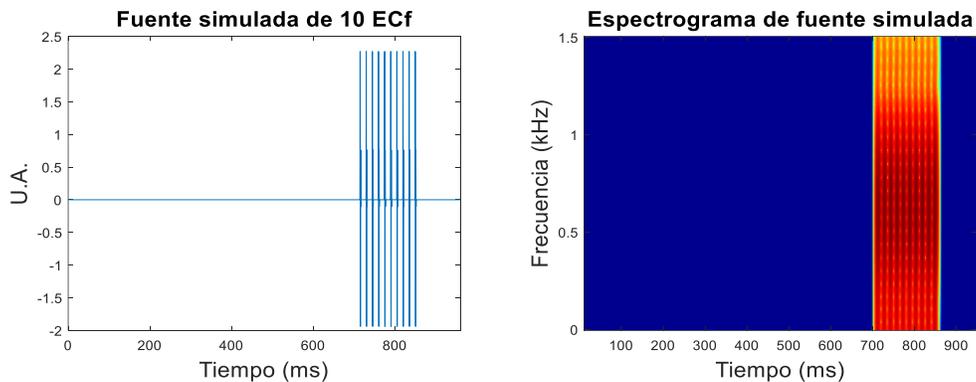
**Figura A36.** CIs presentados en la figura A36 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 7g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.7 Prueba 8 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y canales de SRN

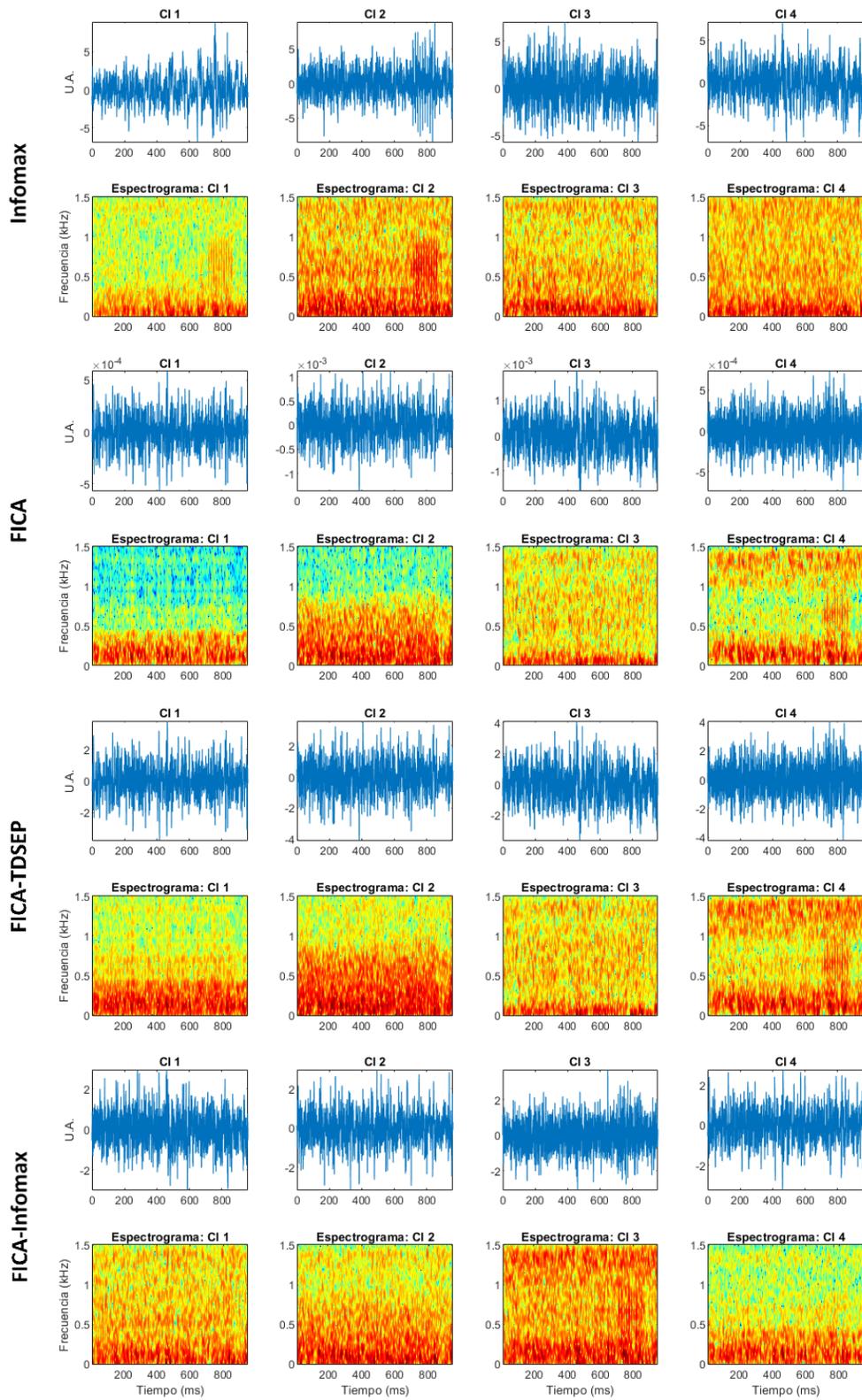
Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC en la etapa de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC2 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PM2. Además, se consideraron las señales de SRN de los canales PLC1 y PM1 para la BSS.

### A.7.1 Fuente simulada de EC de tipo fino

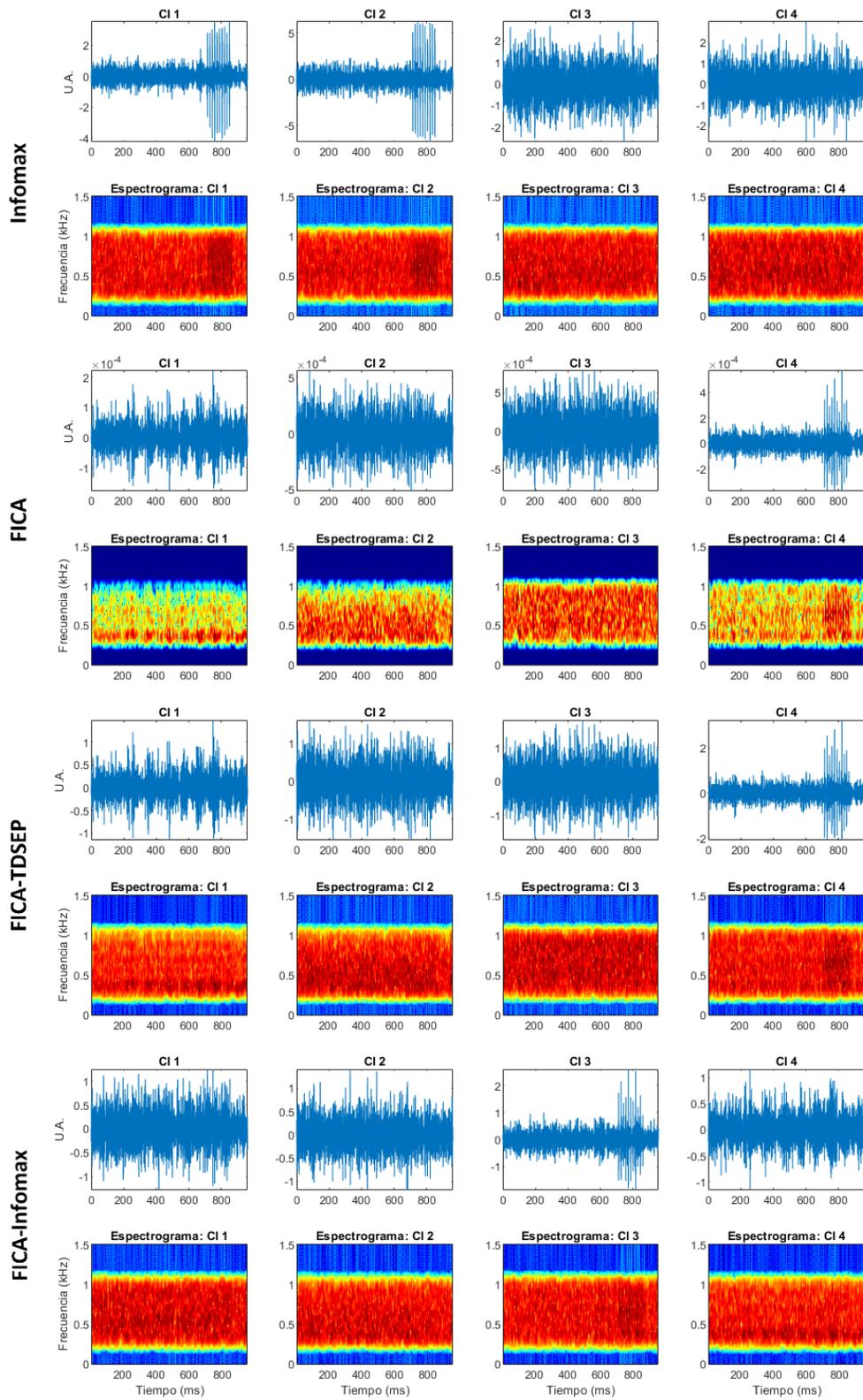
La fuente simulada de 10 ECf utilizada en esta prueba, definida como prueba 8f, se muestra junto a su espectrograma en la **figura A37**. En las **figuras A38 y A39** se muestran los CIs estimados por los algoritmos de ICA y los CIs-FiltECf, respectivamente. En los CIs se observa un patrón de espigas asociado a EC únicamente en la representación temporal del CI 2 de Infomax, mientras que en los espectrogramas se aprecia este patrón en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y ligeramente en el CI 3 de FICA-Infomax. En cambio, los CIs-FiltECf muestran el patrón de espigas en ambas representaciones en los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP y en el CI 3 de FICA-Infomax. Tanto el patrón presente en los CIs como los ECf de la fuente simulada se localizan entre los 650 y 900 ms, y poseen un contenido en frecuencia alrededor de los 650 Hz, lo que indica una asociación entre ellos.



**Figura A37.** Fuente simulada de 10 ECf (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 10 ECf se emplearon en la prueba 8f.



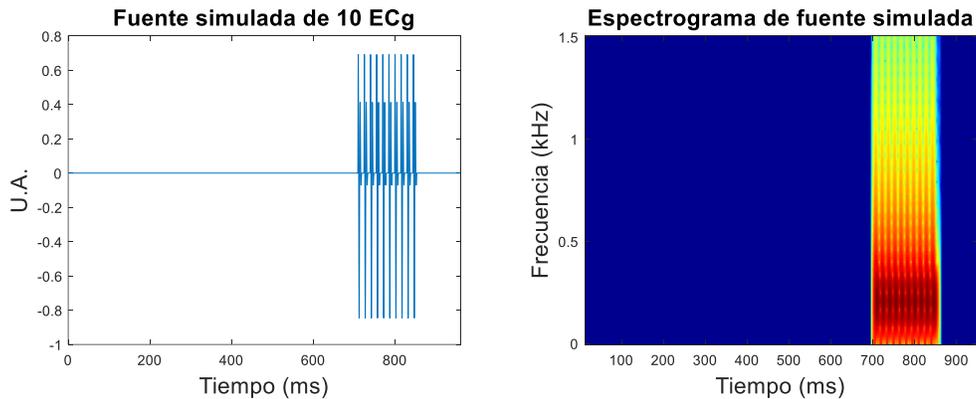
**Figura A38.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 8f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



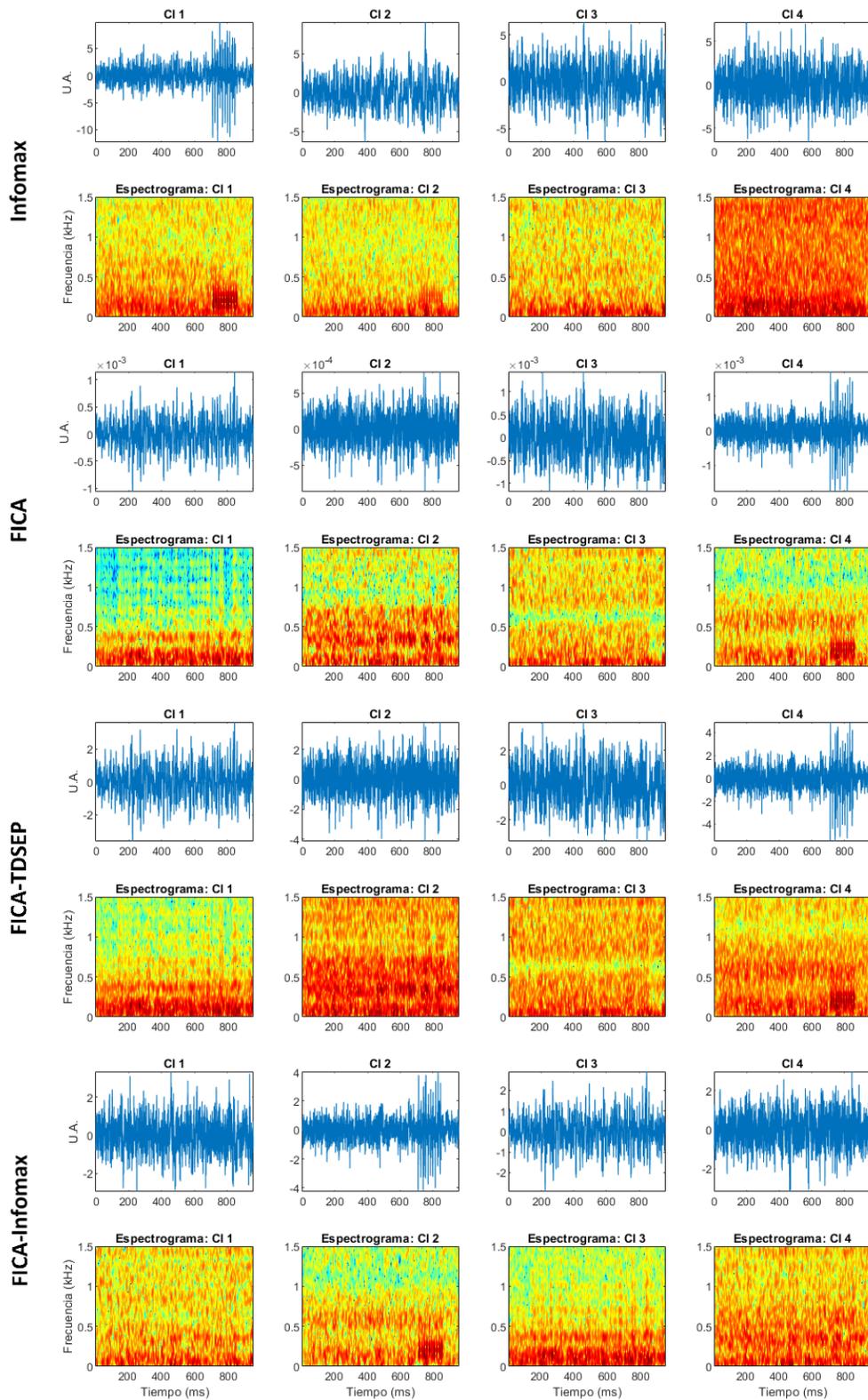
**Figura A39.** CIs presentados en la figura A38 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 8f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.7.2 Fuente simulada de EC de tipo grueso

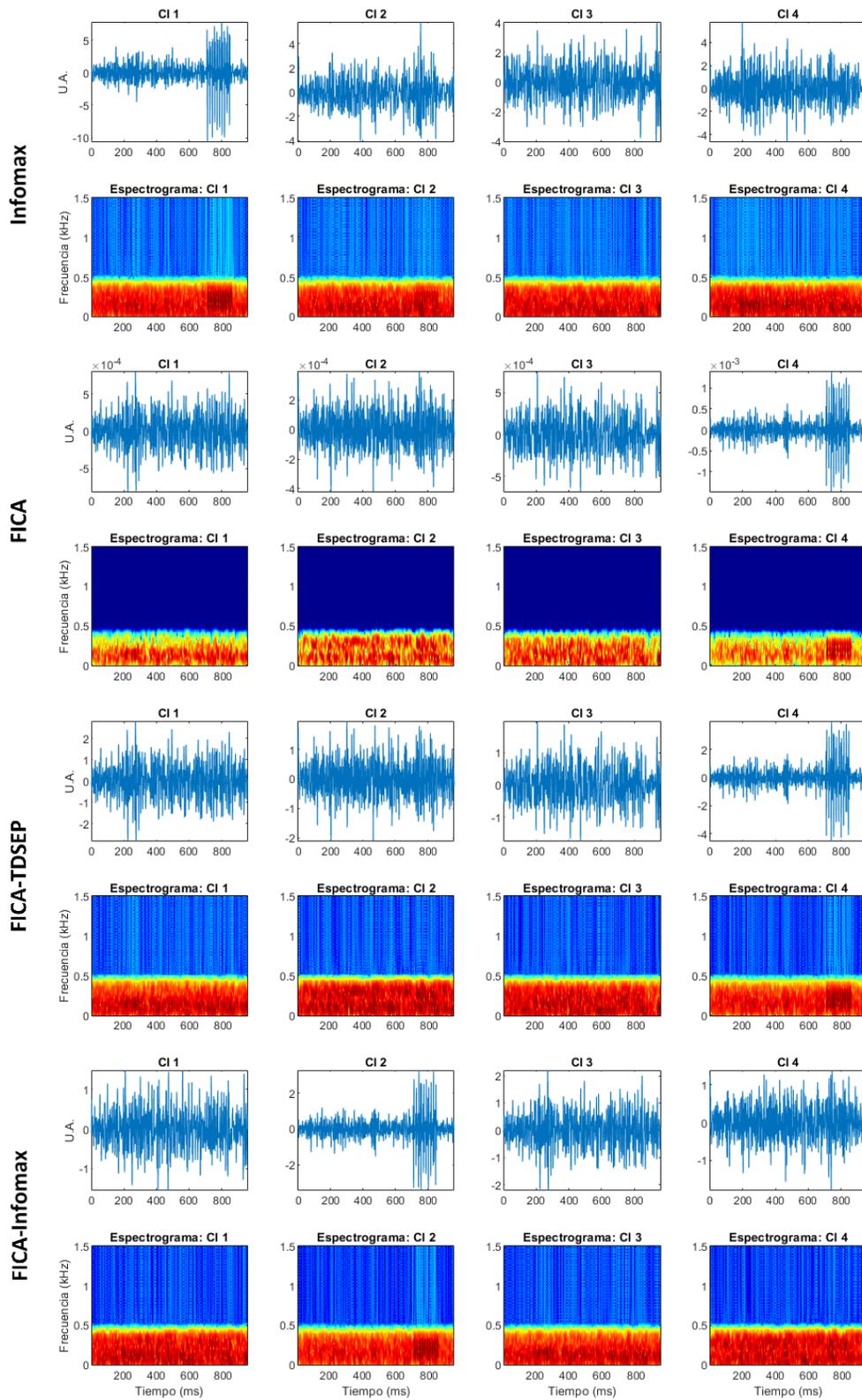
La fuente simulada de 10 ECg utilizada en esta prueba, llamada prueba 8g, se muestra junto a su espectrograma en la **figura A40**. En las **figuras A41** y **A42** se muestran los CIs y los componentes filtrados mediante FiltECg, respectivamente. En los CIs se aprecia un patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales en el CI 1 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 2 de FICA-Infomax, mientras que en los espectrogramas se encuentra este patrón en los componentes mencionados anteriormente y, además, en el CI 2 de Infomax. En los CIs-FiltECg se localiza el patrón de espigas en los mismos componentes descritos en las gráficas de los CIs tanto en las representaciones temporales como en los espectrogramas. Las espigas de este patrón se asocian a los ECg de la fuente simulada al considerar que comparten una ubicación, entre los 700 y 900 ms, y un contenido en frecuencia de alrededor de 200 Hz similar.



**Figura A40.** Fuente simulada de 10 ECg (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 10 ECg se emplearon en la prueba 8g.



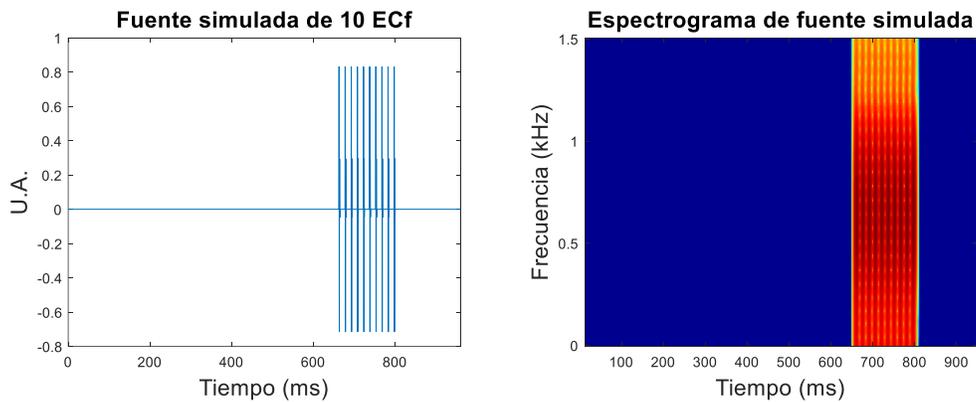
**Figura A41.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 8g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



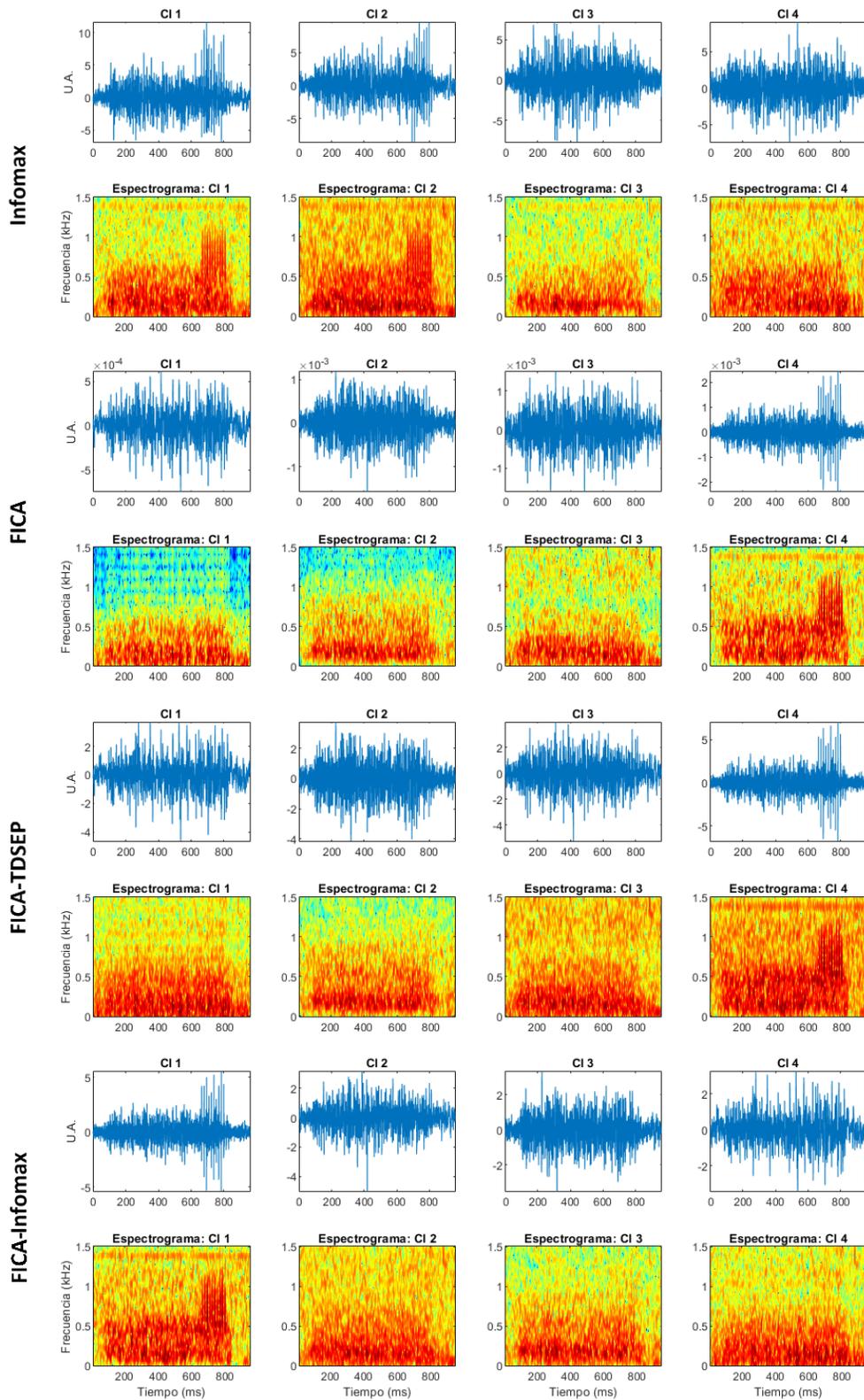
**Figura A42.** CIs presentados en la figura A41 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 8g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.8 Prueba 9 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC finos en la fase de inspiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Esta fuente simulada se muestra en la **figura A43** junto a su espectrograma. Los CIs estimados por los algoritmos de ICA y los CIs-FiltECf se muestran en las **figuras A44** y **A45**, respectivamente. Tanto en los CIs como en los CIs-FiltECf se observa el patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 1 de FICA-Infomax. Este patrón de espigas se ubica entre los 600 y los 850 ms y contiene información en frecuencia alrededor de 650 Hz; estas características son asociadas a los ECf de la fuente simulada.



**Figura A43.** Fuente simulada de 10 ECf (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 10 ECf se emplearon en la prueba 9.



**Figura A44.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 9: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.

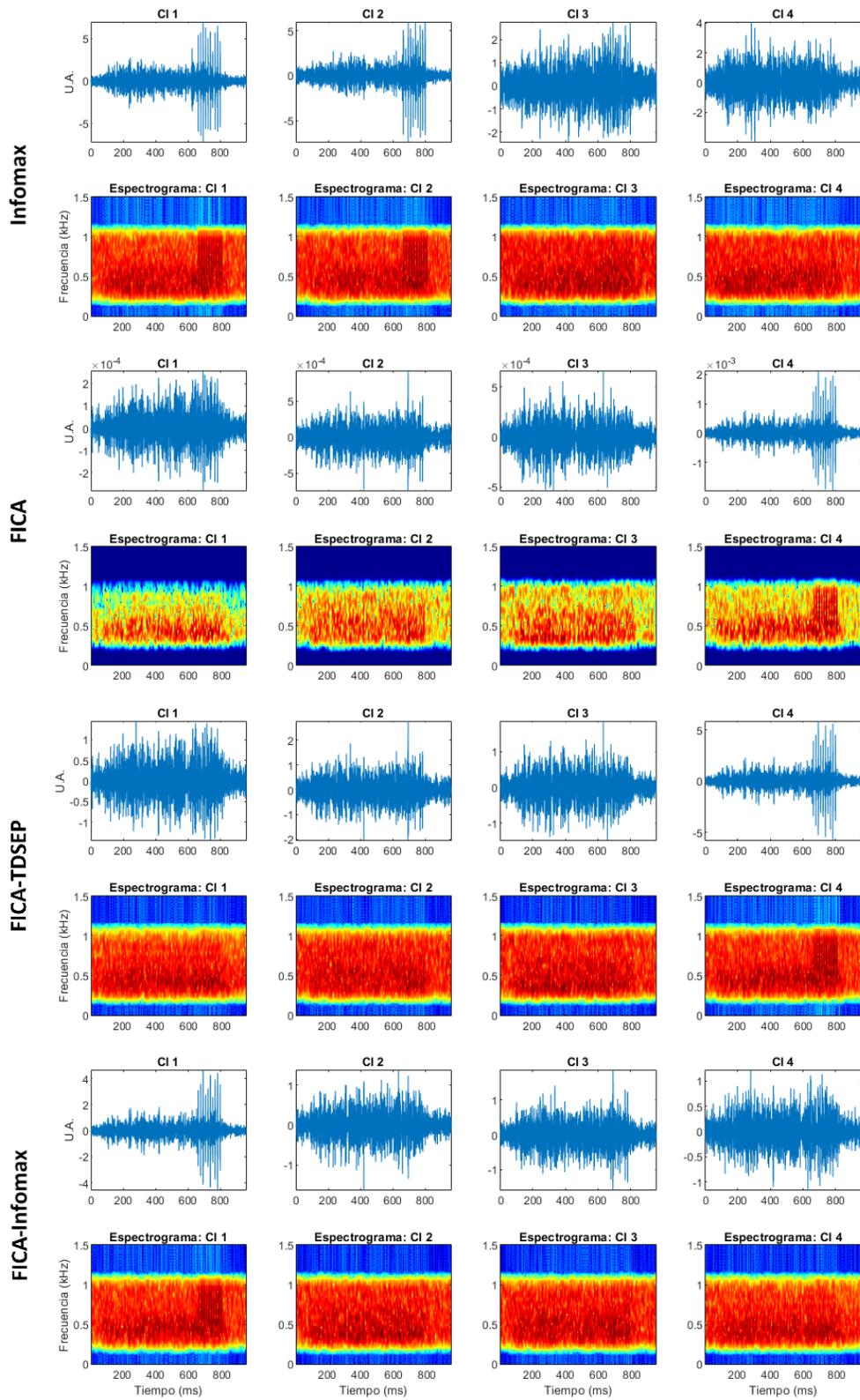
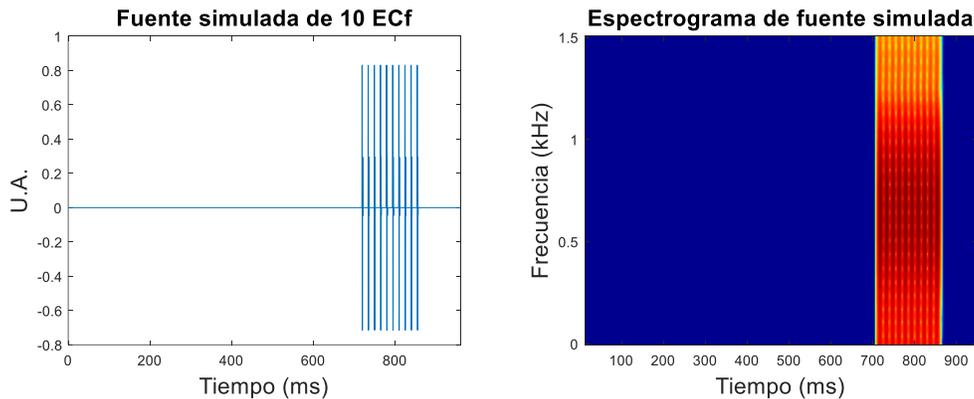


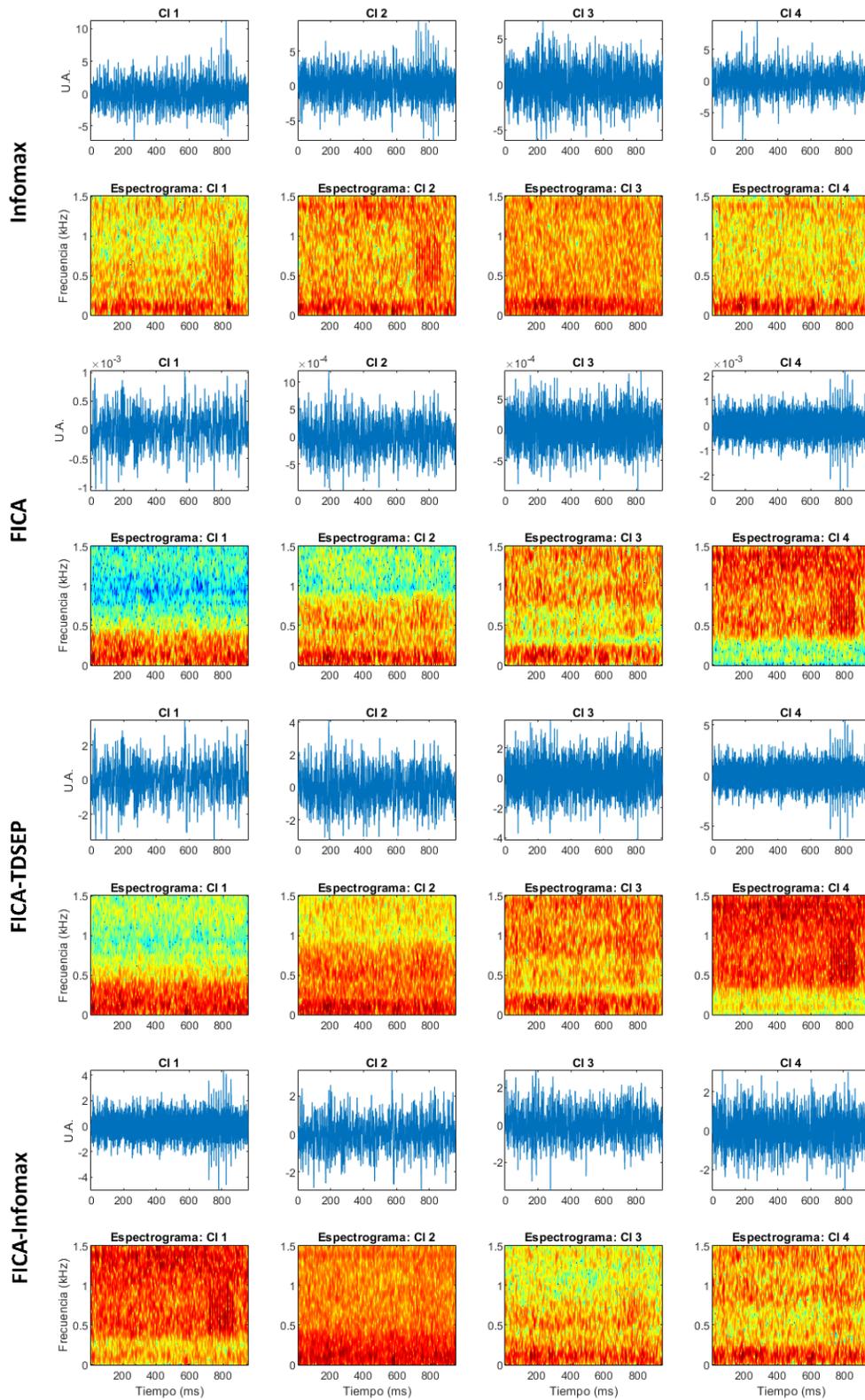
Figura A45. CIs presentados en la figura A44 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 9: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.9 Prueba 10 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

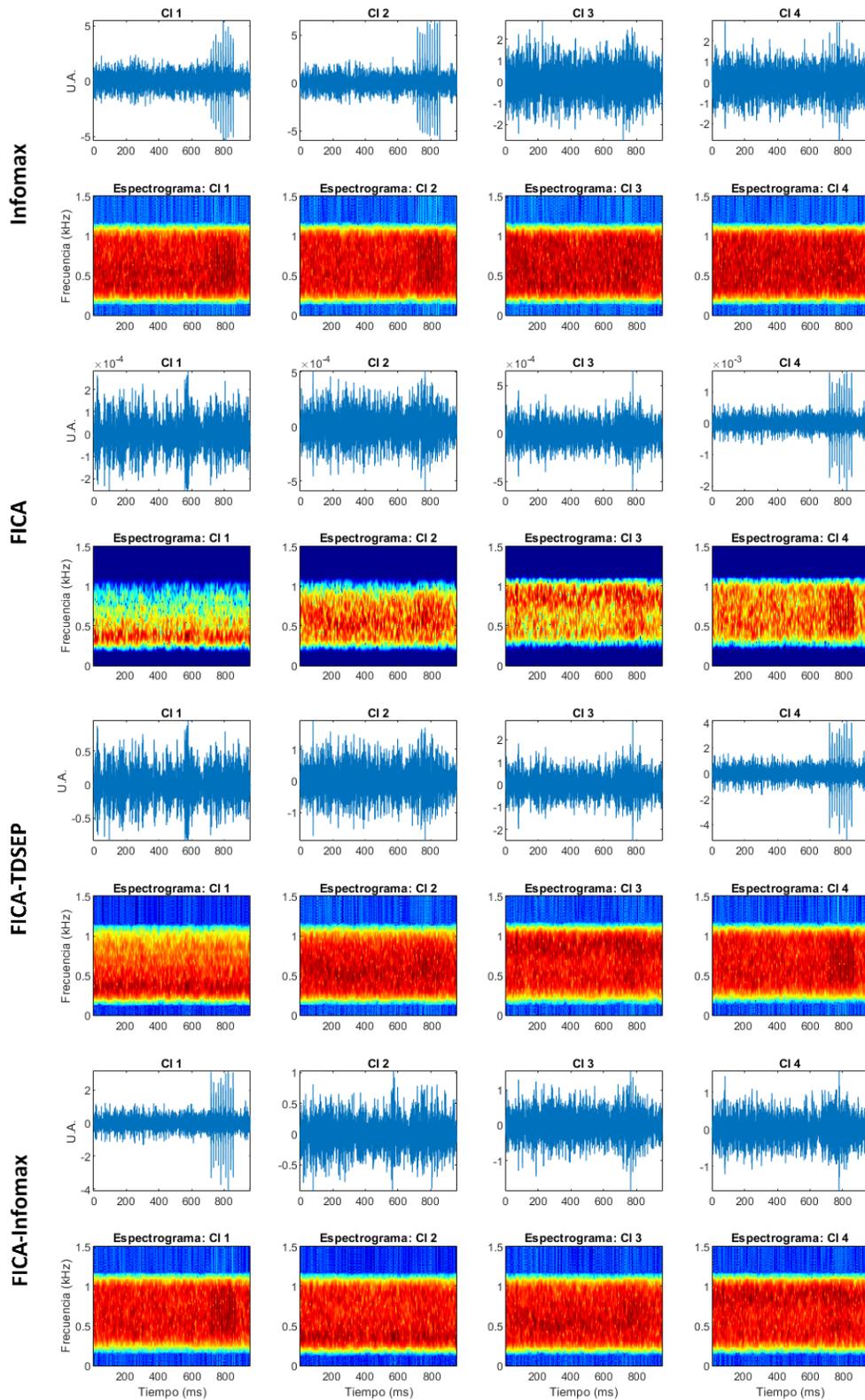
Para esta prueba se simuló una fuente con 10 EC finos en la etapa de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Esta fuente simulada se muestra en la **figura A46** junto a su espectrograma. Los CIs estimados en esta prueba se muestran en la **figura A47** mientras que los componentes filtrados mediante FiltECf se encuentran en la **figura A48**. En los CIs se aprecia un patrón de espigas asociado a EC tanto en las representaciones temporales como en los espectrogramas del CI 2 y ligeramente del CI 1 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 1 de FICA-Infomax. Los CIs-FiltECf muestran este patrón con claridad en ambas representaciones de los componentes anteriormente mencionados. Las espigas de este patrón se asocian con los ECf de la fuente simulada ya que ambos se localizan entre los 700 y 900 ms y contienen información en frecuencia alrededor de los 650 Hz.



**Figura A46.** Fuente simulada de 10 ECf (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 10 ECf se emplearon en la prueba 10.



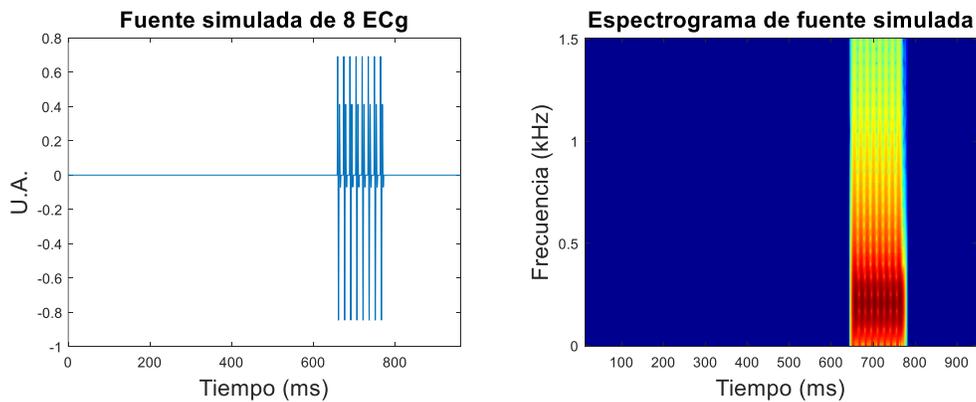
**Figura A47.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 10: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



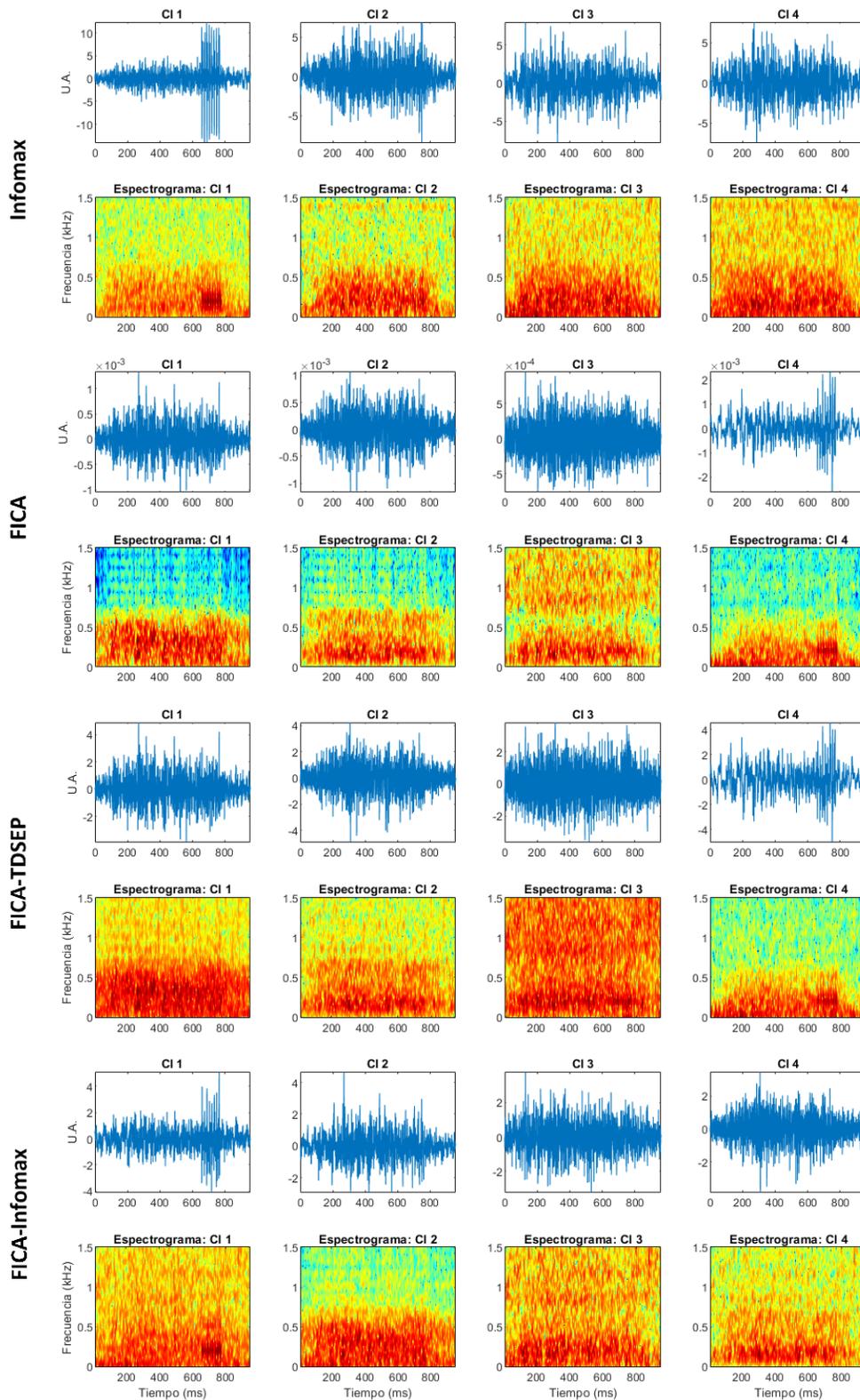
**Figura A48.** CIs presentados en la figura A47 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 10: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.10 Prueba 11 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

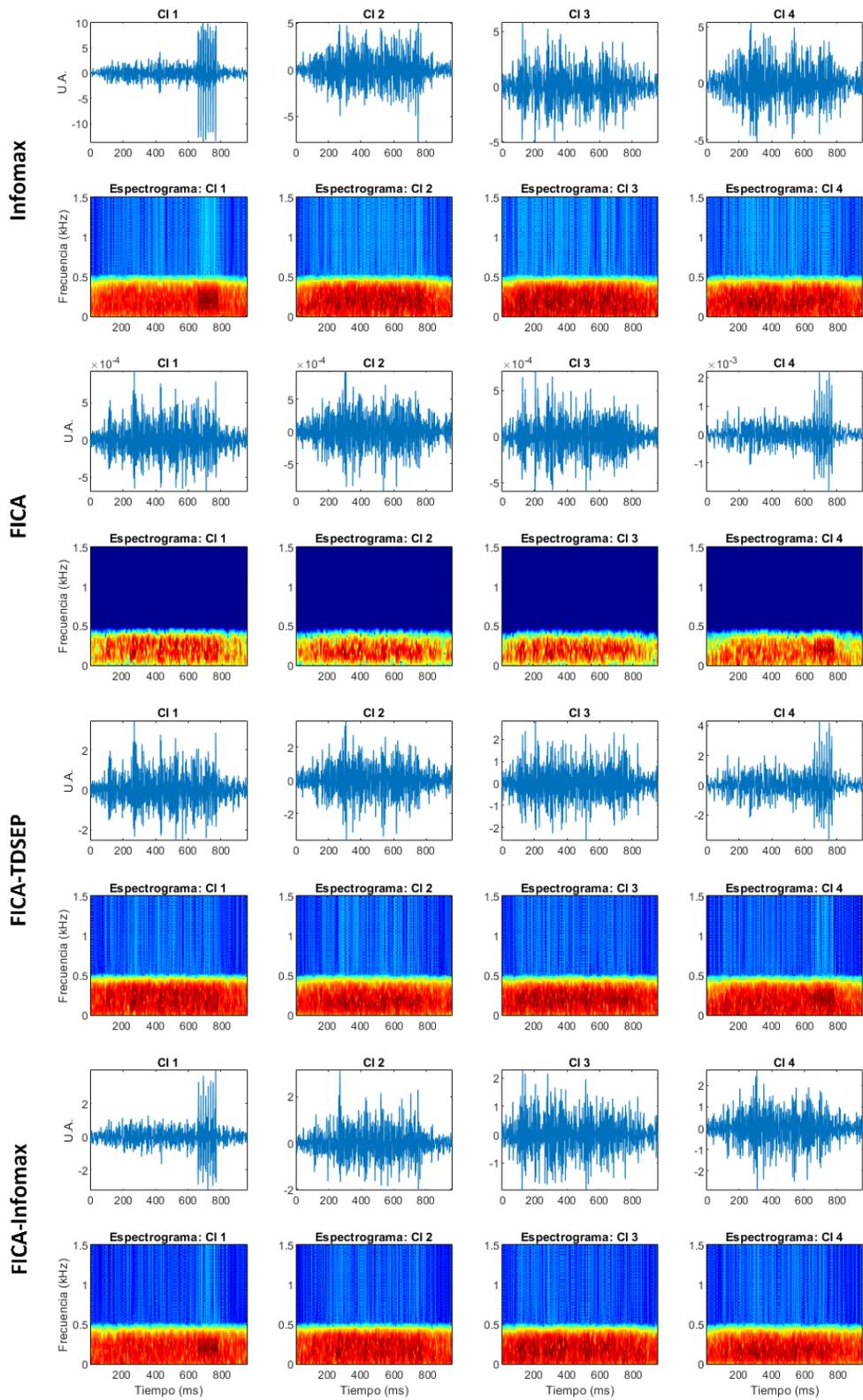
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC gruesos en la fase de inspiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PLC2, PM2 y PM3. Esta fuente simulada se muestra, junto a su espectrograma, en la **figura A49**. Los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA se muestran en la **figura A50** mientras que en la **figura A51** se encuentran los correspondientes CIs-FiltECg. Tanto los CIs como los CIs-FiltECg muestran el patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales y en los espectrogramas del CI 1 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 1 de FICA-Infomax. Este patrón, al igual que los ECg simulados, se localiza entre los 600 y 800 ms y posee un contenido en frecuencia alrededor de los 200 Hz.



**Figura A49.** Fuente simulada de 8 ECg (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 8 ECg se emplearon en la prueba 11.



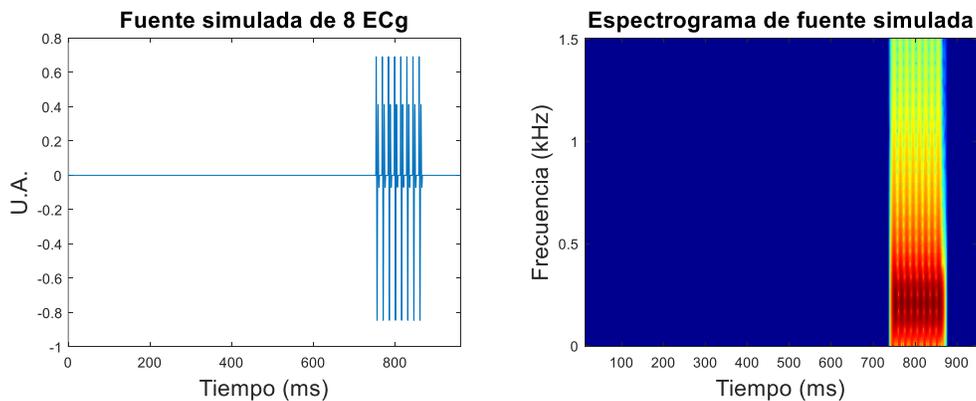
**Figura A50.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 11: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



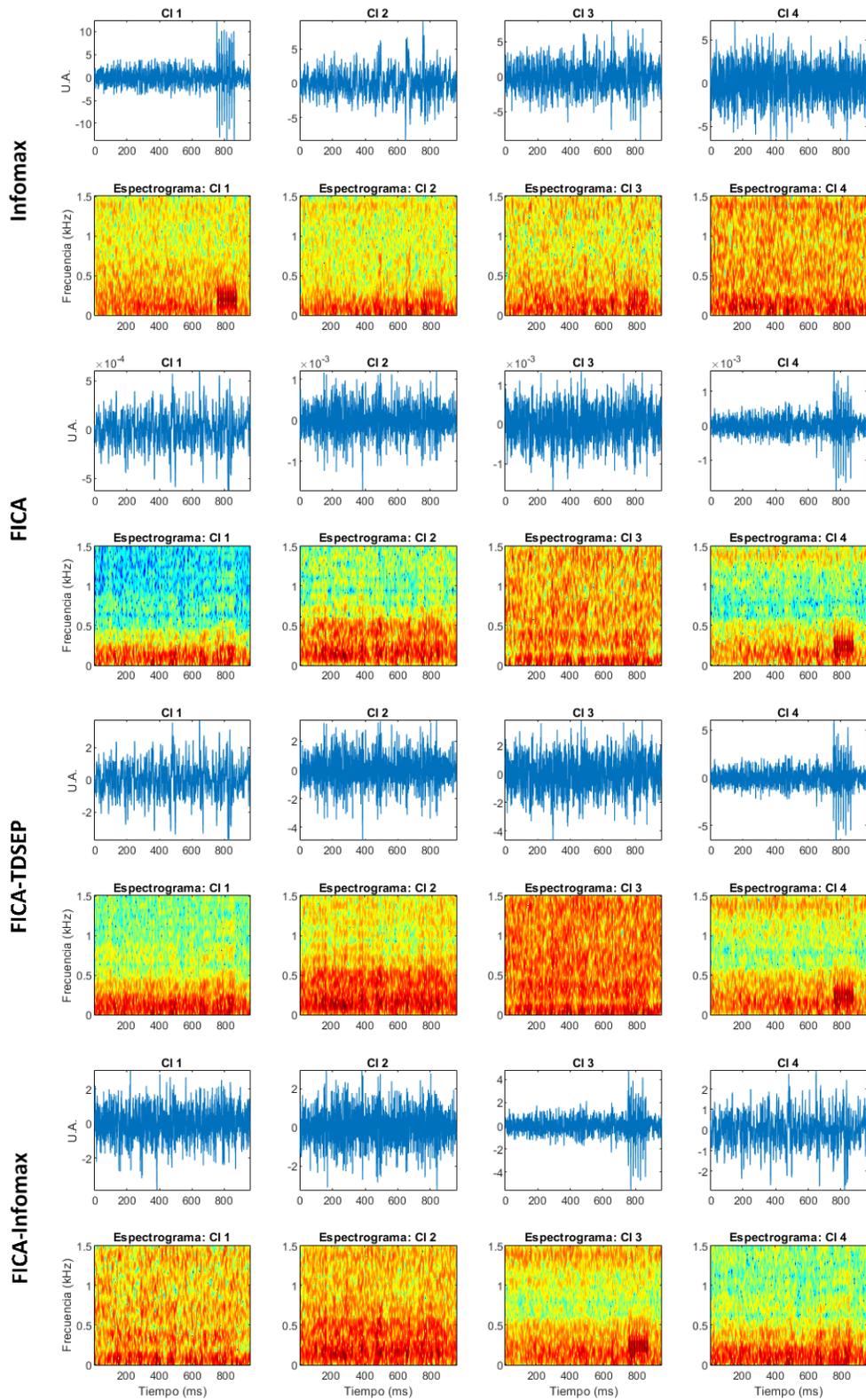
**Figura A51.** CIs presentados en la figura A50 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 11: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.11 Prueba 12 – Una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

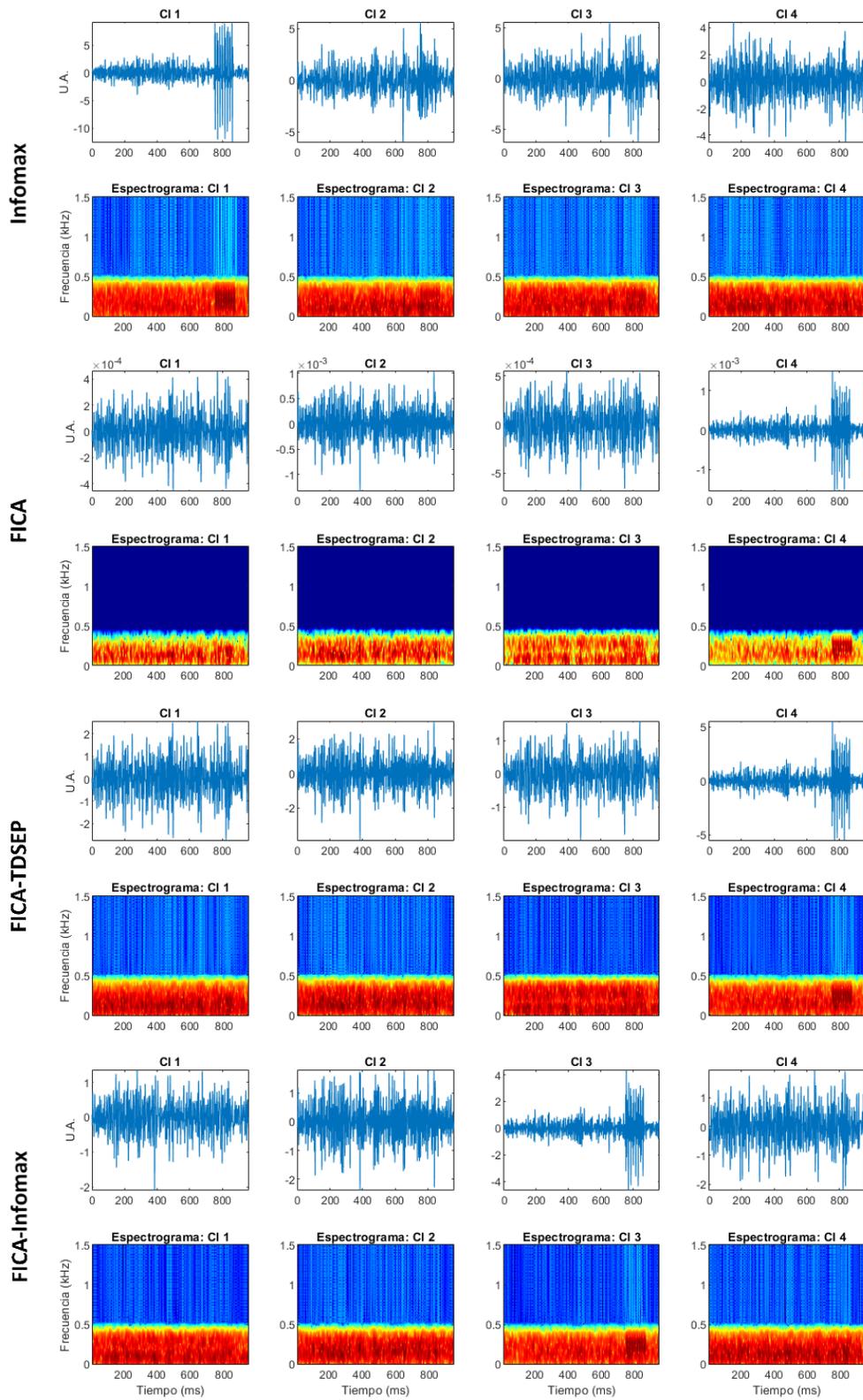
Para esta prueba se simuló una fuente con 8 EC gruesos en la etapa de espiración del CR. Esta fuente se insertó en el micrófono PLC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PLC2, PM2 y PM3. En la **figura A52** se muestra esta fuente simulada junto a su espectrograma. Los CIs obtenidos en la BSS mediante los algoritmos de ICA y los componentes filtrados por FiltECg se muestran en las **figuras A53 y A54**, respectivamente. En las gráficas de los CIs se observa un patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales del CI 1 de Infomax, de los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y del CI 3 de FICA-Infomax, mientras que en los espectrogramas se visualiza este patrón en estos mismos componentes y, además, con menor intensidad en los CI 2 y CI 3 de Infomax. Estos resultados se replican en las gráficas de los CIs-FiltECg, sin embargo, en el CI 3 de Infomax de la **figura A54** las espigas del patrón son más evidentes en la representación temporal. El patrón de espigas encontrado y los ECg de la fuente simulada se asocian debido a que ambos se localizan entre los 700 y 900 ms y contienen información en frecuencia alrededor de los 200 Hz.



**Figura A52.** Fuente simulada de 8 ECg (izquierda) junto a su espectrograma (derecha). Los 8 ECg se emplearon en la prueba 12.



**Figura A53.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 12: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



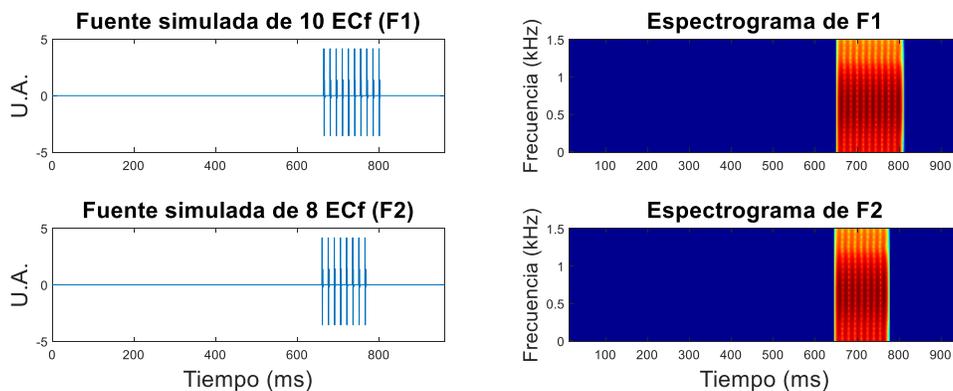
**Figura A54.** CIs presentados en la figura A53 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 12: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.12 Prueba 13 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación unidireccional

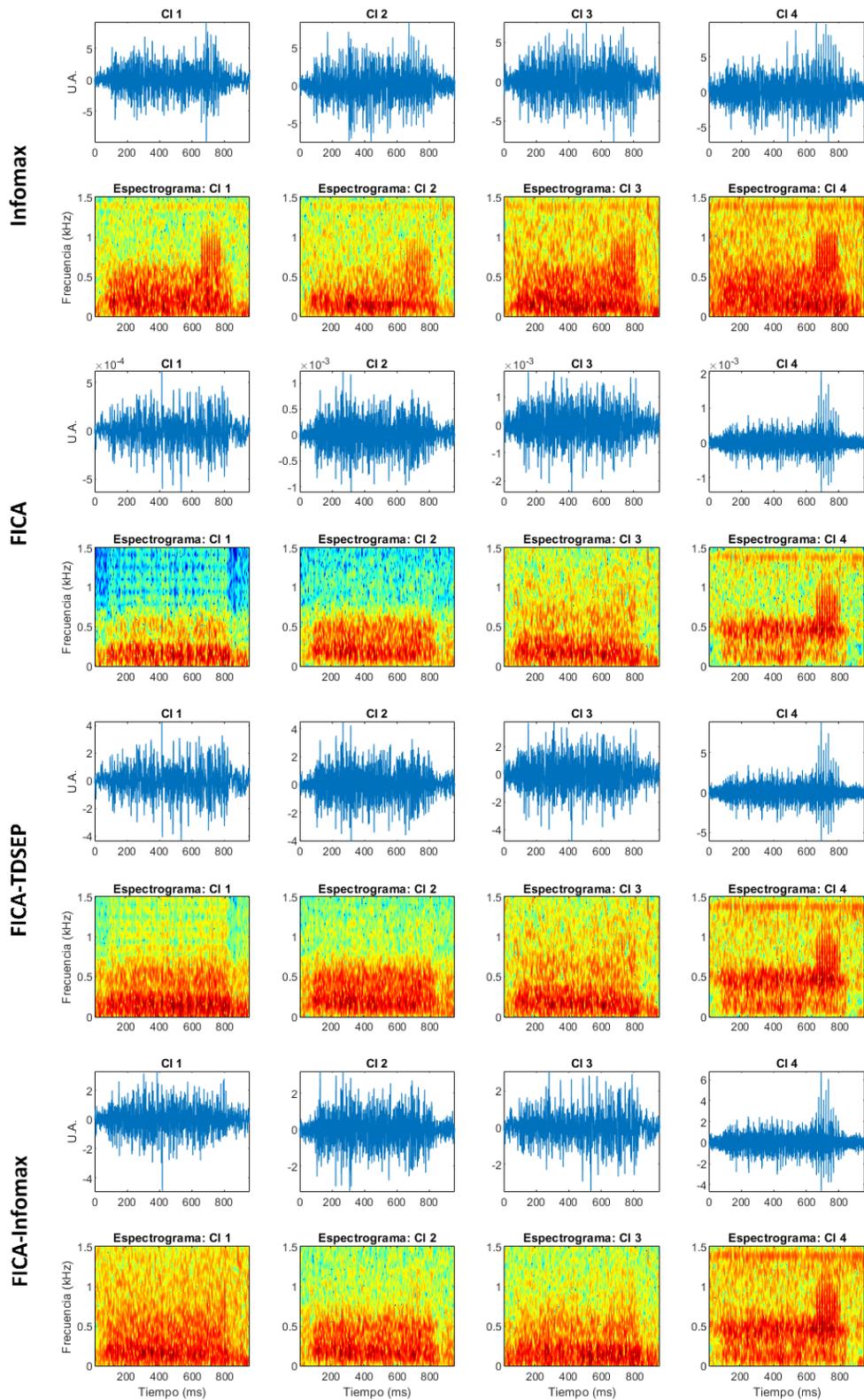
Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de inspiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRX4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRX3.

### A.12.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECf utilizadas en esta prueba, denominada prueba 13f, se muestran en la **figura A55** junto a sus respectivos espectrogramas. Los CIs obtenidos mediante los algoritmos de ICA se muestran en la **figura A56** mientras que los CIs-FiltECf se encuentran en la **figura A57**. En las representaciones temporales de los CIs se observa el patrón de espigas asociado a EC en los CI 4 de los cuatro algoritmos de ICA, mientras que en los espectrogramas se identifica este patrón en estos mismos CIs y, además, en los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax. En las representaciones temporales y espectrogramas de los componentes filtrados mediante FiltECf se observa el patrón de espigas en los CI 1, CI 2, CI 3 y CI 4 de Infomax, y en los CI 4 de FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. Las características de este patrón de espigas de los CI 1 y CI 4 de Infomax, y de los CI 4 de FICA, de FICA-TDSEP y de FICA-Infomax, coinciden con aquellas de los ECf de F1, i.e., se localizan entre los 650 y 850 ms y tienen un contenido en frecuencia alrededor de 650 Hz. En cambio, el patrón de espigas de los CI 2 y CI 3 de Infomax se asocia a los ECf simulados de F2, ya que este patrón se ubica entre los 600 y 800 ms y posee contenido en frecuencia alrededor de 650 Hz.



**Figura A55.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECf, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 13f.



**Figura A56.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 13f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.

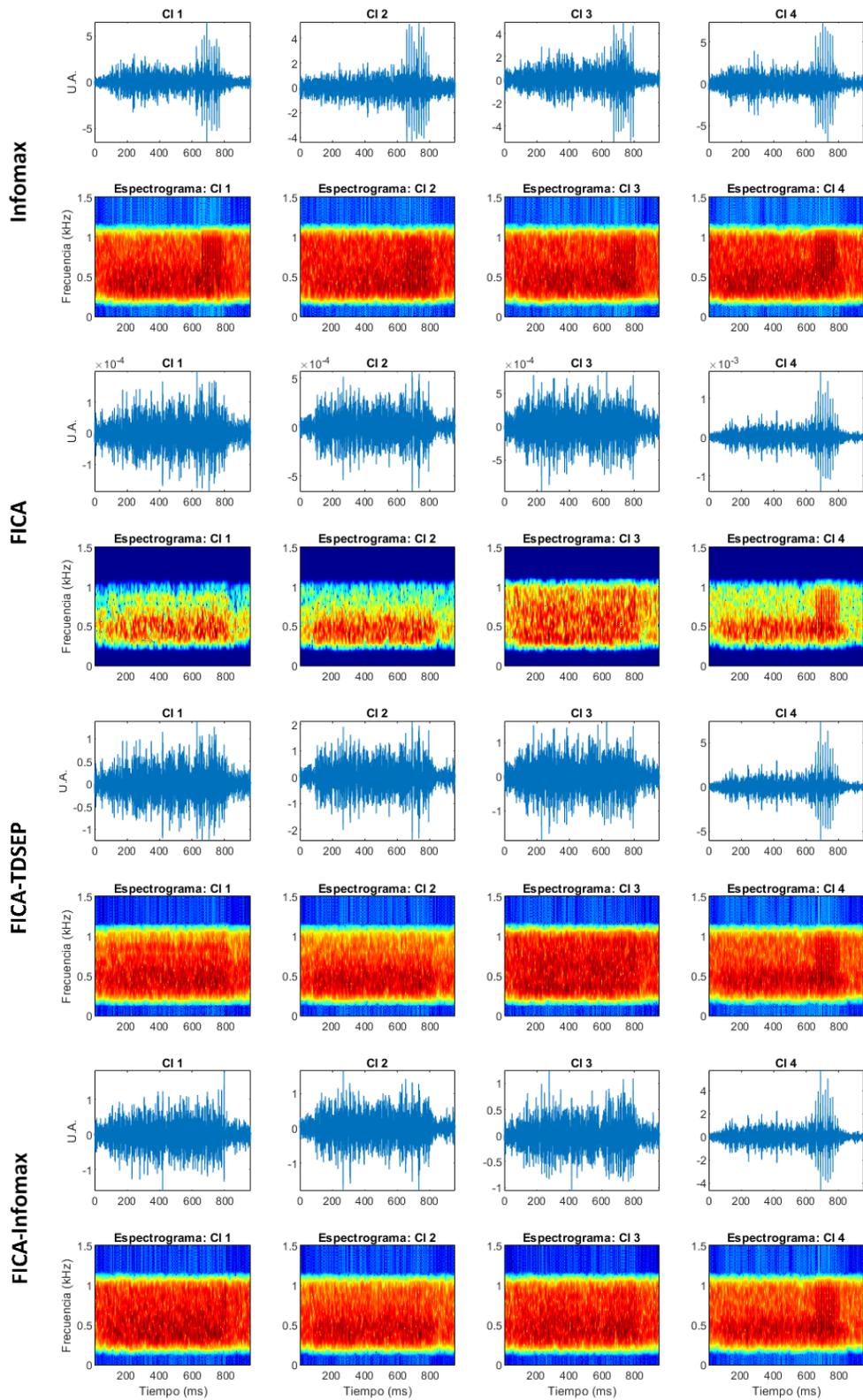
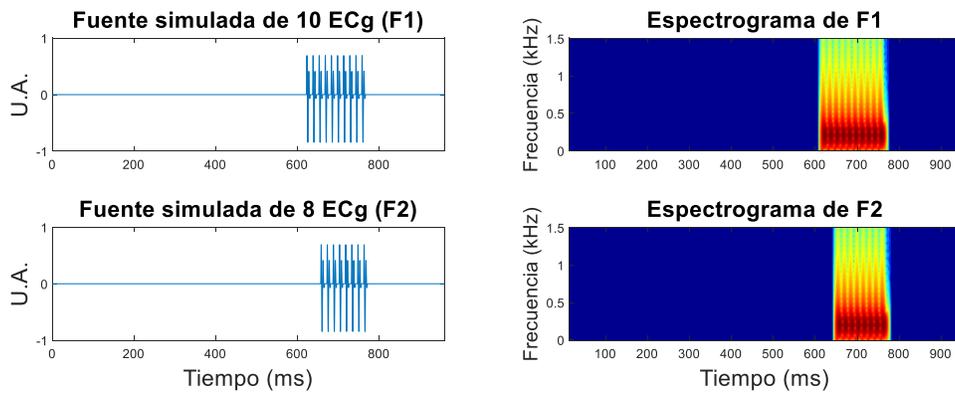


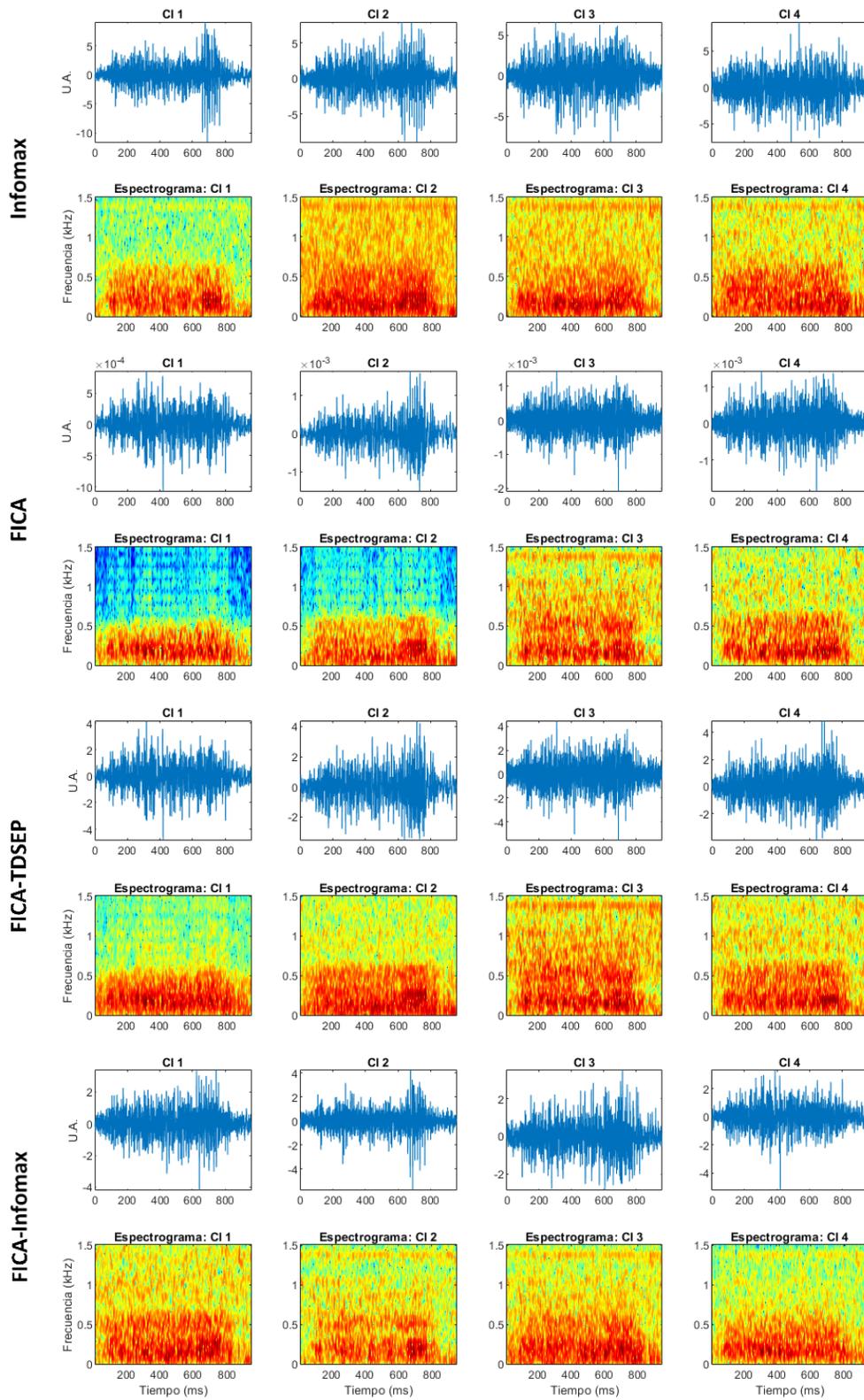
Figura A57. CIs presentados en la figura A56 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 13f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.12.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

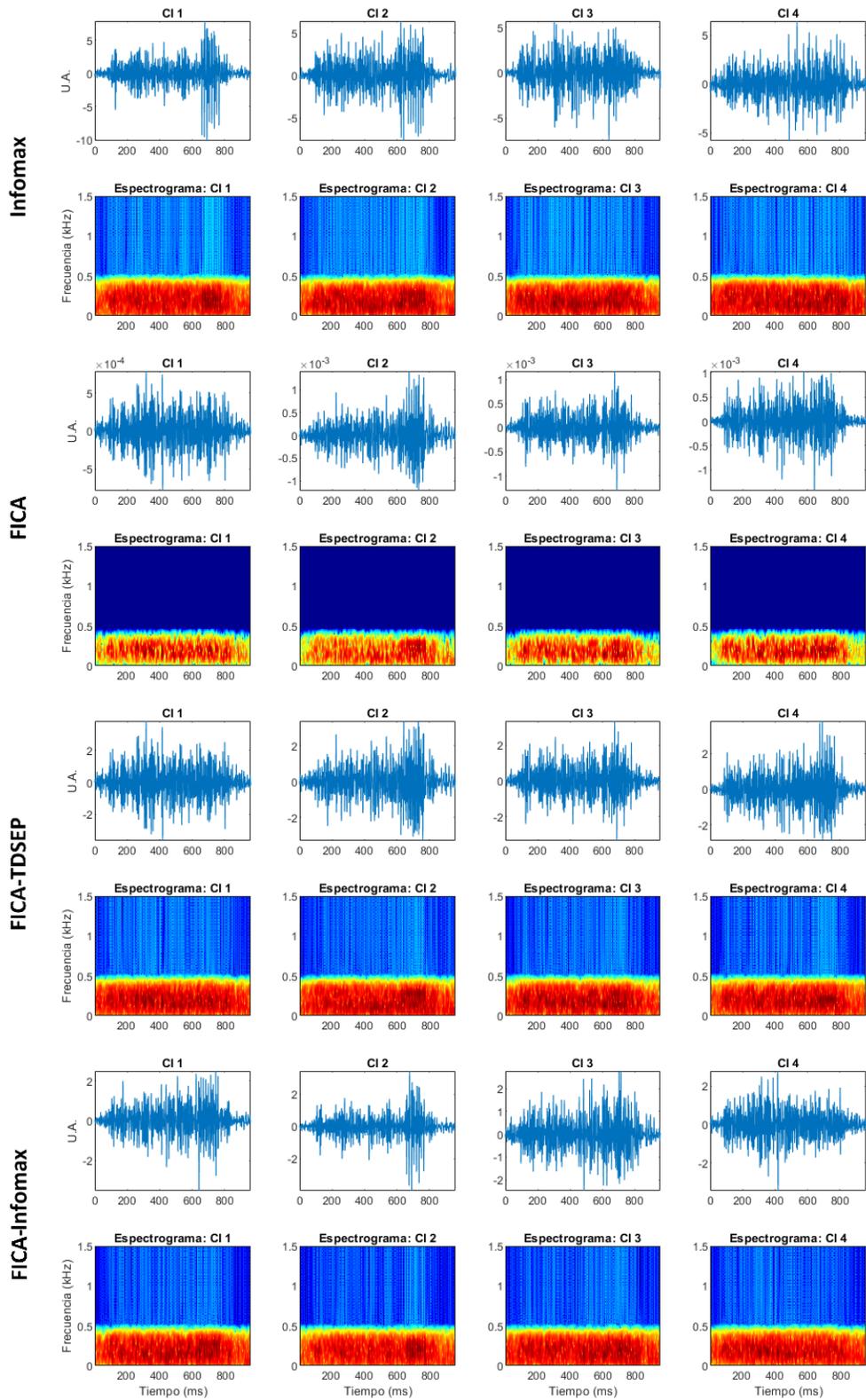
Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECg utilizadas en esta prueba, llamada prueba 13g, se muestran en la **figura A58** junto a sus respectivos espectrogramas. Los CIs obtenidos mediante los algoritmos de ICA y los CIs-FiltECg se muestran en las **figuras A59 y A60**, respectivamente. En ambas figuras, se observa el patrón de espigas asociado a los EC en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los CI 1 y CI 2 de Infomax, del CI 2 de FICA, de los CI 2 y CI 4 de FICA-TDSEP, y de los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. El patrón de espigas de los CI 2 de Infomax, FICA y FICA-TDSEP, y del CI 1 de FICA-Infomax se encuentra, al igual que los ECg de la fuente simulada F1, ubicado entre los 600 y 800 ms y contiene información en frecuencia alrededor de los 200 Hz. Al igual que los ECg de la fuente simulada F2, el patrón de espigas del CI 1 de Infomax, del CI 4 de FICA-TDSEP y del CI 2 de FICA-Infomax se localiza entre los 650 y 800 ms con información en frecuencia alrededor de los 200 Hz.



**Figura A58.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECg, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 13g.



**Figura A59.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 13g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



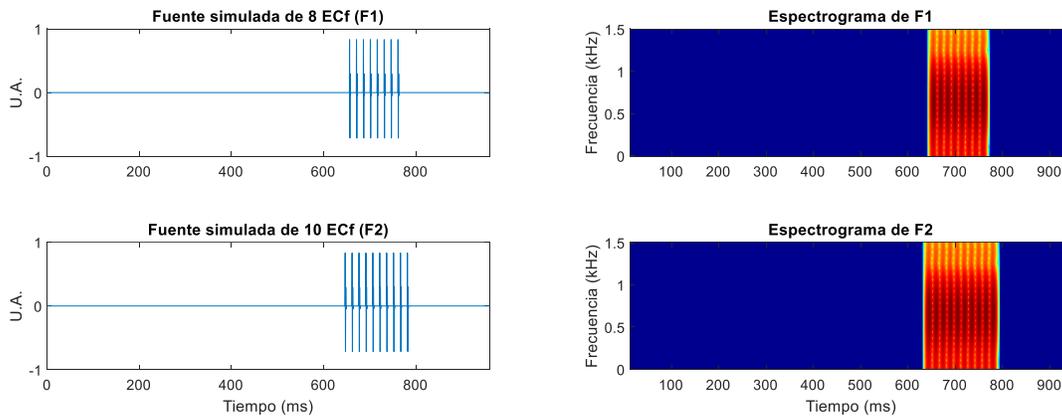
**Figura A60.** CIs presentados en la figura A59 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 13g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.13 Prueba 14 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación unidireccional

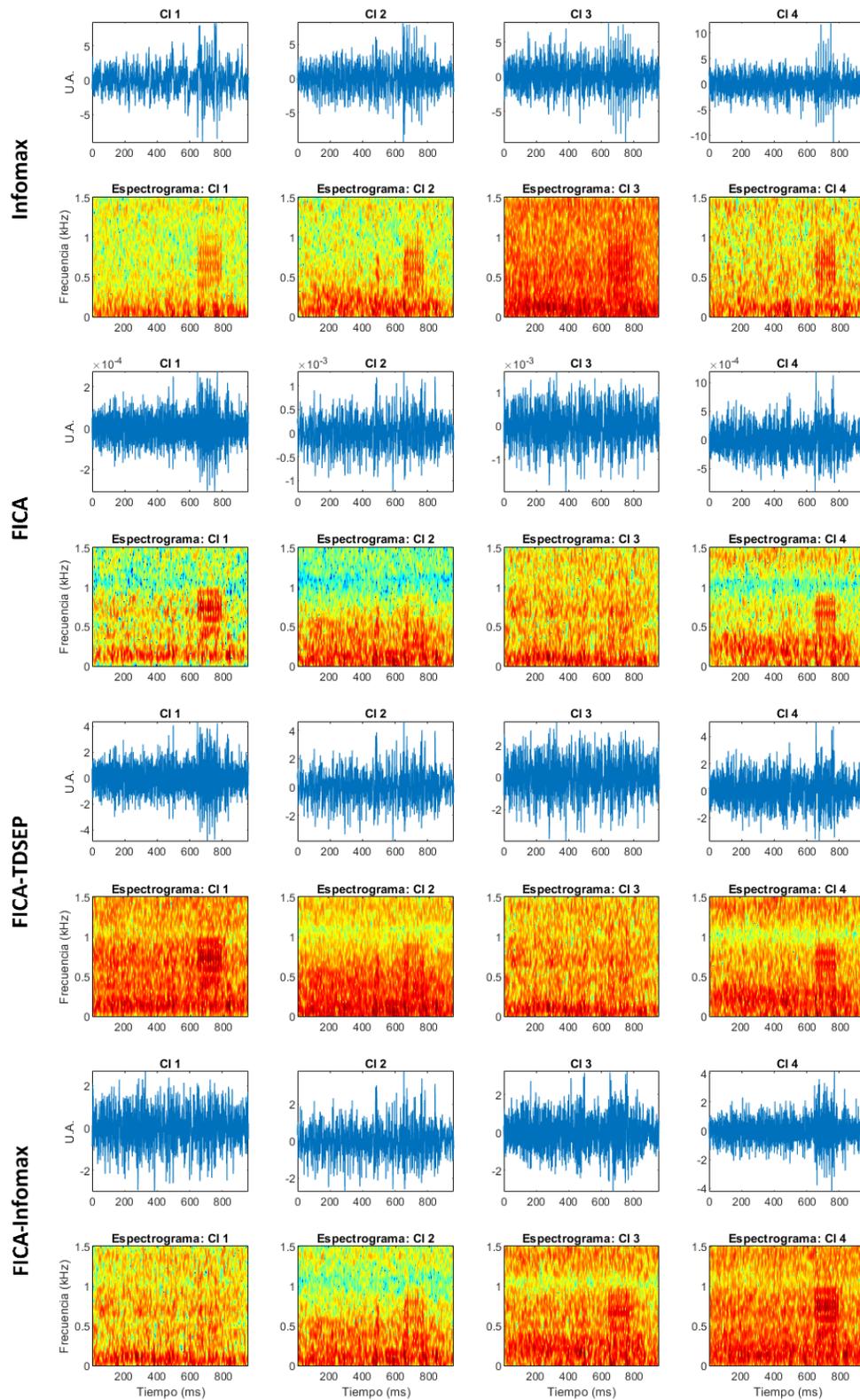
Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la etapa de espiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 8 EC, se insertó en el micrófono PLC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PM2. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 10 EC, se insertó en el micrófono PLC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PM3.

#### A.13.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

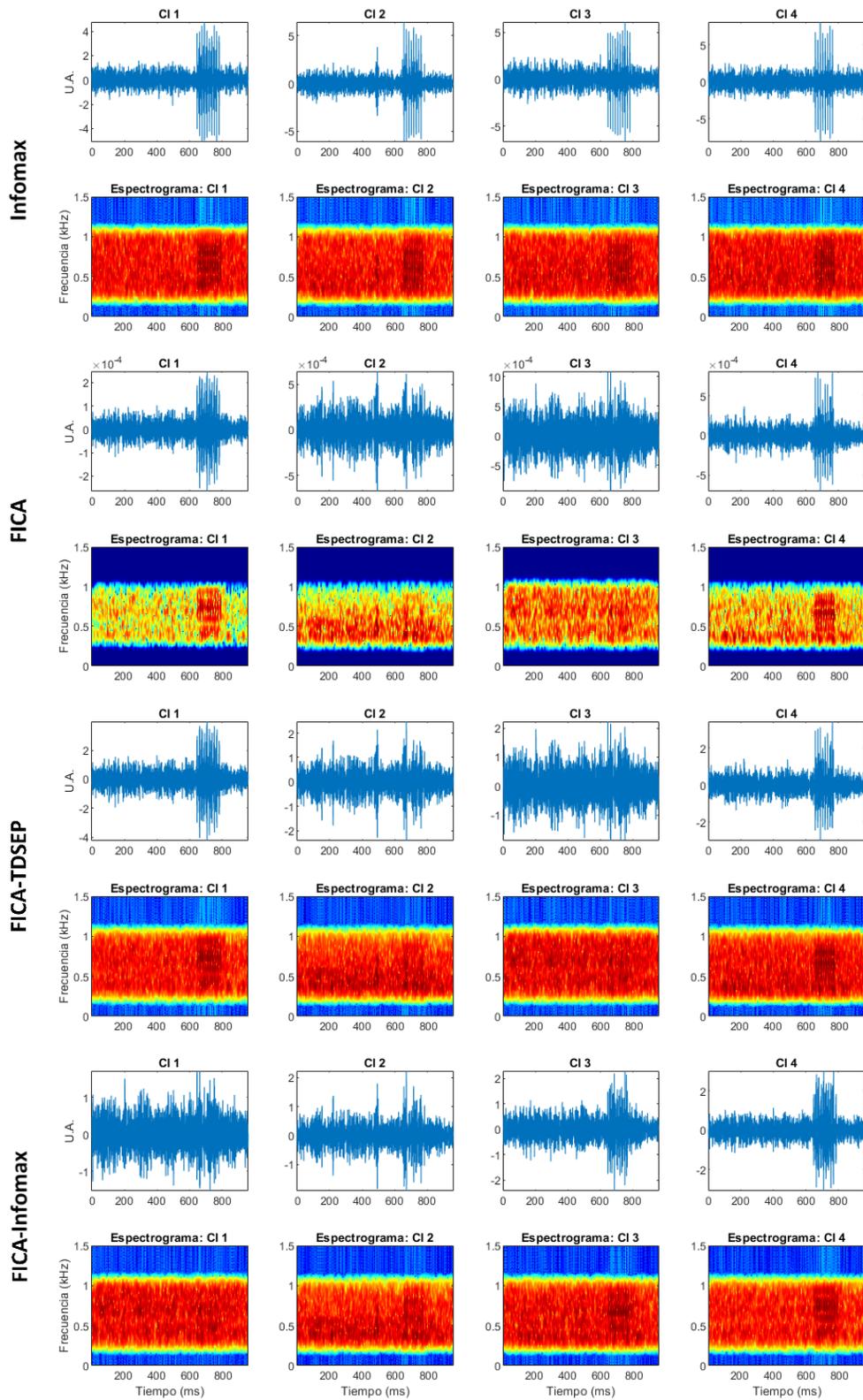
Las fuentes simuladas de 8 y 10 ECf utilizadas en esta prueba, definida como prueba 14f, se muestran en la **figura A61** junto a sus respectivos espectrogramas. En las **figuras A62 y A63** se muestran los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA y los correspondientes CIs-FiltECf. En las gráficas de los CIs, se aprecian patrones de espigas asociados a EC en las representaciones temporales del CI 1, CI 3 y CI 4 de Infomax, de los CI 1 de FICA y FICA-TDSEP y en el CI 4 de FICA-Infomax. En la gráficas de los espectrogramas se localizan estos patrones en los CI 1, CI 2, CI 3 y CI 4 de Infomax, en los CI 1 y CI 4 de FICA y FICA-TDSEP, y en los CI 2, CI 3 y CI 4 de FICA-Infomax. En las gráficas de los CIs-FiltECf, los patrones de espigas se encuentran en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los cuatro CIs de Infomax, de los CI 1 y CI 4 de FICA y FICA-TDSEP, y de los CI 2, CI 3 y CI 4 de FICA-Infomax. Las espigas del patrón observado en los CI 1 y CI 3 de Infomax, en los CI 1 de FICA y FICA-TDSEP, y en el CI 4 de FICA-Infomax se asocian con los ECf de la fuente simulada F1 ya que ambos se encuentran ubicados entre los 650 y 800 ms con información en frecuencia alrededor de 650 Hz. Por su parte, el patrón encontrado en los CI 2 y CI 4 de Infomax, en



**Figura A61.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 8 y 10 ECf, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 14f.



**Figura A62.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 14f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.

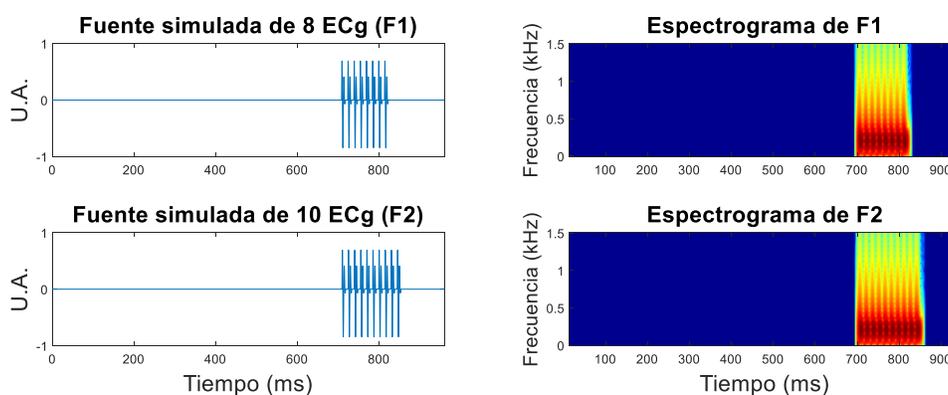


**Figura A63.** CIs presentados en la figura A62 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 14f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

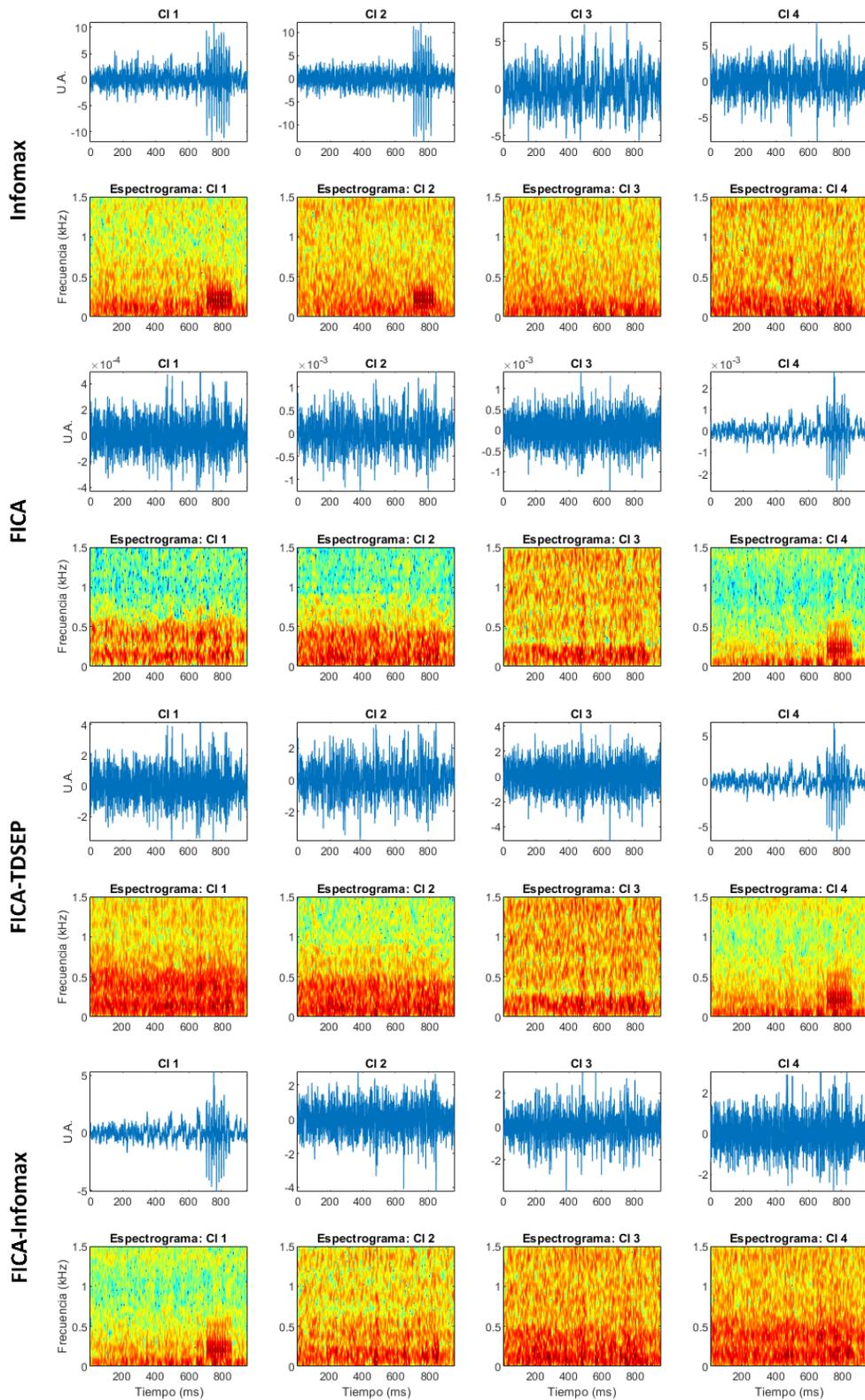
los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax, se relaciona con los ECf de la fuente simulada F2 ya que ambos se ubican entre los 600 y 800 ms y contienen información en frecuencia alrededor de los 650 Hz.

### A.13.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

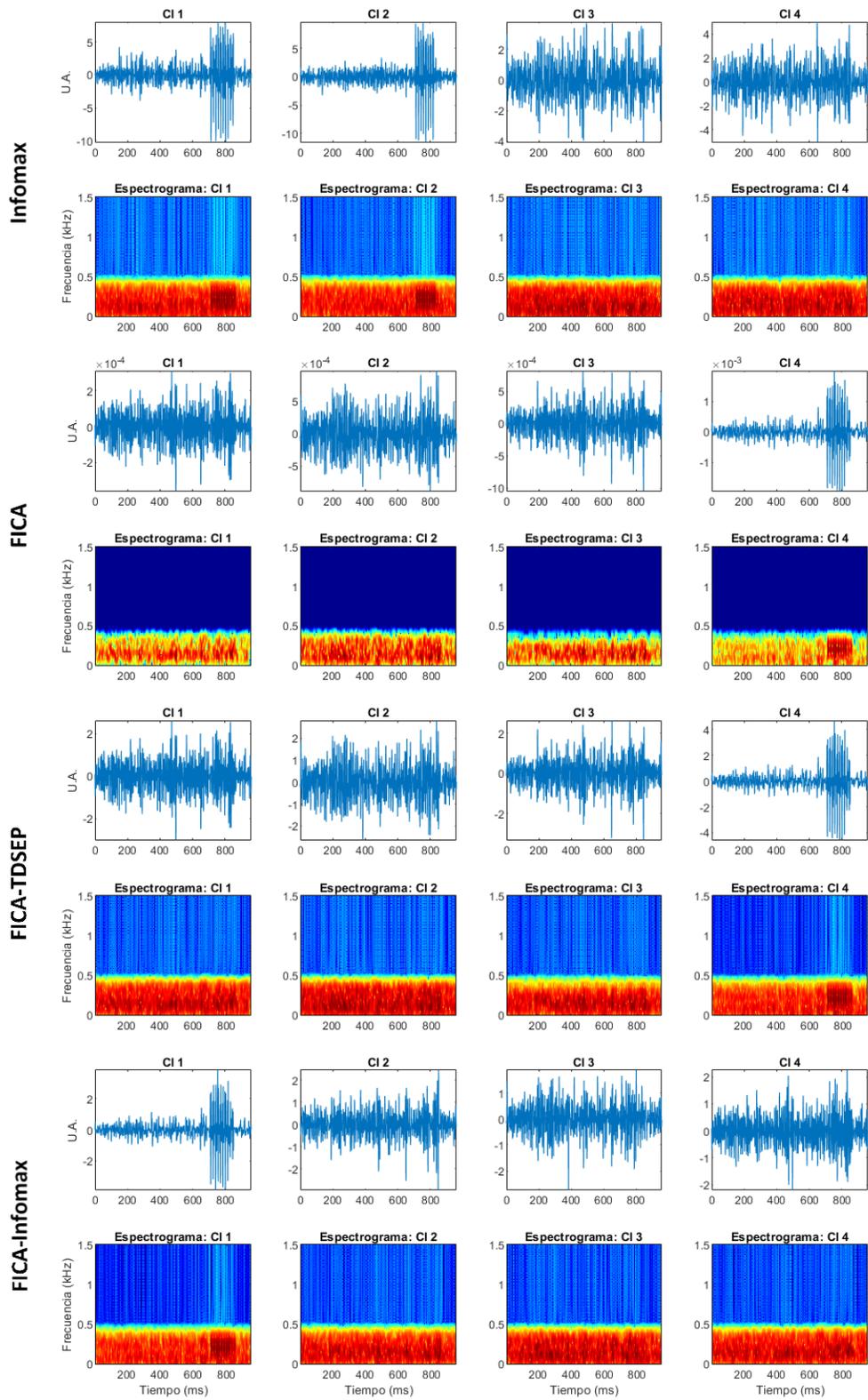
Las fuentes simuladas de 8 y 10 ECg utilizadas en esta prueba, denominada prueba 14g, se muestran junto a sus espectrogramas en la **figura A64**. Los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA se muestran en la **figura A65** mientras que los CIs-FiltECg se encuentran en la **figura A66**. En ambas figuras se aprecian patrones de espigas asociados a EC en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 1 de FICA-Infomax. Las espigas del patrón observado en el CI 2 de Infomax se asocian a los ECg de la fuente simulada F1 debido a su localización alrededor de los 700 y 850 ms y a su contenido en frecuencia alrededor de los 200 Hz. En cambio, las espigas del patrón encontrado en el CI 1 de Infomax, de los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP, y del CI 1 de FICA-Infomax, se asocian a los ECg de la fuente simulada F2 ya que ambos se localizan entre los 700 y 900 ms y poseen información en frecuencia alrededor de los 200 Hz.



**Figura A64.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 8 y 10 ECg, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 14g.



**Figura A65.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 14g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



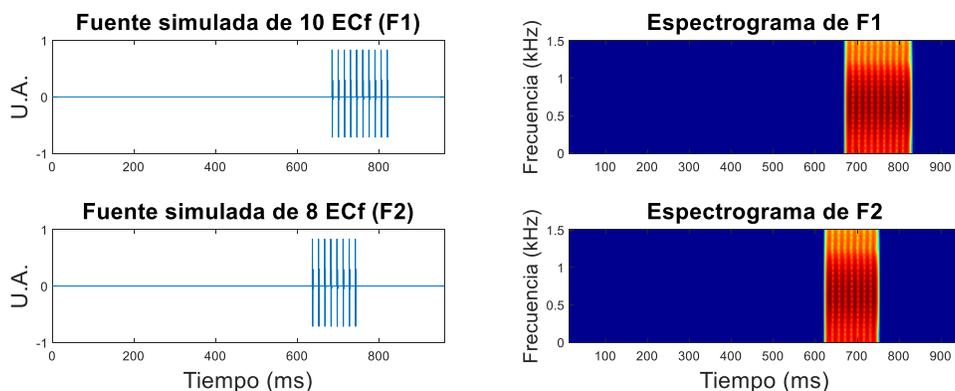
**Figura A66.** CIs presentados en la figura A65 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 14g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.14 Prueba 15 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

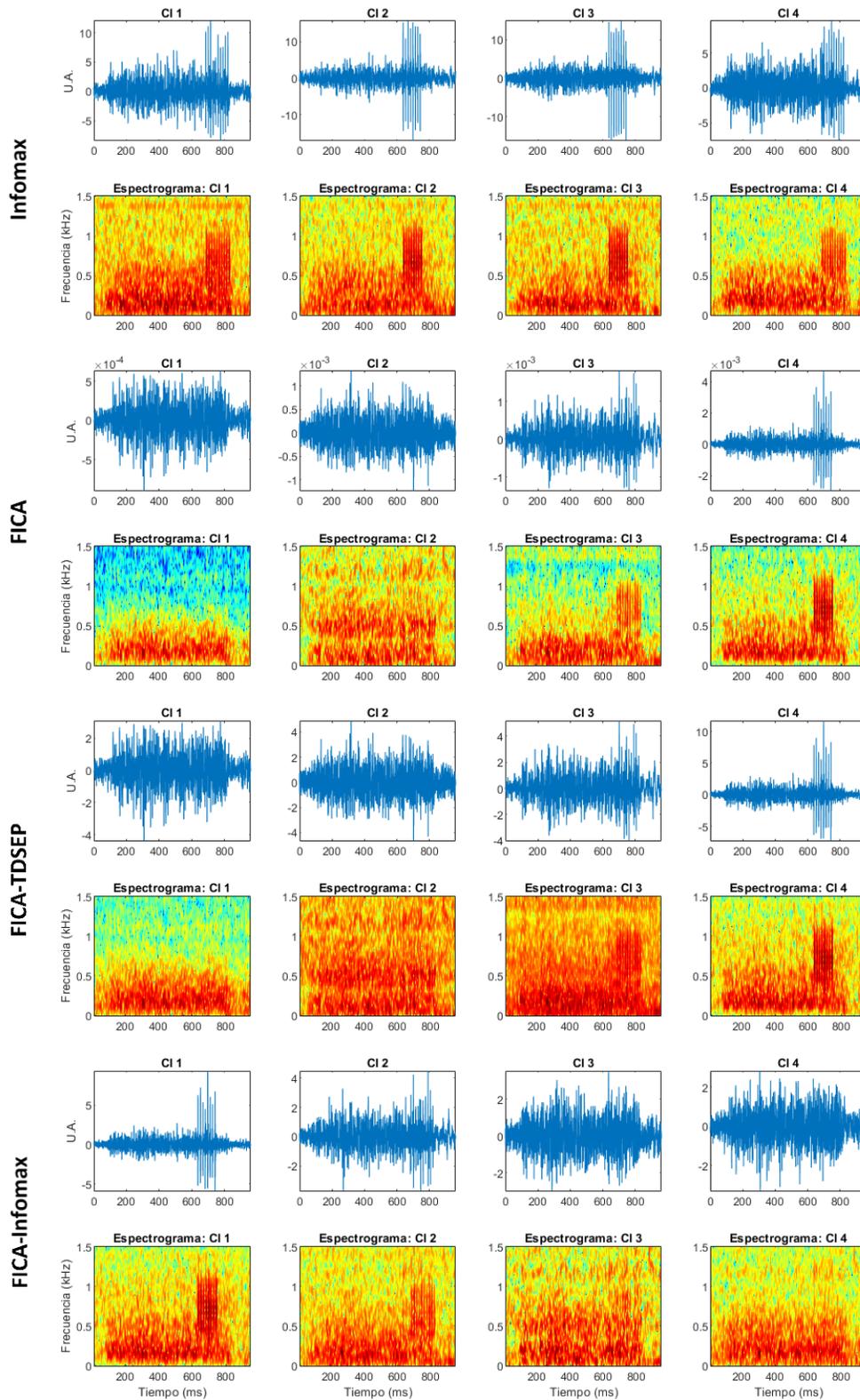
Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de inspiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PM3, PM4 y PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRC3. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

### A.14.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

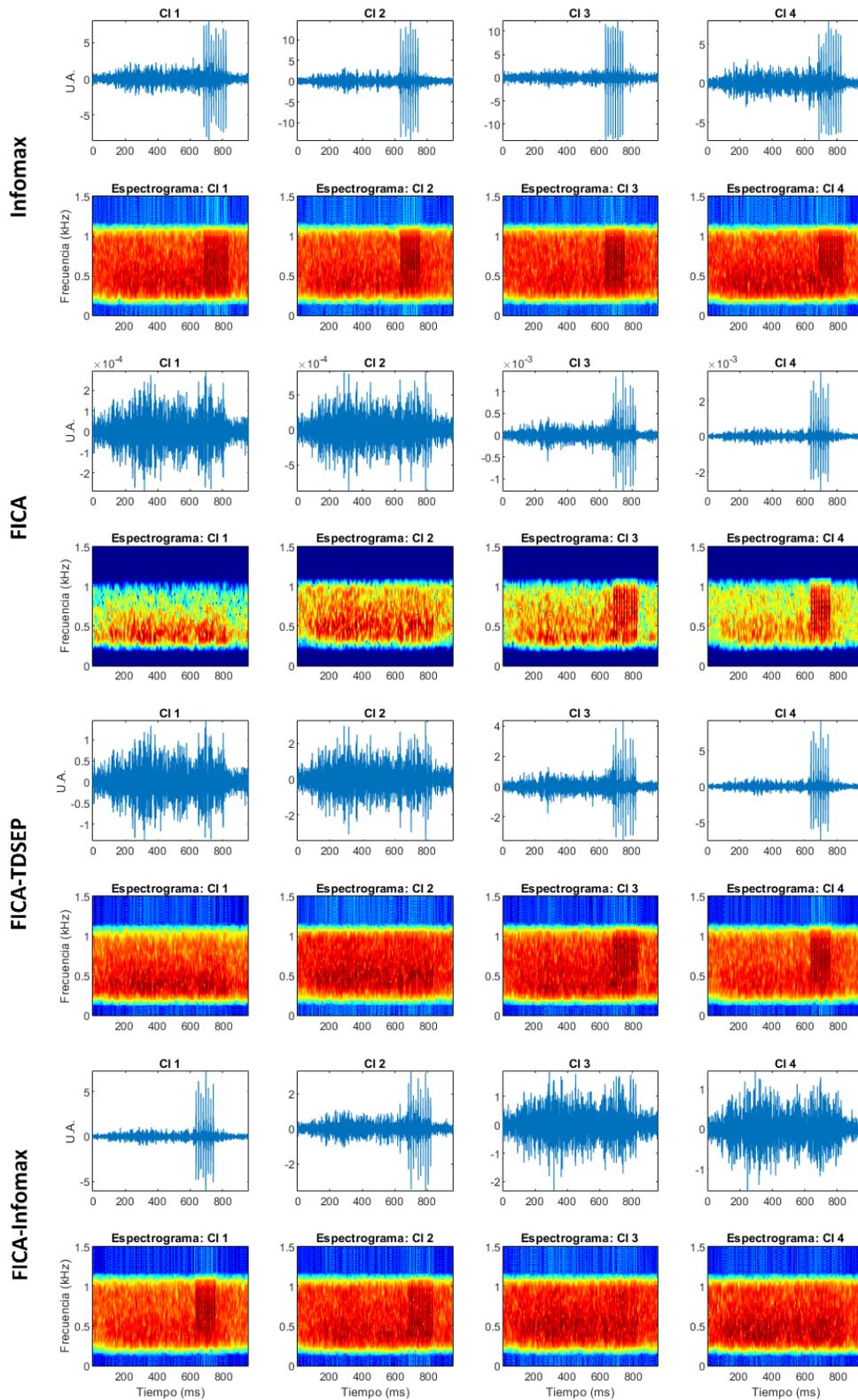
Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECf utilizadas en esta prueba, denominada prueba 15f, se muestran junto a sus espectrogramas en la **figura A67**. Los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA y los CIs filtrados mediante FilteCf se muestran en las **figuras A68 y A69**, respectivamente. En las gráficas de los CIs se aprecia el patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales de los cuatros CIs de Infomax, en los CI 4 de FICA y FICA-TDSEP, y en los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax, mientras que los espectrogramas muestran espigas en estos mismos componentes y, además, en los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP. Los CIs-FiltECf contienen al patrón de espigas en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los CI 1, CI 2, CI 3 y CI 4 de Infomax, en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. El patrón de los CI 1 y CI 4 de Infomax, los CI 3 de FICA y de FICA-TDSEP, y el CI 2 de FICA-Infomax, se encuentra ubicado entre los 650 y 850 ms y posee información en frecuencia alrededor de los 650 Hz, lo que asemeja a las características de los ECf de la fuente simulada F1. El patrón de espigas de los CI 2 y CI 3 de Infomax, de los CI 4 de FICA y de FIAC-TDSEP y el CI 1 de FICA-Infomax, al igual que los ECf de la fuente simulada F2, se ubica entre los 600 y 750 ms con contenido en frecuencia alrededor de los 650 Hz.



**Figura A67.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECf, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 15f.



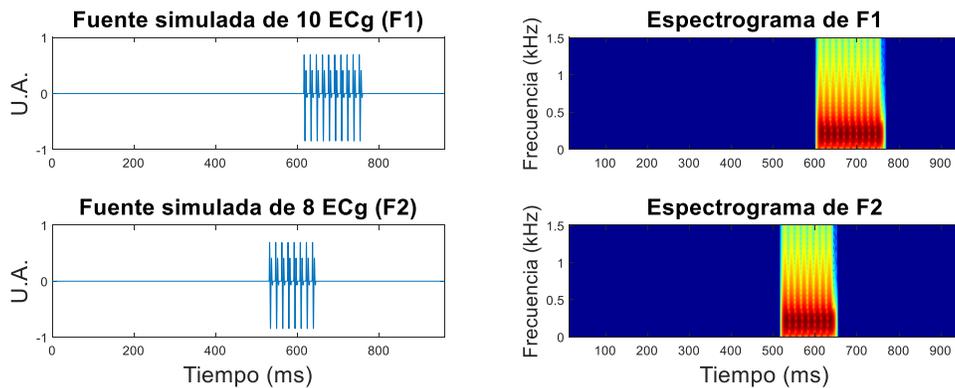
**Figura A68.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 15f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



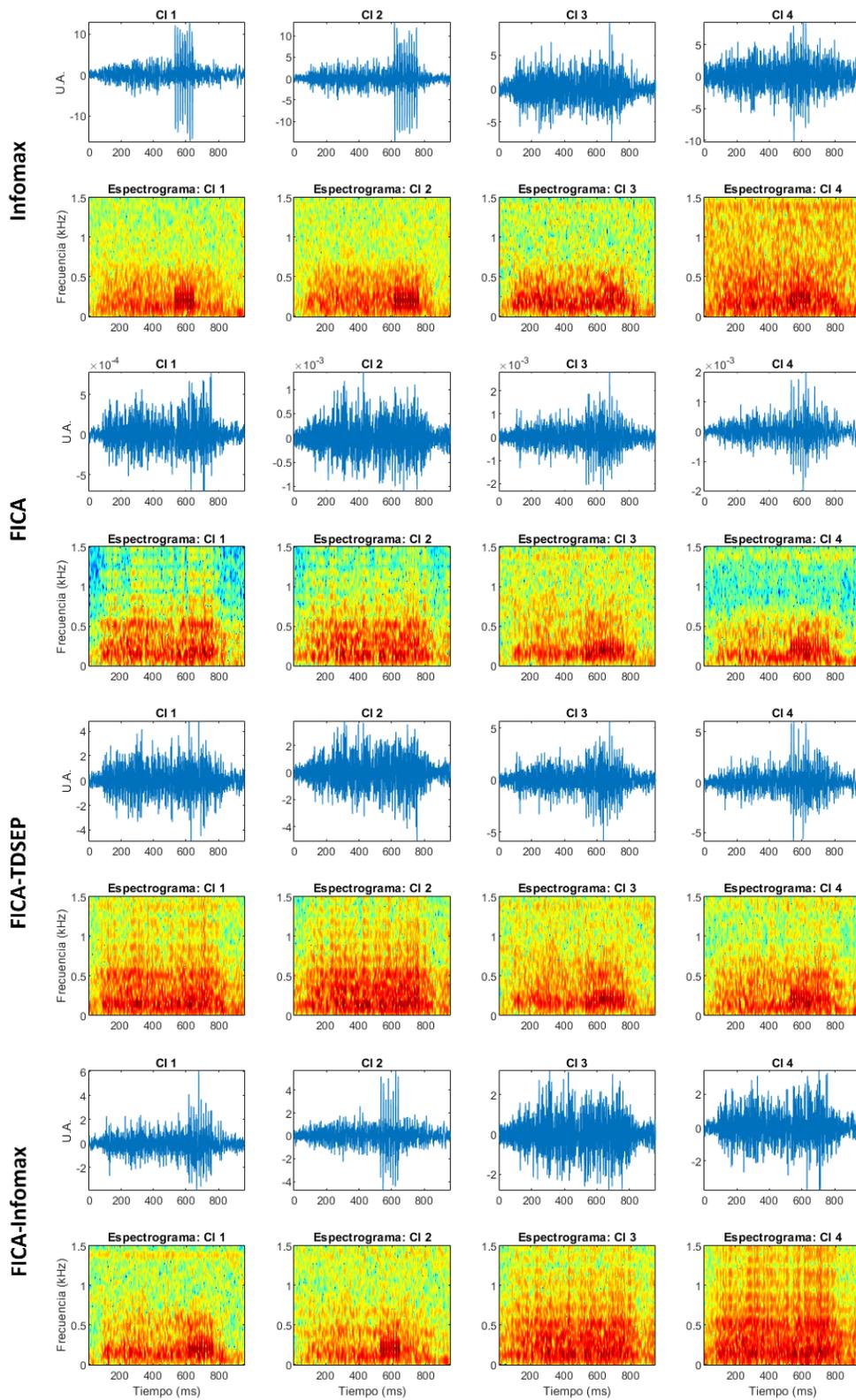
**Figura A69.** CIs presentados en la figura A68 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 15f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.14.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

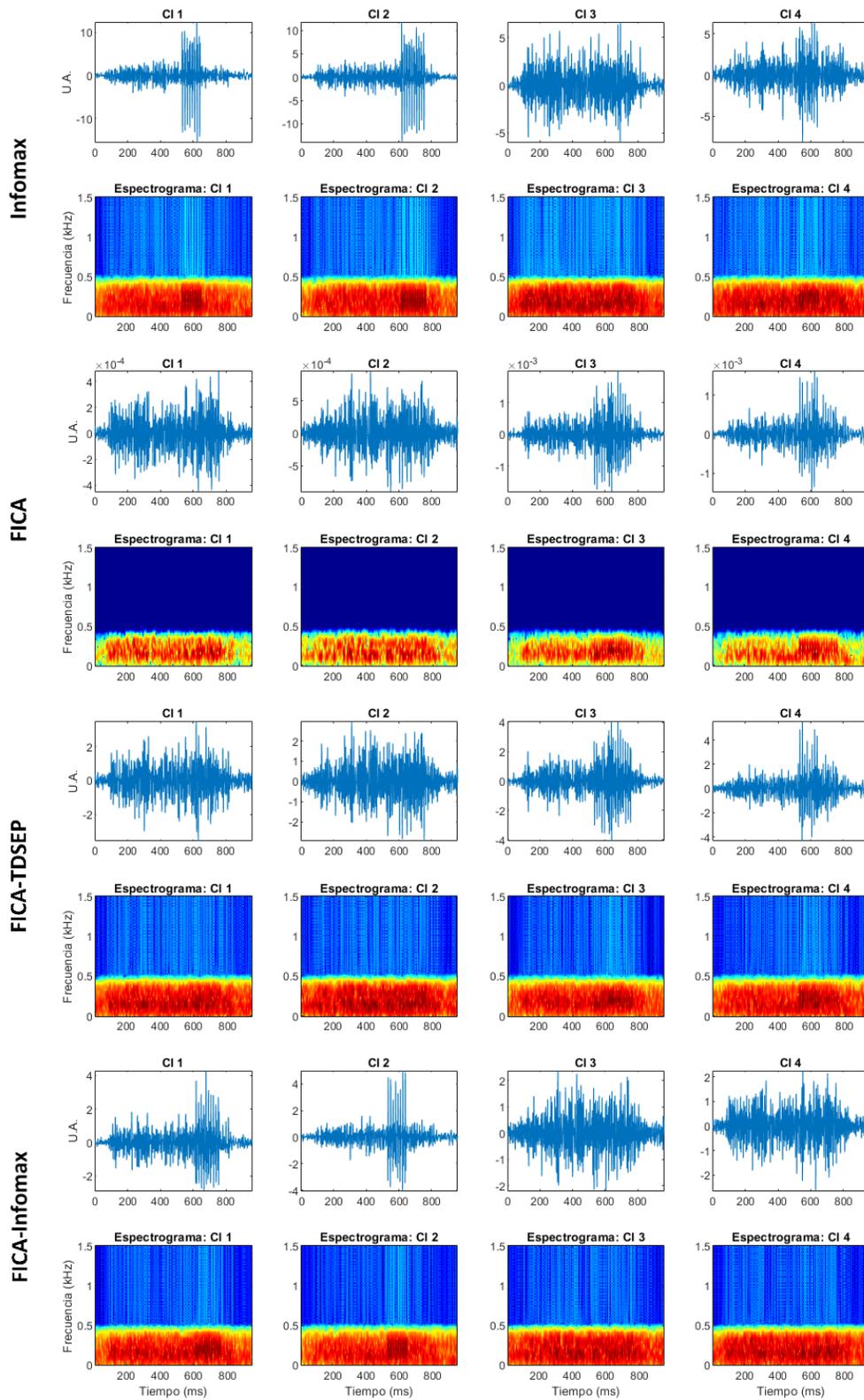
Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECg utilizadas en esta prueba, llamada prueba 15g, se muestran junto a sus espectrogramas en la **figura A70**. Los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA se encuentran en la **figura A71** mientras que los CIs-FiltECg se muestran en la **figura A72**. En ambas gráficas se observa el patrón de espigas asociadas a EC en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los CI 1, CI 2 y CI 4 (espigas de baja intensidad en la representación temporal de este último componente) de Infomax, en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. El patrón de espigas del CI 2 de Infomax y del CI 1 de FICA-Infomax, al igual que los ECg de la fuente simulada F1, se localiza entre los 600 y 800 ms y posee un contenido en frecuencia alrededor de los 200 Hz. En cambio, el patrón de espigas de los CI 1 y CI 4 de Infomax y del CI 2 de FICA-Infomax se ubica entre los 500 y 650 ms y posee información en frecuencia alrededor de los 200 Hz, características similares a aquellas de los ECg de la fuente simulada F2. El patrón encontrado en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP se localiza entre los 500 y 800 ms y posee un contenido en frecuencia alrededor de 200 Hz.



**Figura A70** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECg, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 15g.



**Figura A71.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 15g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



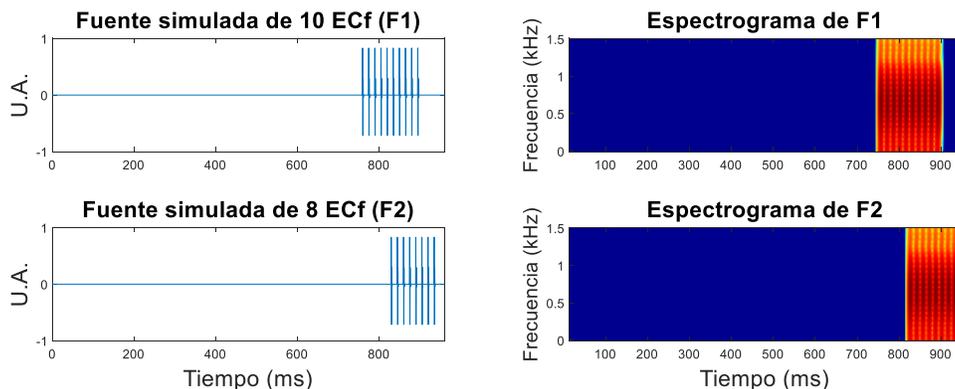
**Figura A72.** CIs presentados en la figura A71 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 15g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.15 Prueba 16 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

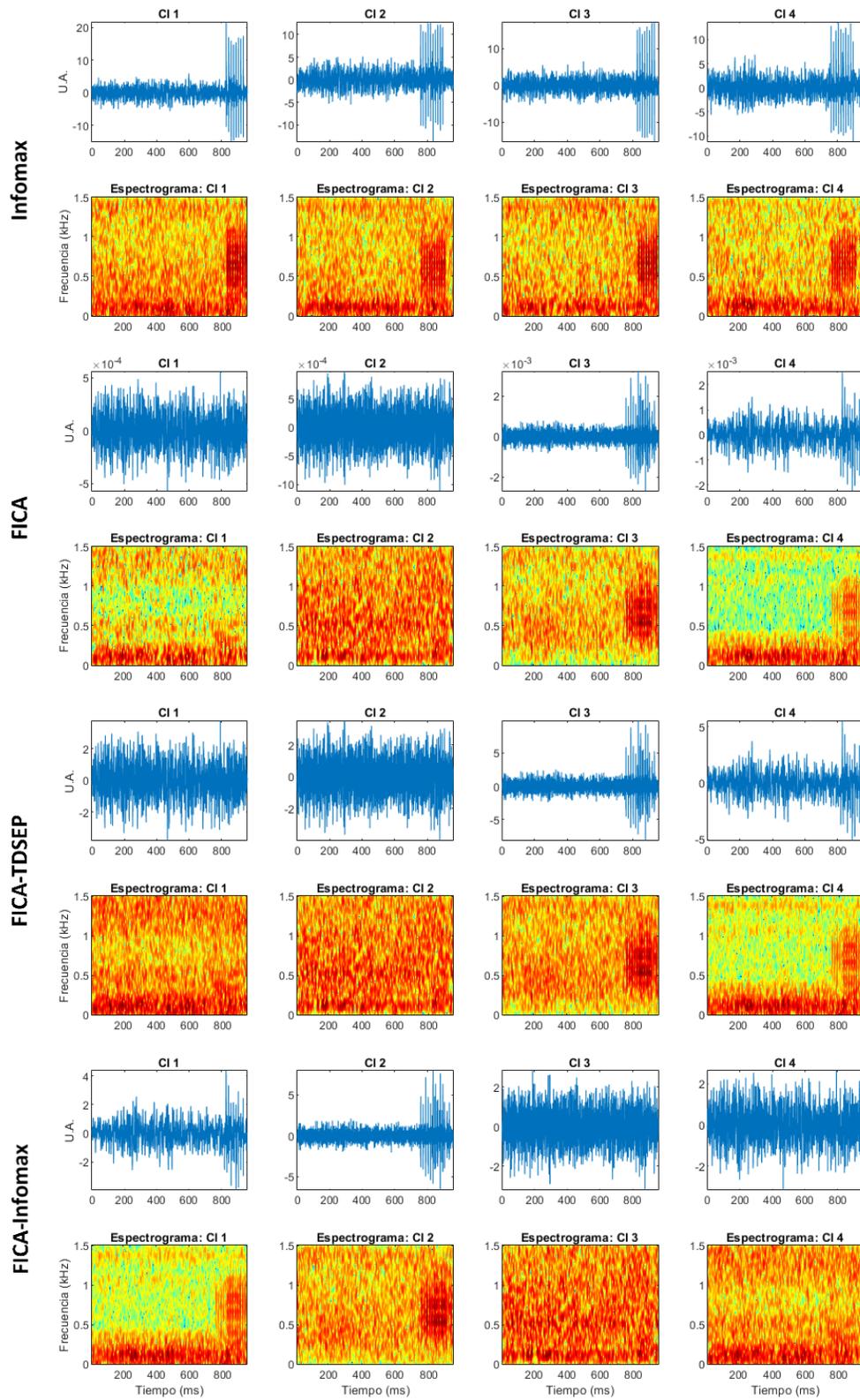
Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la etapa de espiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PM3, PM4 y PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRC3. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

### A.15.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECf utilizadas en esta prueba, llamada prueba 16f, se encuentran en la **figura A73** junto a sus espectrogramas. Los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA se muestran en la **figura A74** mientras que los CIs-FiltECf se encuentran en la **figura A75**. En ambas figuras se observan patrones de espigas asociados a EC en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los cuatro componentes estimados por Infomax, en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. Las espigas del patrón encontrado en los CI 2 y CI 4 de Infomax se asocian con los ECf de la fuente simulada F1, ya que éstas se encuentran entre los 700 y 950 ms y contienen información en frecuencia alrededor de los 650 Hz. Por su parte, las espigas de los CI 1 y CI 3 de Infomax se encuentran entre los 800 y 950 ms y poseen información en frecuencia alrededor de 650 Hz, indicando una asociación con los ECf de la fuente simulada F2.



**Figura A73.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECf, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 16f.



**Figura A74.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 16f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.

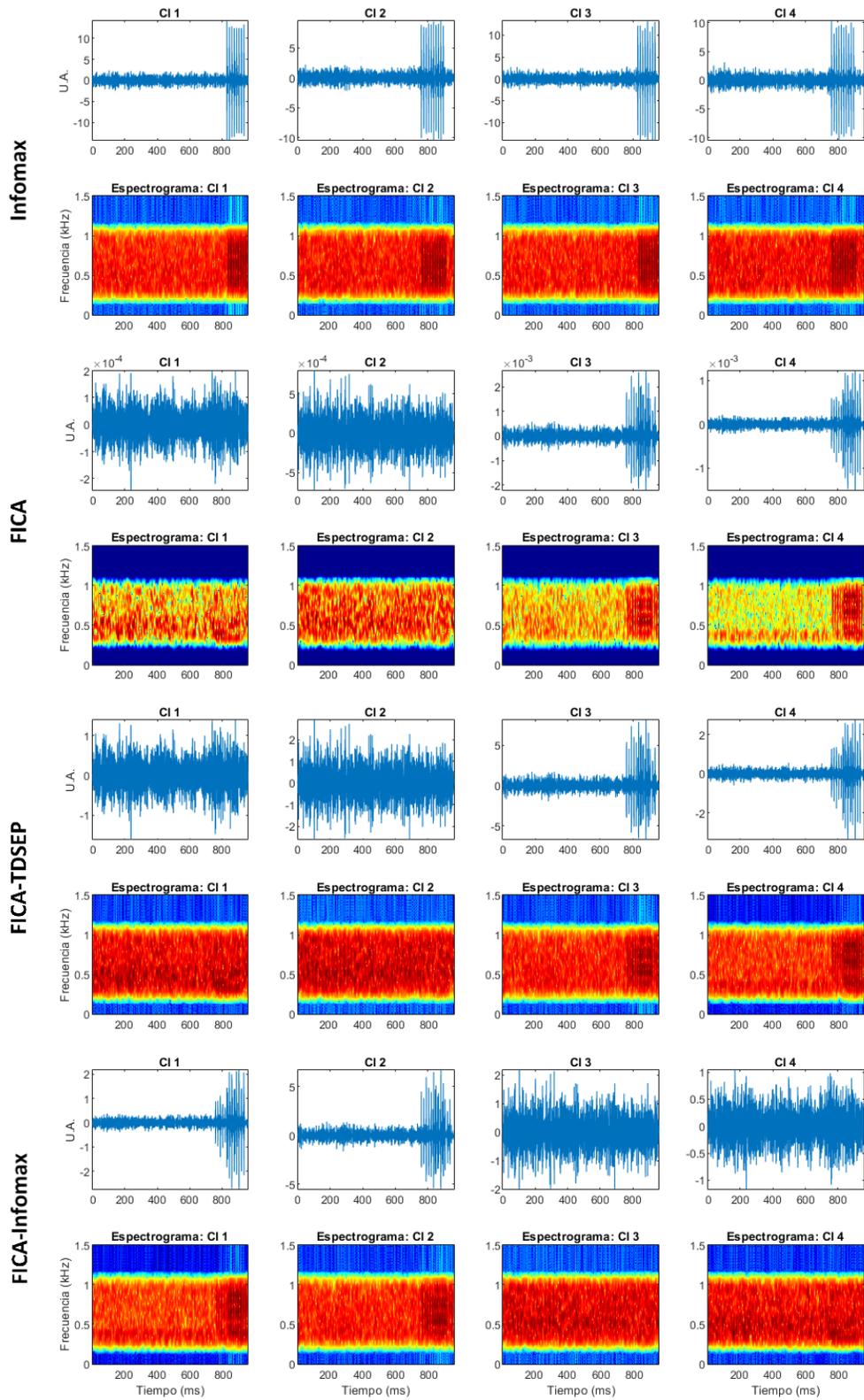
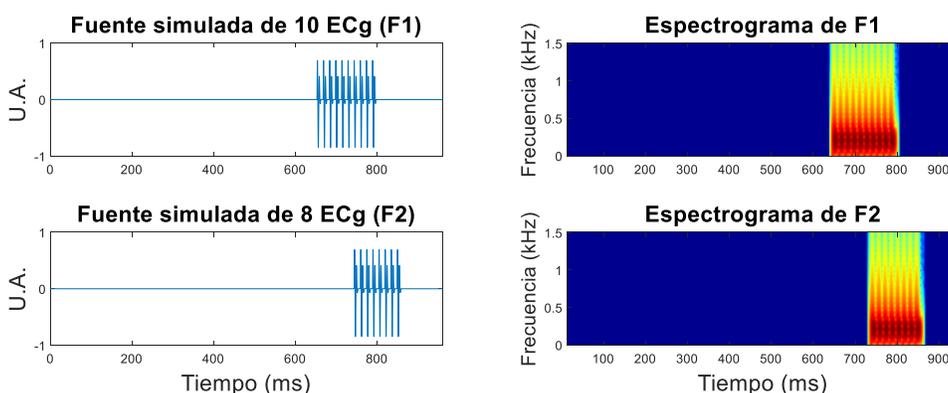


Figura A75. CIs presentados en la figura A74 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 16f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

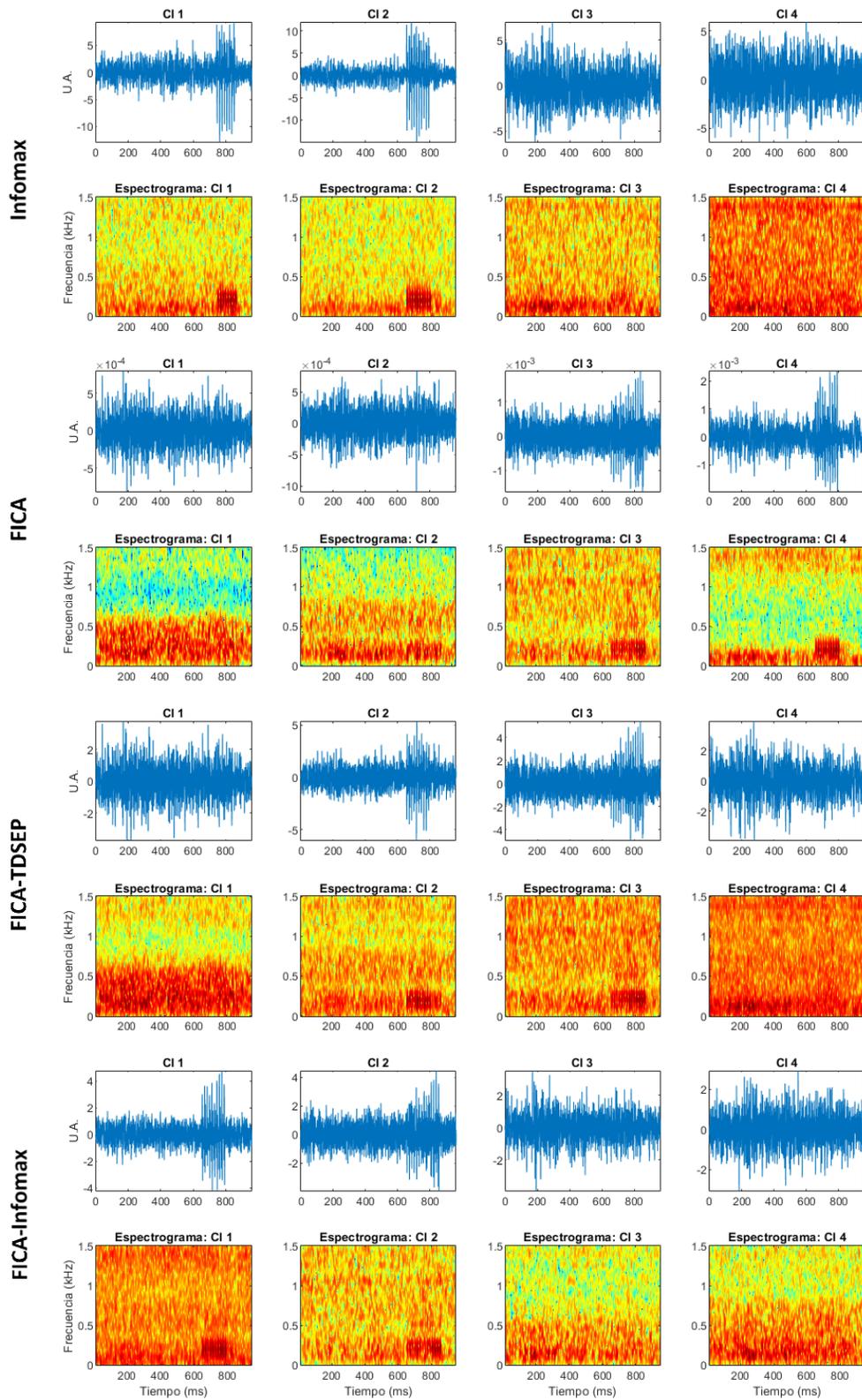
Además, las espigas del patrón localizado en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax se encuentran entre los 700 y 950 ms y con contenido en frecuencia alrededor de los 650 Hz.

### A.15.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

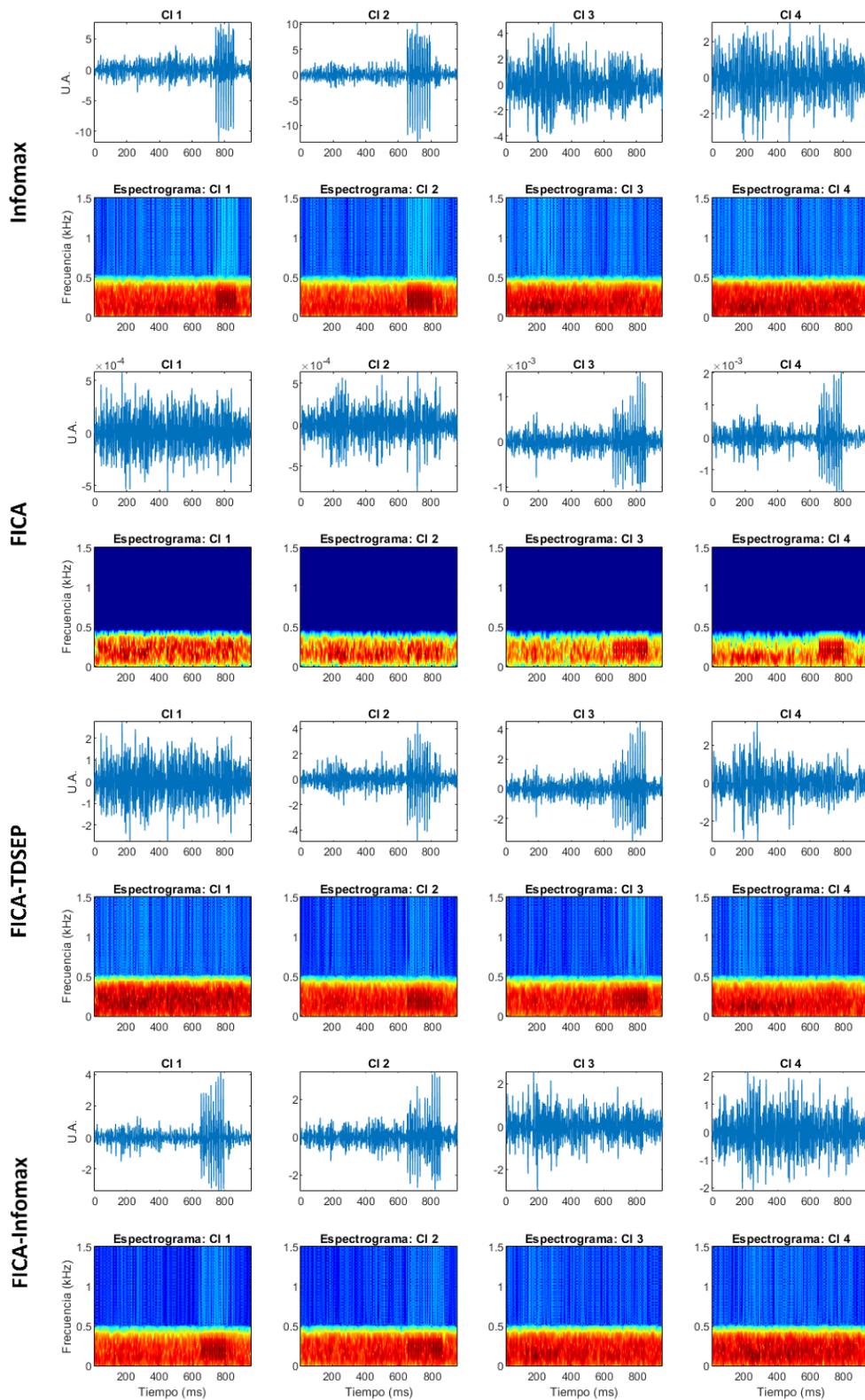
Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECg utilizadas en esta prueba, definida como prueba 16g, se encuentran en la **figura A76** junto a sus espectrogramas. Los CIs estimados mediante los algoritmos de ICA y los CIs-FiltECg se muestran en las **figuras A77** y **A78**, respectivamente. En ambas gráficas se encuentran patrones de espigas asociados a EC en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 3 y CI 4 de FICA, en los CI 2 y CI 3 de FICA-TDSEP y en los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. Las espigas del patrón localizado en el CI 2 de Infomax, en el CI 4 de FICA y en el CI 1 de FICA-Infomax se encuentran entre los 600 y 800 ms con contenido en frecuencia alrededor de 200 Hz, indicando una asociación con los ECg de la fuente simulada F1. En cambio, las espigas del patrón ubicado en el CI 1 de Infomax se asocian a los ECg de la fuente simulada F2 debido a que estas espigas se localizan entre los 700 y 900 ms y poseen información en frecuencia alrededor de 200 Hz. Finalmente, las espigas del patrón del CI 3 de FICA, del CI 2 de FICA-TDSEP y del CI 2 de FICA-Infomax se localizan entre los 600 y 900 ms con contenido en frecuencia alrededor de 200 Hz.



**Figura A76.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECg, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 16g.



**Figura A77.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 16g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



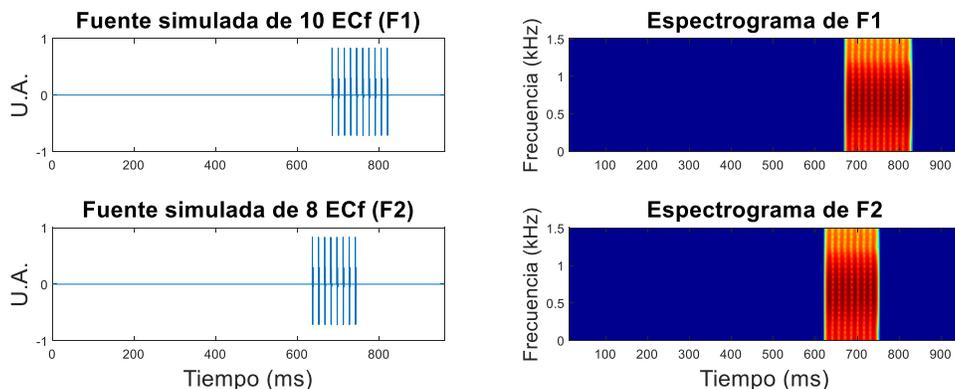
**Figura A78.** CIs presentados en la figura A77 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 16g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.16 Prueba 17 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

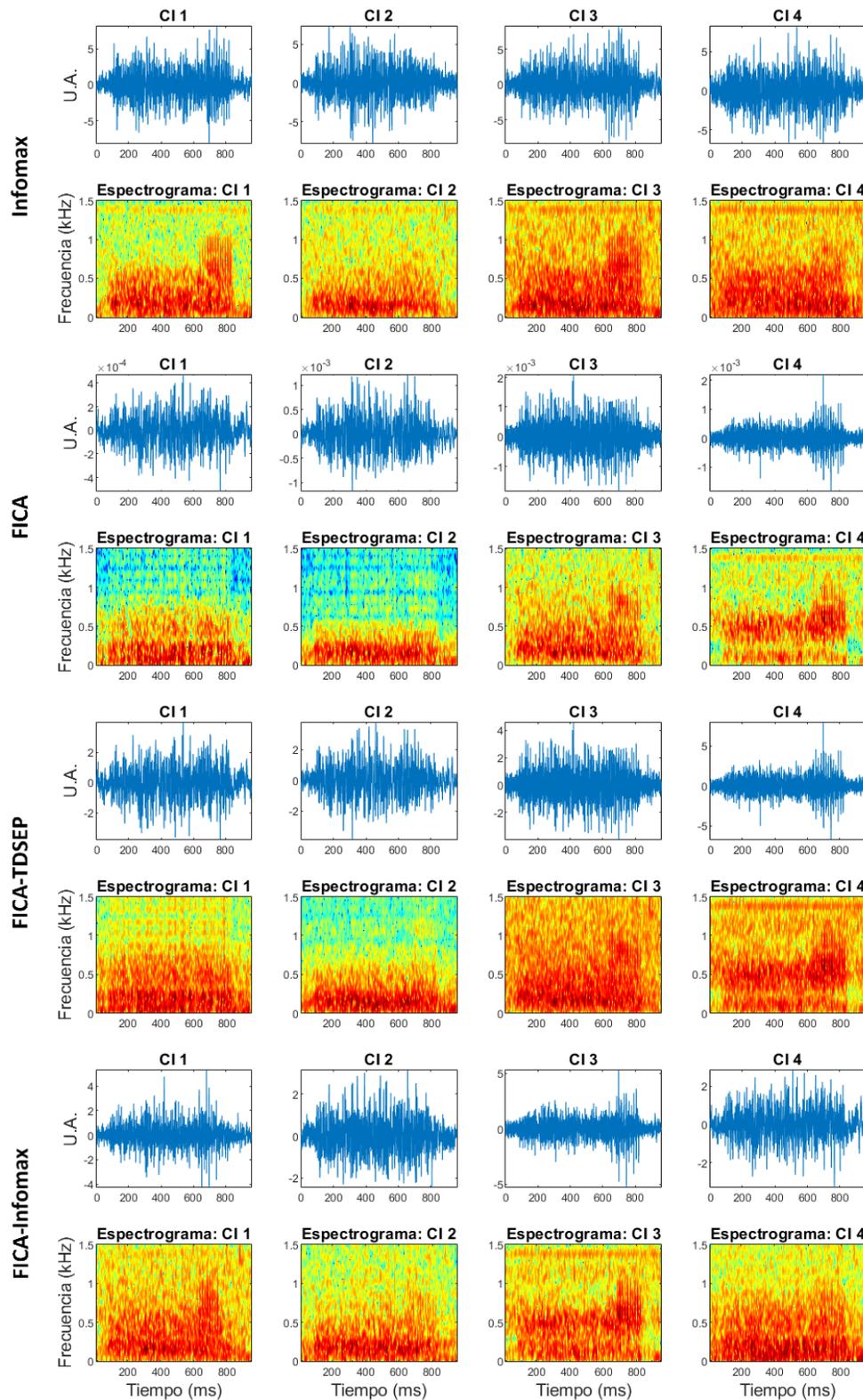
Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de inspiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

### A.16.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

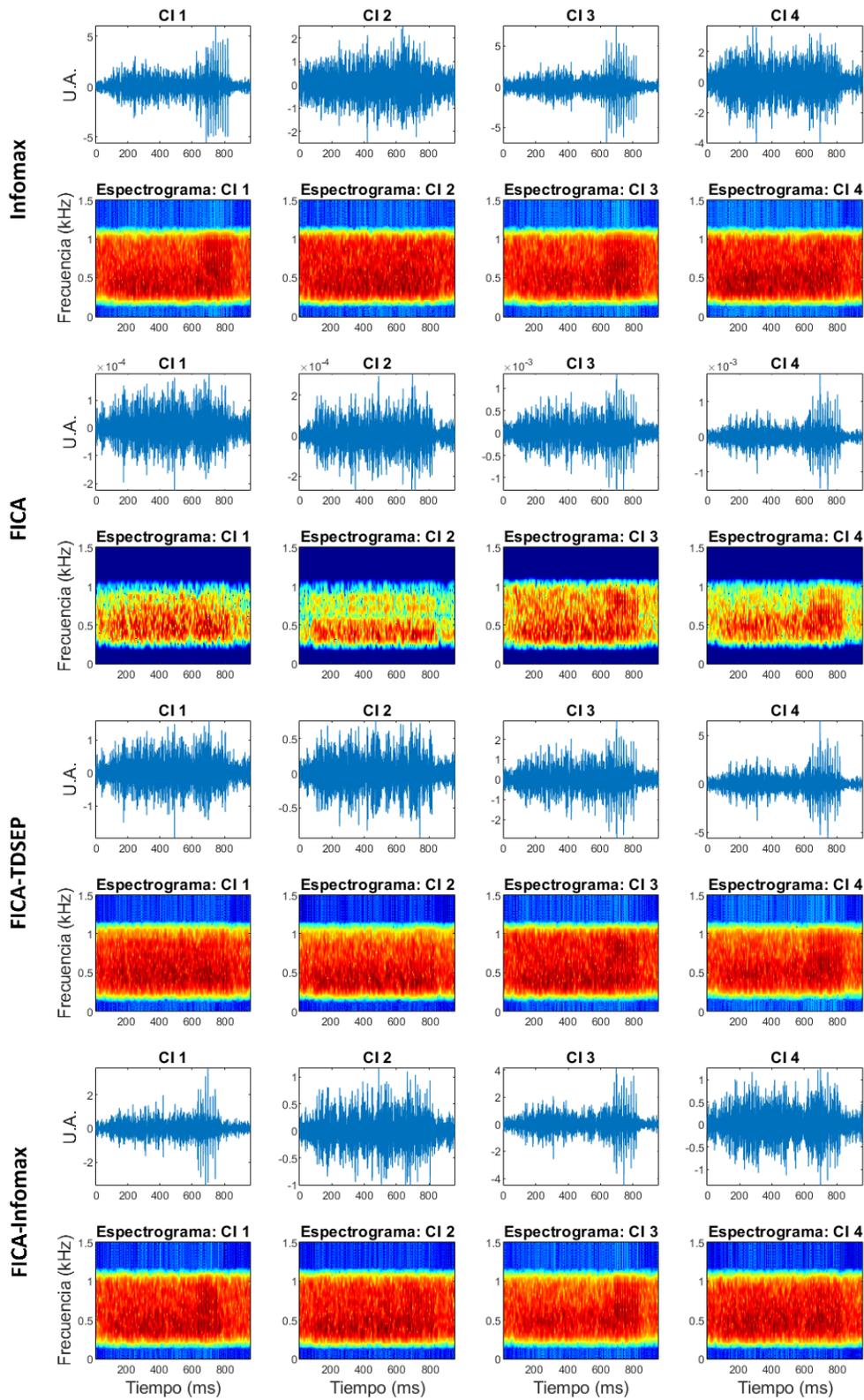
Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECf utilizadas en esta prueba, llamada prueba 17f, se encuentran junto a sus espectrogramas en la **figura A79**. Los CIs estimados por los algoritmos de ICA se muestran en la **figura A80** mientras que en la **figura A81** se encuentran los CIs filtrados mediante FiltECf. En las gráficas de los CIs se aprecia el patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales de los CI 1 y CI 3 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y en los CI 1 y CI 3 de FICA-Infomax, mientras que en los espectrogramas se encuentra este patrón en estos mismos CIs y, además, en los CI 3 de FICA y FICA-TDSEP. Las gráficas de los CIs-FiltECf muestran el patrón de espigas tanto en las representaciones temporales como en los espectrogramas de los CI 1 y CI 3 de Infomax, en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y en los CI 1 y CI 3 de FICA-Infomax. El patrón de espigas del CI 2 de FICA-Infomax, al igual que los ECf de la fuente simulada F1, se encuentra entre los 650 y 900 ms y contiene información en frecuencia alrededor de 650 Hz, mientras que el patrón de espigas del CI 1 de FICA-Infomax se encuentra entre los 600 y 800 ms con contenido en frecuencia alrededor de 650 Hz, similar a las características de los ECf de la fuente simulada F2. El patrón de los CI 1 y CI 3 de Infomax, y de los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP se localiza entre los 600 y 900 ms y posee información en frecuencia alrededor de 650 Hz.



**Figura A79.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECf, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 17f.



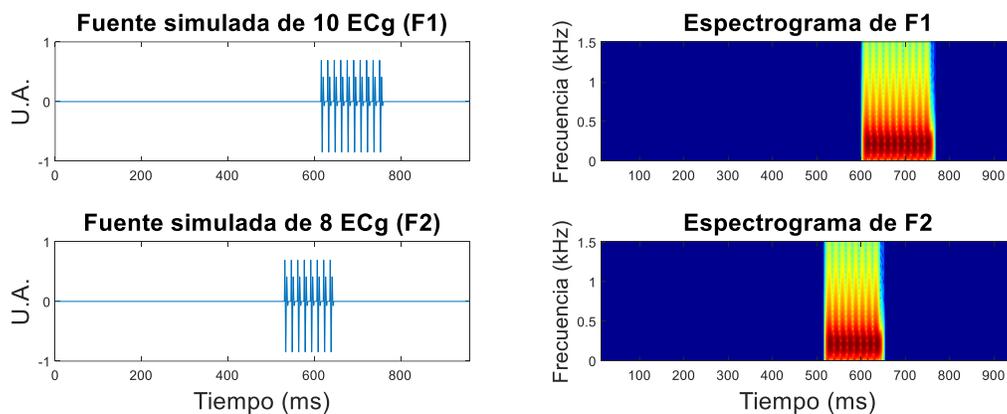
**Figura A80.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 17f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



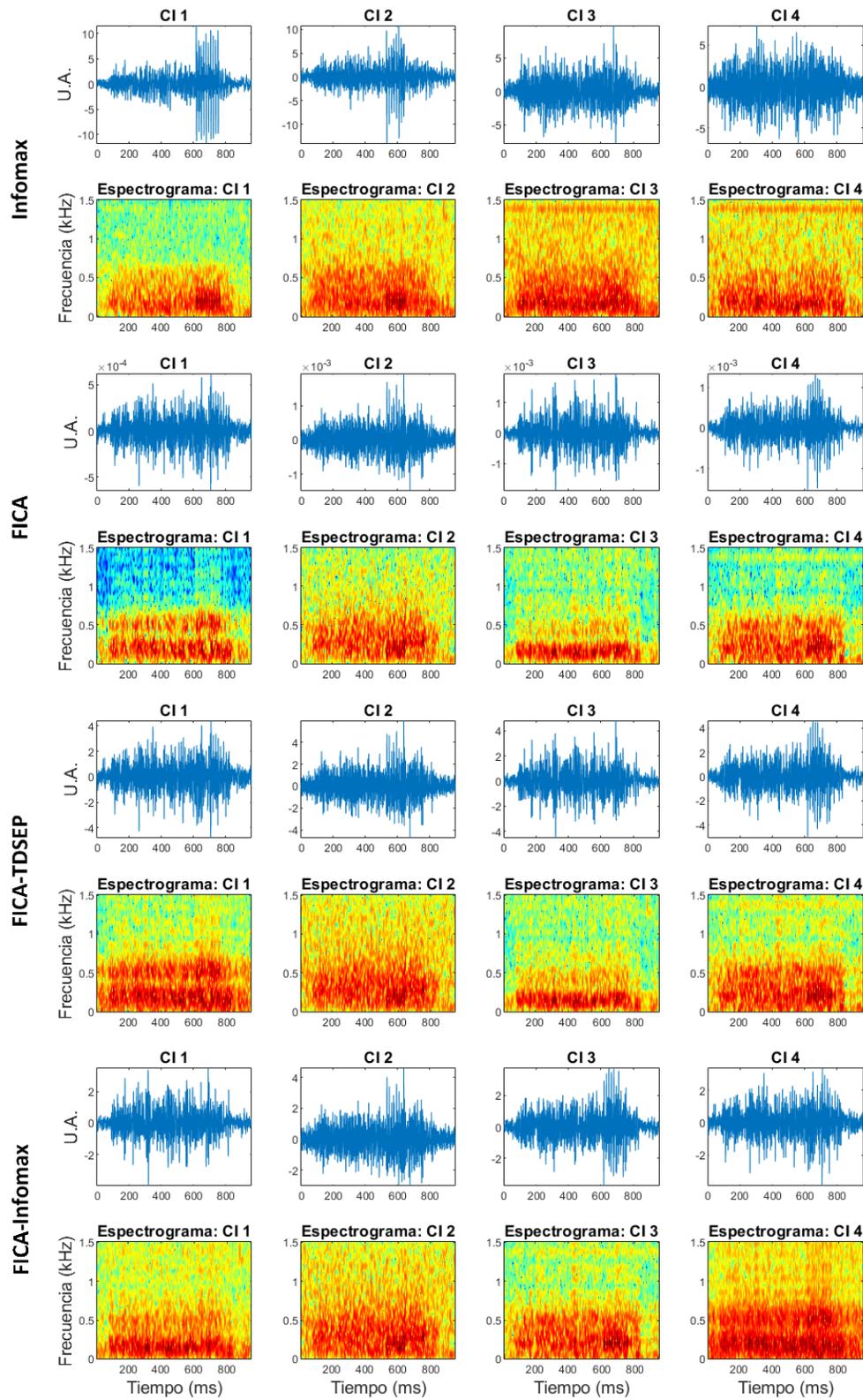
**Figura A81.** CIs presentados en la figura A80 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 17f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.16.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

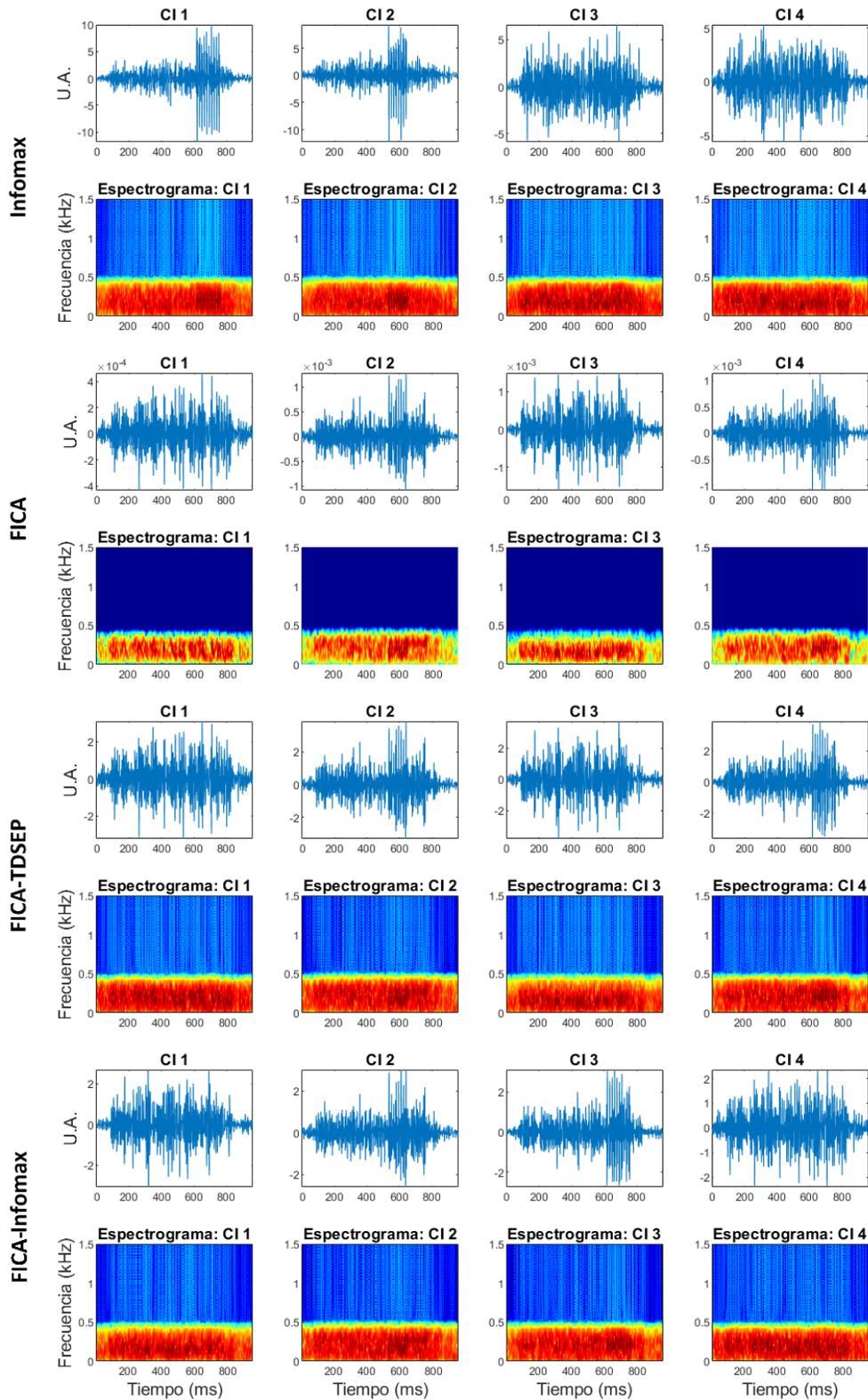
Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECg utilizadas en esta prueba (prueba 17g) se encuentran junto a sus espectrogramas en la **figura A82**. Los CIs estimados por los algoritmos de ICA se muestran en la **figura A83** mientras que los CIs-FiltECg se encuentran en la **figura A84**. En las gráficas de los CIs se encuentra el patrón de espigas asociadas a EC en las representaciones temporales de los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 3 de FICA-Infomax y en los espectrogramas de los CI 2 de FICA, de FICA-TDSEP y de FICA-Infomax, aunados a aquellos de los componentes mencionados anteriormente. En las gráficas de los CIs-FiltECg se observa este patrón de espigas en los CI 1 y CI 2 de FICA, en los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax tanto en las representaciones temporales como en los espectrogramas. El patrón de espigas del CI 1 de Infomax, de los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y del CI 3 de FICA-Infomax, al igual que los ECg de la fuente simulada F1, se ubica entre los 600 y 800 ms y posee información en frecuencia alrededor de 200 Hz. El patrón de espigas de los CI 2 de Infomax, de FICA, de FICA-TDSEP y de FICA-Infomax se encuentra entre los 500 y 650 ms y tiene un contenido en frecuencia alrededor de 200 Hz, características que comparten con los ECg de la fuente simulada F2.



**Figura A82.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECg, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 17g.



**Figura A83.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 17g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



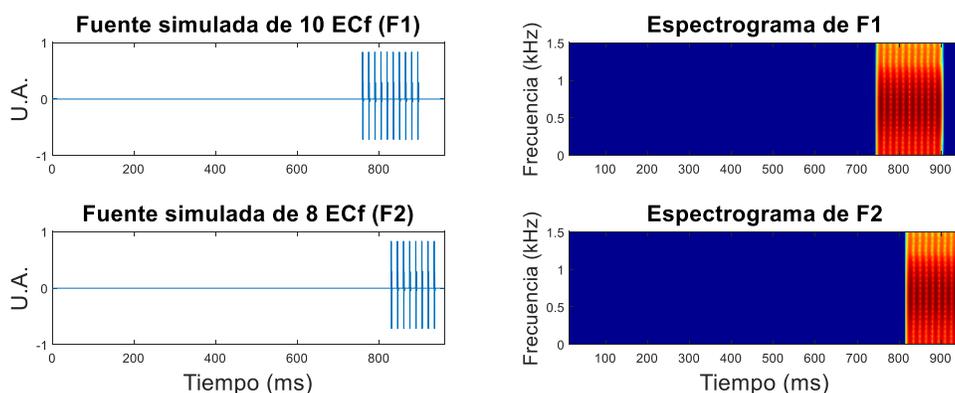
**Figura A84.** CIs presentados en la figura A84 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 17g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.17 Prueba 18 – Una fuente simulada de EC con propagación unidireccional y una fuente simulada de EC con propagación bidireccional

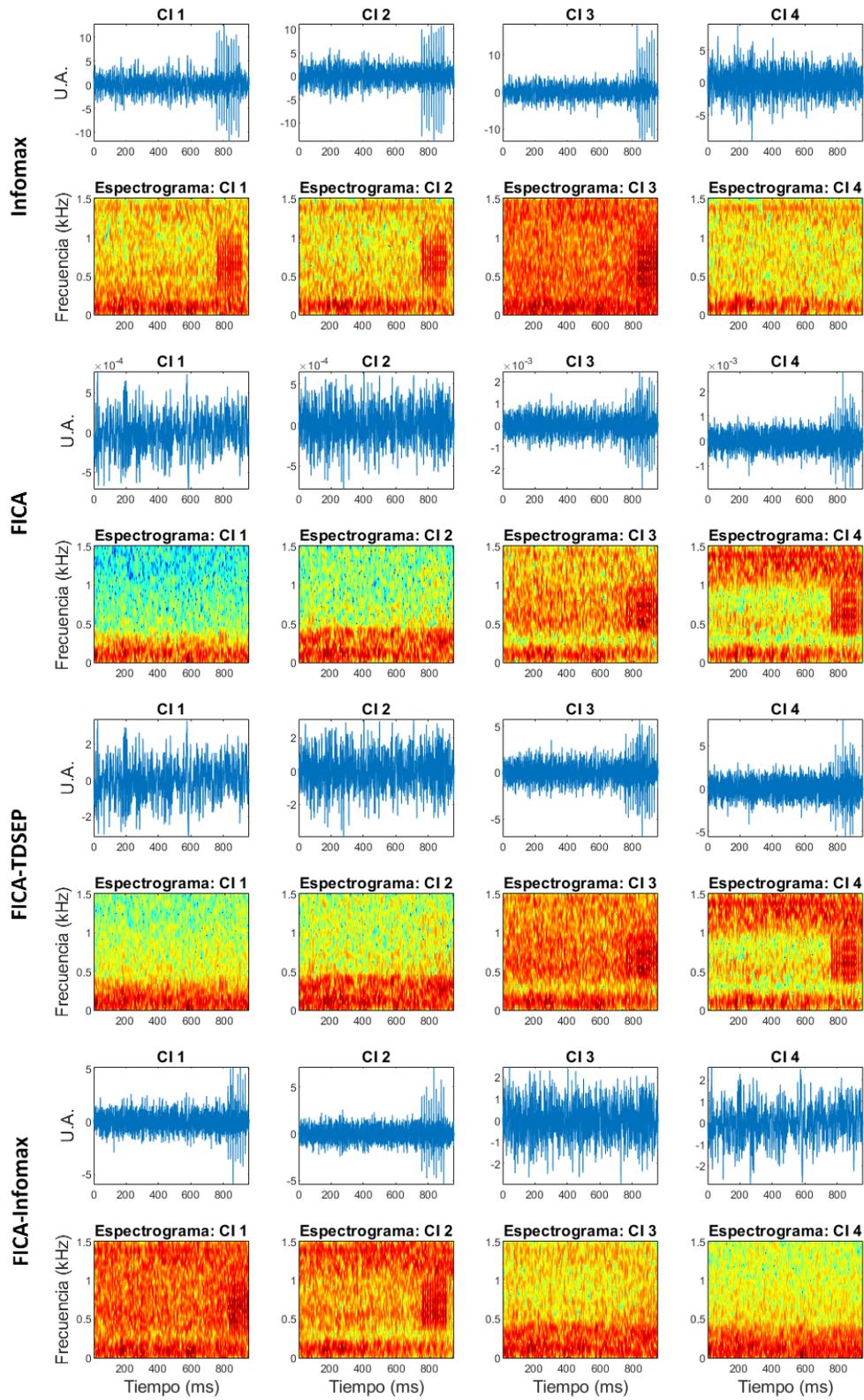
Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la etapa de espiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó unidireccionalmente hacia el micrófono PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

### A.17.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

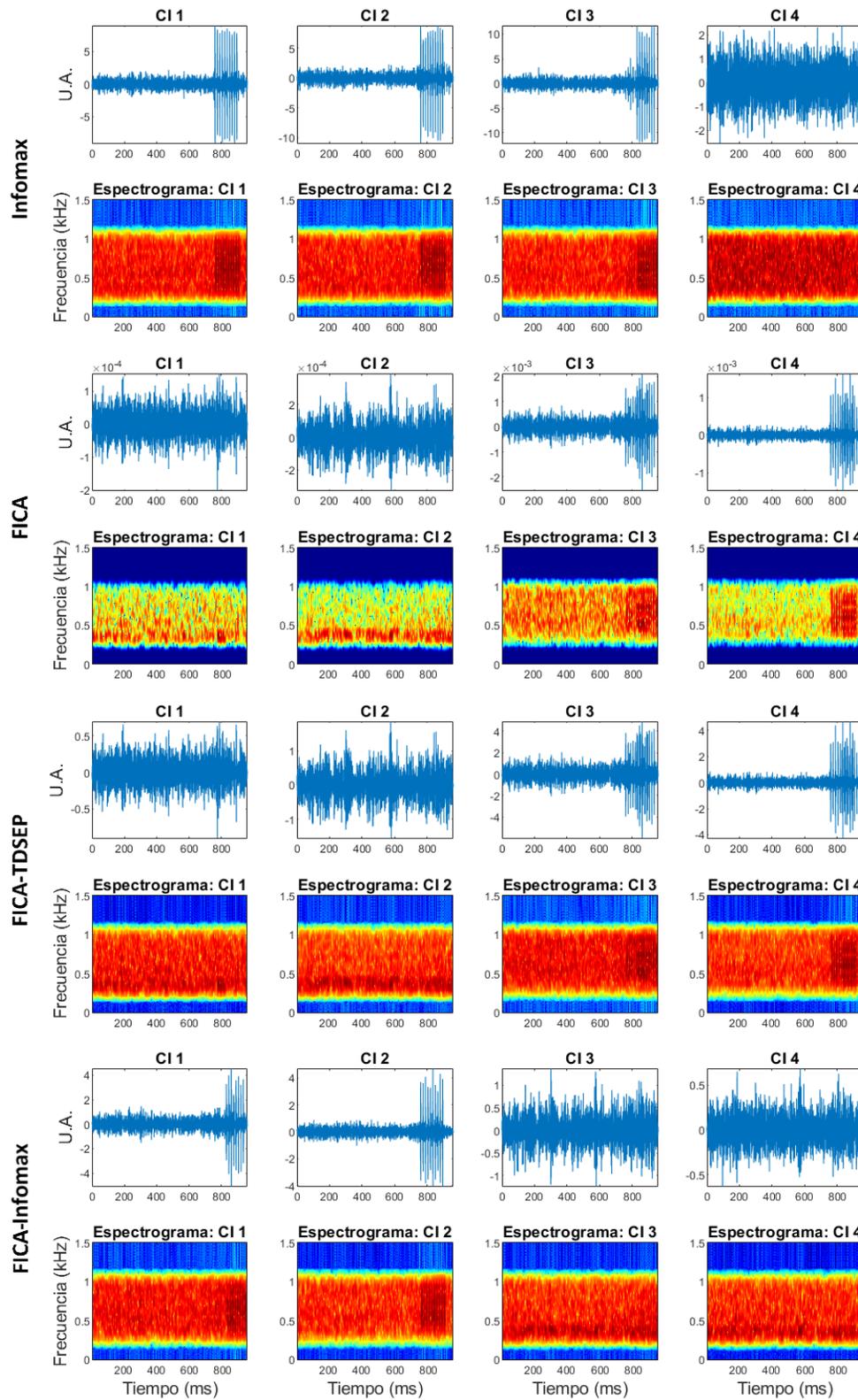
Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECf utilizadas en esta prueba, denominada prueba 18f, se encuentran en la **figura A85** junto a sus espectrogramas. Los CIs estimados por los algoritmos de ICA y los CIs filtrados mediante FiltECf se muestran en las **figuras A86** y **A87**, respectivamente. En ambas gráficas se observan patrones de espigas asociados a EC en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax, de los CI 3 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y de los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. El patrón de espigas encontrado en los CI 1 y CI 2 de Infomax, y en el CI 2 de FICA-Infomax se localiza entre los 700 y 900 ms y poseen información en frecuencia alrededor de 650 Hz, señalando una asociación con los ECf de la fuente simulada F1. Por su parte, el patrón de espigas del CI 1 de FICA-Infomax se asocia a los ECf de la fuente simulada F2 debido a que estas espigas se encuentran entre los 800 y 950 ms con contenido en frecuencia alrededor de 650 Hz. Por último, el patrón de espigas del CI 3 de Infomax y de los CI 3 y CI 4 de FICA y FICA-TDSEP se encuentra entre los 700 y 950 ms y cuenta con información en frecuencia alrededor de 650 Hz.



**Figura A85.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECf, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 18f.



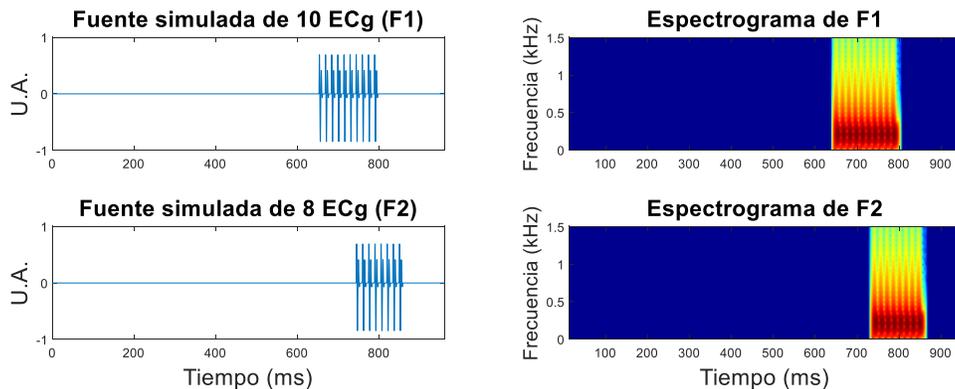
**Figura A86.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 18f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



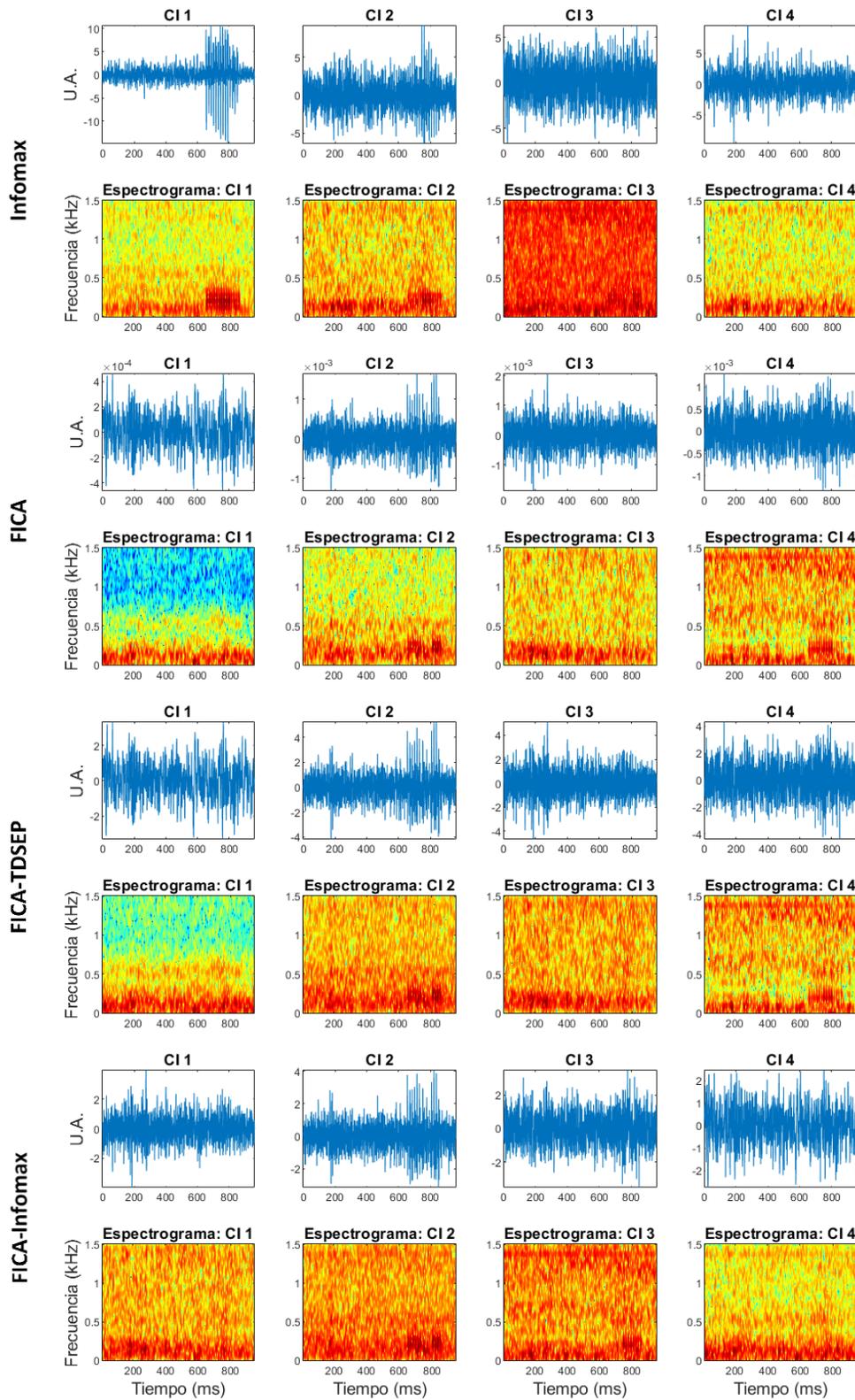
**Figura A87.** CIs presentados en la figura A86 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 18f: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.17.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

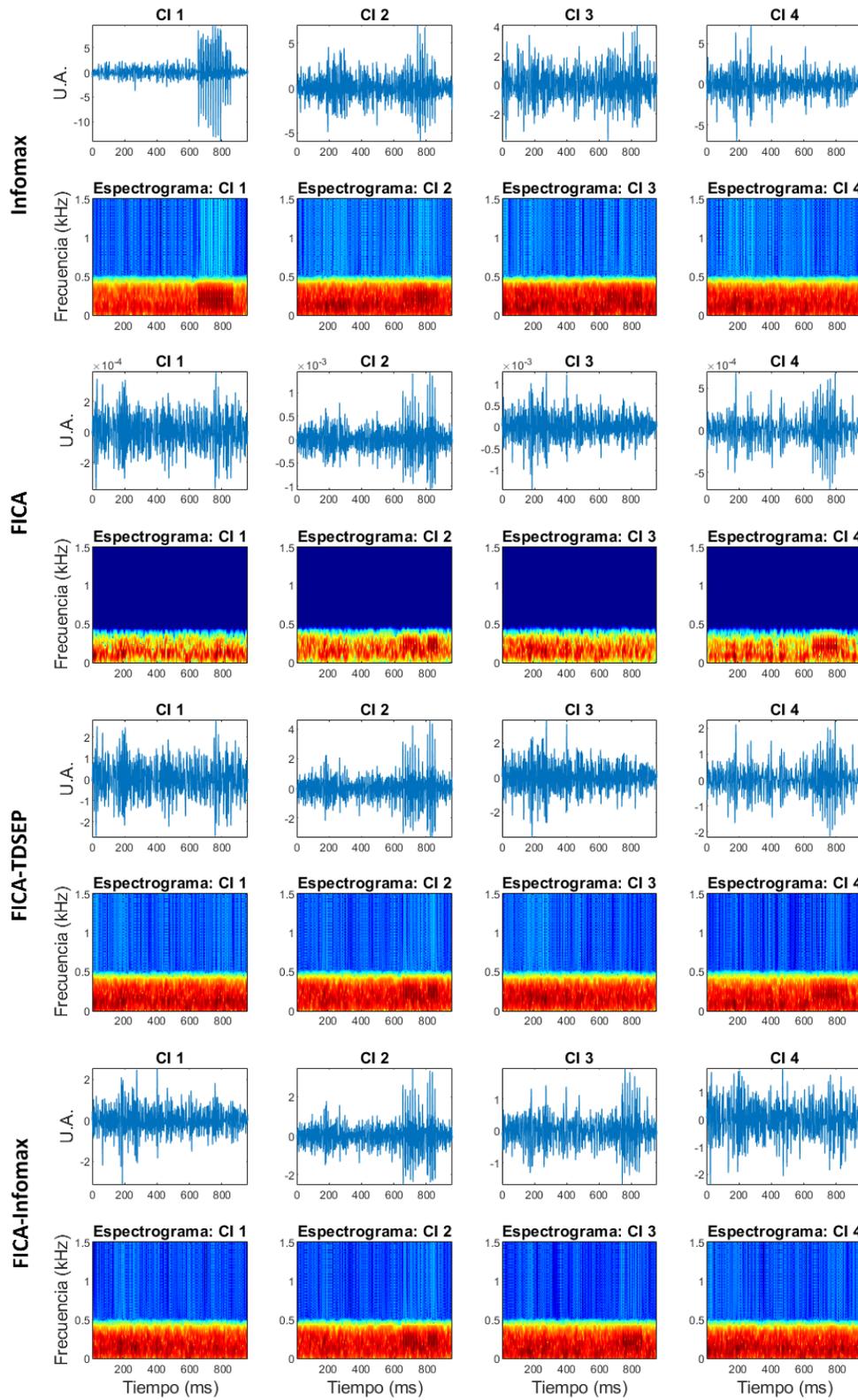
Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECg utilizadas en esta prueba, definida como prueba 18g, se encuentran en la **figura A88** junto a sus espectrogramas. Los CIs estimados por los algoritmos de ICA y los CIs-FiltECg se encuentran en las **figuras A89 y A90**, respectivamente. En las gráficas de los CIs se aprecian patrones de espigas asociados a EC en las representaciones temporales de los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 2 de FICA, de FICA-TDSEP y de FICA-Infomax, mientras que los espectrogramas muestran estos patrones en estos mismos componentes y, además, en el CI 3 de Infomax, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 3 de FICA-Infomax. Las gráficas de los CIs-FiltECg muestran patrones de espigas en las representaciones temporales de los CI 1 y CI 2 de Infomax, en los CI 2 y CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax. Además, se encuentra un patrón de espigas en el espectrograma del CI 3 filtrado de Infomax. Las espigas del patrón localizado en el CI 4 de FICA se asocian a los ECg de la fuente simulada F1 al considerar que el patrón se encuentra entre los 600 y 800 ms y también posee información en frecuencia alrededor de 200 Hz. Por otra parte, las espigas del patrón ubicado en el CI 3 de FICA-Infomax se localizan entre los 700 y 900 ms y contienen información en frecuencia alrededor de 200 Hz, indicando una relación con los ECg de la fuente simulada F2. Finalmente, el patrón de espigas presente en los CI 1, CI 2 y CI 3 de Infomax, del CI 2 de FICA, de los CI 2 y CI 3 se encuentra entre los 600 y 900 ms con información en frecuencia alrededor de 200 Hz.



**Figura A88.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECg, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 18g.



**Figura A89.** Componentes independientes estimados por los cuatro algoritmos de ICA en la prueba 18g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



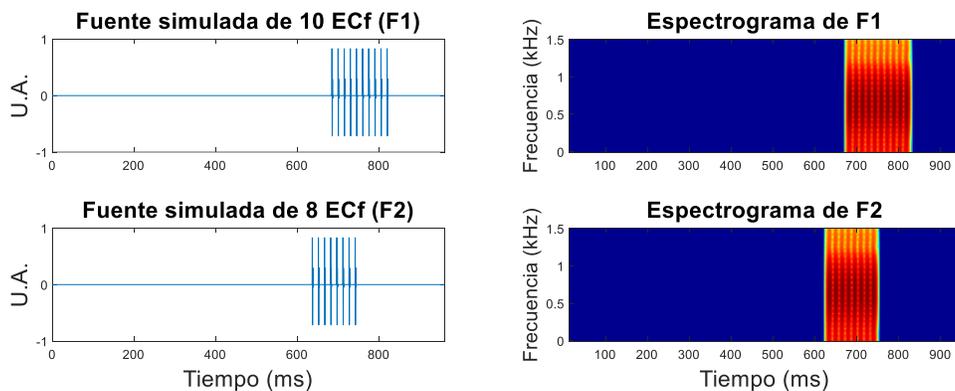
**Figura A90.** CIs presentados en la figura A89 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 18g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.18 Prueba 19 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación bidireccional

Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la fase de inspiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PM3, PM4 y PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

### A.18.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECf utilizadas en esta prueba, denominada prueba 19f, se encuentran junto a sus espectrogramas en la **figura A91**. Los CIs estimados por Infomax y FICA se encuentran en la **figura A92** mientras que los CIs estimados por FICA-TDSEP y FICA-Infomax se encuentran en la **figura A93**. Los CIs filtrados mediante FiltECf de Infomax y de FICA se muestran en la **figura A94** y en la **figura A95** se encuentran los CIs-FiltECf de FICA-TDSEP y de FICA-Infomax. En las gráficas de los CIs se observa el patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales de los CI 1, CI 2, CI 3 y CI 6 de Infomax, en los CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 2 de FICA-Infomax, mientras que los espectrogramas muestran este patrón en estos mismos componentes y, además, en los CI 4 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 1 de FICA-Infomax. En las gráficas de los CIs-FiltECf se observa el patrón de espigas en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los CI 1, CI 2, CI 3 y CI 6 de Infomax, en los CI 4 y CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. El patrón de espigas de los CI 1 y CI 2 de Infomax, de los CI 5 de



**Figura A91.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECf, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 19f.

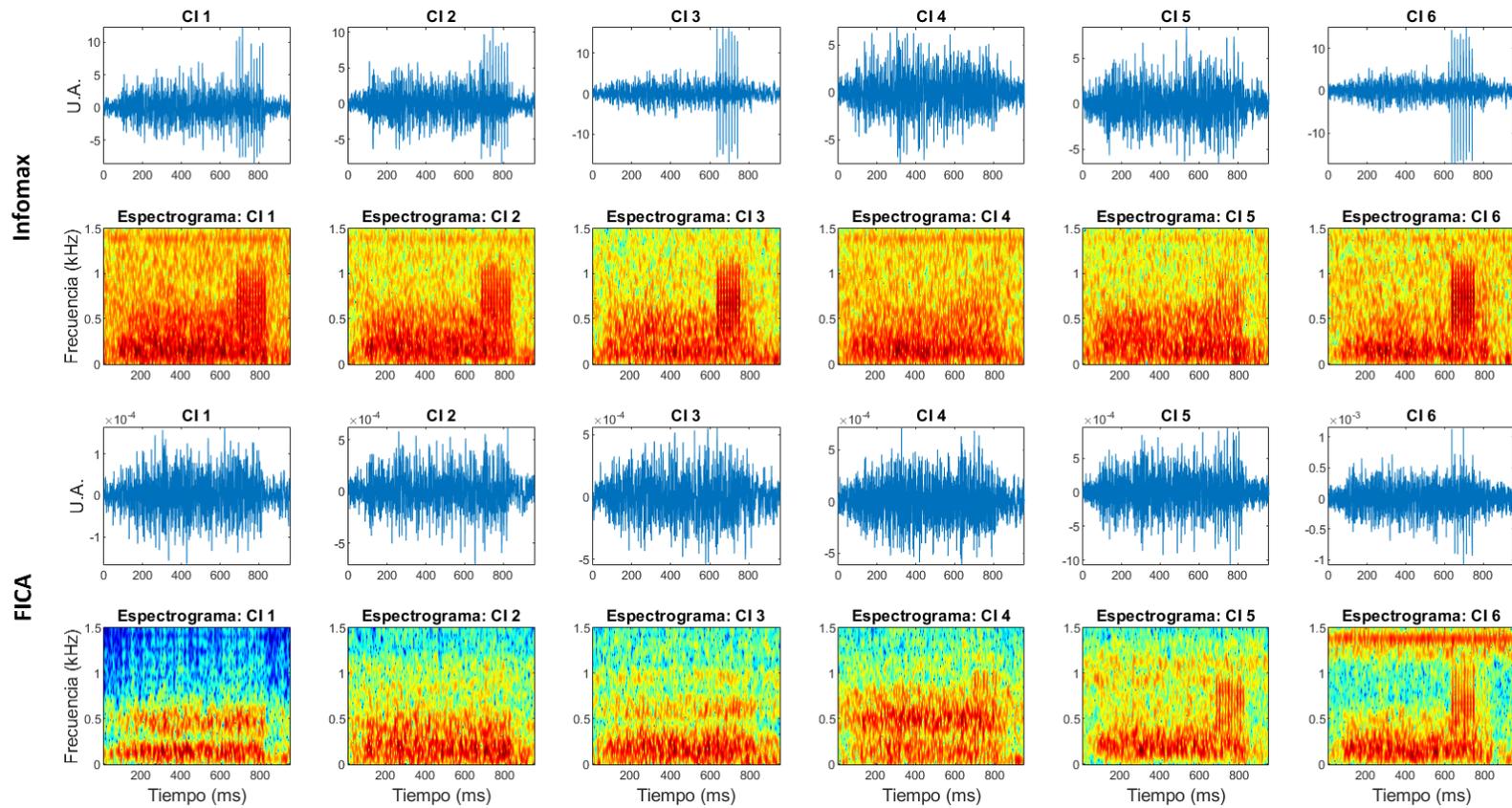
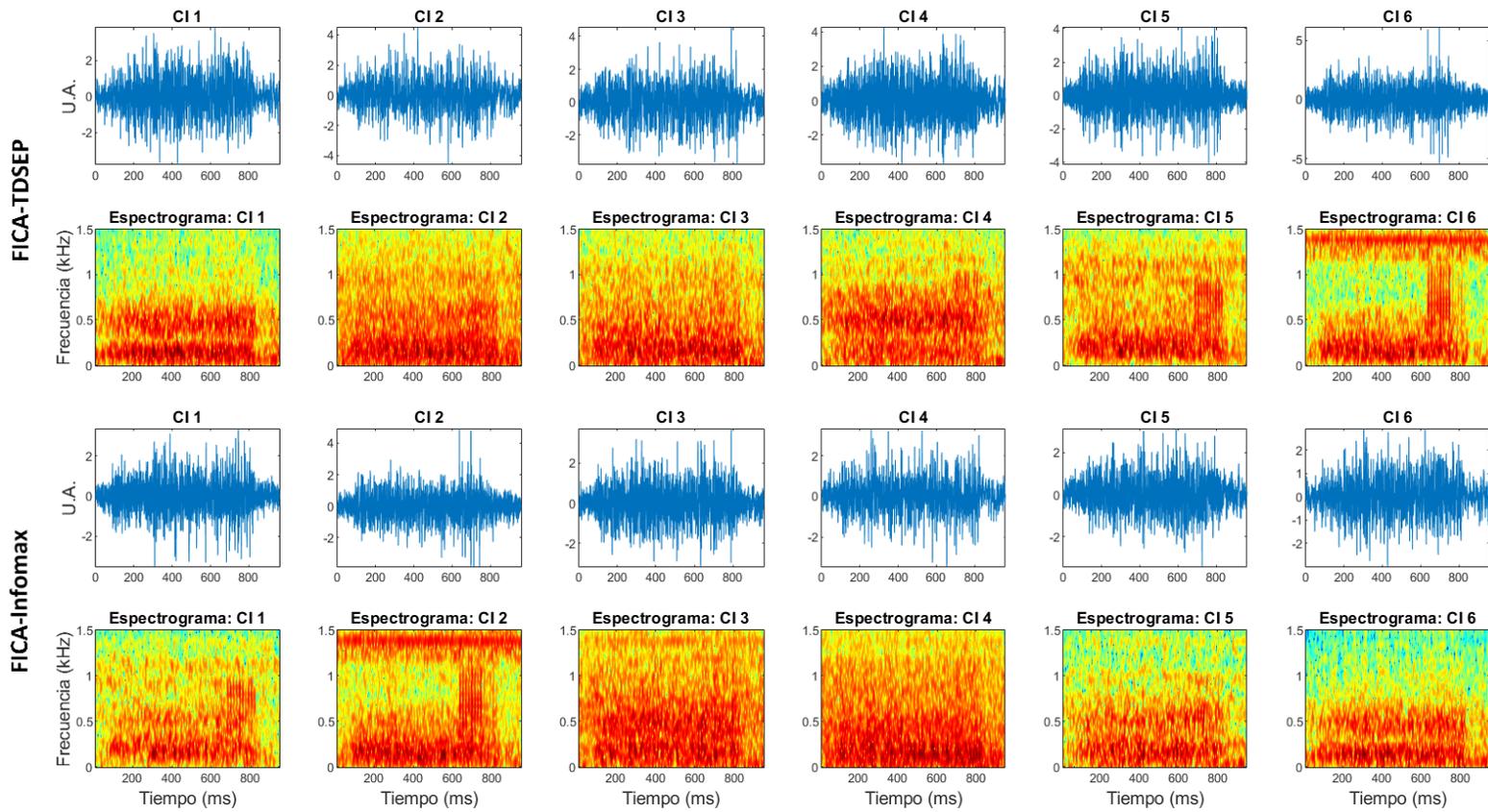


Figura A92. Componentes independientes estimados por los algoritmos de Infomax y FICA, de arriba abajo, en la Prueba 19f. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



**Figura A93.** Componentes independientes estimados por los algoritmos de FICA-TDSEP y FICA-Infomax, de arriba abajo, en la Prueba 19f. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.

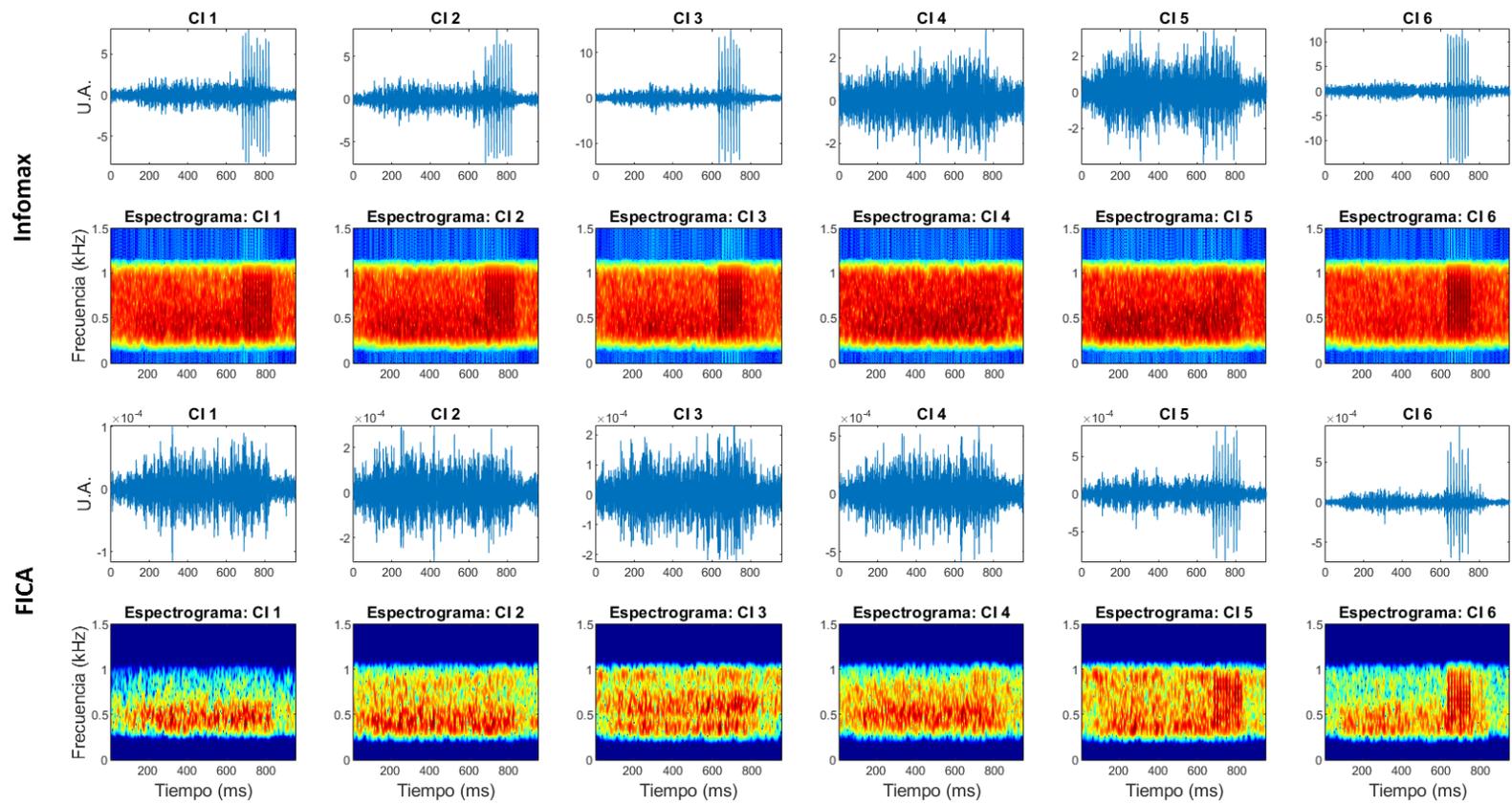
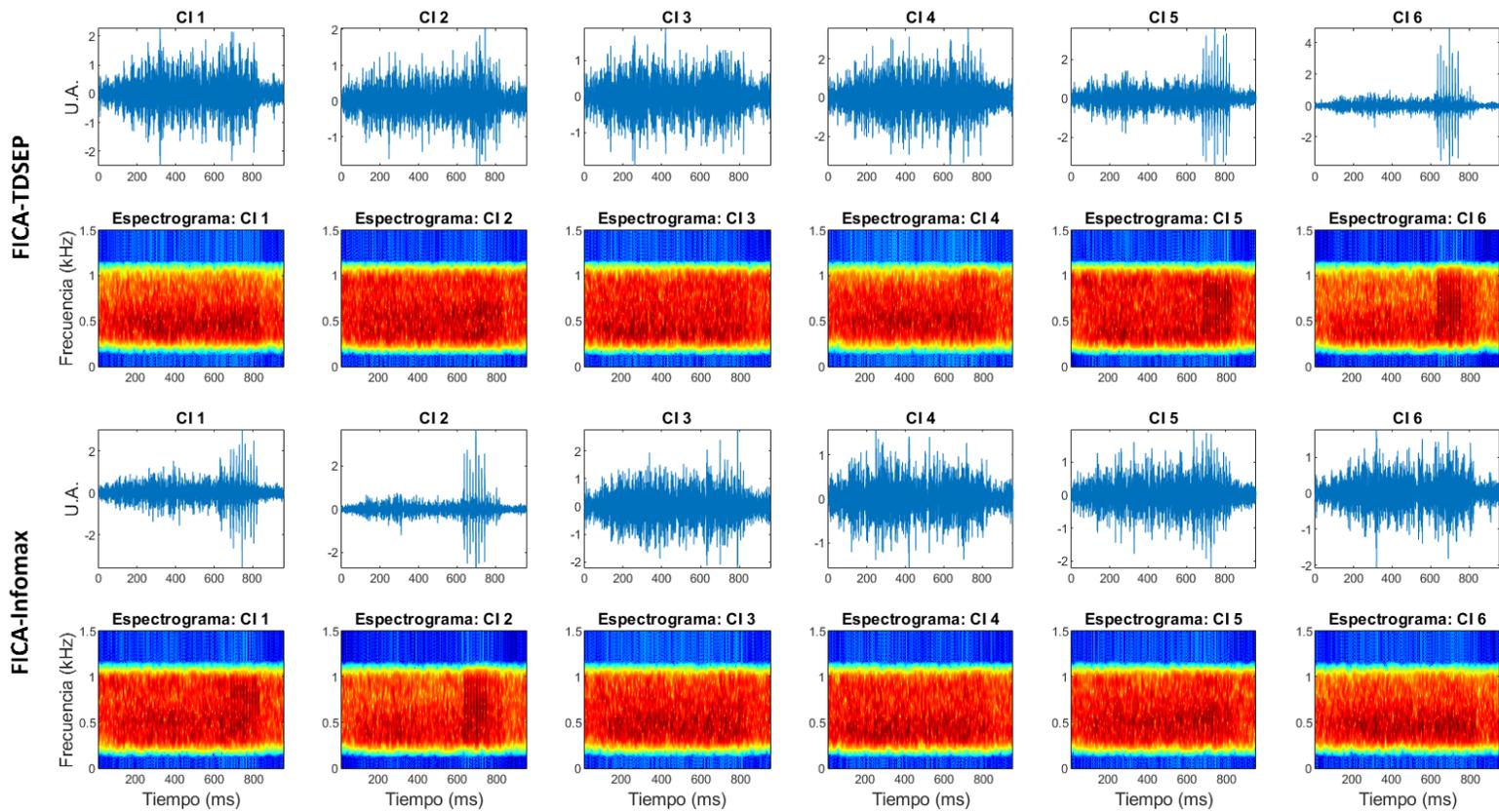


Figura A94. CIs presentados en la figura A92 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 19f: (de arriba abajo) Infomax y FICA. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

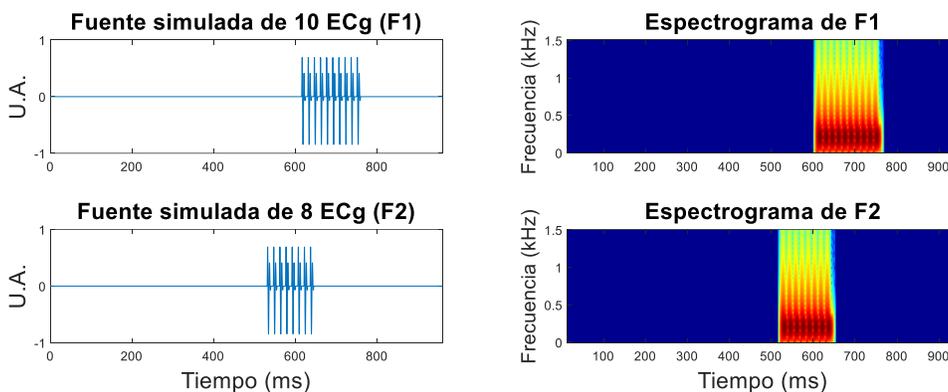


**Figura A95.** CIs presentados en la figura A93 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 19f: (de arriba abajo) FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

FICA y de FICA-TDSEP y del CI 1 de FICA-Infomax, al igual que los ECf de la fuente simulada F1, se encuentra entre los 650 y 850 ms con contenido en frecuencia alrededor de 650 Hz. El patrón de espigas de los CI 3 y CI 6 de Infomax, de los CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP y del CI 2 de FICA-Infomax se encuentra entre los 600 y 750 ms y posee información en frecuencia alrededor de 650 Hz, características similares a los ECf de la fuente simulada F2.

### A.18.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECg utilizadas en esta prueba, llamada prueba 19g, se encuentran junto a sus espectrogramas en la **figura A96**. Los CIs estimados por Infomax y FICA se encuentran en la **figura A97** mientras que los CIs estimados por FICA-TDSEP y FICA-Infomax se encuentran en la **figura A98**. Los CIs filtrados mediante FiltECg de Infomax y de FICA se muestran en la **figura A99** y en la **figura A100** se encuentran los CIs-FiltECg de FICA-TDSEP y de FICA-Infomax. En las gráficas de los CIs y de los componentes filtrados mediante FiltECg se observa el patrón de espigas asociado a EC en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los CI 1, CI 2 y CI 6 de Infomax, de los CI 3 y CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP, y de los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax. El patrón de espigas del CI 1 de Infomax y del CI 2 de FICA-Infomax se localiza entre los 600 y 800 ms, y contiene información en frecuencia alrededor de 200 Hz, características que comparten con los ECg de la fuente simulada F1. En cambio, el patrón de espigas de los CI 2 y CI 6 de Infomax y del CI 3 de FICA-Infomax, al igual que los ECg de la fuente simulada F2, se ubica entre los 500 y 650 ms con contenido en frecuencia alrededor de 200 Hz. Por su parte, el patrón de espigas de los CI 3 y CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP se localiza entre 500 y 800 ms y posee información en frecuencia alrededor de 200 Hz.



**Figura A96.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECg, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 19g.

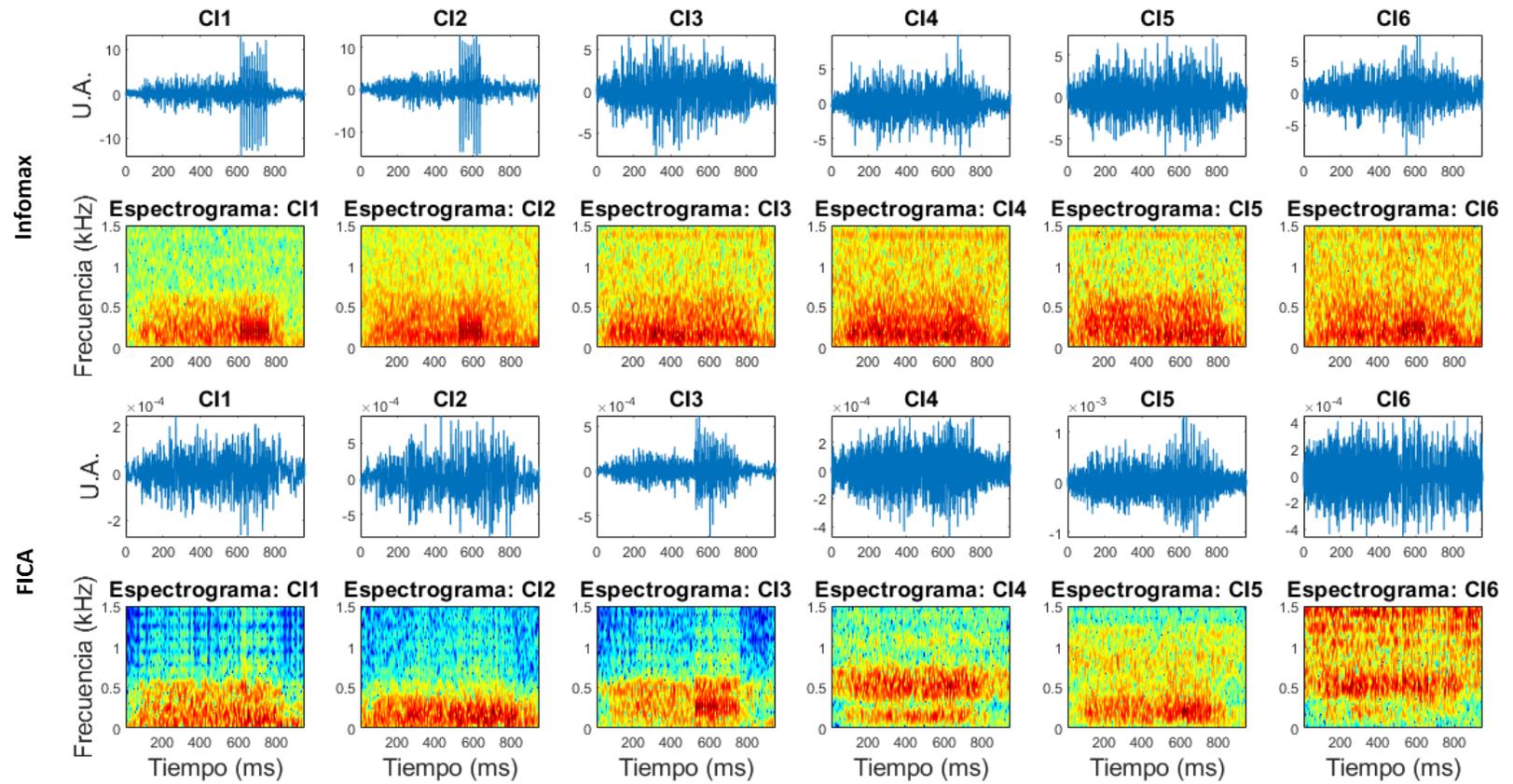
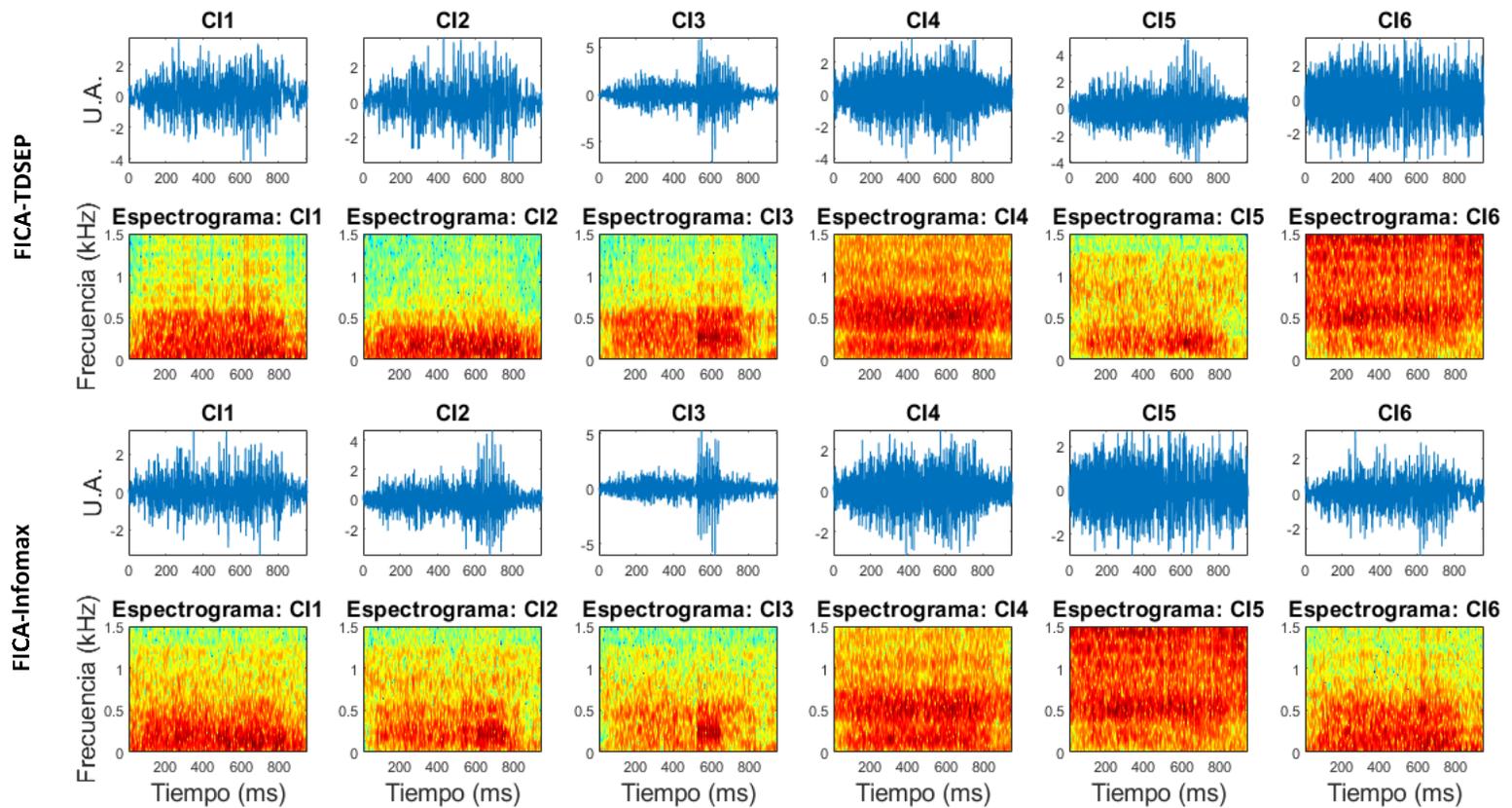


Figura A97. Componentes independientes estimados por los algoritmos de Infomax y FICA, de arriba abajo, en la Prueba 19g. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



**Figura A98.** Componentes independientes estimados por los algoritmos de FICA-TDSEP y FICA-Infomax, de arriba abajo, en la Prueba 19g. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.

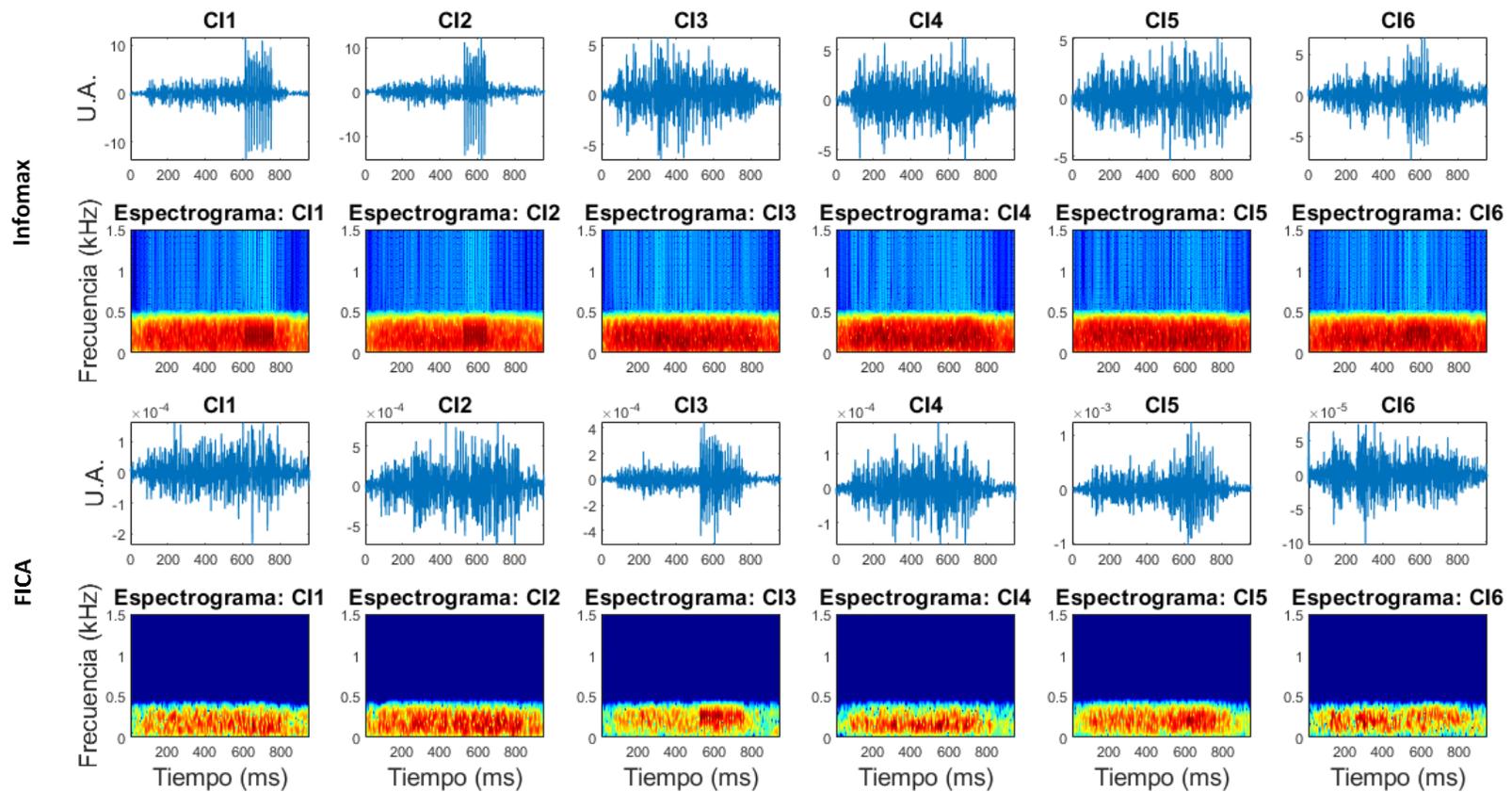
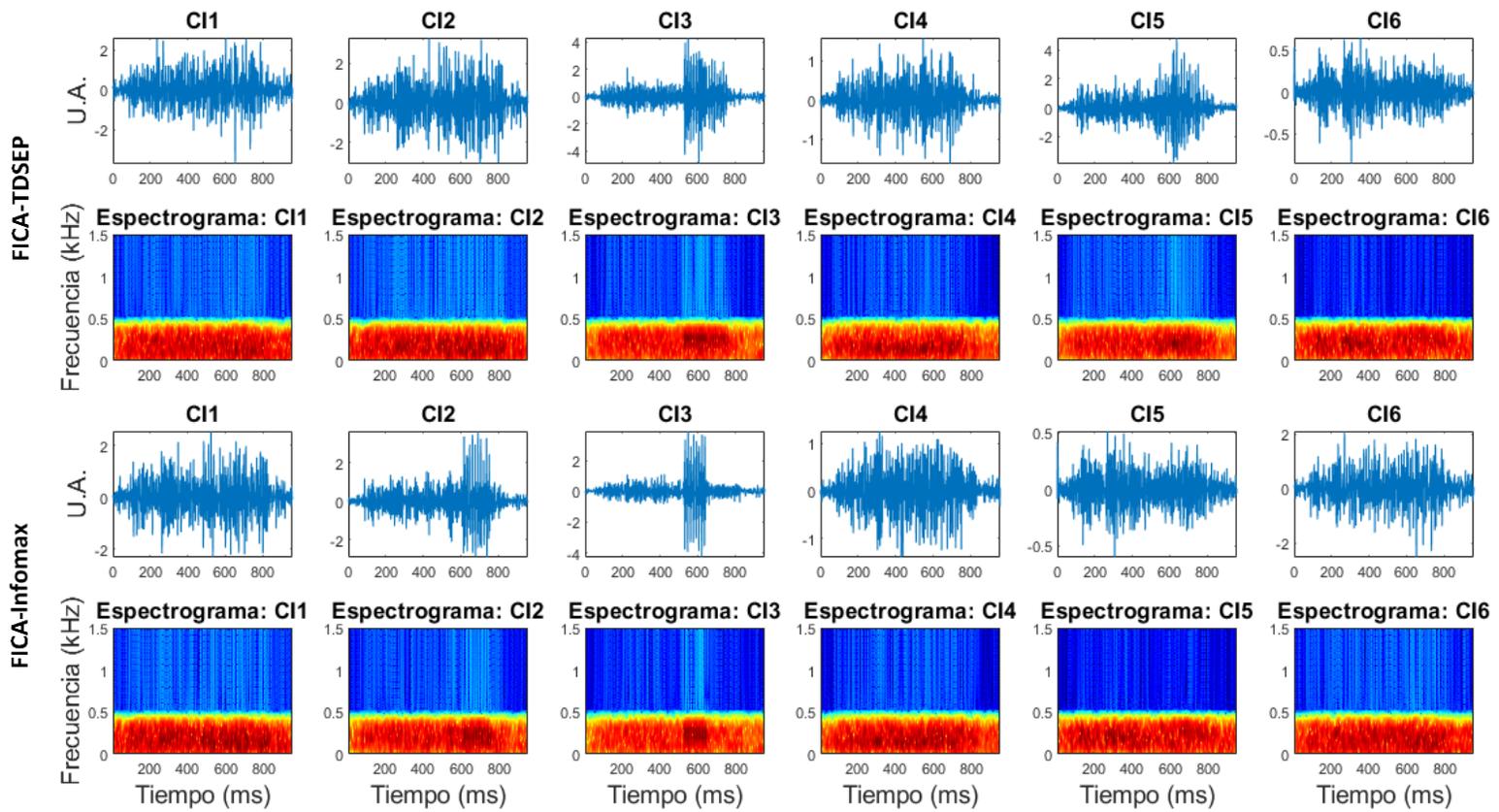


Figura A99. CIs presentados en la figura A97 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 19g: (de arriba abajo) Infomax y FICA. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.



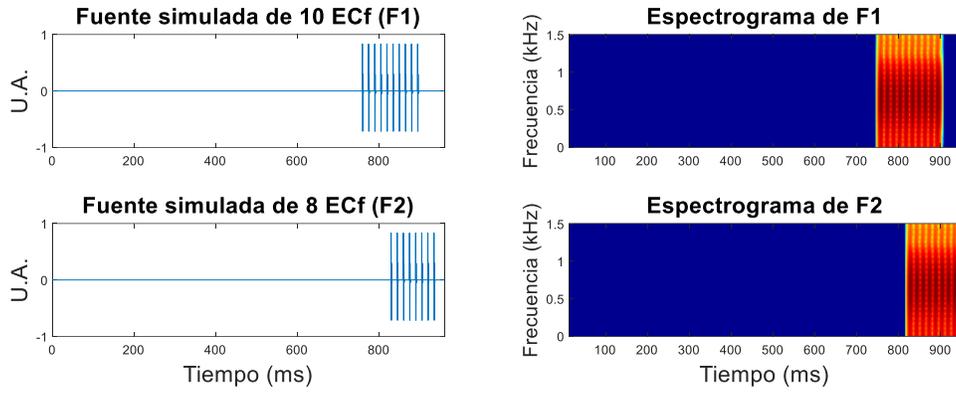
**Figura A100.** CIs presentados en la figura A98 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 19g: (de arriba abajo) Infomax, FICA, FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## A.19 Prueba 20 – Dos fuentes simuladas de EC con propagación bidireccional

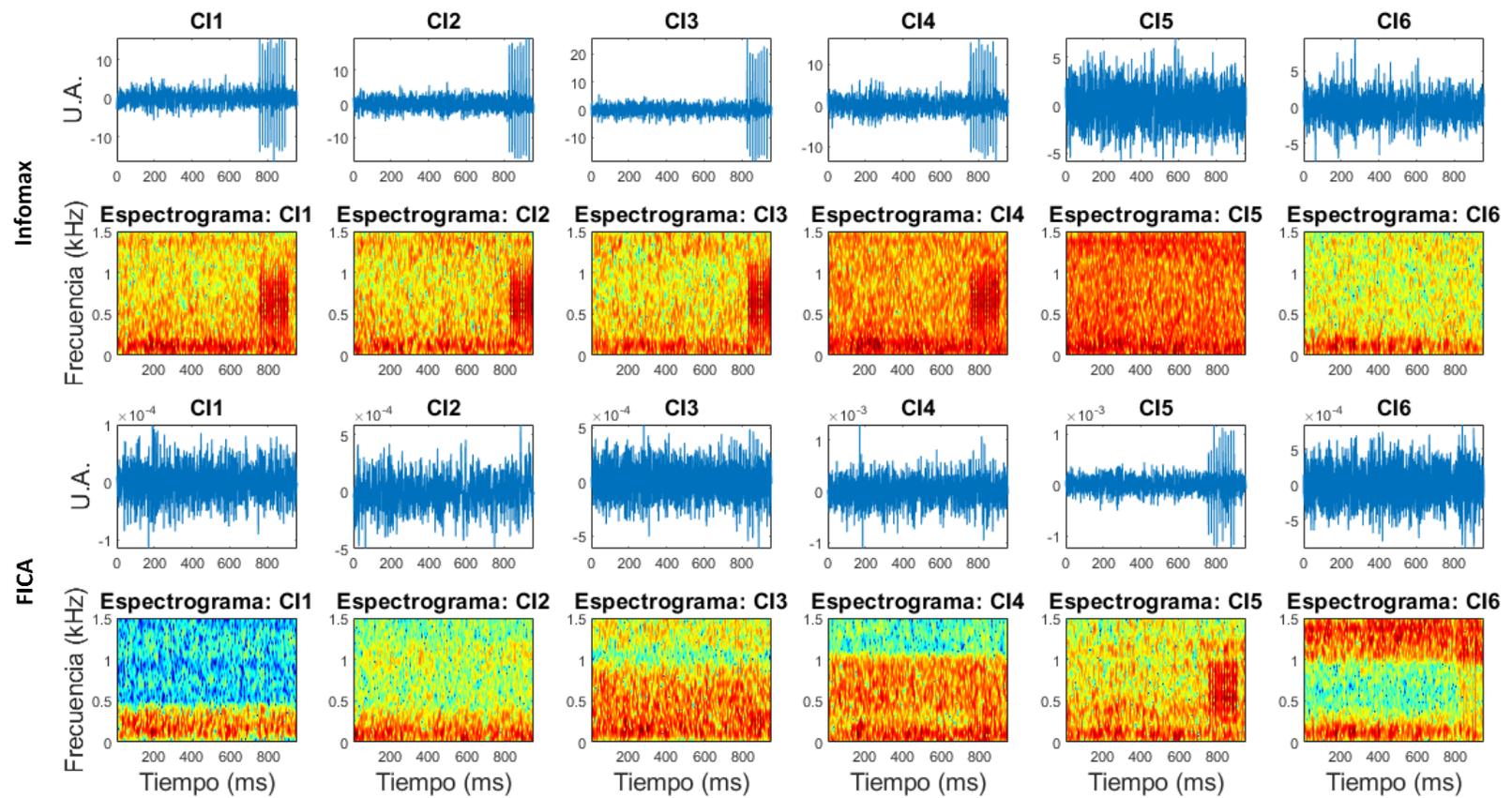
Para esta prueba se simularon dos fuentes de EC en la etapa de espiración del CR. La primera fuente, llamada F1, contiene 10 EC, se insertó en el micrófono PRC3 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PM3, PM4 y PRC4. La segunda fuente, llamada F2, cuenta con 8 EC, se insertó en el micrófono PRC4 y se propagó bidireccionalmente hacia los micrófonos PRC3, PRX3 y PRX4. Ambos micrófonos fuente actúan simultáneamente como micrófonos de propagación.

### A.19.1 Fuentes simuladas de EC de tipo fino

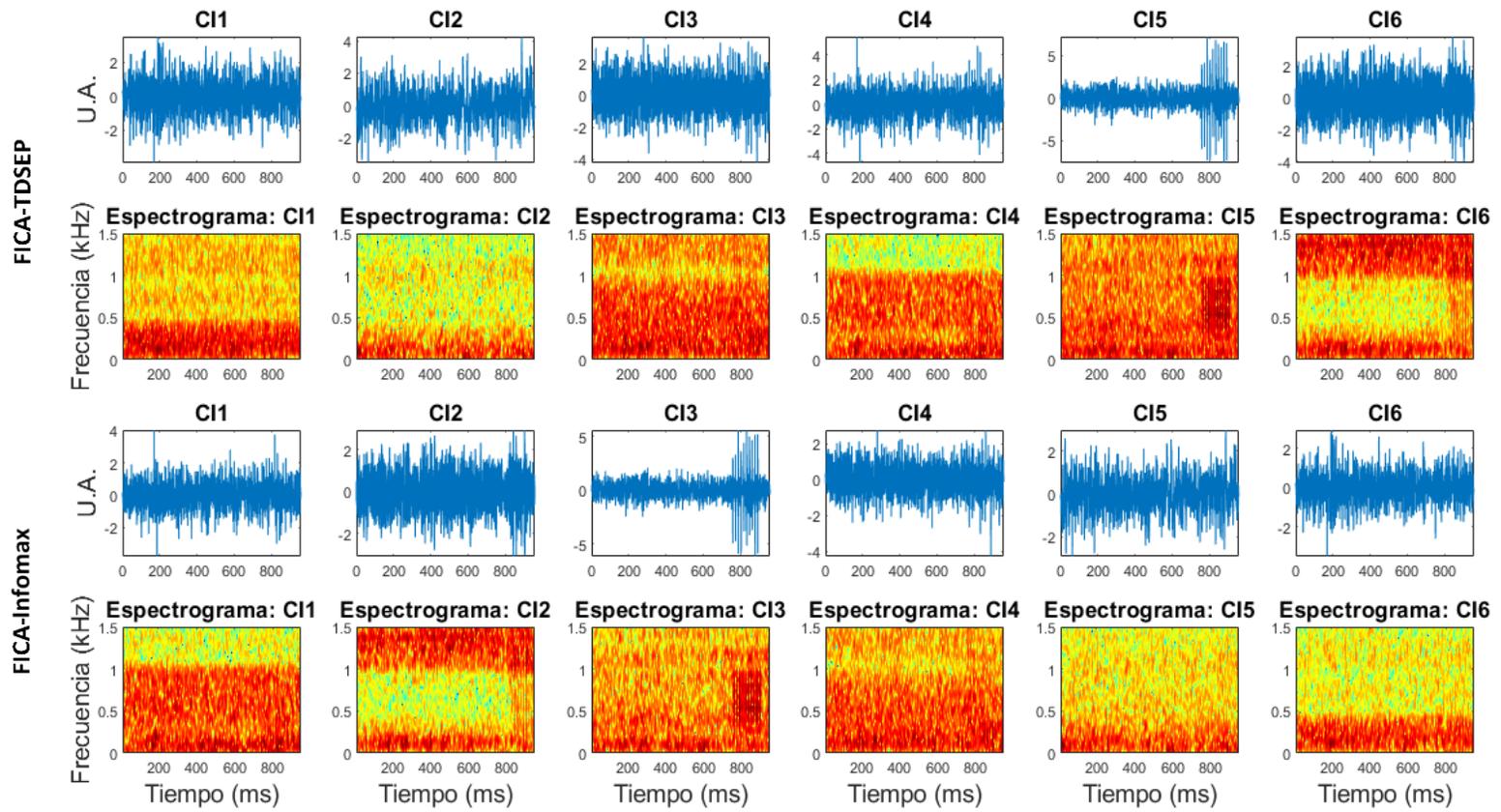
Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECf utilizadas en esta prueba, llamada prueba 20f, se encuentran en la **figura A101** junto a sus espectrogramas. Los CIs estimados por Infomax y FICA se encuentran en la **figura A102** mientras que los CIs estimados por FICA-TDSEP y FICA-Infomax se encuentran en la **figura A103**. Los CIs-FiltECf de Infomax y de FICA se muestran en la **figura A104** y en la **figura A105** se encuentran los CIs-FiltECf de FICA-TDSEP y de FICA-Infomax. En las gráficas de los CIs se identifican patrones de espigas asociados a EC en las representaciones temporales de los CI 1, CI 2, CI 3 y CI 4 de Infomax, en los CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP, y en el CI 3 de FICA-Infomax, mientras que en los espectrogramas se encuentran estos patrones en los componentes mencionados anteriormente y, además, en el CI 6 de FICA-TDSEP, en el CI 2 de FICA-Infomax y ligeramente en el CI 6 de FICA. En las gráficas de los CIs filtrados mediante FiltECf se observan patrones de espigas en los CI 1, CI 2, CI 3 y CI 4 de Infomax, en los CI 5 y CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP, y en los CI 2 y CI 3 de FICA-Infomax tanto en sus representaciones temporales como en los espectrogramas. Las espigas del patrón ubicado en los CI 1 y CI 4 de Infomax, en los CI 5 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 3 de FICA-Infomax se localizan entre los 700 y 900 ms y poseen información en frecuencia alrededor de los 650 Hz, indicando una asociación con los ECf de la fuente simulada F1. En cambio, el patrón de espigas de los CI 2 y CI 3 de Infomax, de los CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y del CI 2 de FICA-Infomax, se asocian a los ECf de la fuente simulada F2 debido a que tanto las espigas como los ECf se encuentran ubicados entre los 800 y 950 ms y cuentan con información en frecuencia alrededor de los 650 Hz.



**Figura A101.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECf, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 20f.



**Figura A102.** Componentes independientes estimados por los algoritmos de Infomax y FICA, de arriba abajo, en la prueba 20f. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



**Figura A103.** Componentes independientes estimados por los algoritmos de FICA-TDSEP y FICA-Infomax, de arriba abajo, en la prueba 20f. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.

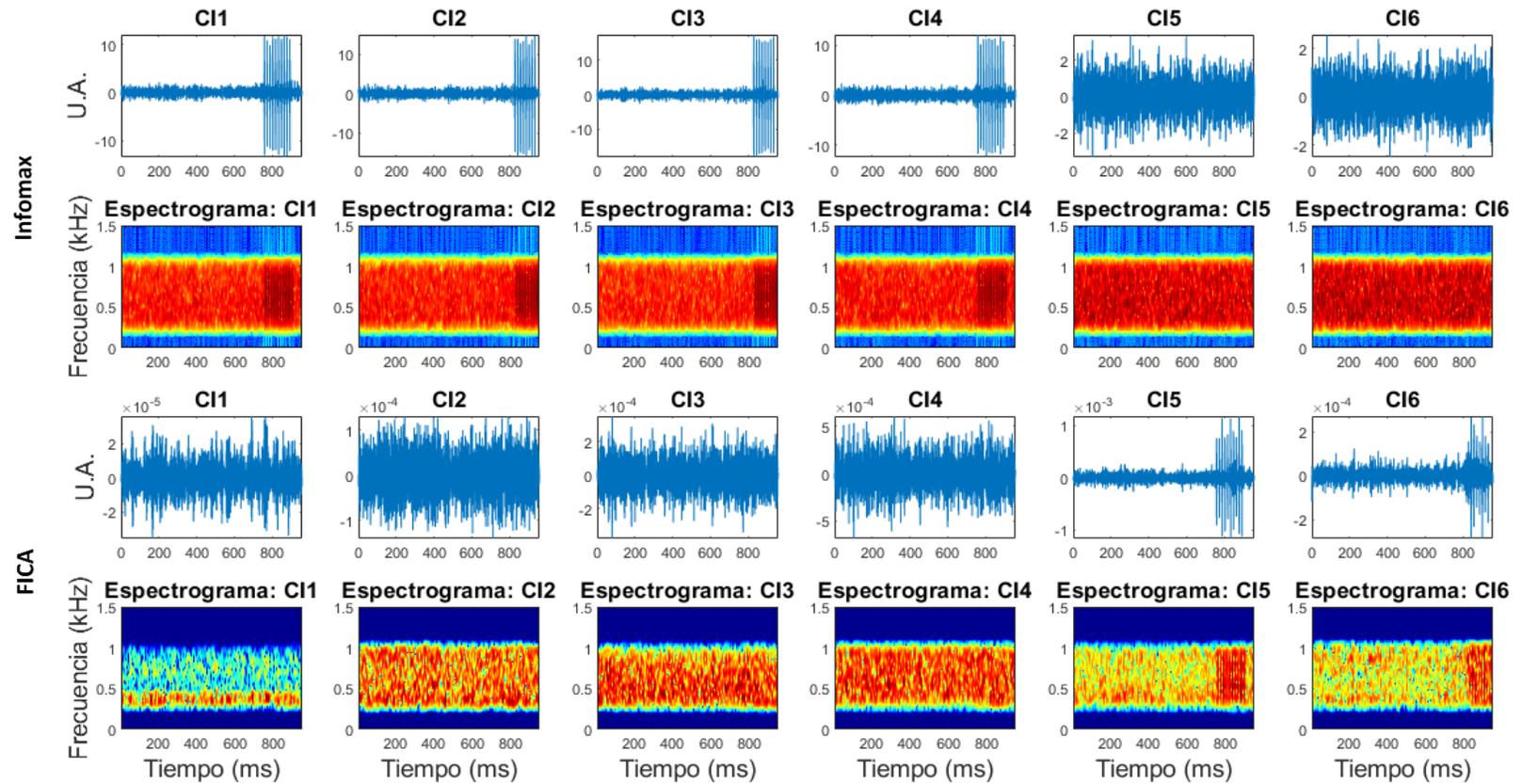


Figura A104. CIs presentados en la figura A102 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 20f: (de arriba abajo) Infomax y FICA. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

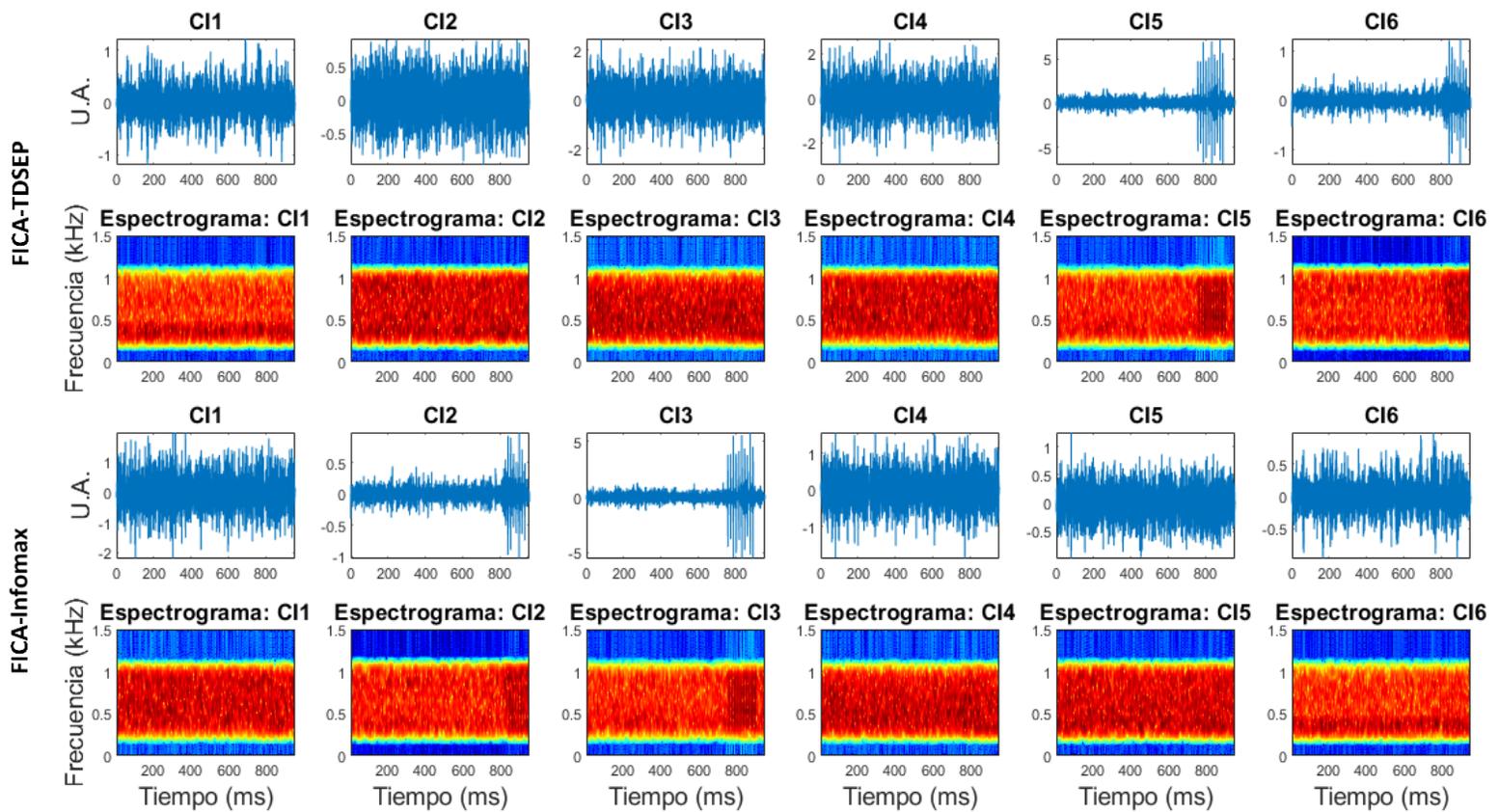
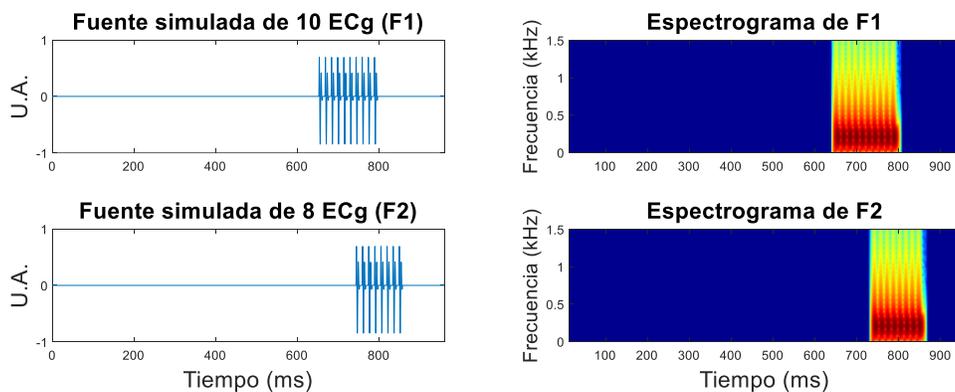


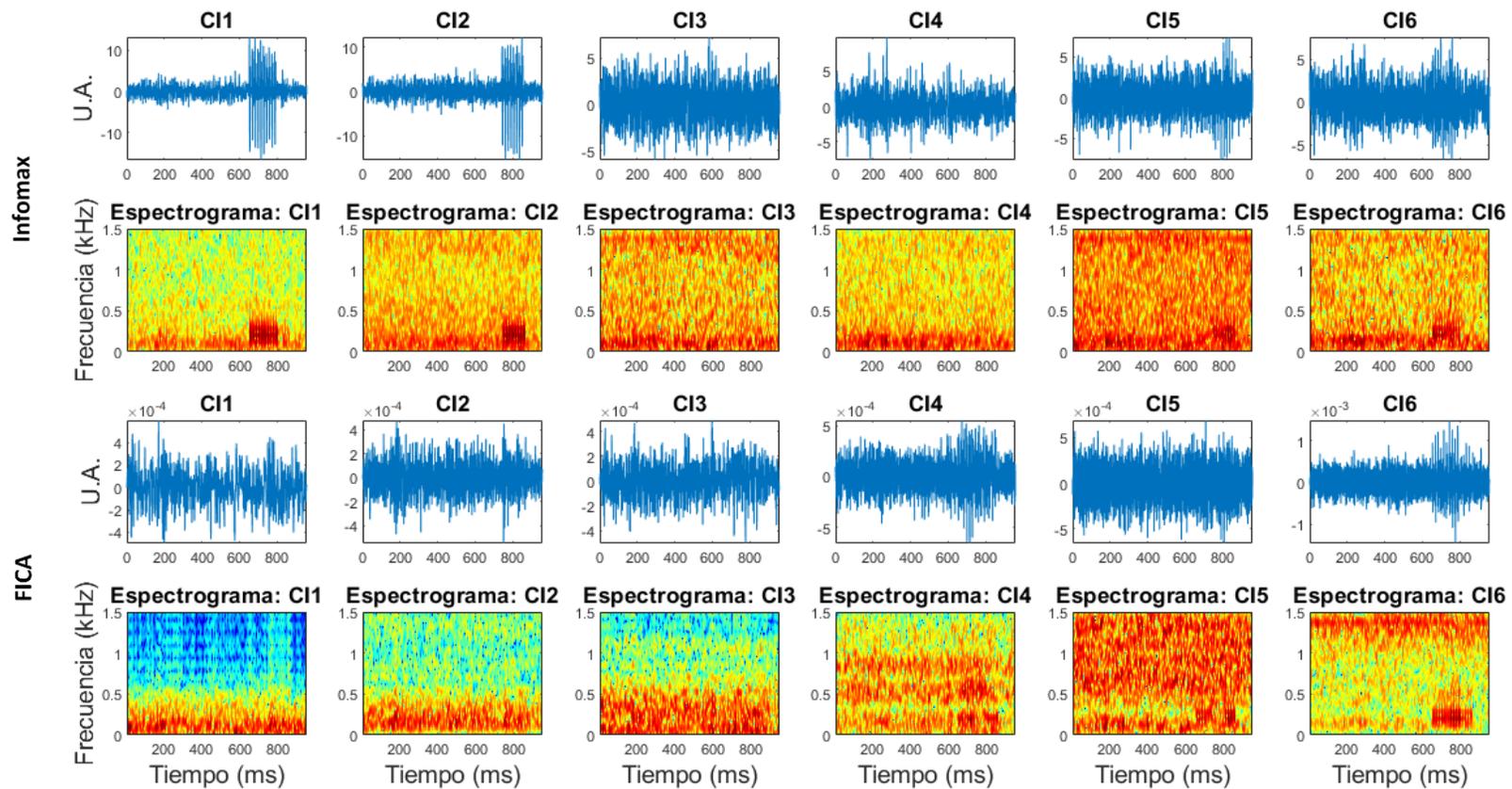
Figura A105. CIs presentados en la figura A103 y filtrados con FiltECf (CIs-FiltECf) en la prueba 20f: (de arriba abajo) FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

### A.19.2 Fuentes simuladas de EC de tipo grueso

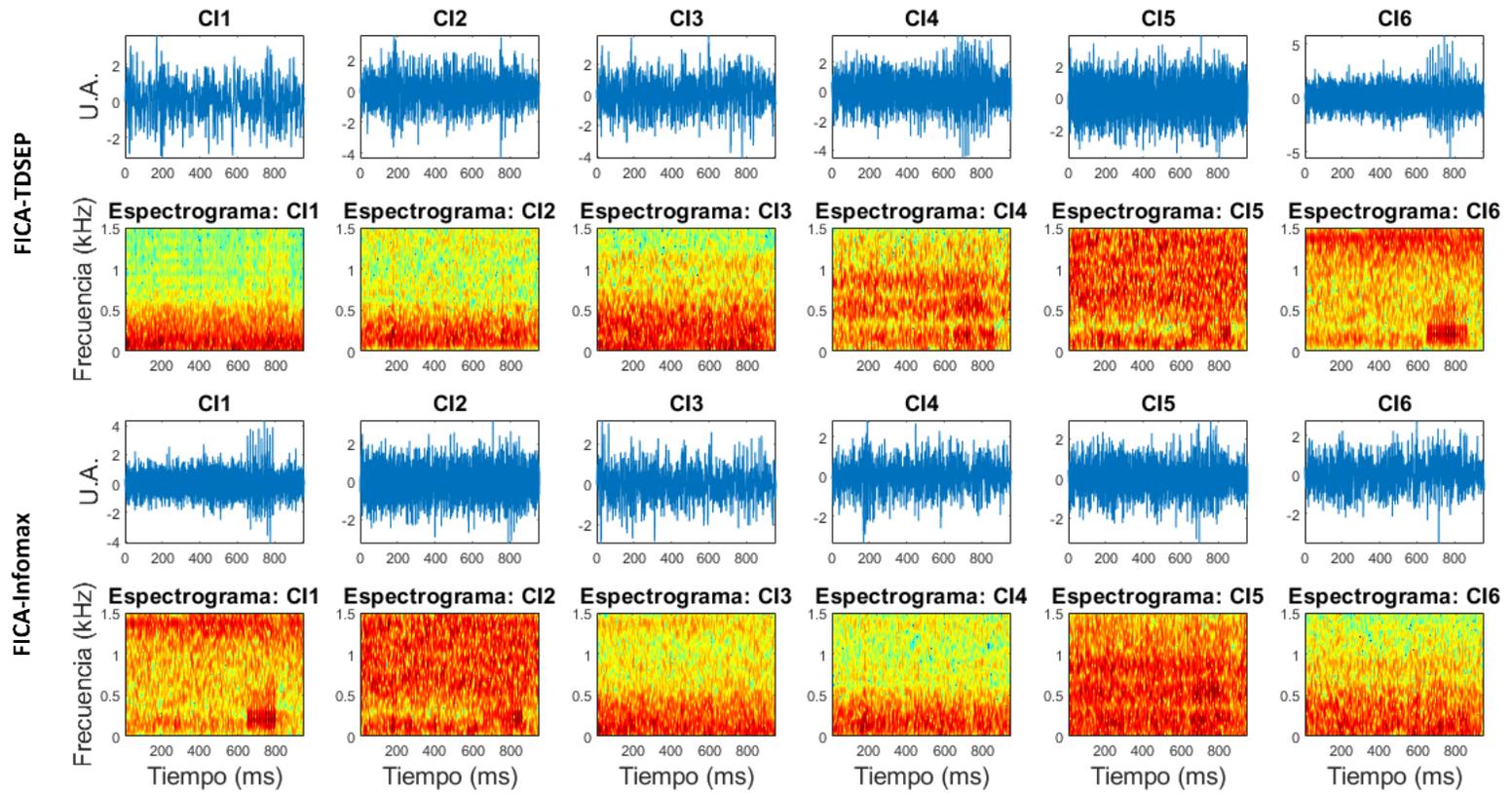
Las fuentes simuladas de 10 y 8 ECg utilizadas en esta prueba, denominada prueba 20g, se encuentran en la **figura A106** junto a sus espectrogramas. Los CIs estimados por Infomax y FICA se encuentran en la **figura A107** mientras que los CIs estimados por FICA-TDSEP y FICA-Infomax se encuentran en la **figura A108**. Los CIs-FiltECg de Infomax y de FICA se muestran en la **figura A109** y en la **figura A110** se encuentran los CIs-FiltECg de FICA-TDSEP y de FICA-Infomax. En las gráficas de los CIs se aprecian patrones de espigas en las representaciones temporales y espectrogramas de los CI 1, CI 2, CI 5 y CI 6 de Infomax, de los CI 4 y CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y del CI 1 de FICA-Infomax, y, además, en los espectrogramas de los CI 5 de FICA y FICA-TDSEP y del CI 2 de FICA-Infomax. En las gráficas de los CIs-FiltECg se encuentran patrones de espigas en las representaciones temporales y en los espectrogramas de los CI 1, CI 2, CI 5 y CI 6 de Infomax, de los CI 4, CI 5 y CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP, y de los CI 1 y CI 2 de FICA-Infomax. El patrón de espigas de los CI 1 y CI 6 de Infomax y del CI 1 de FICA-Infomax se localiza entre los 600 y 800 ms con contenido en frecuencia alrededor de 200 Hz, indicando una asociación con los ECg de la fuente simulada F1. Por su parte, las espigas del patrón ubicado en los CI 2 y CI 5 de Infomax se encuentran entre los 700 y 900 ms y poseen información en frecuencia alrededor de 200 Hz, indicando una asociación con los ECg de la fuente simulada F2. Finalmente, el patrón de espigas encontrado en los CI 4, CI 5 y CI 6 de FICA y de FICA-TDSEP y en el CI 2 de FICA-Infomax se ubica entre los 600 y 900 ms y contiene información en frecuencia alrededor de 200 Hz.



**Figura A106.** Fuentes simuladas F1 (gráficas superiores) y F2 (gráficas inferiores) de 10 y 8 ECg, respectivamente. Las representaciones temporales de F1 y F2 se encuentran a la izquierda mientras que los correspondientes espectrogramas se ubican a la derecha. Estas fuentes simuladas se emplearon en la prueba 20g.



**Figura A107.** Componentes independientes estimados por los algoritmos de Infomax y FICA, de arriba abajo, en la prueba 20g. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.



**Figura A108.** Componentes independientes estimados por los algoritmos de FICA-TDSEP y de FICA-Infomax, de arriba abajo, en la prueba 20g. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente.

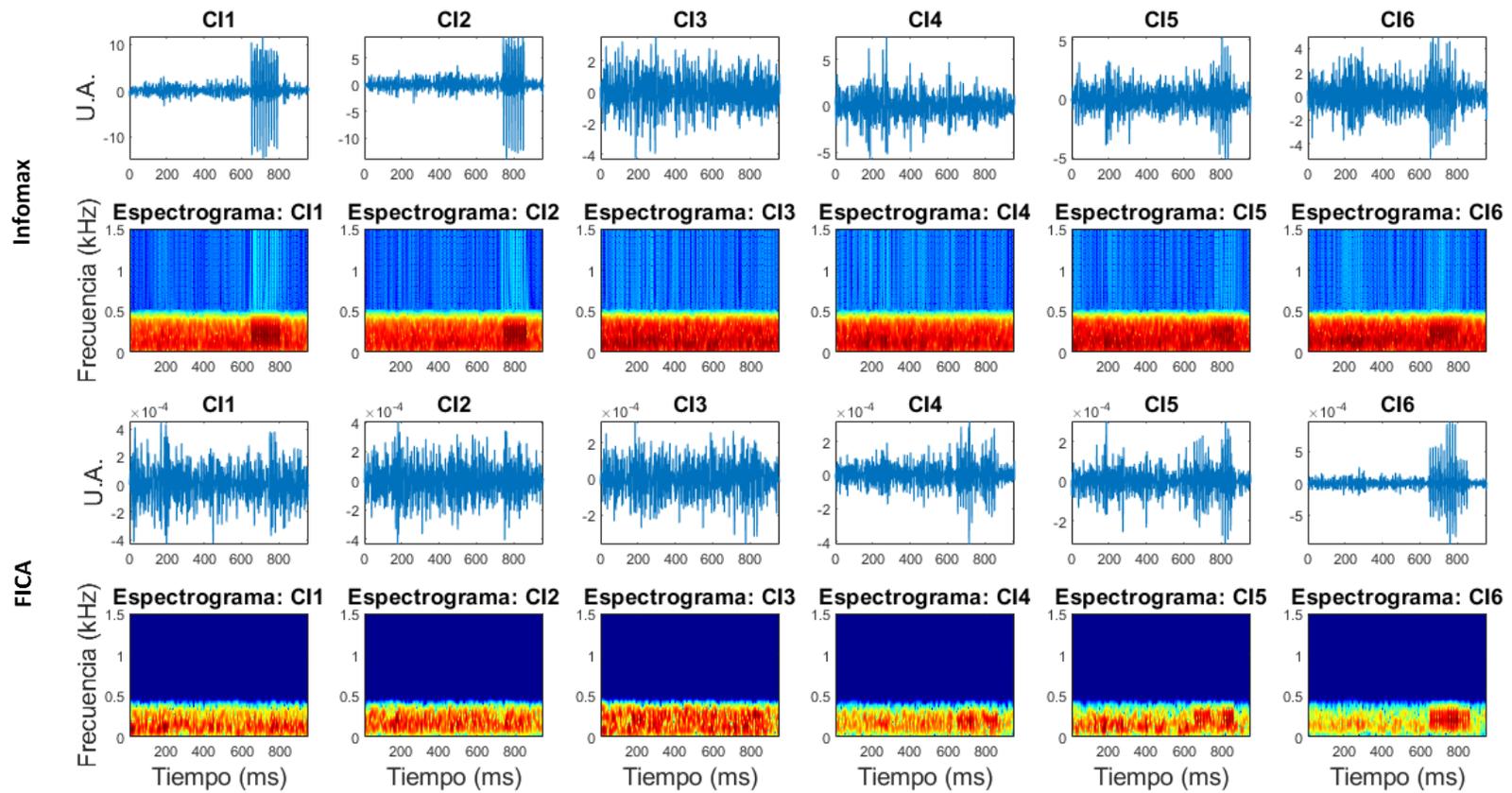
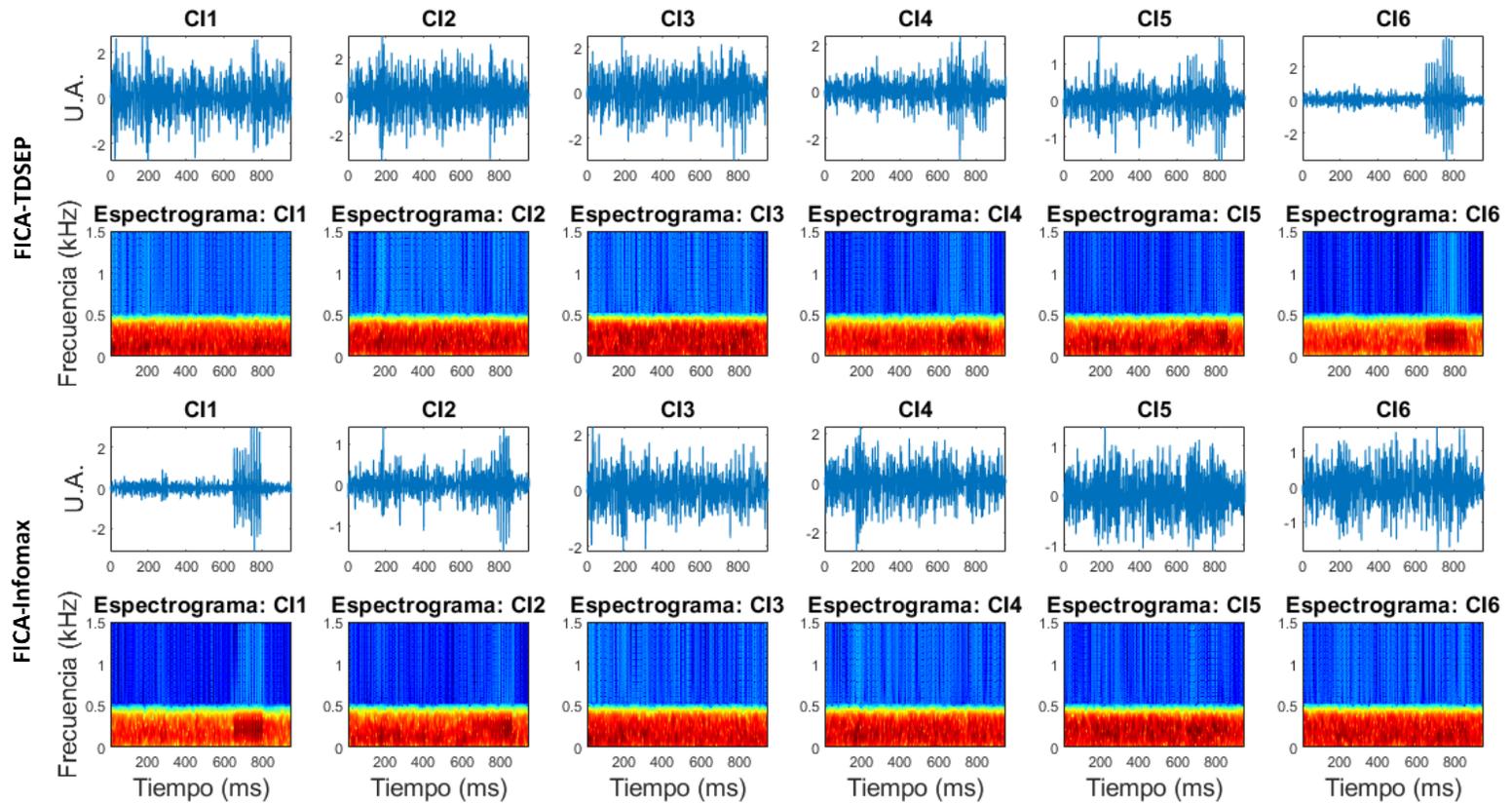


Figura A109. CIs presentados en la figura A107 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 20g: (de arriba abajo) Infomax y FICA. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.



**Figura A110.** CIs presentados en la figura A108 y filtrados con FiltECg (CIs-FiltECg) en la prueba 20g: (de arriba abajo) FICA-TDSEP y FICA-Infomax. El espectrograma del CI se muestra debajo del correspondiente componente filtrado.

## ANEXO B

### B.1 Artículo de investigación publicado online en la revista “Health and Technology”, editorial “Springer”

Autores: **I.B. Martín Emiliano Rodríguez García**, Dra. Sonia Charleston Villalobos, Dra. Norma Castañeda Villa, Dra. Aída Jiménez González, Dr. Ramón González Camarena, Dr. Ángel Tomás Aljama Corrales.

Título: *Automated extraction of fine and coarse crackles by independent component analysis.*

Revista: *Health and Technology.*

Editorial: Springer.

Fecha de recepción: 15 de enero de 2019.

Fecha de aceptación: 22 de agosto de 2019.

DOI: 10.1007/s12553-019-00365-w.



# Automated extraction of fine and coarse crackles by independent component analysis

Martín Emiliano Rodríguez-García<sup>1</sup> · Sonia Charleston-Villalobos<sup>1</sup> · Norma Castañeda-Villa<sup>1</sup> · Aida Jiménez-González<sup>1</sup> · Ramón González-Camarena<sup>2</sup> · Ángel Tomás Aljama-Corrales<sup>1</sup>

Received: 15 January 2019 / Accepted: 22 August 2019  
© IJPEGM and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

## Abstract

In this work further research was achieved on the separation by Independent Components (IC) of simulated abnormal breathing sounds (ABS) sources immersed in normal breathing sounds. This study considers only ABS discontinuous sounds, known as crackles, and includes fine and coarse types for both inspiratory and expiratory phases. Additionally, we develop a novel proposal to automated characterization of the IC associated with crackles. We analyzed the efficiency of three independent component analysis algorithms, i.e. FastICA, Infomax and TDSEP, through the Amari index, the signal to interference ratio, and the total relative distortion index. In the simulated multichannel signal scenarios, the performance indexes showed that Infomax is the best algorithm to solve the problem of blind source separation, supporting the results found in previous efforts. Finally, the presence of crackles in the IC obtained by Infomax was determined through their kurtosis and skewness, whereas the type of crackle was found by their characterization via the spectrogram of selected IC. Results indicate that the proposed methodology is able to adequately extract the crackle sources and identify the respiratory cycle phase in which they appear. Also, we managed to estimate the type and number of existing crackles in each source. In conclusion, our methodology can provide quantitative information on the clinical relevance of crackles in respiratory patients.

**Keywords** Blind source separation · Crackles · Kurtosis · Skewness · Spectrogram

## 1 Introduction

Breathing sounds (BS) offer relevant information on pulmonary parenchyma and airways physiology and pathology. As a result, the methods used for analyzing BS components are of special importance [1, 2]. The BS acoustic characteristics differ significantly between normal and abnormal sounds. Normal breathing sounds (NBS) are produced by the respiratory activity in healthy subjects and are differentiated according to their localization in the thoracic surface, the respiratory cycle phase, and with the square of the air flow [2]. On the other hand, abnormal sounds have acoustic characteristics that indicate the

presence, severity, and localization of a disease in the respiratory system [2].

Discontinuous abnormal sounds, also known as crackles, have an explosive and transient character. In terms of their temporal morphology, crackles can be classified as fine (FC) and coarse (CC) and can be produced in different lung diseases, such as pulmonary fibrosis or asbestosis. It is clinically relevant to detect crackles and establish their characteristics and localization in both the respiratory cycle and the thoracic surface [2].

One of the most recent techniques for crackle extraction from BS is independent component analysis (ICA). For ICA, relevant assumptions are that crackles are added to BS and that these sources are independent by being generated through different biological processes. In other words, BS are generated by turbulences in the bronchial tree, whereas crackles are produced by the sudden opening of abnormally closed airways [3, 4]. Recently, the viability of different ICA algorithms has been evaluated for the extraction of independent components (IC) associated with crackles [1]. Nonetheless, in these previous efforts, it was not considered the possible temporal overlapping of crackles due to

✉ Martín Emiliano Rodríguez-García  
emilianorodriguez@xanum.uam.mx

<sup>1</sup> Electrical Engineering Department, Metropolitan Autonomous University, Mexico City, Mexico

<sup>2</sup> Health Sciences Department, Metropolitan Autonomous University, Mexico City, Mexico

simultaneous openings of different airways. In [3], clustering of sources via nonlinear indexes is used in the automated selection of IC associated with crackles in multichannel recordings. However, only FC sounds in the inspiratory phase were simulated to test the proposed automated selection, thus ignoring CC sounds and the expiratory phase.

This study presents an additional step in the multichannel BS processing via ICA considering simulations that include 1) different types of crackles, 2) temporal overlapping of crackle sources, and 3) both inspiratory and expiratory phases. The elements incorporated in this study better reflect the real conditions in which BS are acquired; hence this research work may represent a more robust blind source separation (BSS) technique for crackles in BS. To this end, we proposed in this study two simulated scenarios. In the first one, we evaluated the efficiency of three popular ICA algorithms, FastICA, Information-Maximization (Infomax), and Temporal Decorrelation Source Separation (TDSEP), to select the optimal algorithm to extract crackle sounds. Once the optimal algorithm was selected, the second simulated scenario allowed the detection and automated selection of IC associated with crackles.

## 1.1 Theoretical background

### 1.1.1 Independent component analysis

ICA is a statistical technique that looks to recover a group of unobserved independent signals from their lineal mixture in measured signals. In the noise-free ICA model, the measured signals  $\mathbf{x}(t)$  are represented by  $\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t)$ , where  $\mathbf{s}(t)$  are the unobserved source signals, and  $\mathbf{A}$  is the mixing matrix, which is invertible and has linearly independent columns. By calculating the inverse of  $\mathbf{A}$ , i.e., separation matrix  $\mathbf{W}$ , the source estimations or independent components  $\hat{\mathbf{s}}(t)$  are calculated as  $\hat{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t)$ . FastICA, Infomax, and TDSEP are among the most popular ICA algorithms. FastICA minimizes negentropy between components, Infomax maximizes the joint entropy of the components by minimizing the existing mutual information between them, and TDSEP minimizes the existing temporal cross-correlation between components [5].

### 1.1.2 Skewness and kurtosis

Skewness and kurtosis are representative indexes of the probability density function of a random variable based on the third and fourth central moment, respectively. Skewness describes the asymmetry degree of a distribution, where zero represents a symmetrical distribution. On the other hand, kurtosis describes the degree of data concentration around the mean value – a Gaussian distribution has a kurtosis value of zero [6].

### 1.1.3 Spectrogram

Time-frequency analysis of a non-stationary signal can be achieved by the squared magnitude of the short-time Fourier transform [7]. In this paper, the spectrogram is used to characterize the crackle sources.

## 2 Methods

### 2.1 Simulated scenarios

#### 2.1.1 Breathing sounds from healthy subjects

To generate the proposed scenarios, NBS data from a healthy subject were used in which simulated crackles were inserted. The participant included in the study gave his informed consent. The BS signals were acquired on the back of the subject with a  $5 \times 5$  microphone array. For further details on the microphone array, sensor nomenclature, and the breathing maneuver performed by the subject, refer to [1, 3, 4]. For the digitalization of the multichannel BS and air flow signals we used a 12 bit A/D card with a sample frequency of 10 kHz. The signals were filtered with a 201 order, FIR band-pass filter in the 75 to 1500 Hz band.

#### 2.1.2 Simulated crackles – Single channel scenario

To create the first simulated scenario (i.e., simulated scenario 1) we considered five sources, and thus five mixtures. This scenario was built by linearly combining one NBS channel with two simulated FC sources and two simulated CC sources using a random mixing matrix  $\mathbf{A}$ , whose coefficients guaranteed a low enough signal to noise ratio (SNR) to make sure that the crackles were not visible. We simulated both FC and CC using the mathematical model proposed by Kiyokawa et al. [8]. This model maintains the temporal characteristics of FC, with an initial width deflection (IDW) of 0.9 ms and a two cycle duration (2CD) of 3 ms, and those of CC, with an IDW of 2.2 ms and a 2CD of 10 ms [9]. The crackles were inserted in the inspiratory (IP) and expiratory (EP) phases considering temporal overlapping. Furthermore, source 1 is given by the NBS channel, source 2 contains six FC in the IP, source 3 contains five CC in the IP, source 4 contains five FC in the EP, and source 5 contains six CC in the EP. For BSS and to select the optimal algorithm we used the ICA algorithms previously mentioned (i.e. FastICA, Infomax, and TDSEP). In FastICA we obtained symmetrically the IC and we used the hyperbolic tangent as the non-linear function. In TDSEP we used time delays in the range  $\tau = 0, 1, \dots, 50$ . Finally, in Infomax we used the extended version.

### 2.1.3 Simulated crackles – Multichannel scenario

In the second scenario (i.e., scenario 2), we used a NBS multichannel record (25 channels) and four types of insertion: ten FC in the IP, nine CC in the IP, nine FC in the EP, and ten CC in the EP. These four simulated crackle sources were inserted in the PRC4, PM4, PRX3, and PLC3 channels, respectively, considering crackle transmission between channels as well as temporal overlap. We made the insertions by adding the crackle sources to the NBS, maintaining the same SNR restriction achieved in scenario 1.

### 2.2 Optimal ICA algorithm selection

The Amari index (Am) and the signal-to-interference ratio (SIR) were among the indexes used to evaluate the separation made by the three ICA algorithms in scenario 1. Further information of these indexes can be consulted in [1, 10]. As the third index, we calculated the total relative distortion (TRD), defined as follows:

$$TRD = \frac{\|\hat{s}_i\|^2 - \langle \hat{s}_i, s_i \rangle^2}{\langle \hat{s}_i, s_i \rangle^2} \quad (1)$$

where  $\hat{s}_i$  represents the estimated sources and  $s_i$  the reference signals. TRD represents the total error in the source separation, i.e. it is associated with different types of errors in the estimations (e.g. interferences, noise, and artefacts). Ideally, TRD should equal zero [11].

### 2.3 Automated crackle detection

For the second scenario we used the algorithm with the best performance obtained during the evaluation made in scenario 1. Once the IC were calculated, we performed the automated selection and characterization of the ones containing crackle information according to the following steps:

1. We determined crackle presence in the IC by calculating the kurtosis and skewness of each of the squared components during IP and EP. If the values for kurtosis and skewness overcome the established thresholds in either IP or EP, this specific IC are confirmed to contain crackles in that respiratory phase. After a series of preliminary tests involving IC with and without crackles, kurtosis and skewness thresholds were set at 35 and 4.5, respectively.
2. We determined the crackle types (i.e. fine or coarse) with the spectrogram of the selected IC from step 1. Knowing in which phase of the respiratory cycle the crackles are located, the spectral power was calculated in the frequency bands given by the 2CD of FC and CC. The frequency

**Table 1** Performance indexes of ICA algorithms

Index		FastICA	Infomax	TDSEP
Am		0.36	<b>0.30</b>	4.13
SIR	Source 1	89.35e+002	<b>67.07e+004</b>	0.59e+002
	Source 2	2.52e+002	<b>2.06e+004</b>	1.20e+002
	Source 3	390.62e+002	<b>909.64e+004</b>	30.15e+002
	Source 4	<b>1.15e+004</b>	0.24e+004	27.80e+002
TRD	Source 1	1.11e-004	<b>0.14e-005</b>	16.88e-003
	Source 2	39.67e-004	<b>4.83e-005</b>	7.77e-003
	Source 3	0.25e-004	<b>0.01e-005</b>	0.33e-003
	Source 4	<b>0.86e-004</b>	4.08e-004	0.35e-003

**Boldface type indicates best performances.**

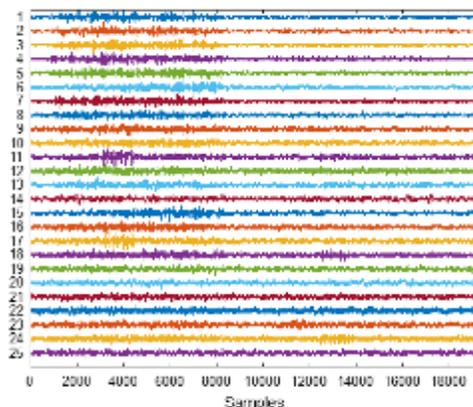
band for CC is between 195 and 205 Hz, whereas for FC, it is between 660 and 670 Hz. The type of crackle was determined according to the frequency band with the highest spectral power.

3. We determined the number of crackles by obtaining local maxima of the envelope of the frequency band, in the corresponding respiratory phase, of the crackle type that exists in the selected IC.

## 3 Results

### 3.1 Optimal ICA algorithm selection

Table 1 shows the calculated performance indexes for the three ICA algorithms. According to the Am index, Infomax had the best performance, thus obtaining the lowest value of



**Fig. 1** IC obtained by Infomax in the scenario 2

**Table 2** Calculated kurtosis and skewness in scenario 2

Index	IC (a.u.)							
	11th		17th		18th		24th	
	IP	EP	IP	EP	IP	EP	IP	EP
Kurtosis	<b>58.1</b>	16.5	<b>111.0</b>	13.3	26.9	<b>81.4</b>	15.9	<b>38.3</b>
Skewness	<b>6.48</b>	3.26	<b>8.91</b>	3.02	3.25	<b>7.45</b>	3.21	<b>5.21</b>

IP: Inspiratory phase. EP: Expiratory phase. Boldface type indicates presence of crackles in corresponding respiration cycle phases of specified IC.

the three algorithms, followed by FastICA. SIR indicates that Infomax achieved the best source extraction in three of the four crackle sources (sources 2–4), whereas TRD shows that, for the same sources, Infomax achieved the lowest degree of distortion. Thus, according to the SIR and TRD values, Infomax achieved an acceptable performance in the extraction of source 5. Given these results, we chose Infomax as the best algorithm to separate crackles from NBS.

### 3.2 Automated crackle identification in the IC

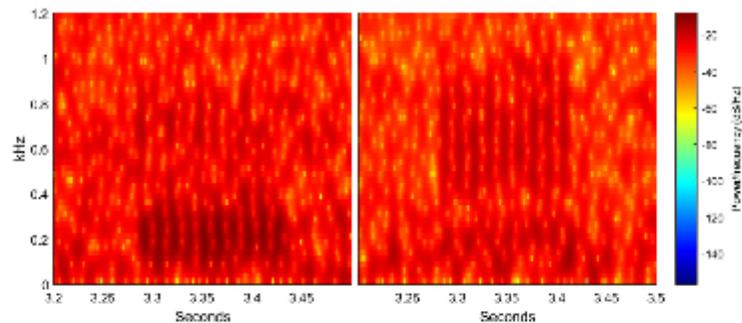
Figure 1 depicts the 25 IC obtained by Infomax from a respiratory cycle. In the 11th, 17th, 18th and 24th IC estimated crackle sources can be observed, whereas the rest of the IC resemble respiratory sound information. Table 2 shows the calculated kurtosis and skewness values in a respiratory cycle of the four aforementioned IC. These indexes allowed us to automatically detect the 11th and 17th IC as sources with crackles in the IP, and IC 18 and 24 as sources with crackles in the EP.

The spectral power in the FC and CC frequency bands during the IP for the 11th and 17th IC and during the EP for the 18th and 24th IC indicated that both the 11th and 24th IC contained CC, whereas the 17th and 18th IC contained FC. Finally, we calculated the number of crackles in each of these IC: the 11th and 18th IC included nine crackles each, whereas

the 17th and 24th IC had ten crackles a piece. Together, these results show that nine CC in the IP were present in the 11th IC, ten FC in the IP were present in the 17th IC, nine FC in the EP could be found in the 18th IC, and ten CC in the EP could be found in the 24th IC. These results indicate that the 11th, 17th, 18th, and 24th IC correspond to the four simulated crackle insertions described in scenario 2. The difference in the spectral power of the frequency bands between FC and CC can be seen in the spectrograms introduced in Fig. 2.

## 4 Discussion

We proposed a methodology for the automated extraction and identification of the type and number of crackles in NBS by ICA. Through simulated crackles, we managed to generate a controlled scenario to find the optimal ICA algorithm to separate NBS from FC and CC, inserted in both the IP and EP of the respiratory cycle. The results show that our methodology is efficient in terms of detection and characterization of IC with the presence of crackles. Similarly, we demonstrated that it is possible to determine the components containing crackles as well as the phase of the respiratory cycle in which they appear by calculating kurtosis and skewness values. The spectral power in the frequency bands of FC and CC provided a viable method for differentiating crackle types. Also, the envelope of the spectral power of the crackle type enabled us to calculate the number of existent crackles in the IC by obtaining local maxima. As future work, we plan to validate the methodology with both a larger number of simulated scenarios and BS recordings from pulmonary patients. Similarly, notice that real crackles may have different temporal morphology if compared to the ones simulated in this research work which is particularly due to the variations of the crackle generator mechanism with respect to mechanical and dynamical characteristics of airways. Finally, different time-frequency representations will be further assessed to improve temporal and frequency crackle localization.

**Fig. 2** Spectrograms of simulated CC (left) and FC (right)

## 5 Conclusions

Infomax achieved a good source separation of the simulated crackles and the NBS in both scenarios, which allowed the methodology to properly identify the IC containing crackles, the phase of the respiratory cycle in which they appear, crackle type, and number of existent crackles. Obtaining this information by an automated process allows a quantitative analysis that may provide relevant clinical information on lung conditions in patients.

**Funding** There is no funding source.

## Compliance with ethical standards

**Conflict of interest** The authors declare that they have no conflict of interest.

**Ethical approval** This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

**Informed consent** Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

## References

1. Castañeda-Villa N, Charleston-Villalobos S, González-Camarena R, Aljama-Corales T. Assessment of ICA algorithms for the analysis of crackles sounds. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2012; 605–8.
2. Reyes BA, Charleston-Villalobos S, González-Camarena R, Aljama-Corales T. Assessment of time-frequency representation techniques for thoracic sounds analysis. *Comput Methods Prog Biomed.* 2014;114(3):276–90.
3. Charleston-Villalobos S, Castañeda-Villa N, González-Camarena R, Mejía-Ávila M, Aljama-Corales T. Automated clustering of independent components for discontinuous sounds thoracic imaging. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2015;4126–9.
4. Charleston-Villalobos S, González-Camarena R, Chi-Lem G, Aljama-Corales T. Crackle sounds analysis by empirical mode decomposition. *IEEE Eng Med Biol Mag.* 2007;26(1):40–7.
5. Mantini D, Hild K, Allea G, Comari S. Performance comparison of independent component analysis algorithms for fetal cardiac signal reconstruction: a study on synthetic MCG data. *Phys Med Biol.* 2006;51(4):1033–46.
6. Kamiya A, Murayama S, Kamiya H, Yamashiro T, Oshiro Y, Tanaka N. Kurtosis and skewness assessments of solid lung nodule density histograms: differentiating malignant from benign nodules on CT. *Jpn J Radiol.* 2014;32:14–21.
7. Flandin P. Time-frequency filtering based on spectrogram zeros. *IEEE Signal Processing Letters.* 2015;22(11):2137–41.
8. Kiyokawa H, Greenberg M, Shimota K, Pastenkamp H. Auditory detection of simulated crackles in breath sounds. *Chest.* 2001;119(6):1886–92.
9. Quandt V, Pacola E, Pichorim S, Gamba H, Sovierzoski M. Pulmonary crackle characterization: approaches in the use of discrete wavelet transform regarding border effect, mother-wavelet selection, and subband reduction. *Res Biomed Eng.* 2015.
10. Nordhausen K, Ollila E, Oja H. On the performance indices of ICA and blind source separation. *IEEE 12th international workshop on signal processing advances in wireless communications.* 2011;486–490.
11. Gibonval R, Benayon L, Vincent E, Févolette C. Proposals for performance measurement in source separation. *ICA.* 2003;2003:763–8.

**Publisher's note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

