



XIV CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

Del 12 al 14 de agosto de 2026

Evaluación de una fuente impulsiva tipo origami en la medición del tiempo de reverberación frente a métodos estandarizados

Páez, J.¹; Berg, E.²; Campo, B.³

^{1,2} Norsonic AS, Tranby, Noruega, {jorge.paez, erlend.berg}@norsonic.com

³ Norconsult Norge AS, Sandvika, Noruega, berenice.campo@norconsult.com

Resumen

La determinación del tiempo de reverberación en recintos es un aspecto fundamental en la evaluación acústica de espacios interiores. Los métodos habituales se basan en el uso de fuentes impulsivas o señales excitadoras específicas, que en algunos casos requieren equipamiento especializado. En este trabajo se analiza el uso de una fuente impulsiva sencilla y reutilizable basada en una estructura tipo origami para la medición del tiempo de reverberación conforme a procedimientos estandarizados (ISO 3382). La metodología consiste en la realización de mediciones de tiempo de reverberación en diferentes recintos utilizando tres métodos: la fuente origami como excitación impulsiva, así como el método interrumpido y el método de respuesta al impulso mediante señales de barrido, estos últimos empleando una fuente sonora omnidireccional. Se determinan valores de tiempo de reverberación global y por bandas de frecuencia con cada uno de los métodos, evaluando la repetibilidad de las mediciones y la influencia del desgaste de la fuente origami en los resultados.

Palabras clave: tiempo de reverberación, fuente impulsiva origami, fuente impulsiva reutilizable, respuesta al impulso, acústica de recintos.

1. Introducción

La medición del tiempo de reverberación constituye una de las aplicaciones más habituales de la acústica de salas y forma parte de numerosos procedimientos de caracterización acústica de recintos. La norma ISO 3382-2 establece procedimientos normalizados para la determinación de este parámetro en recintos ordinarios mediante diferentes técnicas de medición [1].

Entre los métodos disponibles, las técnicas basadas en respuestas impulsivas continúan siendo ampliamente utilizadas debido a su simplicidad y rapidez de aplicación. Tradicionalmente, estas mediciones se han realizado mediante fuentes impulsivas convencionales, como globos o pistolas de fogeo, así como mediante fuentes sonoras excitadas mediante ruido interrumpido o barrido sinusoidal.

En los últimos años se ha propuesto el uso de fuentes impulsivas basadas en estructuras plegadas de papel, conocidas como Fuente impulsiva de origami (*Origami Impulse Source. OIS*), como alternativa a otras fuentes impulsivas convencionales. Diversos estudios han mostrado que este tipo de fuente puede generar impulsos adecuados para la determinación de parámetros acústicos de salas utilizando un equipamiento mínimo y una elevada portabilidad [2,3].

Los trabajos publicados hasta la fecha se han centrado principalmente en validar el método y comparar sus resultados con técnicas de medición establecidas. Sin embargo, la influencia del uso repetido de la fuente sobre la estabilidad de los resultados obtenidos por el uso prolongado de una misma unidad de origami ha recibido escasa atención.

El presente trabajo evalúa experimentalmente la repetibilidad y estabilidad de una fuente impulsiva tipo Origami y compara los resultados obtenidos con los métodos Señal Barrido e Ruido Interrumpido.

2. Antecedentes

Toyoda et al. desarrollaron una fuente impulsiva basada en un Origami capaz de generar impulsos acústicos de elevada amplitud mediante el colapso controlado de una estructura de papel previamente plegada [2]. Los autores caracterizaron experimentalmente la fuente, evaluando su repetibilidad, directividad y contenido espectral, y demostraron su aplicabilidad para la determinación del tiempo de reverberación mediante comparación con el método de ruido interrumpido [2].

En un trabajo posterior, los mismos autores aplicaron la fuente Origami a mediciones de aislamiento acústico en campo, observando resultados comparables a los obtenidos mediante fuentes impulsivas convencionales y destacando nuevamente la elevada repetibilidad de la fuente [3].

Más recientemente, Silva et al. compararon la utilización de una fuente Origami con los métodos de ruido interrumpido y globo para la determinación del tiempo de reverberación conforme a ISO 3382-2 [4]. Los resultados obtenidos mostraron una concordancia general entre los distintos procedimientos de medida y destacaron ventajas asociadas a la portabilidad, facilidad de uso, bajo coste y utilización de materiales reciclables [4].

Aunque estos trabajos demostraron la viabilidad práctica de la fuente Origami para diferentes aplicaciones acústicas, no se identificaron estudios específicos destinados a evaluar la estabilidad de los resultados obtenidos tras la reutilización repetida de una misma unidad. El propio trabajo original de Toyoda et al. señala que la vida útil de la fuente está condicionada por el deterioro progresivo del papel tras usos sucesivos [2].

En este contexto, resulta de interés analizar experimentalmente si la reutilización continuada de una misma fuente puede producir variaciones apreciables en los tiempos de reverberación obtenidos.

3. Metodología

3.1 Sala de ensayo

Los ensayos se realizaron en una sala de oficina utilizada habitualmente como espacio multimedia. El recinto presenta una geometría irregular con cubierta inclinada y superficies acristaladas en parte de sus cerramientos.

El volumen estimado de la sala fue de 89,5 m³. El tiempo de reverberación medio obtenido fue $RT = 0,45$ s.

A partir de estos valores se estimó una frecuencia de Schroeder próxima a 143 Hz. Por este motivo, el análisis principal se realizó para el intervalo comprendido entre 250 Hz y 4 kHz.



Figura 1. Sala de ensayo: Sala Multimedia (*Media Room*) de Norsonic, Noruega.

Asimismo, se verificó el cumplimiento de la distancia mínima recomendada entre fuente y receptor de acuerdo con ISO 3382-2 [1]. A partir del volumen de la sala y del tiempo de reverberación medio obtenido se estimó una distancia mínima aproximada de 1,5 m. Todas las configuraciones fuente-receptor evaluadas cumplieron este criterio, siendo la configuración S2-R3 la más próxima al límite calculado.

3.2 Equipamiento

Las mediciones se realizaron mediante un sonómetro Norsonic Nor145 y el software Norsonic Nor850. Para las mediciones mediante Señal Barrido e Ruido Interrumpido se utilizó una fuente omnidireccional Norsonic Nor283 alimentada mediante un amplificador Norsonic Nor282.

La fuente impulsiva utilizada correspondió a una estructura tipo Fuente impulsiva de origami (*Origami Impulse Source. OIS*) Norsonic Nor286 basada en el diseño descrito en los trabajos previos de Toyoda et al. [2,3].

3.3 Configuración experimental

Se definieron dos posiciones de fuente y tres posiciones de receptor, obteniéndose un total de seis configuraciones fuente-receptor.

Para cada configuración se realizaron 20 mediciones consecutivas de la fuente impulsiva Origami. Se completaron las seis configuraciones iniciales con un total de 120 mediciones.

Posteriormente se repitieron las mismas configuraciones realizando otras 20 mediciones por configuración.

En total se analizaron 240 mediciones de tiempo de reverberación mediante el uso la misma fuente impulsiva.

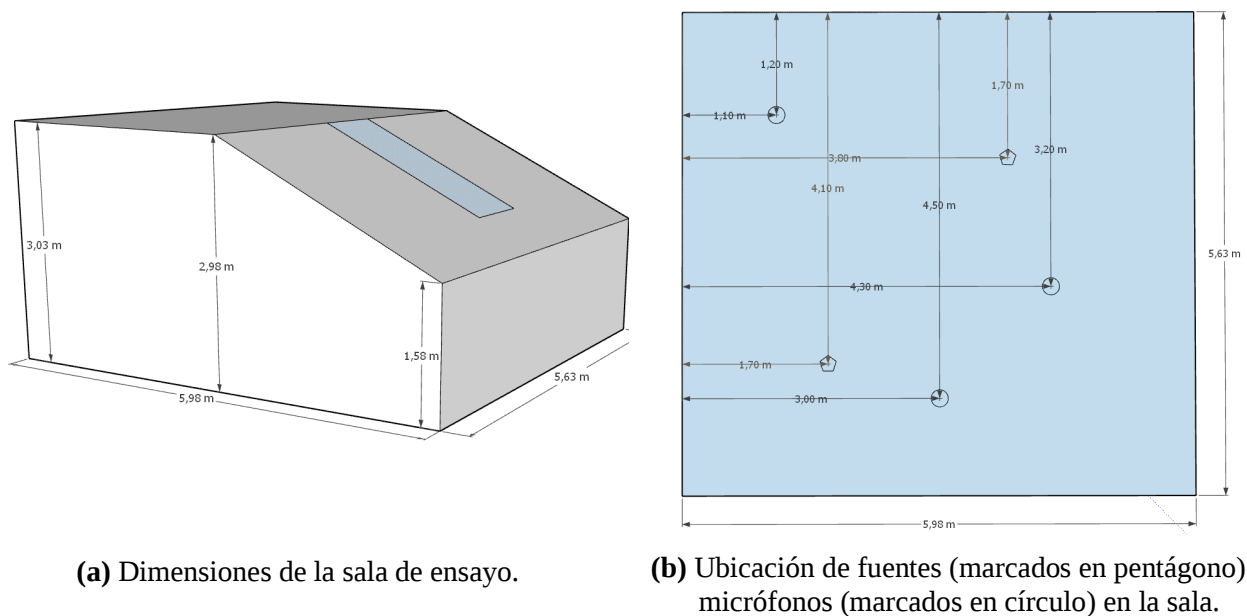


Figura 2: Sala de ensayo: dimensiones y disposición de fuentes y micrófonos.

Tabla 1. Diseño experimental.

Parámetro	Valor
Sala de ensayo	Oficina -Sala Multimedia (<i>Media Room</i>)
Volumen estimado	89,5 m ³
TR promedio	0,45 s
Frecuencia de Schroeder	184 Hz
Posiciones de fuente	2
Posiciones de receptor	3
Combinaciones fuente-receptor	6
Repeticiones válidas por combinación	20
Activaciones iniciales	120
Activaciones finales	120
Total de mediciones Origami analizadas	240
Métodos de referencia	Señal Barrido y Ruido Interrumpido
Rango principal de análisis	250 Hz – 4 kHz

Tabla 2. Distancias entre fuente y receptor para las configuraciones evaluadas.

Configuración	Distancia (m)
S1-R1	2,70
S1-R2	3,43
S1-R3	3,40
S2-R1	2,90
S2-R2	2,61
S2-R3	1,53

3.4 Métodos de referencia

Con objeto de disponer de una referencia adicional, se realizaron mediciones utilizando los métodos señal de barrido y ruido interrumpido conforme a los procedimientos establecidos en ISO 3382-2 [1].

Las mediciones se realizaron utilizando las mismas posiciones de fuente y receptor empleadas durante la campaña con la fuente Origami.

3.5 Tratamiento de datos

Los tiempos de reverberación se obtuvieron mediante el software Nor850 conforme a ISO 3382-2 [1]. Para el tratamiento estadístico se utilizaron los valores de T20 exportados por el software. Adicionalmente, se revisaron los valores de T30 y los coeficientes de correlación de las regresiones, observándose una adecuada linealidad de las curvas de decaimiento y una buena concordancia entre ambos parámetros.

Para cada medición se obtuvo el promedio de las 20 repeticiones correspondiente a las bandas de tercio de octava comprendidas entre 250 Hz y 4 kHz. Posteriormente se compararon los resultados obtenidos durante las campañas inicial y final, así como los obtenidos mediante los diferentes métodos de medición.

4. Resultados

4.1 Comparación entre campañas inicial y final

La Tabla 3 presenta los valores medios de tiempo de reverberación obtenidos mediante la fuente impulsiva Origami para las campañas inicial y final.

Tabla 3. Comparación entre campaña inicial y final. Promedio RT en segundos (250 Hz–4 kHz).

Posición relativa (Fuente S - Receptor R)	RT Inicial (s)	RT Final (s)	Δ RT (s)
S1-R1	0,528	0,445	-0,082
S2-R1	0,464	0,431	-0,034
S1-R2	0,468	0,431	-0,037
S2-R2	0,440	0,475	+0,034
S1-R3	0,477	0,464	-0,013
S2-R3	0,420	0,403	-0,017
Promedio global	0,466	0,442	0,036

La diferencia media observada entre ambas campañas fue de 0,036 s para el intervalo comprendido entre 250 Hz y 4 kHz.

Cinco de las seis configuraciones fuente-receptor presentaron diferencias inferiores a 0,04 s. La mayor diferencia observada correspondió a la configuración S1-R1, donde se registró una reducción de 0,082 s respecto a la campaña inicial.

4.2 Comparación con métodos de referencia

La Tabla 4 resume los resultados obtenidos mediante la fuente impulsiva Origami y los métodos Señal Barrido y Ruido Interrumpido.

Tabla 4. Comparación entre métodos. Promedio RT en segundos (250 Hz–4 kHz).

Posición relativa (Fuente S - Receptor R)	Origami Final	Señal Barrido	Ruido Interrumpido
S1-R1	0,445	0,394	0,321
S2-R1	0,431	0,358	0,327
S1-R2	0,431	0,377	0,330
S2-R2	0,475	0,368	0,326
S1-R3	0,464	0,378	0,348
S2-R3	0,403	0,373	0,328
Media global	0,442	0,375	0,330

Los resultados muestran diferencias sistemáticas entre los tres métodos considerados. Los mayores valores fueron obtenidos mediante la fuente Origami, seguidos por Señal Barrido e Ruido Interrumpido.

Con objeto de facilitar la comparación entre métodos, la Tabla 5 resume las diferencias medias observadas.

Tabla 5. Diferencias globales.

Comparación	Diferencia
Origami Promedio – Barrido (<i>Sweep</i>)	+0,067 s
Origami Promedio – Interrumpido (<i>Interrupted</i>)	+0,112 s
Barrido (<i>Sweep</i>) – Interrumpido (<i>Interrupted</i>)	+0,045 s
Origami Inicial – Origami Final	+0,036 s

Puede observarse que la diferencia media asociada al uso continuado de la fuente Origami fue inferior a las diferencias observadas entre los distintos métodos de medición evaluados.

5. Discusión

Los resultados obtenidos muestran que la fuente impulsiva Origami mantuvo un comportamiento estable a lo largo de toda la campaña experimental. Aunque se observaron diferencias entre las campañas inicial y final, la magnitud de dichas variaciones fue reducida para la mayoría de las configuraciones evaluadas.

La configuración S1-R1 presentó la mayor diferencia observada entre campañas. Sin embargo, las restantes configuraciones mostraron variaciones considerablemente menores y no se identificó una tendencia común que indicase un deterioro progresivo de la fuente asociado a su reutilización.

Los resultados obtenidos complementan los trabajos previos de Toyoda et al. [2,3]. Mientras que dichos trabajos caracterizaron la fuente impulsiva y demostraron su aplicabilidad en diferentes escenarios de medida, el presente estudio analiza específicamente la estabilidad de los resultados obtenidos tras la reutilización repetida de una misma unidad.

Resulta especialmente relevante que el trabajo original de Toyoda et al. [2] señalara que la vida útil de la fuente podía verse limitada por el deterioro progresivo del papel. Sin embargo, en las condiciones evaluadas en este estudio no se observaron cambios sistemáticos en los tiempos de reverberación medidos que pudieran asociarse a dicho deterioro.

La comparación con los métodos Señal Barrido e Ruido Interrumpido mostró diferencias superiores a las observadas entre las campañas inicial y final de la propia fuente. Mientras que la diferencia media asociada a la reutilización fue de 0,036 s, las diferencias entre métodos oscilaron entre 0,045 s y 0,112 s.

Este resultado es coherente con las observaciones realizadas por Silva et al. [4], quienes también encontraron una concordancia general entre los resultados obtenidos mediante la fuente Origami y otros procedimientos normalizados de medición.

6. Conclusiones

El estudio comprendió un total de 240 mediciones. La comparación entre las campañas inicial y final, realizadas en las mismas configuraciones fuente-receptor y separadas por aproximadamente 120 reutilizaciones de la misma fuente impulsiva Origami, no evidenció un efecto apreciable de la reutilización sobre los tiempos de reverberación medidos.

La diferencia media observada entre la campaña inicial y la campaña final fue de 0,036 s para el intervalo comprendido entre 250 Hz y 4 kHz.

Cinco de las seis configuraciones fuente-receptor evaluadas con la fuente impulsiva origami mostraron diferencias inferiores a 0,04 s. La comparación entre las campañas inicial y final no evidenció cambios apreciables en los tiempos de reverberación medidos.

Las diferencias observadas entre los métodos Origami, Señal Barrido e Ruido Interrumpido fueron superiores a las diferencias asociadas a la reutilización de la fuente dentro del rango de activaciones analizado.

En el conjunto del estudio se realizaron 240 mediciones. Los resultados obtenidos indican que la fuente impulsiva Origami mantuvo una adecuada estabilidad durante toda la campaña experimental y respaldan su utilización como alternativa portátil y reutilizable frente a otras fuentes impulsivas de un solo uso previamente evaluadas en la literatura.

Referencias

1. ISO 3382-2:2017. *Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*.
2. Toyoda, E.; Sugie, N.; Yoshimura, J. *Characteristics of the Origami Impulse Source and Its Application to Measuring Reverberation Time*. 2009.
3. Toyoda, E.; Sugie, N.; Yoshimura, J. *Field Survey Method of Sound Insulation Performance Using the Origami Impulse Source*. 2011.
4. Silva, F. et al. *The Origami Impulse Source as a Sustainable Alternative for Measuring Reverberation Time in the Brazilian Context*. 2025