



Carrera  
Ingeniería Civil Aeroespacial  
Universidad de Concepción

# ALGORITMOS PARA LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE EMISIONES ACÚSTICAS EN 3D

**Francisco Bastian Duarte Smith**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Aeroespacial

Profesor guía:  
Dr. Félix Leaman W.

Agosto 2025  
Concepción, Chile

©2025 Francisco Bastian Duarte Smith

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, han sido parte de este camino y han hecho posible que este trabajo llegue a su fin.

A mis padres, por brindarme siempre su apoyo incondicional, por su preocupación constante y por estar presentes en cada paso importante de mi vida. Su confianza en mí ha sido un pilar fundamental que me ha dado la seguridad para enfrentar cada desafío.

A mi profesor guía, por su dedicación y disposición para orientarme, por compartir sus conocimientos con claridad y por impulsarme a buscar siempre la mejor versión posible de este proyecto.

A mi pareja, por acompañarme día a día, por su paciencia en los momentos de mayor estrés y por recordarme que incluso en las etapas más complejas siempre hay espacio para una sonrisa. Su apoyo emocional ha sido clave para mantenerme motivado y enfocado.

A mi sobrino, por convertirse en una fuente de alegría y motivación genuina, recordándome con su energía y entusiasmo lo valioso que es celebrar cada pequeño logro.

A mi hermana y a mi cuñado, por su cercanía, por ofrecerme siempre un espacio para descansar la mente y por estar disponibles para escucharme y darme su apoyo sincero cuando más lo necesitaba.

A todos ellos, gracias por acompañarme en este camino y por ser parte esencial de este logro que también les pertenece.

## Resumen

Este trabajo aborda el problema de localizar con precisión fuentes de emisión acústica (EA) en estructuras tridimensionales metálicas. El objetivo principal fue evaluar y comparar diferentes métodos de cálculo para la localización 3D, usando datos reales obtenidos en un tambor cilíndrico metálico y en una estructura de vigas soldadas, simulando condiciones industriales.

Se utilizó un sistema experimental de detección de EA con sensores piezoeléctricos fijados al manto del tambor. Las señales se procesaron en un programa en Python, calculando los tiempos de llegada (TOA) con distintos umbrales, estimando la velocidad de propagación y aplicando cinco algoritmos: USBM, Thurber, TRF + Huber con punto inicial fijo y adaptativo, y Particle Swarm Optimization (PSO).

En el manto, el PSO logró el menor error promedio (0.136 m con desviación de 0.073 m al umbral 0.5%), mientras que en la base destacó el TRF adaptativo (0.107 m con desviación de 0.118 m al 1%). En la localización sin restricción de superficie (integrada), los mejores resultados fueron 0.130 m con PSO y 0.075 m con TRF adaptativo. Se observó que los umbrales intermedios (0.5% y 1%) dieron mejores resultados, mientras que los muy bajos y altos empeoraron la precisión por falsos positivos o detección tardía.

En la estructura de vigas, los errores fueron más altos por la atenuación, las reflexiones en soldaduras y trayectorias no consideradas en el cálculo. El mejor resultado fue 0.462 m al 1% de umbral y el peor 0.795 m al 5%, aunque el error relativo fue similar al del tambor (8.46%).

La variabilidad de los resultados se debió principalmente a diferencias en la aplicación de la fuente, elección de puntos iniciales, ruido en la detección de TOA, anisotropías del material, reflexiones y pérdidas de señal por el acoplamiento de los sensores.

En conclusión, es posible localizar fuentes de EA con buena precisión incluso fuera del plano de sensores, siempre que se utilice un modelo geométrico adecuado, un algoritmo robusto y un umbral calibrado.

## Abstract

This work addresses the problem of accurately locating acoustic emission (AE) sources in three-dimensional metallic structures. The main objective was to evaluate and compare different calculation methods for 3D localization, using real data obtained from a metallic cylindrical drum and a welded beam structure, simulating industrial conditions.

An experimental AE detection system was implemented using piezoelectric sensors attached to the drum's shell. The signals were processed in a Python program, calculating the time of arrival (TOA) with different thresholds, estimating wave propagation speed, and applying five algorithms: USBM, Thurber, TRF + Huber with fixed and adaptive initial points, and Particle Swarm Optimization (PSO).

For the shell, PSO achieved the lowest average error (0.136 m with a deviation of 0.073 m at a 0.5% threshold), while for the base the TRF adaptive method performed best (0.107 m with a deviation of 0.118 m at 1%). In the unrestricted (integrated) localization, the best results were 0.130 m with PSO and 0.075 m with TRF adaptive. Intermediate thresholds (0.5% and 1%) produced the most accurate results, while very low or very high thresholds reduced accuracy due to false positives or late detection.

In the welded beam structure, errors were higher due to attenuation, reflections at welded joints, and unmodeled propagation paths. The best result was 0.462 m at a 1% threshold, and the worst was 0.795 m at 5%, although the relative error was like the drum's (8.46%).

The variability of the results was mainly due to differences in source application, selection of initial points, noise in TOA detection, material anisotropies, reflections, and signal losses from sensor coupling.

In conclusion, AE sources can be located with good accuracy even outside the sensor plane, if an appropriate geometric model, a robust algorithm, and a properly calibrated threshold are used.

# Contenidos

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Tablas.....</b>	<b>8</b>
<b>Nomenclatura .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Contexto .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>13</b>
1.2.1    Objetivos específicos .....	13
<b>1.3 Estado del Arte.....</b>	<b>14</b>
1.3.1    Métodos Lineales No Iterativos .....	15
1.3.2    Métodos Iterativos Clásicos Basados en Derivadas.....	15
1.3.3    Métodos de Búsqueda Directa y Optimización Global .....	16
1.3.4    Localización en Estructuras Cilíndricas .....	16
1.3.5    Localización en Estructuras de Múltiples Vigas Soldadas .....	17
1.3.6    Método de Hsu-Nielsen (Rotura de mina de lápiz) .....	17
<b>2 Marco Teórico .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Localización Basada en Tiempos de Llegada .....</b>	<b>19</b>
2.1.1    Localización en 1D.....	19
2.1.2    Localización en 2D.....	19
2.1.3    Localización en 3D.....	20
<b>2.2 Resolución Numérica de Ecuaciones.....</b>	<b>21</b>
2.2.1    Método Trust–Region Reflective (TRF) con pérdida de Huber.....	21
2.2.2    Método PSO .....	23
<b>2.3 Localización en Estructuras Cilíndricas .....</b>	<b>24</b>
2.3.1    Transformación de coordenadas.....	24
2.3.2    Restricciones y consideraciones en el cálculo .....	24
<b>3 Localización en Estructuras Cilíndricas Huecas .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Procedimiento Experimental.....</b>	<b>25</b>
3.1.1    Procedimiento de Análisis .....	28
3.1.2    Cálculo Velocidad de Onda .....	29
3.1.3    Cálculo de Localización de Fuentes de EA.....	30
<b>3.2 Complejidad de la Localización.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3 Localización en el Manto .....</b>	<b>32</b>
<b>3.4 Localización en el Piso .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5 Localización Integrada.....</b>	<b>36</b>

<b>4</b>	<b><i>Localización en Estructuras de Vigas Soldadas</i></b> .....	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Procedimiento Experimental</b> .....	<b>38</b>
4.1.1	Procedimiento de Análisis .....	40
4.1.2	Cálculo Velocidad de Onda .....	40
4.1.3	Cálculo de Localización de Fuentes de EA.....	41
<b>4.2</b>	<b>Complejidad de la Localización</b> .....	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>Localización en Estructura de Vigas Soldadas</b> .....	<b>41</b>
<b>5</b>	<b><i>Resultados</i></b> .....	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Velocidad de Onda en Tambor</b> .....	<b>43</b>
<b>5.2</b>	<b>Localización Restringida al Manto del Tambor</b> .....	<b>43</b>
<b>5.3</b>	<b>Localización Restringida a la Base del Tambor</b> .....	<b>49</b>
<b>5.4</b>	<b>Localización Sin Restricciones en el Tambor</b> .....	<b>53</b>
5.4.1	Localización Sin Restricciones en la Base del Tambor .....	53
5.4.2	Localización Sin Restricciones en el Manto del Tambor .....	59
<b>5.5</b>	<b>Velocidad de Onda en Estructura de Vigas Soldadas</b> .....	<b>65</b>
<b>5.6</b>	<b>Localización en la Estructura de Vigas Soldadas</b> .....	<b>65</b>
<b>6</b>	<b><i>Discusión de Resultados</i></b> .....	<b>69</b>
<b>6.1</b>	<b>Variabilidad de los datos</b> .....	<b>69</b>
<b>6.2</b>	<b>Localización restringida al manto del tambor</b> .....	<b>70</b>
<b>6.3</b>	<b>Localización restringida a la base del tambor</b> .....	<b>71</b>
<b>6.4</b>	<b>Localización sin restricción en el tambor</b> .....	<b>71</b>
<b>6.5</b>	<b>Localización en estructura de vigas soldadas</b> .....	<b>72</b>
<b>7</b>	<b><i>Conclusión</i></b> .....	<b>73</b>
<b>7.1</b>	<b>Trabajos Futuros</b> .....	<b>73</b>
	<b><i>Referencias</i></b> .....	<b>75</b>
	<b><i>Anexo A: Resultados de Métodos Adicionales</i></b> .....	<b>77</b>

## Lista de Figuras

<i>Figura 1: Efectos Kaiser y Felicity. Fuente: NDT.net</i> .....	14
<i>Figura 2: Resultados de Localización de Fuga en Base de Estanque por los autores Nguyen y Kim. Fuente: Nguyen y Kim (2024).</i> .....	17
<i>Figura 3: Calibración de sensores de emisión acústica con método Hsu-Nielsen. Fuente: (Bacharz, M., Bacharz, K., y Trąpczyński, W., 2022)</i> .....	18
<i>Figura 4: Tambor con sensores posicionados y amplificadores conectados</i> .....	25
<i>Figura 5: Sistema de referencia del manto del tambor</i> .....	25
<i>Figura 6: Ubicaciones de sensores y fuentes en el manto del tambor</i> .....	26
<i>Figura 7: Ensayo de rotura de mina de lápiz</i> .....	27
<i>Figura 8: Sistema de referencia del piso del tambor y fuentes marcadas</i> .....	28
<i>Figura 9: Interfaz Programa Python para Visualización y Cálculo de Localización de Fuentes de EA.</i> .....	29
<i>Figura 10: Plano de vista frontal del tambor con sección de proyección geométrica con posición de sensores y fuentes</i> .....	33
<i>Figura 11: Diagrama de flujo de cálculo de localización para el manto del tambor</i> .....	34
<i>Figura 12: Plano de vista inferior del tambor con posición de sensores y fuentes</i> .....	35
<i>Figura 13: Diagrama de flujo de cálculo de localización para la base del tambor</i> .....	36
<i>Figura 14: Diagrama de flujo de cálculo de localización sin restricciones en el tambor</i> .....	37
<i>Figura 15: Estructura de vigas soldadas con sensores instalados y fuentes de EA marcadas</i> .....	38
<i>Figura 16: Estructura de vigas soldadas con ejes y referencia de origen del sistema de coordenadas</i> .....	39
<i>Figura 17: Ubicaciones de sensores y fuentes en la estructura de vigas soldadas</i> .....	39
<i>Figura 18: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en el manto del tambor</i> .....	43
<i>Figura 19: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en el manto del tambor</i> .....	46
<i>Figura 20: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en la base del tambor</i> .....	49
<i>Figura 21: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en la base del tambor</i> .....	51
<i>Figura 22: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en la base del tambor</i> .....	54
<i>Figura 23: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en la base del tambor</i> .....	56
<i>Figura 24: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en el manto del tambor</i> .....	59
<i>Figura 25: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en el manto del tambor</i> .....	62
<i>Figura 26: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en la estructura de vigas soldadas</i> .....	66

## Lista de Tablas

<i>Tabla 1: Posición de los sensores en el manto del tambor.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2: Posición de las fuentes de EA en el manto del tambor.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 3: Posición de las fuentes de EA en el piso del tambor.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 4: Posición de los sensores en la estructura de vigas soldadas.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 5: Posición de las fuentes de EA en la estructura de vigas soldadas.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 6: Velocidades Calculadas por Nivel de Umbral para el tambor.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 7: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en el manto del tambor.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 8: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método PSO en el manto del tambor.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 9: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en el manto del tambor.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 10: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en el manto del tambor.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 11: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en la base del tambor.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 12: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método PSO en la base del tambor.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 13: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en la base del tambor.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 14: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en la base del tambor.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 15: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en la base del tambor.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 16: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en la base del tambor.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 17: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en la base del tambor.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 18: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en la base del tambor.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 19: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en el manto del tambor.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 20: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en el manto del tambor.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 21: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en el manto del tambor.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 22: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en el manto del tambor.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 23: Velocidades Calculadas por Nivel de Umbral para la Estructura de Vigas Soldadas.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 24: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en la estructura de vigas soldadas.....</i>	<i>66</i>

*Tabla 25: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método PSO en la estructura de vigas soldadas..... 68*

## Nomenclatura

EA	: Emisiones acústicas
TOA	: Tiempo de llegada (time of arrival)
TRF	: Método de región de confianza con restricciones (Trust Region Reflective)
USBM	: Método del Departamento de minas de Estados Unidos (U.S. Bureau of Mines)
PSO	: Método de Optimización por enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization)
TDOA	: Diferencia de tiempos de llegada (Time Difference of Arrival)
PLB	: Rotura de mina de lápiz (Pencil Lead Break)
ASTM	: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)
EN	: Norma Europea (European Norm)
$r$	: Radio de un punto en coordenadas cilíndricas
$\theta$	: Ángulo en coordenadas cilíndricas
$x, y, z$	: Coordenadas cartesianas
$R$	: Radio máximo del cilindro
$L$	: Longitud total entre dos sensores en 1D
$c$	: Velocidad de propagación de la onda
$t$	: Tiempo
$t_f$	: Tiempo de emisión de la fuente
$t_i$	: Tiempo de llegada al sensor $i$
$t_{ref}$	: Tiempo de referencia (máxima amplitud entre sensores)
$t_{start}$	: Tiempo de partida usado en el cálculo
$\tau_i$	: Diferencia de tiempos de llegada respecto al sensor de referencia
$\Delta T$	: Diferencia de tiempos de llegada entre dos sensores
$\delta$	: Parámetro de transición en la función de pérdida de Huber
$\phi$	: Ángulo auxiliar en el cálculo de trayectorias
$d_i$	: Distancia entre la fuente y el sensor $i$
$d_{manto}$	: Distancia geodésica sobre el manto

$d_{base}$	: Distancia sobre la base
$r_i$	: Vector de posición del sensor i
$f$	: Vector de posición de la fuente
$f_i$	: Residuo de tiempo para el sensor i
$J$	: Función de coste (suma de cuadrados de residuos)
$J_{Huber}$	: Función de coste con pérdida de Huber
$\omega$	: Factor de inercia en PSO
$c_1, c_2$	: Coeficientes cognitivo y social en PSO
$r_1, r_2$	: Números aleatorios uniformes en [0,1] usados en PSO
$v_j$	: Velocidad de la partícula j en PSO
$p_j$	: Mejor posición personal de la partícula j en PSO
$g$	: Mejor posición global del enjambre en PSO
$\Delta x$	: Incremento de posición en el método TRF
$B$	: Aproximación del Hessiano
$g_{TRF}$	: Gradiente de la función de coste
$Z$	: Altura máxima del tambor
$X, Y, Z$	: Dimensiones de la estructura de vigas
$idx_i, idx_j$	: Índices de sensores usados en la matriz de diferencias de tiempo
$v$	: Vector de dirección estimada hacia la fuente
$dt$	: Matriz de diferencias de tiempo entre sensores
$w_{ij}$	: Peso asignado a un par de sensores
$t_0$	: Tiempo estimado de origen de la onda para la semilla inicial
$\Delta$	: Radio de la región de confianza en TRF
$N$	: Número de sensores
$M$	: Número de partículas

# 1 Introducción

## 1.1 Contexto

La realidad industrial actual exige que muchas estructuras permanezcan en servicio durante periodos prolongados – a menudo más allá de su vida útil de diseño original –, lo que hace una exigencia el implementar técnicas eficientes de monitoreo de integridad estructural (Habel, 2013), de forma de optimizar la continuidad operacional eliminando esa necesidad de en determinadas ocasiones tener que detener la producción, optando o favoreciendo el desarrollo de un mantenimiento predictivo en vez de un mantenimiento preventivo o un mantenimiento correctivo. En este contexto, la técnica de Emisión Acústica (EA) ha surgido como un método de ensayo no destructivo muy útil para observar en tiempo real el desarrollo de daños en materiales y componentes, los cuales permiten detectar los cambios internos del material imposibles de ver a simple vista, como, por ejemplo, la detección del crecimiento de una grieta interna antes de que esta alcance su máximo generando un daño crítico en el equipo y en la continuidad operacional. La EA permite una supervisión continua tanto de zonas localizadas como de estructuras completas, destacando por su alta sensibilidad a defectos no simples de detectar, su naturaleza no invasiva y su capacidad de proporcionar datos en tiempo real (Ciaburro, 2022).

La EA es un fenómeno físico donde una fuente localizada en el material, como una grieta o deformación plástica, libera energía en forma de ondas elásticas que se propagan a través de la estructura y son detectadas por sensores piezoeléctricos (Kohn, 1995), con los cuales se registran las señales emitidas para posteriormente estudiar el comportamiento de la EA en los materiales. Estas señales contienen información sobre el estado del material, su daño interno y, especialmente, sobre la ubicación de la fuente emisora, lo que permite la implementación de sistemas de mantenimiento predictivo (Holford et al., 2009) de una forma no invasiva, gracias a la capacidad de los sensores de realizar la detección de fallas sin tener que someter la estructura o la pieza a algún esfuerzo o intervención alguna más que la de poner sensores en su superficie, dado que es la falla misma la que envía señales a los sensores, los cuales pueden incluso solo ser instalados en áreas que se conozcan como puntos críticos comunes de falla de las estructuras, sin necesidad de tener que analizar todo y reducir los costos.

Esta técnica ha demostrado su efectividad en sectores tan diversos como la ingeniería civil, la industria automotriz, la energía, y especialmente, la industria aeroespacial, donde los requisitos de seguridad son sumamente exigentes (Holford et al., 2009) y la detección de falla resulta complicada por el poco tiempo que se da para evaluar ciertos sistemas dado su alta demanda, como ocurre por ejemplo con los vuelos comerciales, donde los aviones luego de terminar un vuelo tienen que rápidamente prepararse para el siguiente, y la detección de fallas en operación resulta imposible con los métodos actuales tradicionales por estar en movimiento a muy altas velocidades a una gran altitud. En aplicaciones aeroespaciales, la EA se emplea para detectar daños por fatiga, delaminaciones y microgrietas en componentes críticos, especialmente en estructuras de materiales compuestos (Ghadarah et al., 2023). El uso de sensores de EA en fuselajes, alas o recubrimientos de turbinas permite detectar en tiempo real la iniciación de fallas sin

necesidad de desmontar la estructura o interrumpir el servicio (Holford et al., 2009), esta metodología es útil para cualquier estructura o pieza, inclusive de materiales no metálicos, que este sometida a algún esfuerzo, pero dado que su enfoque es de permitir al máximo posible la continuidad operacional, en el ámbito aeroespacial, los aviones, y los elementos que los componen, son la principal atracción para el uso de estos sensores.

Históricamente, gran parte de la investigación en localización de fuentes de EA se ha enfocado en geometrías bidimensionales, donde existen múltiples métodos bien establecidos como la triangulación de tiempos de arribo (TOA, Time Of Arrive), beamforming o algoritmos basados en inteligencia artificial (Ciaburro, 2022), los cuales son útiles y suficientes para estudiar ciertas estructuras como planchas o cualquier pieza con la medida del espesor muy inferior a sus otras dimensiones, un ejemplo de esto son los estanques, específicamente en su manto, incluso la investigación en 1D llega a ser útil en muchos elementos, como en cañerías o vigas, donde la medida de su largo es muy superior a sus otras 2 dimensiones. Sin embargo, el desafío actual se encuentra en llevar estas capacidades al entorno tridimensional para poder abarcar más estructuras con formas mucho más complejas. La localización 3D de fuentes de EA se vuelve compleja debido a la anisotropía de los materiales, la variación direccional de velocidades de onda y la necesidad de contar con un mayor número de sensores (Jierula et al., 2024), aunque ya existen algunos métodos para este problema tridimensional, como el mismo método TOA también para 2D y 1D, estos no son tan precisos o no son aplicables a todas las piezas y materiales.

En estructuras complejas, como las aeroespaciales, esta localización tridimensional es clave para asegurar su seguridad estructural. Su implementación permitiría detectar daños internos de forma, incluso en materiales compuestos avanzados o aleaciones metálicas especiales (Ghadarah et al., 2023), materiales de los cuales están compuestas muchas piezas de las estructuras aeroespaciales. En definitiva, la localización de fuentes de EA en 3D constituye una herramienta de monitoreo estructural continuo, capaz de detectar el origen y evolución de defectos sin interferir con la operación normal del sistema (Jierula et al., 2024).

## **1.2 Objetivos**

Evaluar metodologías de localización de fuentes de emisión acústica en estructuras tridimensionales, considerando la propagación de ondas y su relación con los distintos tipos de geometrías.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- a) Analizar algoritmos de localización de fuentes de emisiones acústicas en 1D y en 2D.
- b) Analizar algoritmos de localización de fuentes de emisiones acústicas en 3D.
- c) Aplicación de algoritmos de localización de fuentes de emisiones acústicas en 3D en mediciones experimentales.

- d) Propuesta de algoritmo mejorado para la localización de fuentes de emisiones acústicas en estructuras complejas.

### 1.3 Estado del Arte

Existen fuentes de emisiones acústicas (EA) que son fácilmente detectables por el oído humano, como la rotura de una hoja de papel o de un vidrio. Sin embargo, las que se estudian mediante técnicas de localización suelen ser inaudibles, ya que corresponden a eventos microestructurales internos del material, imperceptibles sin instrumentación especializada. Estas señales se generan en tiempo real, lo que implica que, si una grieta ya se formó antes del inicio de la medición y permanece estable, no se producirá una nueva señal hasta que dicha grieta experimente una reapertura o crecimiento debido a un nuevo esfuerzo aplicado.

Este comportamiento se explica mediante el efecto Kaiser, que establece que un material no emite señales de EA mientras se le recargue por debajo del esfuerzo máximo previamente alcanzado, manifestando así una "memoria de carga" (Pollock, 1986). Cuando este comportamiento desaparece, se presenta el llamado efecto Felicity, que se produce cuando el material comienza a emitir señales incluso antes de alcanzar la carga máxima anterior. Esta pérdida de memoria se cuantifica mediante el índice de Felicity, el cual se interpreta como una medida de daño acumulado en la estructura (Yuyama et al., 1985). En la Figura 1 se muestra una representación gráfica de estos efectos.

Por su parte, el corolario de Dunegan sostiene que la aparición de señales de EA durante una recarga por debajo del máximo anterior constituye evidencia de la generación de un daño nuevo (Dunegan et al., 1969). En conjunto, estos tres efectos explican el valor de la Emisión Acústica como herramienta de diagnóstico en estructuras sometidas a carga variable, permitiendo una detección temprana de fallas activas.

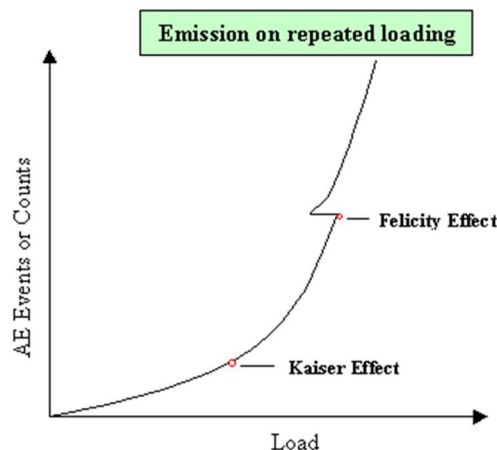


Figura 1: Efectos Kaiser y Felicity. Fuente: NDT.net.

Existen diversas metodologías para localizar fuentes de emisiones acústicas, clasificadas según los sensores utilizados y la forma en que adquieren la información proveniente de la onda acústica generada por la fuente emisora. Entre las metodologías más comunes

destacan el método basado en Diferencias de Tiempo de Llegada (TDOA, por sus siglas en inglés), la Localización Basada en Amplitud de Señal, el Método de Zona, y el Método de Análisis Modal (Jierula et al., 2024).

Para el caso específico de este estudio, donde se utilizan sensores piezoeléctricos capaces de registrar continuamente la amplitud y tiempo de llegada de la onda acústica durante su propagación, se empleará el método de Triangulación por Diferencias de Tiempo de Llegada (TDOA). La solución de las ecuaciones derivadas del método TDOA se aborda utilizando diversos métodos numéricos, que pueden clasificarse en tres grupos principales:

- Métodos Lineales No Iterativos
- Métodos Iterativos Clásicos Basados en Derivadas
- Métodos de Búsqueda Directa y Optimización Global

### 1.3.1 Métodos Lineales No Iterativos

Los métodos lineales resuelven directamente las ecuaciones de tiempo de llegada mediante su linealización. Generalmente requieren el número mínimo de sensores necesarios para una solución única, es decir, dos sensores para el caso unidimensional (1D), tres sensores para el caso bidimensional (2D), y cuatro sensores para el caso tridimensional (3D), además de asumir una velocidad constante de propagación de la onda acústica (Liu et al., 2024). Estos métodos son rápidos y directos, ya que proveen soluciones cerradas en uno o pocos pasos; sin embargo, suelen ser más sensibles al ruido debido a que no permiten ajustes adicionales cuando se dispone de mediciones redundantes.

Un método representativo en esta categoría es el Método USBM (United States Bureau of Mines), que linealiza las ecuaciones tomando diferencias temporales respecto a un sensor de referencia, generando un sistema sobre determinado que usualmente se resuelve mediante mínimos cuadrados lineales.

### 1.3.2 Métodos Iterativos Clásicos Basados en Derivadas

Los métodos iterativos proporcionan soluciones numéricas aproximadas mediante refinamientos sucesivos de una estimación inicial, minimizando el error entre tiempos calculados y tiempos medidos. Típicamente emplean técnicas basadas en mínimos cuadrados no lineales, las cuales parten de una posición inicial estimada y aplican algoritmos iterativos para mejorar dicha estimación. Esta familia de métodos se basa en derivadas (primera y segunda) para optimizar la búsqueda, ofreciendo alta eficiencia, pero pudiendo presentar problemas de divergencia si la posición inicial está alejada de la solución real (Thurber, 1985).

Dentro de esta categoría se destacan el método de Thurber y el método Trust Region Reflective (TRF). El método de Thurber es una versión extendida del algoritmo clásico de

Geiger, que incluye derivadas de segundo orden (Hessiano) además del gradiente para actualizar la posición estimada en cada iteración, proporcionando correcciones más precisas en presencia de superficies complejas o anisotropía en el material (Thurber, 1985). El algoritmo TRF se basa en métodos derivados de Newton, específicamente Newton-Raphson, aplicando restricciones en forma de "regiones de confianza" (trust regions). En cada iteración, este algoritmo resuelve un problema simplificado restringido a una región cercana a la solución actual, optimizando así la convergencia y evitando mínimos locales no deseados (Moré & Sorensen, 1983).

### 1.3.3 Métodos de Búsqueda Directa y Optimización Global

Los métodos de búsqueda directa y optimización global no utilizan derivadas para la optimización, basándose en exploraciones del espacio de búsqueda mediante la evaluación directa de la función objetivo, es decir, la diferencia entre tiempos observados y tiempos predichos. Estos métodos son particularmente útiles cuando la función objetivo es compleja, no diferenciable, o presenta múltiples mínimos locales.

Entre estos métodos destacan los algoritmos metaheurísticos globales, que imitan comportamientos naturales para encontrar la solución óptima. Un ejemplo es la Optimización por Enjambre de Partículas (Particle Swarm Optimization, PSO), donde un conjunto de soluciones potenciales (partículas) se mueve en el espacio de búsqueda guiadas tanto por sus propias experiencias como por la experiencia colectiva del grupo, logrando convergencia en torno al óptimo global tras sucesivas iteraciones (Kennedy & Eberhart, 1995).

### 1.3.4 Localización en Estructuras Cilíndricas

En cilindros sólidos, como barras metálicas o de hormigón, la propagación se da a través del volumen del material, lo cual permite aplicar directamente métodos tridimensionales de triangulación. Sin embargo, en materiales heterogéneos o anisótropos, es común complementar el enfoque TDOA con modelos probabilísticos o métodos iterativos para mejorar la precisión (Dehghan Niri et al., 2015). En estos casos, la ubicación tridimensional de la fuente se resuelve mediante la intersección de hipersferas definidas por las diferencias de tiempos medidos.

Por otro lado, en estructuras cilíndricas huecas, como tambores o tanques, las ondas de emisión acústica (EA) se propagan por la superficie curva, lo que genera trayectorias múltiples, dispersión y la posibilidad de que la onda llegue a un sensor desde distintas direcciones. A pesar de estos desafíos geométricos, estudios recientes han demostrado que es posible localizar fuentes ubicadas tanto en el manto como en la base, incluso utilizando sensores colocados exclusivamente en el manto.

El trabajo de Nguyen y Kim (2024), quienes realizaron ensayos sobre un tanque cilíndrico con sensores distribuidos lateralmente en el manto de forma simétrica y fuentes simuladas en la base resulta relevante para este estudio. Aplicando un algoritmo de agrupamiento y

corrección temporal para eliminar los falsos positivos, lograron localizar las fuentes con un error promedio de 0.16 m, distancia tomada desde la fuente real, hasta una sección correspondiente a la mayor probabilidad de la fuente. En la Figura 2 pueden visualizar sus resultados para tres de las fuentes simuladas.

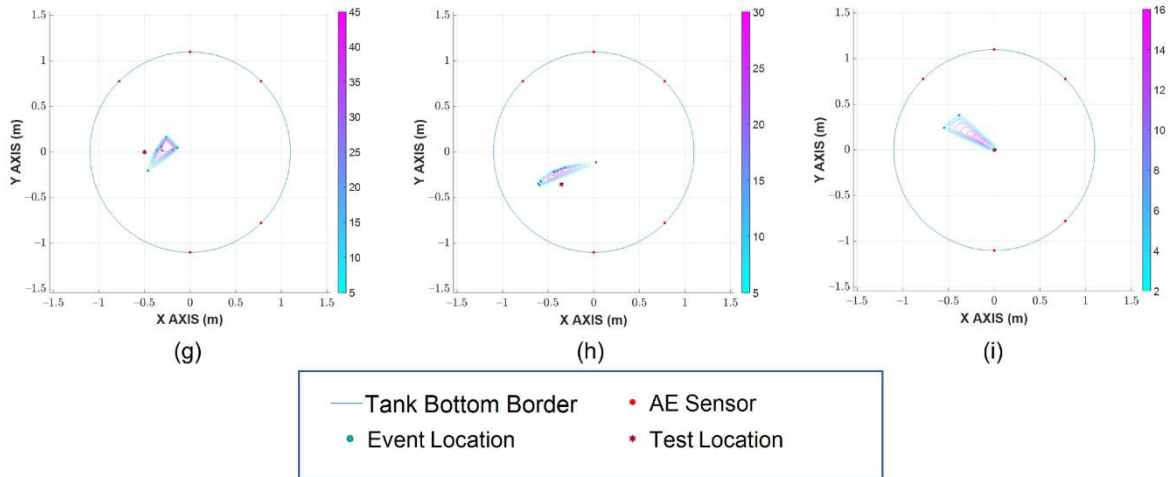


Figura 2: Resultados de Localización de Fuga en Base de Estanque por los autores Nguyen y Kim. Fuente: Nguyen y Kim (2024).

### 1.3.5 Localización en Estructuras de Múltiples Vigas Soldadas

En la literatura no se encontraron estudios que experimentarán con estructuras conformadas por múltiples vigas soldadas para localizar fuentes de emisiones acústicas. Por otra parte, lo que si se conoce es que las interfaces mecánicas actúan como obstáculos acústicos: parte de la energía se refleja o convierte de modo, y la porción transmitida sufre retardos y amortiguamiento adicionales. Esto resulta en tiempos de llegada anómalos en los sensores (mayores que en un medio continuo) y, por consiguiente, en pérdidas de precisión si no se corrige adecuadamente el modelo de propagación (Baxter et al., 2007), indicando que la presencia de múltiples soldaduras probablemente complejizará la precisión en la localización de fuentes de emisiones acústicas en la estructura.

### 1.3.6 Método de Hsu-Nielsen (Rotura de mina de lápiz)

El método Hsu-Nielsen, conocido comúnmente como rotura de mina de lápiz (*pencil lead break*, PLB), es una técnica utilizada para generar de forma controlada una emisión acústica simulada, provocando la fractura de una mina de grafito. El procedimiento consiste en utilizar un lápiz mecánico, normalmente con minas de grafito 2H de 0,3 mm o 0,5 mm de diámetro, las cuales se presionan contra la superficie del material en ensayo hasta que se rompen (Hsu & Breckenridge, 1981; ASTM, 2015). La fractura súbita de la mina libera energía de forma impulsiva, generando una onda elástica que se propaga por la estructura.

Esta señal es similar a la que se produciría en un evento real de emisión acústica, como la iniciación o el crecimiento de una grieta, y es detectada por los sensores de EA como una señal transitoria de alta amplitud (*burst*) (Sause, 2011). Por este motivo, la rotura de mina se considera una fuente artificial y reproducible de emisión acústica, que permite simular eventos internos sin necesidad de dañar el material (Hsu & Breckenridge, 1981).

El uso de esta técnica como método de verificación y calibración de sistemas de EA está respaldado por varias normas técnicas. En particular, la norma ASTM E976 recomienda expresamente el uso del método Hsu-Nielsen para realizar ensayos de reproducibilidad de sensores, así como para verificar su sensibilidad antes de una inspección (ASTM, 2015). También es mencionado en guías europeas como EN 13477-2, para la verificación de características operativas de sistemas de EA.

Para asegurar resultados repetibles, el procedimiento debe seguir ciertas especificaciones. La longitud libre de la mina (la parte que sobresale del portaminas) debe estar entre 2 y 3 mm, lo que permite una geometría de rotura consistente (Sause, 2011). El lápiz debe colocarse formando un ángulo de aproximadamente  $30^\circ$  respecto de la superficie del ensayo (Falcetelli et al., 2018). La fuerza se aplica de forma gradual y constante, incrementándola hasta que la mina se fracture, evitando que el cuerpo del lápiz o su punta metálica entre en contacto con el material, ya que esto puede alterar la señal registrada (Hamstad, 2007; Sause, 2011). En la Figura 3 se puede visualizar un ensayo de calibración de sensores en el cual se está utilizando el método de rotura de mina de lápiz, enseñando las medidas de la mina y la forma en la que se debe aplicar la fuerza.

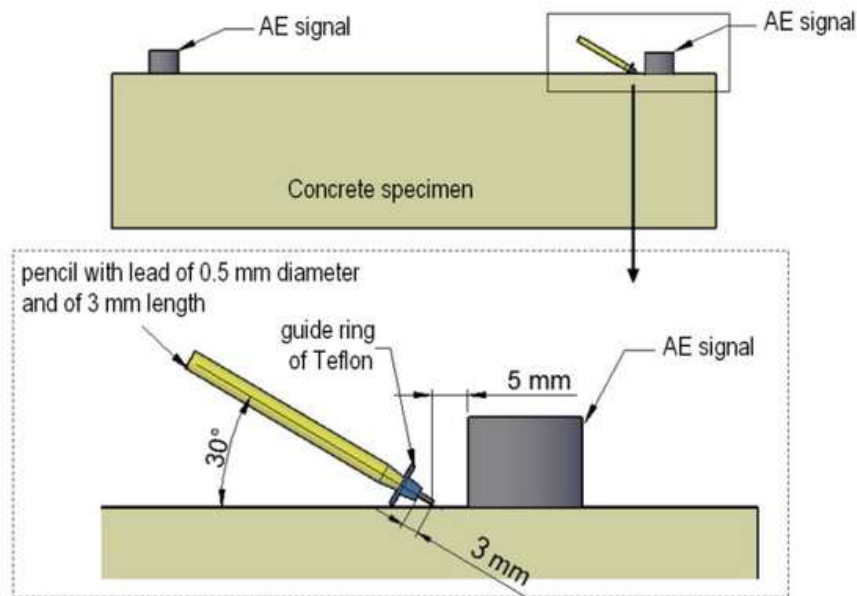


Figura 3: Calibración de sensores de emisión acústica con método Hsu-Nielsen. Fuente: (Bacharz, M., Bacharz, K., y Trąmpczyński, W., 2022)

## 2 Marco Teórico

La presente investigación se ordena en 4 etapas, comenzando con el análisis teórico de la propagación de emisiones acústicas en estructuras en 1D y 2D, seguido de la revisión y clasificación de las metodologías existentes para la localización de fuentes emisiones acústicas en estructuras 3D. Posteriormente, se seleccionan y adaptan métodos específicos para su aplicación en geometrías tridimensionales, considerando las condiciones experimentales definidas. Finalmente, se realiza una evaluación comparativa de los métodos implementados mediante simulaciones y experimentos controlados.

### 2.1 Localización Basada en Tiempos de Llegada

#### 2.1.1 Localización en 1D

La localización de fuentes de emisión acústica en una dimensión se aplica a estructuras alargadas como vigas o cañerías. En este caso, se asume que la fuente y los sensores se encuentran alineados a lo largo de un eje. La metodología se basa en calcular la diferencia de tiempos de llegada ( $\Delta T$ ) entre dos sensores ubicados en los extremos de la estructura.

Sean dos sensores ubicados a una distancia total  $L$ , y una fuente localizada a una distancia  $x$  del primer sensor. Si la velocidad de propagación de la onda acústica es  $c$ , y los tiempos de llegada registrados por los sensores son  $t_1$  y  $t_2$ , entonces:

$$\Delta T = t_2 - t_1 = L - 2xc \quad (1)$$

de donde se despeja la posición de la fuente:

$$x = \frac{L - c \Delta T}{2} \quad (2)$$

Esta solución es cerrada y permite ubicar rápidamente la fuente, siempre que la velocidad de propagación  $c$  sea conocida y constante, y los tiempos de llegada se hayan estimado con precisión.

#### 2.1.2 Localización en 2D

En dos dimensiones, se requiere un mínimo de tres sensores en posiciones no colineales. La fuente se ubica en una coordenada desconocida  $(x_f, y_f)$  y cada sensor  $i$  tiene coordenadas conocidas  $(x_i, y_i)$  y tiempo de llegada  $t_i$ . Se asume que la onda viaja a velocidad constante  $c$ .

La distancia desde la fuente al sensor  $i$  es:

$$d_i = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2} \quad (3)$$

El tiempo de llegada teórico a cada sensor es:

$$t_i = t_f + \frac{d_i}{c} \quad (4)$$

donde  $t_f$  es el tiempo de emisión. Tomando diferencias de tiempos entre pares de sensores se eliminan los términos comunes de  $t_f$ , obteniendo un sistema de ecuaciones no lineales de la forma:

$$c(t_f - t_i) = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2} - \sqrt{(x_f - x_j)^2 + (y_f - y_j)^2} \quad (5)$$

Este sistema se resuelve mediante métodos numéricos, como mínimos cuadrados no lineales, Newton-Raphson, etc. La adición de sensores redundantes nos permite mejorar la precisión.

### 2.1.3 Localización en 3D

Para estructuras tridimensionales, la localización requiere al menos cuatro sensores con posiciones conocidas  $(x_i, y_i, z_i)$ . La fuente tiene una posición desconocida  $(x_f, y_f, z_f)$  y emite una señal a un tiempo  $t_f$ .

La distancia desde la fuente al sensor  $i$  es:

$$d_i = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2} \quad (6)$$

El tiempo de llegada teórico es:

$$t_i = t_f + \frac{d_i}{c} \quad (7)$$

Al igual que en 2D, se forman diferencias de tiempos entre pares de sensores:

$$c(t_f - t_j) = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2} - \sqrt{(x_f - x_j)^2 + (y_f - y_j)^2 + (z_f - z_j)^2} \quad (8)$$

El sistema resultante es altamente no lineal y se resuelve mediante métodos iterativos. Se utiliza una estimación inicial (por ejemplo, centroide de los sensores más cercanos) y luego se aplica un algoritmo de optimización, como mínimos cuadrados no lineales, Newton-Raphson, Trust Region Reflective (TRF) o el método de Thurber. Con suficientes sensores y una correcta estimación inicial, se pueden lograr precisiones del orden de centímetros incluso en estructuras complejas.

## 2.2 Resolución Numérica de Ecuaciones

Para una estructura sólida, se disponen  $N$  sensores en posiciones conocidas  $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ . La fuente de emisión está en  $f = (x_f, y_f, z_f)$  y emite una señal en un tiempo  $t_f$ . La velocidad efectiva de propagación de las ondas se define como  $c$ . La señal llega al sensor  $i$  en un tiempo  $t_i$  dado por:

$$t_i = t_f + \frac{|f - r_i|}{c}, \quad i = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (9)$$

El número de incógnitas es cuatro si  $c$  es conocido ( $x_f, y_f, z_f, t_f$ ) o cinco si  $c$  también se desea estimar. Para eliminar  $t_f$  se define la diferencia de tiempos de llegada (TDOA) respecto a un sensor de referencia (por ejemplo, el sensor 0):

$$\tau_i = t_i - t_0 = \frac{|f - r_i| - |f - r_0|}{c}, \quad i = 1, \dots, N - 1 \quad (10)$$

Estas ecuaciones son no lineales debido a la presencia de la norma euclidiana. Se reformulan como residuos  $f_i(x)$ :

$$f_i(x) = |f - r_i| - |f - r_0| - c \cdot (t_i - t_0) \quad (11)$$

y el problema de localización se define como encontrar  $x = [x_f, y_f, z_f, t_f, c]$  que minimice la suma de los residuos al cuadrado:

$$J(x) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} f_i(x)^2 \quad (12)$$

Esto es equivalente a un problema de mínimos cuadrados no lineales. A continuación, se detalla cómo cada método resuelve este problema.

### 2.2.1 Método Trust–Region Reflective (TRF) con pérdida de Huber

El método TRF resuelve el problema de mínimos cuadrados con restricciones de cota para las variables. Para reducir la influencia de posibles errores de medición de tiempo, se sustituye la suma de cuadrados por la suma de pérdidas de Huber. La función de pérdida de Huber  $\phi$  para un residuo  $f_i$  se define como:

- $\frac{1}{2} \cdot f_i^2$  si  $|f_i(x)| \leq \delta$
- $\delta \cdot (|f_i| - \frac{1}{2} \cdot \delta)$  si  $|f_i| > \delta$

(13)

donde  $\delta$  es un parámetro de transición. Para residuos pequeños se conserva el término cuadrático; para residuos grandes, la penalización es lineal. Se define así la función:

$$J_{Huber}(x) = \sum_{i=1}^{N-1} \phi_{\delta}(f_i(x)) \quad (14)$$

La derivada de  $\phi_{\delta}$  respecto a  $f_i$  es:

- $f_i$  si  $|f_i| \leq \delta$
- $\delta \cdot \frac{f_i}{|f_i|}$  si  $|f_i| > \delta$

(15)

Estos residuos ajustados  $\tilde{f}_i$  se usan en el cálculo del gradiente y del jacobiano.

TRF linealiza los residuos alrededor de una estimación actual  $x^{(k)}$ . Se construyen el vector de residuos  $f$  y la matriz jacobiana  $J$ , cuyas entradas son  $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ . En las ecuaciones de EA:

- Para las coordenadas  $(x, y, z)$  :

$$\frac{\partial f_i}{\partial x} = \frac{x-x_i}{|f-r_i|} - \frac{x-x_0}{|f-r_0|}, \text{ (y análogamente para } y \text{ y } z\text{).} \quad (16)$$

- Para la velocidad  $c$  :

$$\frac{\partial f_i}{\partial c} = -(t_i - t_0) \quad (17)$$

Se define la función cuadrática:

$$q(\Delta x) = \frac{1}{2} \cdot \Delta x^T \cdot B \cdot \Delta x + g_{TRF}^T \cdot \Delta x \quad (18)$$

Donde  $g_{TRF}$  es el gradiente y  $B$  es una aproximación del Hessiano (con  $W$  diagonal de pesos).

$$g_{TRF} = J^T \cdot \tilde{f} \quad (19)$$

$$B = J^T \cdot W \cdot J \quad (20)$$

Se minimiza  $q(\Delta x)$  sujeto a  $\|\Delta x\| \leq \Delta$ .

La corrección  $\Delta x$  se encuentra resolviendo este subproblema. Si la solución de Gauss-Newton  $\Delta x_{GN} = -B^{-1} \cdot g$  satisface  $\|\Delta x_{GN}\| \leq \Delta$ , se toma ese paso. En caso contrario, se ajusta la dirección del paso para que no supere el límite impuesto por  $\Delta$ , y se corrigen las

variables que exceden las restricciones. El valor de  $\Delta$  se modifica dependiendo de qué tanto se acercó la mejora obtenida a la mejora que se esperaba.

## 2.2.2 Método PSO

PSO trata el problema de localización como una optimización global sin derivadas. Se definen  $M$  partículas; cada partícula  $j$  tiene una posición  $x_j = [x_{f_j}, y_{f_j}, z_{f_j}, t_{f_j}, c_j]$ .

- Inicialización: las partículas se ubican aleatoriamente dentro de los límites físicos definidos por el problema (por ejemplo, dentro del volumen del cilindro o sobre sus superficies). A cada partícula se le asigna además una velocidad inicial pequeña, también generada de forma aleatoria. Esta velocidad es un vector de desplazamiento matemático en el espacio de búsqueda. Es decir, indica cuánto y en qué dirección se va a mover la partícula en la siguiente iteración para explorar nuevas soluciones.
- Evaluación: En cada iteración, se evalúa qué tan buena es la posición actual de cada partícula calculando el valor de la función de costo  $J(x_j)$ , que representa el error cuadrático (o robusto, según el método) entre los tiempos de llegada medidos y los estimados para esa solución. Si esta nueva posición mejora el desempeño respecto a la mejor posición personal que la partícula ha alcanzado, entonces se actualiza:

$$\text{si } J(x_j(t)) < J(p_j) \Rightarrow p_j \leftarrow x_j(t) \quad (21)$$

Luego, se compara esta mejora con la mejor solución global  $g$  alcanzada por todo el enjambre. Si la nueva posición personal es mejor que la global actual:

$$\text{si } J(p_j) < J(g) \Rightarrow g \leftarrow p_j \quad (22)$$

- Actualización: cada partícula ajusta su velocidad y su posición para la siguiente iteración. La nueva velocidad depende de tres componentes:
  - a) La velocidad anterior (controlada por el parámetro de inercia  $\omega$ ).
  - b) La atracción hacia su mejor posición personal  $p_j$ .
  - c) La atracción hacia la mejor posición global  $g$ .

La actualización se realiza con las siguientes ecuaciones:

$$v_j(t+1) = \omega \cdot v_j(t) + c_1 \cdot r_1(p_j - x_j(t)) + c_2 \cdot r_2(g - x_j(t)) \quad (23)$$

$$x_j(t + 1) = x_j(t) + v_j(t + 1) \quad (24)$$

, donde:

- a)  $\omega$ : controla la influencia de la velocidad anterior (inercia).
- b)  $c_1$  y  $c_2$ : son coeficientes que controlan la intensidad de la atracción hacia la mejor posición personal y global respectivamente.
- c)  $r_1$  y  $r_2$ : son números aleatorios entre 0 y 1, que introducen aleatoriedad en el proceso.

## 2.3 Localización en Estructuras Cilíndricas

### 2.3.1 Transformación de coordenadas

En el sistema cilíndrico se describe un punto mediante tres magnitudes: el radio  $r$ , que es la distancia perpendicular desde un eje principal situado a lo largo del cilindro en el centro; el ángulo  $\theta$ , medido en un plano de referencia perpendicular al eje; y la coordenada axial  $z$ .

$$x = r \cdot \cos(\theta), y = r \cdot \sin(\theta), z = z \quad (25)$$

Así, la distancia entre dos puntos se escribe como:

$$d_i = \sqrt{(r_f \cdot \cos(\theta_f) - r_i \cdot \cos(\theta_i))^2 + (r_f \cdot \sin(\theta_f) - r_i \cdot \sin(\theta_i))^2 + (z_f - z_i)^2} \quad (26)$$

$$d_i = \sqrt{r_f^2 + r_i^2 - 2r_f \cdot r_i \cdot \cos(\theta_f - \theta_i) + (z_f - z_i)^2} \quad (27)$$

Y el problema de localización ahora consiste en encontrar  $(r_f, \theta_f, z_f, t_f, c)$  que minimicen la suma de los residuos  $f_i$  al cuadrado.

### 2.3.2 Restricciones y consideraciones en el cálculo

- Periodicidad del ángulo: Se limita el ángulo  $\theta$  a un intervalo angular  $2\pi$ .
- Distancia mínima en el plano angular (ángulo módulo  $2\pi$ ): La diferencia  $\theta_f - \theta_i$  aparece dentro del coseno en el término radial. Debido a la periodicidad del ángulo, las dos posiciones  $\theta_f - \theta_i$  y  $\theta_f - \theta_i \pm 2\pi$  describen el mismo punto. Para que la distancia sea la más corta posible, se utiliza el menor ángulo entre las dos direcciones, que se puede calcular con una fórmula de reducción módulo  $2\pi$ . Esto permite corregir el cálculo si, por ejemplo, en una iteración el ángulo cambia de  $\theta \approx +179^\circ$  a  $\theta \approx -179^\circ$ , lo que representaría un cambio pequeño, aunque numéricamente sea un cambio grande.

### 3 Localización en Estructuras Cilíndricas Huecas

#### 3.1 Procedimiento Experimental

Para validar el método de localización de emisiones acústicas que se desarrollará, se realizarán ensayos experimentales sobre un tambor metálico, solo cerrado en el piso, de geometría cilíndrica (Ver Figura 4), cuyas dimensiones son las siguientes:

- **Altura total:** 967 [mm]
- **Circunferencia:** 1747 [mm]



Figura 4: Tambor con sensores posicionados y amplificadores conectados

Para el presente ensayo se toma como origen del eje Z (altura) la base o piso del tambor, orientando hacia arriba el lado positivo del eje, y, como origen del eje X (circunferencia del manto) el punto donde se encuentra la línea vertical de soldadura del tambor, orientando hacia la derecha de la línea de soldadura el lado positivo del eje. Ver Figura 5.



Figura 5: Sistema de referencia del manto del tambor

Se utilizarán, además, cuatro sensores de emisión acústica situados sobre el manto del cilindro, adheridos mediante imanes en las siguientes posiciones, expresadas como (posición en el perímetro de la circunferencia, altura). En la Figura 6 se puede visualizar el Sensor 1 y el Sensor 2. Además, en la Tabla 1 pueden observar las coordenadas exactas.



Figura 6: Ubicaciones de sensores y fuentes en el manto del tambor

Tabla 1: Posición de los sensores en el manto del tambor

Sensor	Posición circunferencial [mm]	Ángulo [rad]	Altura [mm]
1	26	0.0935	869
2	373	1.3416	495
3	846	3.0413	64
4	1270	4.5654	444

Se definieron también 13 fuentes de emisiones acústicas (simuladas con rotura controlada de mina de lápiz) posicionadas en distintas regiones del tambor, divididas entre el manto y el piso del tambor. Un ejemplo de ensayo de rotura de mina de lápiz se puede ver en la Figura 7.



Figura 7: Ensayo de rotura de mina de lápiz

Las fuentes desde la fuente A hasta la fuente H fueron generadas en el manto del tambor. En la Figura 6 se puede visualizar también la Fuente A y la Fuente B. Sus coordenadas están expresadas tanto en milímetros como en radianes (correspondiente al ángulo calculado sobre la circunferencia de 1747 mm), con su altura respectiva sobre la base del tambor: En la Tabla 2 pueden encontrar las coordenadas exactas de las fuentes de EA.

Tabla 2: Posición de las fuentes de EA en el manto del tambor

Fuente	Posición circunferencial [mm]	Ángulo [rad]	Altura [mm]
A	17	0.0611	523
B	175	0.6293	48
C	383	1.3773	886
D	617	2.2188	551
E	885	3.1826	802
F	1074	3.8623	295
G	1322	4.7541	400
H	1518	5.4590	362

El sistema de referencia del piso del tambor se tomará desde el centro hacia el borde del tambor, donde, desde la línea de soldadura se considerará al ángulo  $\theta = 0 [rad]$ . Esto se puede observar en la Figura 8.

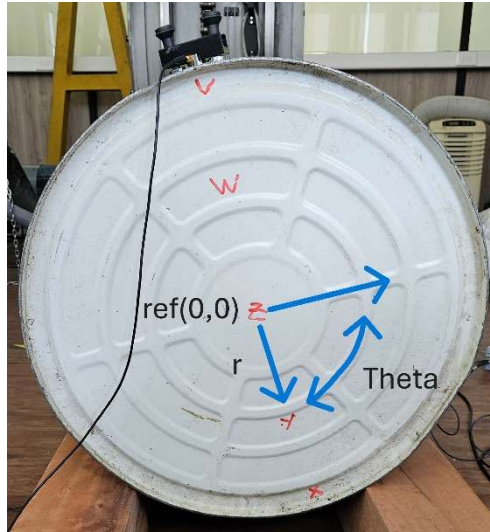


Figura 8: Sistema de referencia del piso del tambor y fuentes marcadas

Las fuentes desde la fuente X hasta la fuente V serán generadas directamente sobre el piso del tambor (0 mm de altura), distribuidas a lo largo del diámetro, desde  $\theta = 0$  [rad], usando coordenadas polares. Las posiciones las pueden encontrar en la Tabla 3.

Tabla 3: Posición de las fuentes de EA en el piso del tambor

Fuente	Coordenada en $r$ [mm]	Coordenada en $\theta$ [rad]
X	250	0
Y	140	0
Z	0	0
W	140	3.14
V	250	3.14

Para cada una de las 13 posiciones de emisiones de fuente acústica, se realizarán cinco repeticiones experimentales bajo las mismas condiciones. Estas repeticiones serán ejecutadas con el fin de asegurar la estabilidad del método, descartar errores específicos de medición, y observar posibles variaciones en la precisión del algoritmo de localización.

Los sensores no serán cambiados de posición entre mediciones, y la geometría del tambor y las condiciones de contacto con la fuente se mantendrán constantes durante todo el ensayo experimental.

### 3.1.1 Procedimiento de Análisis

Los sensores entregarán la información al computador conectado al sistema generando un archivo .tdms, el cual se leerá a través de un código con interfaz programado en Python, encargado de tomar las señales de cada uno de los sensores y realizar los cálculos internamente a través de las funciones públicas disponibles en las bibliotecas del software.

En la interfaz se podrá visualizar la onda para asegurarse de no tener falsos positivos, y se detectará el punto en que las ondas cruzan cierto umbral de voltaje, para al final extraer así el tiempo de llegada de la onda a cada uno de los sensores. En la Figura 9 se puede observar el cómo se ve la interfaz del programa.

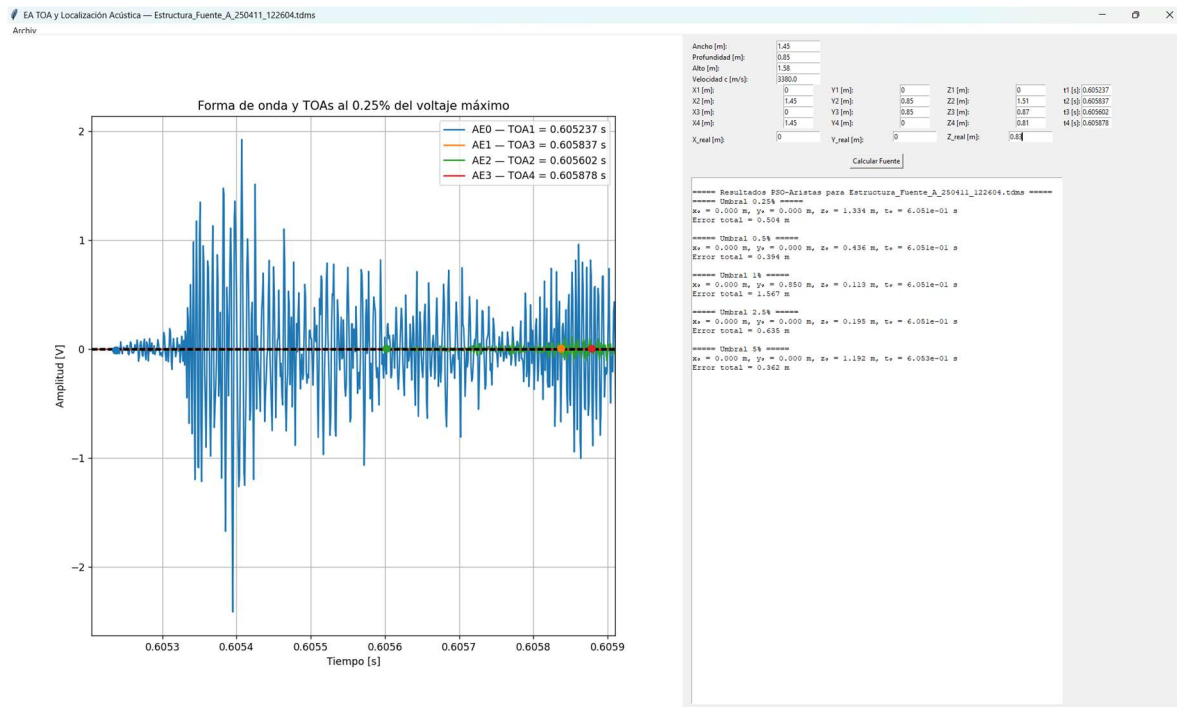


Figura 9: Interfaz Programa Python para Visualización y Cálculo de Localización de Fuentes de EA.

Para recoger los datos se utilizará una frecuencia de muestreo de 1 MHz, mientras que para filtrar las señales recibidas por los sensores se utilizará un filtro de Butterworth de orden 3 y frecuencia de corte igual a 20,000 Hz.

Manteniendo los mismos parámetros para todas las mediciones de cada fuente ensayada el programa procederá a hacer el cálculo internamente y entregando los resultados en la ventana de resultados, los cuales serán procesados en una tabla de Excel para obtener los promedios por cada fuente, por cada nivel de umbral, y por cada método numérico de resolución del problema de TDOA estudiado.

Con otro código programado en Python se procederá a leer el archivo Excel ordenado con los datos para poder generar los gráficos que se utilizarán para resumir y exponer los resultados.

### 3.1.2 Cálculo Velocidad de Onda

Para poder realizar los cálculos se requerirá considerar una velocidad de onda, la cual se obtendrá a través de un promedio de velocidades obtenidas, invirtiendo las ecuaciones de TDOA para obtener la velocidad, utilizando las ya conocidas coordenadas de las fuentes. La ecuación para ello quedará de la siguiente forma:

$$c = \frac{1}{t_f - t_i} \sqrt{2r^2(1 - \cos(\theta_f - \theta_i)) + (z_f - z_i)^2} \quad (28)$$

Dejando de incógnitas a  $c$  y a  $t_f$ , por lo cual, resolviendo el sistema de ecuaciones no lineal, se obtiene la velocidad y se repite el cálculo para cada una de las 5 mediciones en las 8 fuentes generadas en el manto del estanque, realizando todo a través del mismo software programado en Python.

Para obtener la velocidad final, se procederá a calcular el promedio de todas las velocidades obtenidas a través de Excel utilizando la función "MEDIA.ACOTADA" para excluir así los valores erróneos obtenidos, considerando en ella un 20% de acotamiento (10% en los valores bajos y 10% en los altos).

### 3.1.3 Cálculo de Localización de Fuentes de EA

Como apoyo al filtro de Butterworth, se considerará un tiempo de partida desde el cual se comenzarán a registrar los tiempos de llegada de cada umbral, reduciendo así falsos positivos que el filtro de Butterworth no haya podido eliminar. Este tiempo de partida para el tambor se considerará con la siguiente ecuación para la base y para el método integrado:

$$t_{start} = \max\left(0, t_{ref} - \frac{(2 \cdot R + Z)}{c}\right) \quad (29)$$

Y con la siguiente ecuación para el manto:

$$t_{start} = \max\left(0, t_{ref} - \frac{\left(\frac{\text{Perímetro del tambor}}{2} + Z\right)}{c}\right) \quad (30)$$

Con  $t_{ref}$  igual al tiempo mínimo de entre todos los sensores en que su señal alcanza la mayor amplitud.

Luego se procederá a utilizar el programa para realizar el cálculo de las fuentes de EA, considerando 5 distintos niveles de umbrales, para así poder analizar cual nivel es el más adecuado y nos permita obtener un menor error, a la vez de considerar para cada uno de esos 5 niveles de umbrales, 5 metodologías de cálculo distintas.

Los 5 niveles de umbrales que consideraremos son:

- 0.25%
- 0.5%
- 1%
- 2.5%
- 5%

Estos umbrales representan la barrera de amplitud que las señales tienen que cruzar para detectar los tiempos de llegada, y serán calculados como su valor porcentual respecto al mayor voltaje obtenido entre las señales de los 4 sensores por cada medición.

A la vez, las 5 metodologías de cálculo que se utilizarán son:

- USBM
- Thurber (con punto inicial adaptativo)
- TRF + Huber (con punto inicial adaptativo)
- TRF + Huber (con punto inicial fijo)
- PSO

Las metodologías de cálculo iterativas requieren de seleccionar un punto de inicio, para lo cual se considerarán 2 opciones distintas para comparar.

- Punto inicial adaptativo: Dado que existen fuentes tanto en el manto como en la base del tambor, se deben considerar puntos iniciales de iteración para ambas superficies. Para calcular el punto inicial en la base se seguirán los siguientes pasos:

- 1- Se construirá una matriz  $dt$  con las diferencias  $t_j - t_i$  entre tiempos de llegada considerando sólo las diferencias positivas.
- 2- Estas diferencias se normalizarán de la forma:

$$w_{ij} = \frac{dt[idx_i, idx_j]}{\sum dt} \quad (31)$$

, para dar más peso a parejas de sensores con mayor diferencia temporal.

- 3- Se modela la posición de cada sensor en la circunferencia de radio  $R$  como  $(R \cdot \cos(\theta_i), R \cdot \sin(\theta_i))$ . Para cada par  $(i, j)$  se calcula el vector  $d = pos[j] - pos[i]$  (dirección del sensor  $i$  al  $j$ ) y se suma al vector global  $v$  con el peso  $w_{ij}$  y normalizado a longitud unitaria. El resultado  $v$  apunta hacia la región de donde proviene la onda.
- 4- La dirección de  $v$  se traduce en un ángulo  $\theta_0 = \arctan2(v_y, v_x)$  y la magnitud  $\|v\|$  se multiplica por  $R$  para obtener  $r_0$ .
- 5- Se identifica el sensor  $k$  con el menor tiempo de llegada (más cercano a la fuente). La distancia geodésica desde la semilla  $(r_0, \theta_0, 0)$  a dicho sensor se divide por  $c$  para estimar el tiempo de propagación. Este tiempo se resta del TOA del sensor para obtener el tiempo de origen  $t_0$ .

Por otro lado, para obtener el punto inicial en el manto se deben realizar los mismos pasos que para la base, pero con la diferencia de que está adaptado a la superficie del manto, considerando las fuentes ubicadas con coordenadas en una posición horizontal  $R \cdot \theta_i$  (longitud de arco) y una vertical  $z_i$ , a diferencia de las coordenadas  $(r_i, \theta_i)$  utilizadas en la base.

- Punto inicial fijo: Para el manto este punto es en la mitad de la circunferencia y la mitad de la altura, en nuestro caso, (873.5 mm, 483.5 mm), mientras que para la base es en el punto (0 mm, 0 rad).

### 3.2 Complejidad de la Localización

Para realizar una correcta localización hay que tener en cuenta ciertas complicaciones, y las principales están dadas por la forma del tambor, una de ellas ya se aborda en el punto 2.3.2, pero hay 2 complejidades adicionales que considerar, una de ellas es que el tambor es un cilindro hueco, lo cual implica que la onda solo recorre superficies y no un volumen, estas superficies se pueden dividir entre el manto del tambor y los extremos (base superior e inferior).

En nuestro caso, el tambor solo tiene una base en el piso, por lo cual se considerarán solo las superficies del manto y la base del piso.

La otra complicación presente en nuestro trabajo es que los sensores sólo han sido colocados en el manto del tambor, lo cual implica que las fuentes generadas en el piso deberán ser localizadas considerando que la onda recorrerá tanto la base como el manto del tambor.

En nuestro caso, a diferencia de como realizaron la localización los estudios encontrados en la literatura, realizaremos el proceso utilizando el mínimo de sensores necesarios para obtener la localización en un cuerpo 3D (4 sensores), calculando además el error como una diferencia entre la posición real y la posición calculada, en vez de entre la posición calculada y un área de posibilidades. Adicionalmente a lo anterior, se obtendrán resultados no sólo para fuentes localizadas en la base, sino también para fuentes localizadas en el mismo manto, evaluando fuentes en ambas superficies al mismo tiempo.

### 3.3 Localización en el Manto

Tras haber obtenido los puntos iniciales de iteración requeridos, se procederá a evaluar los distintos métodos numéricos para resolver el problema de la localización, estos son el método PSO, TRF + Huber (con punto inicial adaptativo), TRF + Huber (con punto inicial fijo), Thurber y USBM.

Para calcular la distancia geodésica entre el punto inicial de iteración y los sensores, tal como se hizo para obtener  $t_0$ , se procede a cortar imaginariamente el tambor en su largo, para poder obtener una placa rectangular con la cual las coordenadas serán  $(R \cdot \theta_i, z_i)$ , donde  $R$  representa el radio máximo del tambor y es el que se utiliza dado que en el interior del cilindro es hueco y las ondas solo se moverán por la superficie (en ese radio máximo).

De esa forma, la distancia entre la fuente y cada sensor estará dada por la siguiente ecuación:

$$d_{manto} = \sqrt{[R((\theta_i - \theta_0 + \pi) \bmod(2\pi) - \pi) - \pi]^2 + z_i^2} \quad (32)$$

En la Figura 10 se pueden visualizar los sensores y las fuentes ubicadas en el tambor en las posiciones anteriormente indicadas.

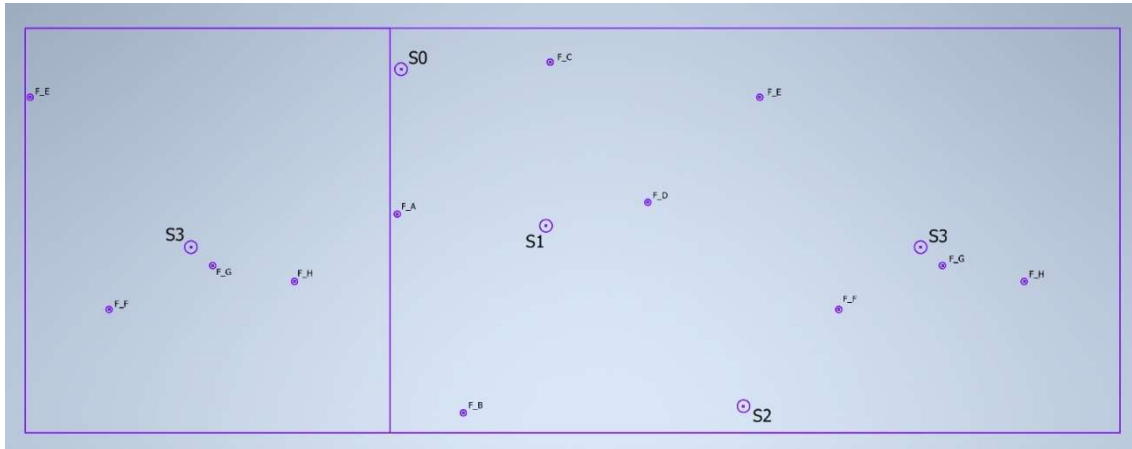


Figura 10: Plano de vista frontal del tambor con sección de proyección geométrica con posición de sensores y fuentes

Los círculos grandes representan los sensores y los círculos pequeños representan las fuentes, además, la línea que divide el rectángulo es para poder graficar y visualizar que el recorrido de la onda de una fuente de emisión acústica en un cuerpo cerrado va a poder recorrer la superficie de forma en que su inicio será igual a su final, es decir va a dar la vuelta alrededor de la superficie llegando al mismo punto desde el que comenzó, generando que la onda pueda llegar al sensor desde 2 direcciones distintas ( $\pi$  y  $-\pi$ ), pero la distancia más corta será la que ayude a identificar ese tiempo de llegada.

Por ejemplo, en el rectángulo de la derecha se ve que la Fuente H está muy lejos del sensor S0, pero realmente, viendo el rectángulo de la izquierda se ve que están cerca, demostrando que el sensor que está más lejos de la Fuente H es realmente el sensor S2.

Este diagrama se utilizará para confirmar la correcta identificación del orden en que los tiempos de llegada se van registrando.

Parámetros utilizados en el método numérico PSO:

- Número de partículas: 80.
- Número de iteraciones: 400.
- Coeficientes del modelo:
  - a)  $w = 0.9$
  - b)  $c_1 = 0.5$

c)  $c_2 = 0.3$

Parámetros utilizados en el método numérico TRF + Huber:

- Escala de la pérdida:  $1 \cdot 10^{-3}$
- Límite de evaluaciones de la función: 1000
- Tolerancias:  $1 \cdot 10^{-10}$

En la Figura 11 pueden encontrar un diagrama de flujo que muestra los principales pasos utilizados para llegar a localizar la fuente de EA con nuestras metodologías para el manto del tambor.

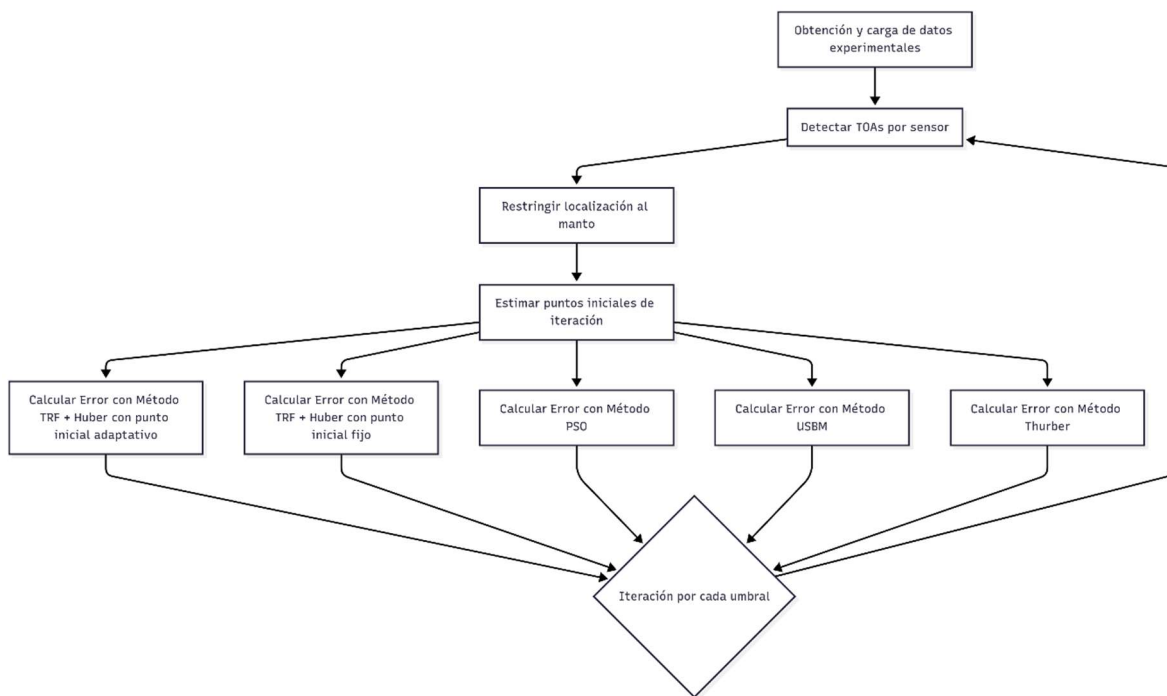


Figura 11: Diagrama de flujo de cálculo de localización para el manto del tambor

### 3.4 Localización en el Piso

Al igual que para el manto, en el piso se utilizarán los métodos numéricos PSO, TRF + Huber (con punto inicial adaptativo), TRF + Huber (con punto inicial fijo), Thurber y USBM.

Para realizar el cálculo de la distancia entre dos puntos con fuentes en el piso, dado que los sensores están en el manto, como se mencionó anteriormente, esto implica obtener la distancia considerando un recorrido tanto por la base como por el manto, lo cual se realizará de la siguiente forma:

- 1- Con el punto inicial  $(r_0, \theta_0, 0)$  y las coordenadas de cada sensor  $(R, \theta_i, z_i)$ , se busca el ángulo  $\varphi_i$  por el cual se llega desde el punto inicial al punto  $(R, \varphi_i, 0)$  que minimiza

la distancia entre el punto inicial y el sensor a través de una iteración, por lo cual la distancia recorrida en la base será:

$$d_{base} = \sqrt{R^2 + r_0^2 - 2 \cdot r_0 \cdot R \cdot \cos(\theta_0 - \varphi_i)} \quad (33)$$

- 2- Luego se procederá a calcular la distancia en el manto desde el punto  $(R, \varphi_i, 0)$  a cada sensor  $(R, \theta_i, z_i)$  con la misma ecuación con la que se calcula la distancia entre dos puntos en el manto, pero reemplazando  $\theta_0$  por  $\varphi$ , quedando de la siguiente forma:

$$d_{manto} = \sqrt{[R((\theta_i - \varphi + \pi) \bmod(2\pi) - \pi) - \pi]^2 + z_i^2} \quad (34)$$

- 3- Así, finalmente la distancia total es igual a:

$$d_i = d_{base} + d_{manto} \quad (35)$$

Con esta ecuación de distancia total se explora el intervalo para  $\varphi$  entre  $[0, 2\pi]$  que minimiza esa distancia total.

En la Figura 12 se puede visualizar el diagrama utilizado para corroborar el orden de los TOA a los sensores.

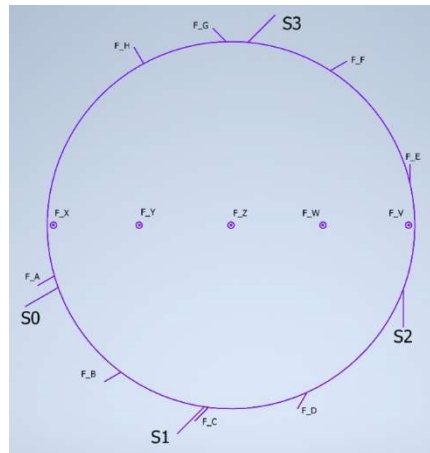


Figura 12: Plano de vista inferior del tambor con posición de sensores y fuentes

Parámetros utilizados en el método numérico PSO:

- Número de partículas: 30.
- Número de iteraciones: 100.
- Coeficientes del modelo:
  - a)  $w = 0.7$
  - b)  $c_1 = 1.5$
  - c)  $c_2 = 1.5$

Parámetros utilizados en el método numérico TRF + Huber:

- Escala de la pérdida:  $1 \cdot 10^{-3}$
- Límite de evaluaciones de la función: 1000
- Tolerancias:  $1 \cdot 10^{-10}$

En la Figura 13 pueden encontrar un diagrama de flujo que muestra los principales pasos utilizados para llegar a localizar la fuente de EA con nuestras metodologías para la base del tambor.

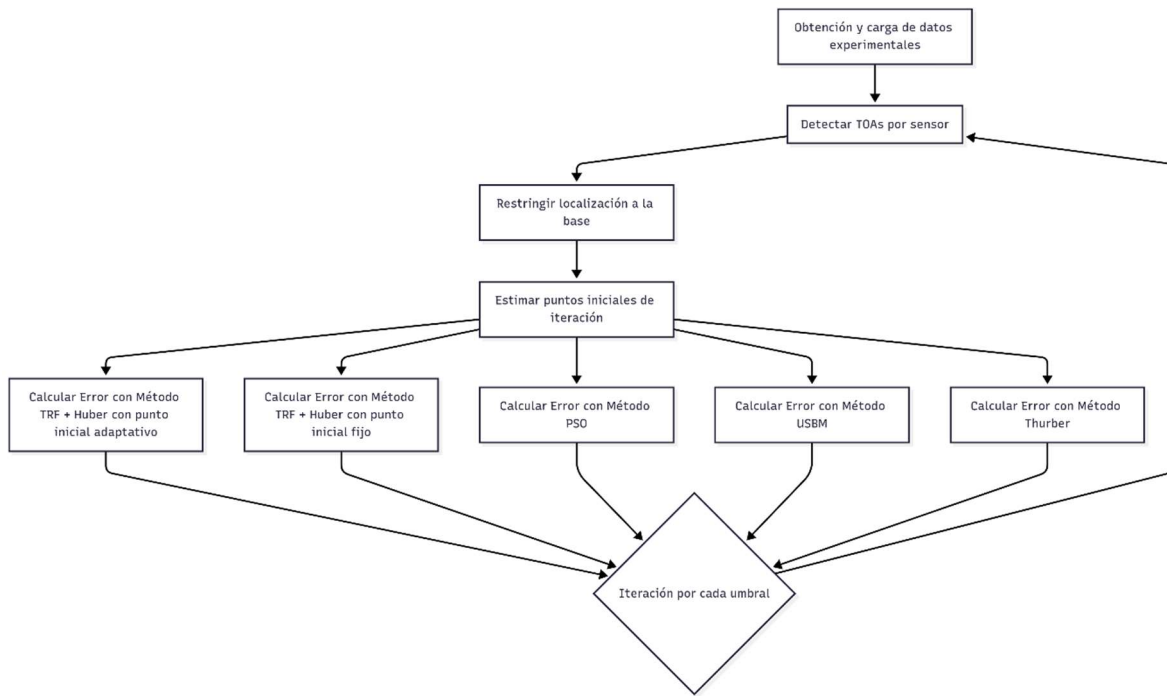


Figura 13: Diagrama de flujo de cálculo de localización para la base del tambor

### 3.5 Localización Integrada

Para combinar ambos métodos sin restricción alguna respecto a si la fuente se encuentra en la base o en el manto se procede a realizar los cálculos anteriores considerando ambos casos, por lo cual se obtienen 2 resultados, uno si la fuente se encontrara en la base y otro si la fuente se encontrará en el manto.

Para decidir cuál será el resultado final se realiza una comparación entre los costes de los resultados, obtenidos como la suma de los residuos al cuadrado, si el coste del resultado obtenido con la fuente en el manto es menor que el obtenido en la base, entonces el resultado final reflejado serán las coordenadas del manto, en caso contrario, serán las coordenadas de la base, repitiendo el mismo proceso tanto para el método PSO como para el método TRF + Huber, siendo en este caso los únicos dos métodos que se utilizarán.

Parámetros utilizados en el método numérico PSO:

- Número de partículas: 50.
- Número de iteraciones: 200.
- Coeficientes del modelo:
  - a)  $w = 0.7$
  - b)  $c_1 = 1.5$
  - c)  $c_2 = 1.5$

Parámetros utilizados en el método numérico TRF + Huber:

- Escala de la pérdida:  $1 \cdot 10^{-3}$
- Límite de evaluaciones de la función: Sin límite
- Tolerancias:  $1 \cdot 10^{-8}$

En la Figura 14 pueden encontrar un diagrama de flujo que muestra los principales pasos utilizados para llegar a localizar la fuente de EA con nuestras metodologías, para el caso sin restricciones del tambor.

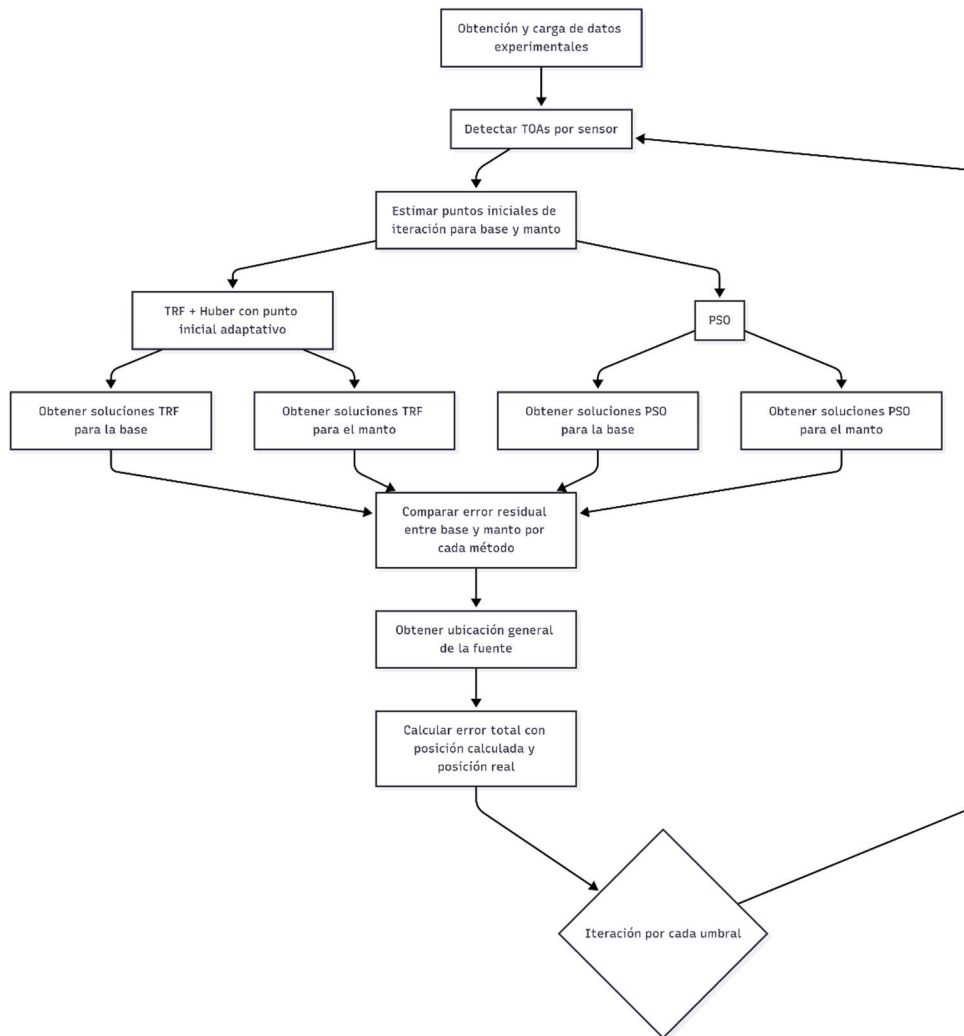


Figura 14: Diagrama de flujo de cálculo de localización sin restricciones en el tambor

## 4 Localización en Estructuras de Vigas Soldadas

### 4.1 Procedimiento Experimental

Para validar el método de localización de emisiones acústicas que se desarrollará, se realizarán ensayos experimentales sobre una estructura de vigas soldadas mostrada en la Figura 15 con perfil cuadrado, solo unido por vigas soldadas en la parte superior, cuyas dimensiones son las siguientes:

- **Largo Z:** 1580 [mm] (Altura)
- **Largo X:** 1450 [mm] (Ancho)
- **Largo Y:** 850 [mm] (Profundidad)



*Figura 15: Estructura de vigas soldadas con sensores instalados y fuentes de EA marcadas.*

Para el presente ensayo se toma como origen el punto situado en el suelo de la pata delantera izquierda indicado en la Figura 16. El valor del eje Z aumenta hacia arriba, el del eje X aumenta hacia la derecha, y el del eje Y aumenta hacia atrás.



Figura 16: Estructura de vigas soldadas con ejes y referencia de origen del sistema de coordenadas

Se utilizarán, además, cuatro sensores de emisión acústica situados sobre la estructura en posiciones aleatorias, adheridos mediante imanes en las siguientes posiciones, expresadas como (ancho, profundidad, altura). En la Figura 17 se pueden visualizar los sensores y algunas fuentes, y, en la Tabla 4 se encuentran las coordenadas de los sensores.



Figura 17: Ubicaciones de sensores y fuentes en la estructura de vigas soldadas

Tabla 4: Posición de los sensores en la estructura de vigas soldadas

Sensor	Ancho [m]	Profundidad [m]	Altura [m]
1	0	0	0
2	1.45	0.85	1.51
3	0	0.85	0.87
4	1.45	0	0.81

Se simularán 10 fuentes de emisiones acústicas (simuladas con rotura controlada de mina de lápiz) posicionadas en distintas regiones de la estructura de manera aleatoria.

En la Tabla 5 se muestran las coordenadas desde la Fuente A hasta la Fuente J.

Tabla 5: Posición de las fuentes de EA en la estructura de vigas soldadas

Fuente	Ancho [m]	Profundidad [m]	Altura [m]
A	0	0	0.83
B	0	0	1.58
C	1.45	0	1.58
D	0	0.85	1.51
E	1.45	0.85	0.82
F	0.67	0.85	1.58
G	1.09	0	1.58
H	0	0.38	1.58
I	1.45	0.78	1.58
J	1.45	0	0

#### 4.1.1 Procedimiento de Análisis

El programa para registrar las señales es el mismo al utilizado con el tambor, pero el programa para realizar el análisis y los cálculos se cambia por uno adaptado en específico para la estructura, cambiando la metodología de cálculo y las ecuaciones a utilizar para el cálculo de la distancia, manteniendo aun la misma interfaz y procedimiento para promediar los resultados.

Al igual que para el tambor, para recoger los datos se utilizará una frecuencia de muestreo de 1 MHz, mientras que para filtrar las señales recibidas por los sensores se utilizará un filtro de Butterworth de orden 3 y frecuencia de corte igual a 20,000 Hz.

#### 4.1.2 Cálculo Velocidad de Onda

La metodología para calcular la velocidad de onda es la misma que la utilizada para el tambor, utilizando las coordenadas reales de las fuentes simuladas para conocer la velocidad de onda en la estructura, con la diferencia en que la distancia entre 2 puntos se considerará distinta, dejando la ecuación de la siguiente forma:

$$c = \frac{1}{\Delta t} (|x_f - x_i| + |y_f - y_i| + |z_f - z_i|) \quad (36)$$

### 4.1.3 Cálculo de Localización de Fuentes de EA

Se considerarán los mismos 5 umbrales para la obtención de los tiempos de llegada de la onda de emisión acústica a los sensores, los mismos utilizados para el tambor, pero en este caso, la única metodología a utilizar será el método numérico PSO. Dado lo anterior, aquí no se define un punto inicial para iteración puesto que el método PSO se resuelve entregando como puntos iniciales distintas partículas con coordenadas aleatorias.

Lo que si se deberá cambiar es el tiempo de partida desde el cual los datos se empezarán a registrar, tiempo que estará regido por la siguiente ecuación:

$$t_{start} = \max\left(0, t_{ref} - \frac{(X + Y + 2Z)}{c}\right) \quad (37)$$

## 4.2 Complejidad de la Localización

La forma de la estructura nos exige encontrar una forma distinta de calcular la distancia entre 2 puntos, esto dado que, a diferencia de lo que indica la ecuación típica, la onda de emisión acústica en este caso tiene un movimiento mucho más restringido que en el tambor, pudiendo solo moverse en línea recta por las direcciones mismas de los ejes, es decir, la estructura solo puede recorrerse en la dirección del ancho, alto y profundidad individualmente.

Dado lo anterior, se comprende que la distancia entre dos puntos situados en la misma viga será simplemente  $|x_j - x_i|$ , y, por consiguiente, la distancia entre dos puntos situados en distintas vigas se interpreta con la ecuación:

$$d_i = |x_f - x_i| + |y_f - y_i| + |z_f - z_i| \quad (38)$$

Entregando finalmente una suma de la diferencia entre cada una de las coordenadas, recorriendo la estructura desde el punto inicial viga por viga hasta cada sensor.

## 4.3 Localización en Estructura de Vigas Soldadas

Para facilitar el cálculo de la localización, se considerará una estructura con solo sus 4 patas y las 4 vigas horizontales que las unen en la parte superior, ignorando los refuerzos diagonales de las esquinas superiores entre las patas y las vigas horizontales. Además, a pesar de que las vigas tienen un perfil cuadrado, se considerará que el recorrido de las ondas solo se producirá en la dirección de mayor dimensión de la viga, ignorando su perfil.

Parámetros utilizados en el método numérico PSO:

- Número de partículas: 80.
- Número de iteraciones: 400.
- Coeficientes del modelo:
  - a)  $w = 0.9$
  - b)  $c_1 = 0.5$
  - c)  $c_2 = 0.3$

## 5 Resultados

### 5.1 Velocidad de Onda en Tambor

La velocidad de onda promedio obtenida para los 3 primeros niveles de umbrales, logro compararse de manera asertiva con la velocidad de onda longitudinal típica encontrada en la literatura para el acero, resultando en un promedio entre los 3 resultados de 5230 [m/s]. En la Tabla 6 se encontrarán las velocidades promedio por cada nivel de umbral.

Tabla 6: Velocidades Calculadas por Nivel de Umbral para el tambor.

Umbral	Velocidad Promedio [m/s]
0.25%	5273
0.5%	5236
1%	5182

### 5.2 Localización Restringida al Manto del Tambor

Observando la Tabla 7 o la Figura 18 podemos notar que el mayor error promedio se registró en el umbral 2,5 % para la fuente E (0,763 m) mientras que el valor mínimo (0,010 m) ocurrió en el umbral 0,5 % para la fuente D. Se puede observar también que en la fuente B es donde peor precisión se logra a excepción de los 2 umbrales más altos.

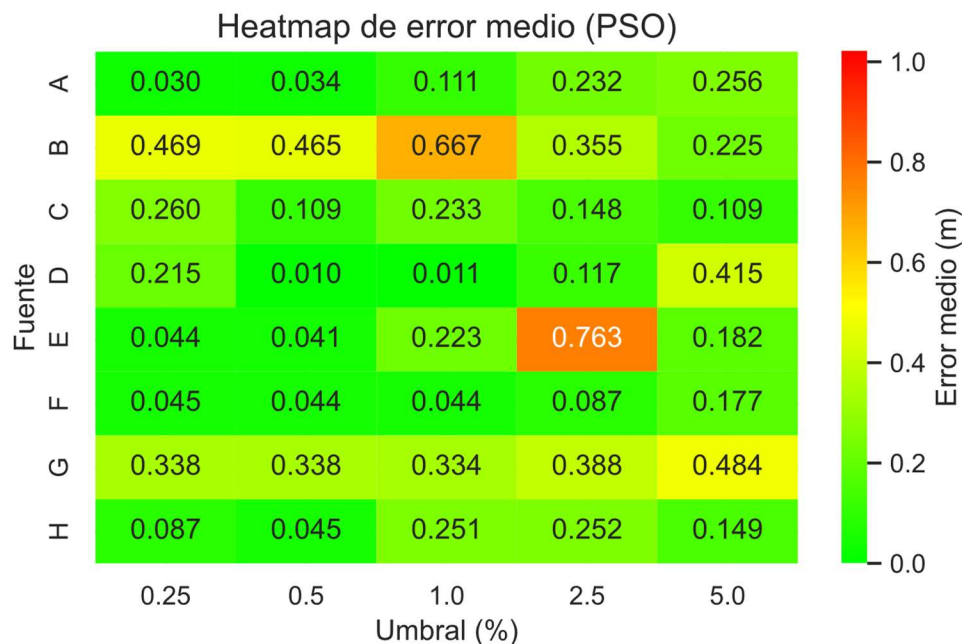


Figura 18: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en el manto del tambor

Tabla 7: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en el manto del tambor

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	A	0.030	0.006	1.97%
	B	0.469	0.409	30.79%
	C	0.260	0.283	17.06%
	D	0.215	0.302	14.09%
	E	0.044	0.014	2.89%
	F	0.045	0.002	2.96%
	G	0.338	0.000	22.22%
	H	0.087	0.098	5.70%
0.5%	A	0.034	0.004	2.21%
	B	0.465	0.401	30.50%
	C	0.109	0.160	7.17%
	D	0.010	0.004	0.69%
	E	0.041	0.011	2.67%
	F	0.044	0.001	2.89%
	G	0.338	0.000	22.21%
	H	0.045	0.004	2.96%
1%	A	0.111	0.055	7.26%
	B	0.667	0.201	43.80%
	C	0.233	0.472	15.29%
	D	0.011	0.004	0.73%
	E	0.223	0.422	14.61%
	F	0.044	0.002	2.91%
	G	0.334	0.010	21.93%
	H	0.251	0.284	16.51%
2.5%	A	0.232	0.023	15.25%
	B	0.355	0.088	23.30%
	C	0.148	0.071	9.70%
	D	0.117	0.221	7.69%

	E	0.763	0.180	50.07%
	F	0.087	0.056	5.73%
	G	0.388	0.052	25.48%
	H	0.252	0.281	16.58%
5%	A	0.256	0.024	16.84%
	B	0.225	0.077	14.79%
	C	0.109	0.009	7.14%
	D	0.415	0.111	27.26%
	E	0.182	0.018	11.98%
	F	0.177	0.038	11.65%
	G	0.484	0.049	31.76%
	H	0.149	0.088	9.80%

Los promedios por umbral de la Tabla 8 muestran que el error más bajo es 0,136 m en el umbral 0,5 %, mientras que el máximo es 0,293 m a 2,5 %, además, la desviación estándar y el error relativo se incrementan al aumentar el umbral, indicando que para este caso lo más adecuado sería utilizar el método PSO en el manto del tambor con un umbral de 0.5%, con una desviación estándar de tan sólo 0.073 m y un error relativo de 8.91%.

*Tabla 8: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método PSO en el manto del tambor*

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.186	0.139	12.21%
0.5%	0.136	0.073	8.91%
1%	0.234	0.181	15.38%
2.5%	0.293	0.121	19.22%
5%	0.250	0.052	16.40%

Observando la Tabla 9 o la Figura 19 podemos notar que la fuente G alcanzó el mayor error promedio (0,746 m) en el umbral 2,5 %, mientras que el menor error fue para la fuente A en el umbral 0,5 % (0,027 m). Se puede notar claramente un peor desempeño para localizar fuentes en el manto con el método TRF + Huber adaptativo que con el método PSO, pero manteniéndose la fuente B como la fuente donde peor precisión se logra.

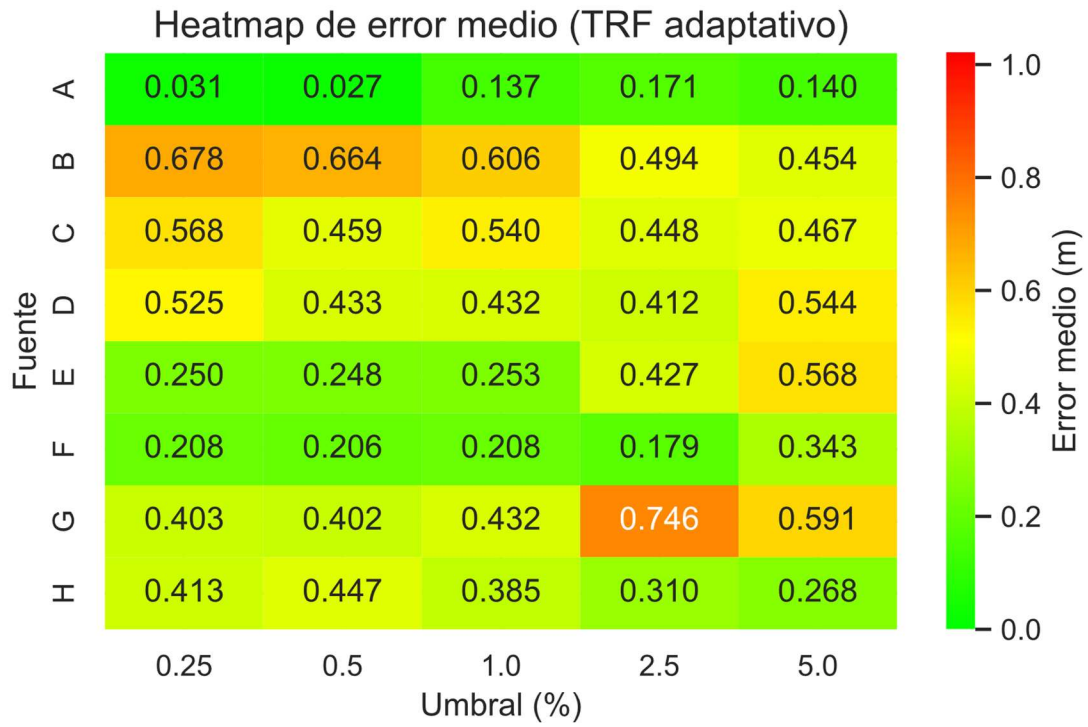


Figura 19: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en el manto del tambor

Tabla 9: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en el manto del tambor

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	A	0.031	0.006	2.05%
	B	0.678	0.008	44.50%
	C	0.568	0.183	37.28%
	D	0.525	0.124	34.48%
	E	0.250	0.007	16.41%
	F	0.208	0.001	13.64%
	G	0.403	0.011	26.44%
	H	0.413	0.083	27.11%
0.5%	A	0.027	0.003	1.78%
	B	0.664	0.024	43.58%
	C	0.459	0.001	30.12%
	D	0.433	0.005	28.41%
	E	0.248	0.006	16.27%
	F	0.206	0.002	13.56%
	G	0.402	0.006	26.41%
	H	0.447	0.008	29.36%
1%	A	0.137	0.062	8.97%
	B	0.606	0.078	39.78%
	C	0.540	0.180	35.48%
	D	0.432	0.003	28.35%
	E	0.253	0.010	16.58%
	F	0.208	0.003	13.64%
	G	0.432	0.053	28.37%
	H	0.385	0.083	25.26%
2.5%	A	0.171	0.045	11.21%
	B	0.494	0.055	32.43%
	C	0.448	0.030	29.40%

	D	0.412	0.032	27.04%
	E	0.427	0.166	28.06%
	F	0.179	0.064	11.74%
	G	0.746	0.145	49.00%
	H	0.310	0.085	20.38%
5%	A	0.140	0.006	9.18%
	B	0.454	0.080	29.82%
	C	0.467	0.009	30.67%
	D	0.544	0.147	35.74%
	E	0.568	0.027	37.31%
	F	0.343	0.155	22.53%
	G	0.591	0.000	38.80%
	H	0.268	0.009	17.58%

Los promedios por umbral de la Tabla 10 muestran que el error máximo (0,422 m) se da a 5 %, mientras que el mínimo (0,361 m) aparece en el umbral de 0,5 % al igual que con el método PSO, lo que significa que si queremos usar sólo el método TRF lo más adecuado para nuestro caso sería utilizar un umbral de 0.5%, el cual además posee la desviación estándar más baja, de tan sólo 7 mm, indicando poca variabilidad en los resultados.

*Tabla 10: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en el manto del tambor*

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.384	0.053	25.24%
0.5%	0.361	0.007	23.69%
1%	0.374	0.059	24.55%
2.5%	0.398	0.078	26.16%
5%	0.422	0.054	27.70%

Con lo anterior, podemos resumir que el mejor método para nuestro caso en que se desee localizar fuentes sólo en el manto del tambor es el método PSO con umbral de 0.5%.

### 5.3 Localización Restringida a la Base del Tambor

Observando la Tabla 11 o la Figura 20 podemos notar que el mayor error promedio, con fuentes restringidas a sólo la base del tambor, se registró en el umbral 2,5 % para la fuente Z (0,806 m) mientras que el valor mínimo (0,027 m) ocurrió en el umbral 1,0 % para la fuente X. Se puede observar también que en la fuente Z es por mucha diferencia donde peor precisión se logra a excepción de los resultados con el umbral de 0.25%, donde la fuente W toma un valor aproximadamente 0.4 m más grande que con los otros umbrales, provocado probablemente por una detección temprana de los tiempos de llegada.

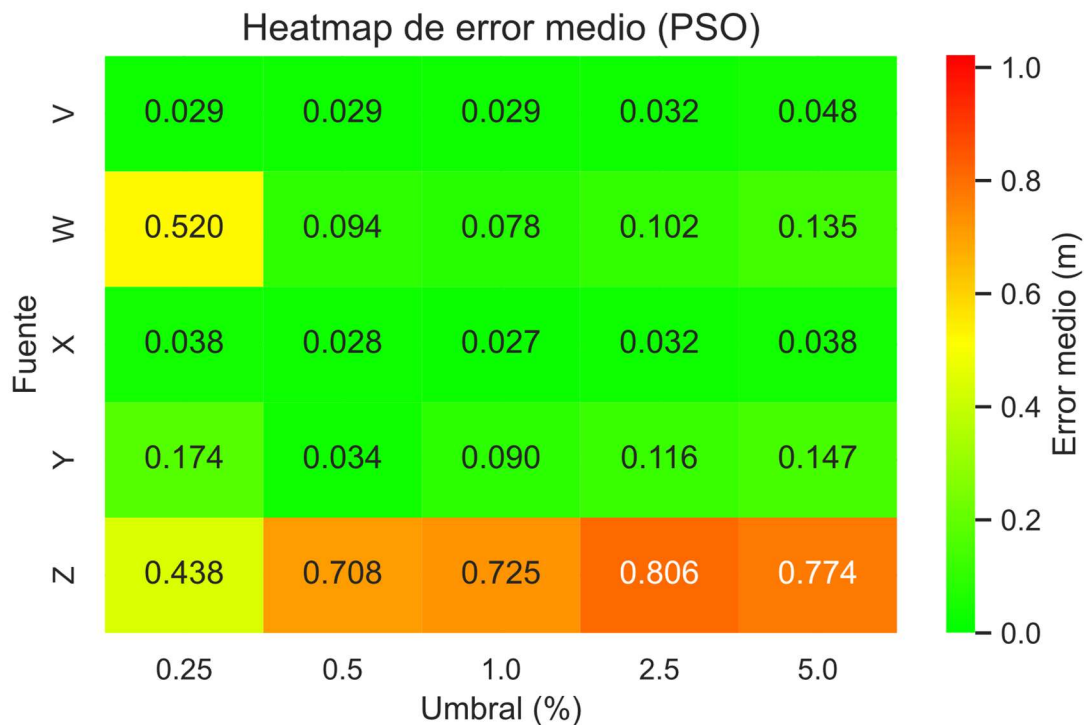


Figura 20: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en la base del tambor

Tabla 11: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en la base del tambor

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	V	0.029	0.002	1.91%
	W	0.520	0.128	34.16%
	X	0.038	0.007	2.52%
	Y	0.174	0.048	11.43%
	Z	0.438	0.215	28.77%
0.5%	V	0.029	0.001	1.91%
	W	0.094	0.006	6.14%
	X	0.028	0.001	1.85%
	Y	0.034	0.029	2.25%
	Z	0.708	0.271	46.48%
1%	V	0.029	0.002	1.94%
	W	0.078	0.013	5.12%
	X	0.027	0.003	1.75%
	Y	0.090	0.048	5.92%
	Z	0.725	0.265	47.61%
2.5%	V	0.032	0.008	2.09%
	W	0.102	0.030	6.67%
	X	0.032	0.004	2.07%
	Y	0.116	0.033	7.63%
	Z	0.806	0.026	52.91%
5%	V	0.048	0.015	3.14%
	W	0.135	0.009	8.85%
	X	0.038	0.017	2.51%
	Y	0.147	0.078	9.63%
	Z	0.774	0.069	50.80%

Los promedios por umbral de la Tabla 12 muestran que el error máximo (0,240 m) se da en el umbral de 0.25%, aumento reflejado principalmente por el elevado error que apareció en la fuente W, puesto que el error en la fuente Z se mantuvo constantemente alto. Por otro

lado, el mínimo (0.179 m) aparece en el umbral de 0,5 %, lo que significa que si queremos localizar fuentes en la base del tambor con el método PSO lo más adecuado sería utilizar un umbral de 0.5%. Es importante destacar que la fuente Z es quien más peso tiene en este error, pues sin considerar su resultado, el error mínimo hubiera sido de 0.046 m.

Tabla 12: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método PSO en la base del tambor

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.240	0.080	15.76%
0.5%	0.179	0.062	11.73%
1%	0.190	0.066	12.47%
2.5%	0.217	0.020	14.27%
5%	0.228	0.038	14.98%

Con el método TRF + Huber adaptativo esta vez se tiene un mejor resultado para localizar las fuentes que con el método PSO, pudiendo observar en la Tabla 13 o en la Figura 21 que el mayor error promedio, con fuentes restringidas a sólo la base del tambor, se registró en el umbral 0,25 % para la fuente W (0.882 m) mientras que el valor mínimo (0.015 m) se registró en el umbral de 2,5 % para la fuente Y.

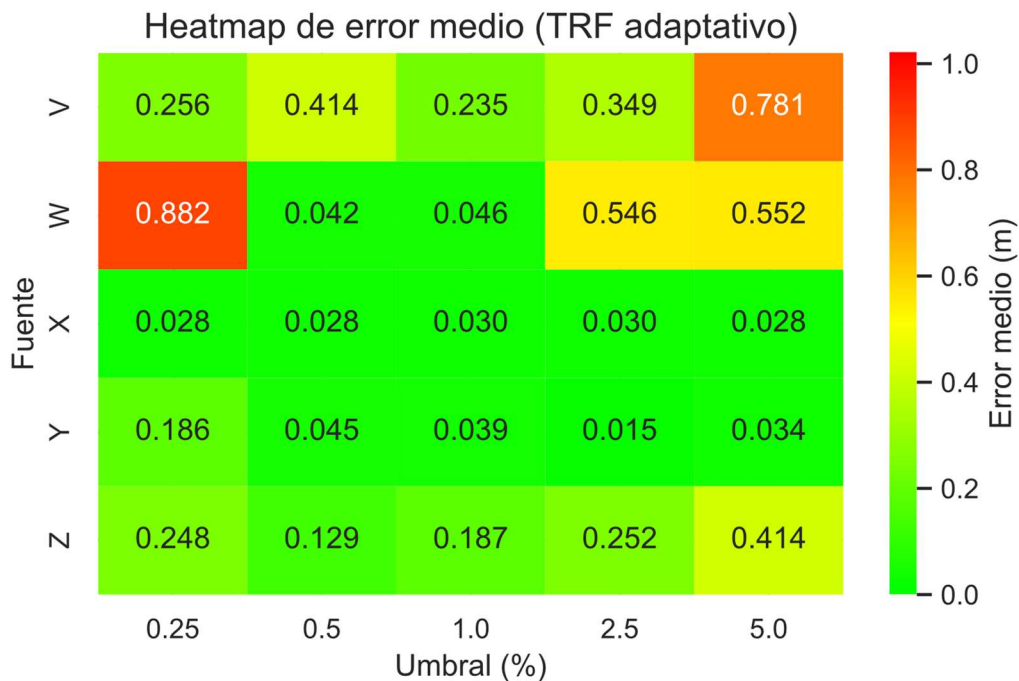


Figura 21: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en la base del tambor

Tabla 13: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en la base del tambor

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	V	0.256	0.365	16.81%
	W	0.882	0.005	57.89%
	X	0.028	0.000	1.84%
	Y	0.186	0.155	12.21%
	Z	0.248	0.151	16.28%
0.5%	V	0.414	0.451	27.19%
	W	0.042	0.001	2.79%
	X	0.028	0.000	1.84%
	Y	0.045	0.010	2.97%
	Z	0.129	0.133	8.45%
1%	V	0.235	0.377	15.41%
	W	0.046	0.003	3.02%
	X	0.030	0.002	1.99%
	Y	0.039	0.013	2.57%
	Z	0.187	0.195	12.27%
2.5%	V	0.349	0.437	22.94%
	W	0.546	0.462	35.87%
	X	0.030	0.002	1.97%
	Y	0.015	0.008	0.97%
	Z	0.252	0.257	16.58%
5%	V	0.781	0.233	51.27%
	W	0.552	0.455	36.23%
	X	0.028	0.003	1.85%
	Y	0.034	0.026	2.25%
	Z	0.414	0.321	27.21%

Los promedios por umbral de la Tabla 14 muestran que el error máximo (0,362 m) se da en el umbral de 5%, y el mínimo (0.107 m) aparece en el umbral de 1%, lo que significa que si queremos localizar fuentes en la base del tambor con el método TRF + Huber adaptativo lo más adecuado sería utilizar un umbral de 1%, siendo un error incluso menor al logrado con el método PSO pero con una desviación estándar de casi el doble, generando menos estabilidad y confianza en los resultados.

*Tabla 14: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) en la base del tambor*

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.320	0.135	21.01%
0.5%	0.132	0.119	8.65%
1%	0.107	0.118	7.05%
2.5%	0.239	0.233	15.67%
5%	0.362	0.208	23.76%

## 5.4 Localización Sin Restricciones en el Tambor

Para poder localizar las fuentes de emisiones acústicas en el tambor sin restricciones, es decir, pudiendo estar la fuente tanto en el manto como en la base, se utilizarán los métodos PSO y TRF Adaptativo, por haber sido los que mejor se comportaron en los resultados anteriores.

A pesar de que en esta actividad se calculará la localización sin restricciones, se separarán los resultados según si la fuente real está localizada en el manto o en la base del tambor, logrando así obtener un resultado capaz de ser comparado directamente los resultados anteriores y capaz de obtener un resultado sobre la capacidad de la metodología para localizar la fuente en la sección del tambor correcta.

### 5.4.1 Localización Sin Restricciones en la Base del Tambor

Para la localización de fuentes en la base del tambor con el método PSO, sin restringir su localización a la misma base, se logra observar en la Tabla 15 y en la Figura 22 que el umbral de 0.25% contiene el mayor error promedio por fuente, con un valor de 0.941 m en la fuente X, mientras que en el umbral de 5% fuente W se obtiene el error promedio más bajo con un valor de 0.036 m. La fuente X mantiene un error constantemente alto a diferencia de las otras fuentes para todos los umbrales, menos para el umbral de 5%.

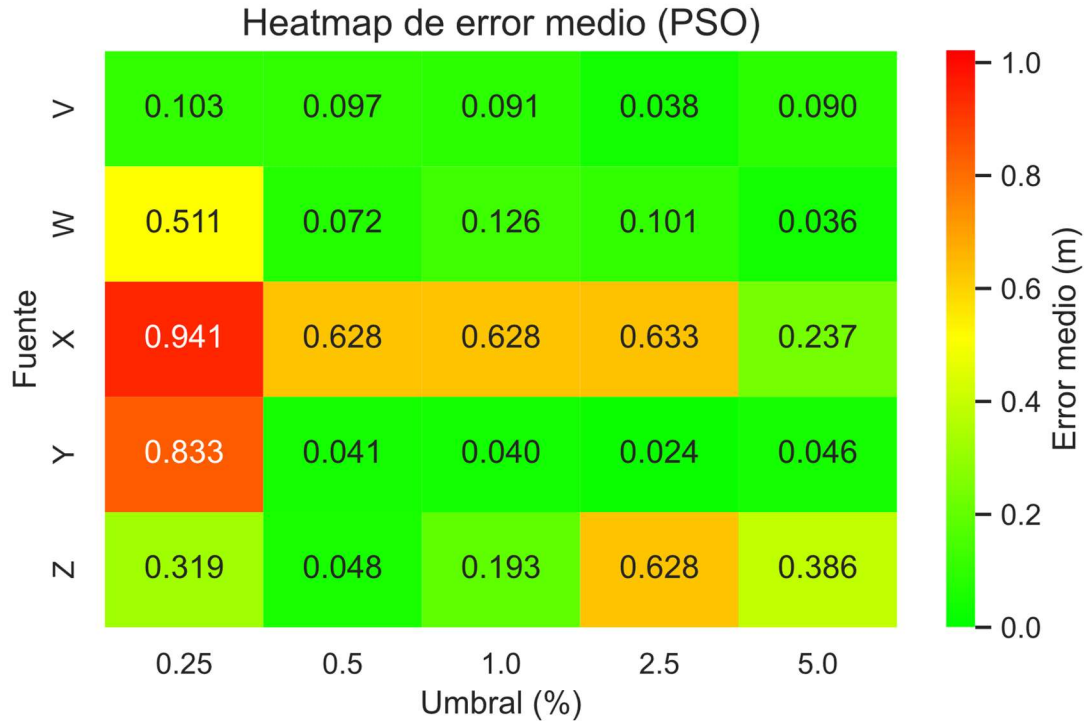


Figura 22: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en la base del tambor

La Tabla 15 también nos entrega los porcentajes de aciertos de la superficie en la cual se localiza la fuente de EA, indicándonos que, a excepción del umbral de 0.25%, la mayor parte de los casos la fuente es localizada correctamente en su superficie real, mostrando además que en general, las fuentes con errores promedio mayores a 0.3 m, generalmente localizan la fuente en la superficie incorrecta, en este caso, en el manto del tambor, cuando las fuentes están realmente en la base.

Tabla 15: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en la base del tambor

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Lugar Localización	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	V	0.103	Manto: 0% / Base: 100%	0.030	6.77%
	W	0.511	Manto: 100% / Base: 0%	0.182	33.55%
	X	0.941	Manto: 100% / Base: 0%	0.187	61.77%
	Y	0.833	Manto: 100% / Base: 0%	0.169	54.68%
	Z	0.319	Manto: 20% / Base: 80%	0.275	20.97%

0.5%	V	0.097	Manto: 20% / Base: 80%	0.014	6.35%
	W	0.072	Manto: 20% / Base: 80%	0.050	4.73%
	X	0.628	Manto: 60% / Base: 40%	0.548	41.23%
	Y	0.041	Manto: 0% / Base: 100%	0.007	2.66%
	Z	0.048	Manto: 0% / Base: 100%	0.036	3.17%
1%	V	0.091	Manto: 60% / Base: 40%	0.007	5.98%
	W	0.126	Manto: 60% / Base: 40%	0.066	8.26%
	X	0.628	Manto: 60% / Base: 40%	0.547	41.26%
	Y	0.040	Manto: 0% / Base: 100%	0.008	2.60%
	Z	0.193	Manto: 20% / Base: 80%	0.244	12.67%
2.5%	V	0.038	Manto: 0% / Base: 100%	0.014	2.50%
	W	0.101	Manto: 40% / Base: 60%	0.059	6.65%
	X	0.633	Manto: 60% / Base: 40%	0.541	41.55%
	Y	0.024	Manto: 0% / Base: 100%	0.009	1.57%
	Z	0.628	Manto: 100% / Base: 0%	0.003	41.23%
5%	V	0.090	Manto: 0% / Base: 100%	0.047	5.88%
	W	0.036	Manto: 0% / Base: 100%	0.007	2.36%
	X	0.237	Manto: 20% / Base: 80%	0.442	15.57%
	Y	0.046	Manto: 0% / Base: 100%	0.014	3.02%
	Z	0.386	Manto: 60% / Base: 40%	0.330	25.32%

Por otro lado, con el método TRF Adaptativo, al igual que cuando se realizaron los cálculos con la restricción de fuente en la base, se logra un resultado con mayor precisión que con el método PSO, con un error promedio máximo de 0.627 m en la fuente Z con un umbral de 2.5%, y un error mínimo de 0.014 m con el mismo umbral en la fuente Y, también menor al error promedio mínimo con el método PSO. Estos resultados se pueden observar en la Figura 23 o en la Tabla 16.

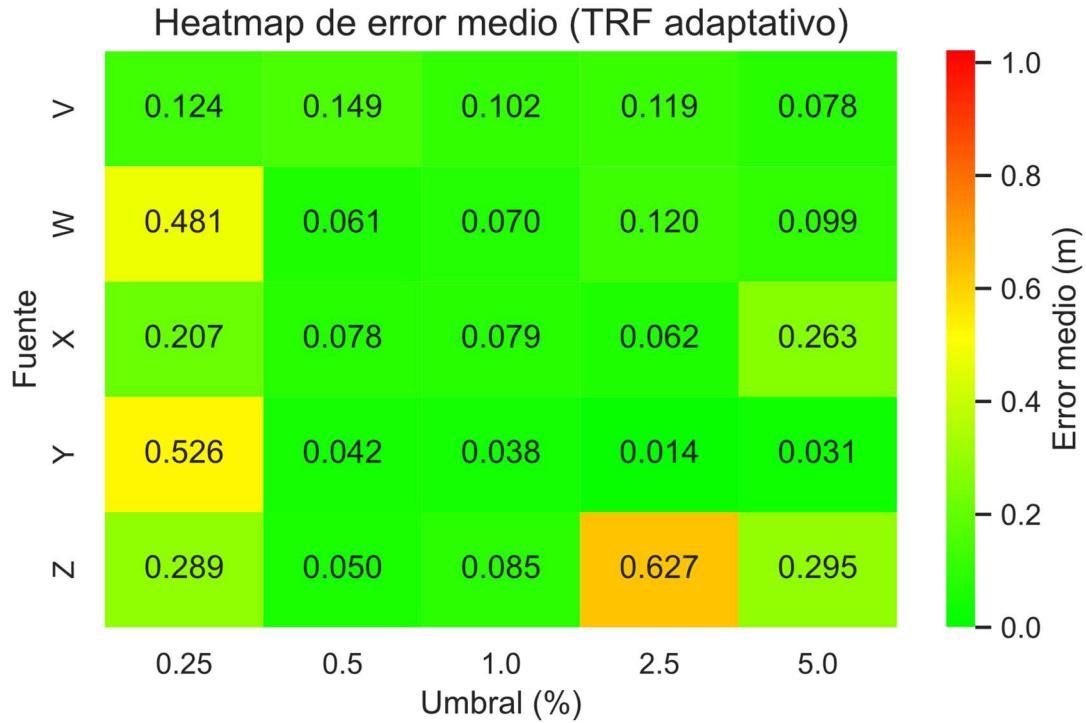


Figura 23: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en la base del tambor

Al igual que con el método anterior, la Tabla 16 también nos entrega los porcentajes de aciertos de la superficie en la cual se localiza la fuente de EA, indicándonos que, a excepción del umbral de 0.25% y del umbral de 5%, la tasa de aciertos en la localización de la superficie real de la fuente es más elevada que con el método PSO, logrando en muchos casos un acierto de un 100% de localizaciones en la base, pero al igual que como ocurría anteriormente, con una desviación estándar respecto al promedio mucho mayor.

Tabla 16: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en la base del tambor

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Lugar Localización	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	V	0.124	Manto: 0% / Base: 100%	0.071	8.13%
	W	0.481	Manto: 100% / Base: 0%	0.238	31.60%
	X	0.207	Manto: 80% / Base: 20%	0.264	13.61%
	Y	0.526	Manto: 100% / Base: 0%	0.236	34.53%
	Z	0.289	Manto: 40% / Base: 60%	0.214	18.95%

0.5%	V	0.149	Manto: 0% / Base: 100%	0.092	9.79%
	W	0.061	Manto: 0% / Base: 100%	0.044	4.03%
	X	0.078	Manto: 60% / Base: 40%	0.046	5.09%
	Y	0.042	Manto: 0% / Base: 100%	0.008	2.76%
	Z	0.050	Manto: 0% / Base: 100%	0.048	3.28%
1%	V	0.102	Manto: 0% / Base: 100%	0.084	6.67%
	W	0.070	Manto: 0% / Base: 100%	0.041	4.62%
	X	0.079	Manto: 60% / Base: 40%	0.044	5.18%
	Y	0.038	Manto: 0% / Base: 100%	0.010	2.48%
	Z	0.085	Manto: 0% / Base: 100%	0.037	5.58%
2.5%	V	0.119	Manto: 0% / Base: 100%	0.119	7.83%
	W	0.120	Manto: 0% / Base: 100%	0.045	7.87%
	X	0.062	Manto: 40% / Base: 60%	0.044	4.06%
	Y	0.014	Manto: 0% / Base: 100%	0.009	0.94%
	Z	0.627	Manto: 100% / Base: 0%	0.004	41.14%
5%	V	0.078	Manto: 80% / Base: 20%	0.096	5.12%
	W	0.099	Manto: 0% / Base: 100%	0.056	6.53%
	X	0.263	Manto: 60% / Base: 40%	0.427	17.27%
	Y	0.031	Manto: 0% / Base: 100%	0.021	2.02%
	Z	0.295	Manto: 40% / Base: 60%	0.309	19.35%

Finalmente, las tablas condensadas Tabla 17 y Tabla 18 nos muestran el error promedio por cada nivel de umbral. Comparando ambos métodos, podemos ver que el error promedio más bajo lo tiene el método TRF + Huber adaptativo, tal como ocurrió cuando las fuentes se restringían a la base, con un valor de 0.075 m en el umbral de 1%, siendo este el error promedio más bajo de nuestros ensayos, con un error relativo del 4.91% y una desviación estándar de solamente 0.043 m, es decir, un error con desviación estándar máximo de 0.118 m, demostrando que el método TRF + Huber adaptativo con un umbral de 1% es el más adecuado para localizar una fuente de emisión acústica en la base de nuestro tambor con nuestras condiciones experimentales.

El mismo método con un umbral de 0.5% también puede considerarse adecuado tomando en cuenta que hay una diferencia de error promedio de solamente 0.001 m o 1 mm respecto al resultado con el umbral de 1%.

*Tabla 17: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en la base del tambor*

Umbral	Error Promedio (m)	Lugar Localización	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.541	Manto: 64% / Base: 36%	0.168	35.55%
0.5%	0.177	Manto: 20% / Base: 80%	0.131	11.63%
1%	0.216	Manto: 40% / Base: 60%	0.174	14.15%
2.5%	0.285	Manto: 40% / Base: 60%	0.125	18.70%
5%	0.159	Manto: 16% / Base: 84%	0.168	10.43%

*Tabla 18: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en la base del tambor*

Umbral	Error Promedio (m)	Lugar Localización	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.325	Manto: 64% / Base: 36%	0.205	21.37%
0.5%	0.076	Manto: 12% / Base: 88%	0.047	4.99%
1%	0.075	Manto: 12% / Base: 88%	0.043	4.91%
2.5%	0.188	Manto: 28% / Base: 72%	0.044	12.37%
5%	0.153	Manto: 36% / Base: 64%	0.182	10.06%

### 5.4.2 Localización Sin Restricciones en el Manto del Tambor

Para localizar fuentes en el manto del tambor con el método PSO, sin restringir su localización al manto, se logra observar en la Tabla 19 y en la Figura 24 que el umbral de 0.25% contiene el mayor error promedio por fuente, con un valor de 0.722 m en la fuente B, mientras que en el umbral de 0.5% fuente D se obtiene el error promedio más bajo con un valor de 0.010 m. Tal como ocurrió con los resultados anteriores del manto, la fuente B mantiene un error constantemente alto a diferencia de las otras fuentes para todos los umbrales, menos para el umbral de 2.5% y el de 5%.

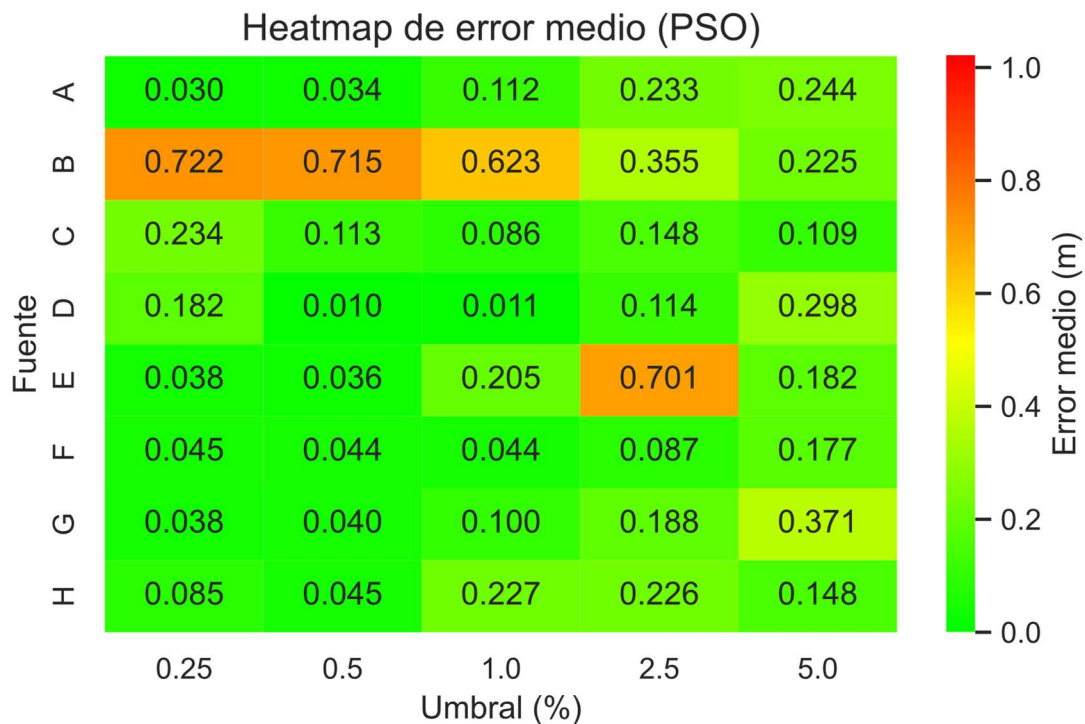


Figura 24: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en el manto del tambor

En la Tabla 19 pueden observar también que, de los 40 resultados, 33 de ellos este método pudo localizar correctamente la superficie donde se localizaba la fuente con un acierto del 100%, y sólo 3 veces detecto la fuente en la base, lo que concuerda con su constante bajo error medio en casi todas las fuentes para cada nivel de umbral, manteniéndose casi constantemente bajo los 0.3 m.

Tabla 19: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en el manto del tambor

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Lugar Localización	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	A	0.030	Manto: 100% / Base: 0%	0.007	1.98%
	B	0.722	Manto: 100% / Base: 0%	0.008	47.41%
	C	0.234	Manto: 100% / Base: 0%	0.246	15.37%
	D	0.182	Manto: 100% / Base: 0%	0.244	11.94%
	E	0.038	Manto: 100% / Base: 0%	0.004	2.52%
	F	0.045	Manto: 100% / Base: 0%	0.002	2.95%
	G	0.038	Manto: 0% / Base: 100%	0.003	2.49%
	H	0.085	Manto: 100% / Base: 0%	0.094	5.60%
0.5%	A	0.034	Manto: 100% / Base: 0%	0.005	2.24%
	B	0.715	Manto: 100% / Base: 0%	0.009	46.97%
	C	0.113	Manto: 80% / Base: 20%	0.167	7.39%
	D	0.010	Manto: 100% / Base: 0%	0.004	0.69%
	E	0.036	Manto: 100% / Base: 0%	0.003	2.35%
	F	0.044	Manto: 100% / Base: 0%	0.001	2.88%
	G	0.040	Manto: 0% / Base: 100%	0.004	2.62%
	H	0.045	Manto: 100% / Base: 0%	0.004	2.95%
1%	A	0.112	Manto: 100% / Base: 0%	0.054	7.37%
	B	0.623	Manto: 100% / Base: 0%	0.180	40.91%
	C	0.086	Manto: 100% / Base: 0%	0.141	5.63%
	D	0.011	Manto: 100% / Base: 0%	0.004	0.73%
	E	0.205	Manto: 100% / Base: 0%	0.383	13.44%
	F	0.044	Manto: 100% / Base: 0%	0.002	2.90%
	G	0.100	Manto: 20% / Base: 80%	0.119	6.59%
	H	0.227	Manto: 100% / Base: 0%	0.250	14.90%
2.5%	A	0.233	Manto: 100% / Base: 0%	0.022	15.28%

	B	0.355	Manto: 100% / Base: 0%	0.088	23.28%
	C	0.148	Manto: 100% / Base: 0%	0.070	9.70%
	D	0.114	Manto: 100% / Base: 0%	0.213	7.46%
	E	0.701	Manto: 100% / Base: 0%	0.160	46.00%
	F	0.087	Manto: 100% / Base: 0%	0.056	5.70%
	G	0.188	Manto: 20% / Base: 80%	0.156	12.31%
	H	0.226	Manto: 100% / Base: 0%	0.244	14.82%
	5%	A	0.244	Manto: 100% / Base: 0%	0.037
B		0.225	Manto: 100% / Base: 0%	0.076	14.81%
C		0.109	Manto: 100% / Base: 0%	0.009	7.14%
D		0.298	Manto: 60% / Base: 40%	0.112	19.58%
E		0.182	Manto: 100% / Base: 0%	0.018	11.98%
F		0.177	Manto: 100% / Base: 0%	0.038	11.62%
G		0.371	Manto: 40% / Base: 60%	0.108	24.37%
H		0.148	Manto: 100% / Base: 0%	0.086	9.69%

Por otro lado, para localizar fuentes en el manto del tambor con el método TRF + Huber adaptativo, sin restringir su localización al manto, se logra observar en la Tabla 20 y en la Figura 25 que el umbral de 0.25% contiene el mayor error promedio por fuente, con un valor de 0.697 m en la fuente B, al igual que con el método PSO, mientras que en el mismo umbral de 0.25% fuente D se obtiene el error promedio más bajo con un valor de 0.042 m. También se puede observar en el gráfico que la dispersión de los datos es bastante alta para muchas fuentes, indicando que claramente este método no es el adecuado para detectar fuentes de EA en el manto de nuestro tambor, para nuestro caso particular con las características de nuestro procedimiento experimental.

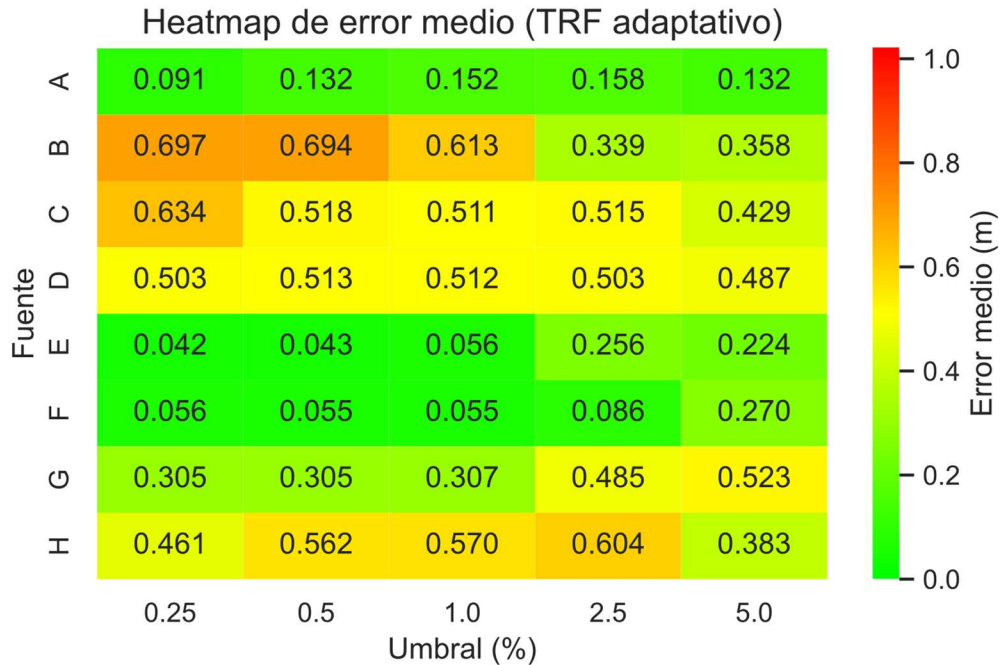


Figura 25: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en el manto del tambor

A pesar de su elevada variabilidad en los resultados y su elevado error promedio, igualmente es importante mencionar que 34 de los 40 resultados tuvieron un 100% de acierto en la localización correcta de la superficie en que ocurrió la fuente, y sólo 4 veces detecto la fuente en la base, lo cual indica que si sólo se desea saber la superficie en la cual se generó la fuente de EA, este método podría localizar fielmente dicha fuente.

Tabla 20: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en el manto del tambor

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Lugar Localización	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	A	0.091	Manto: 100% / Base: 0%	0.104	5.97%
	B	0.697	Manto: 100% / Base: 0%	0.005	45.77%
	C	0.634	Manto: 100% / Base: 0%	0.161	41.63%
	D	0.503	Manto: 100% / Base: 0%	0.150	33.02%
	E	0.042	Manto: 100% / Base: 0%	0.006	2.77%
	F	0.056	Manto: 100% / Base: 0%	0.002	3.68%

	G	0.305	Manto: 0% / Base: 100%	0.000	20.03%
	H	0.461	Manto: 100% / Base: 0%	0.231	30.25%
0.5%	A	0.132	Manto: 100% / Base: 0%	0.131	8.69%
	B	0.694	Manto: 100% / Base: 0%	0.005	45.59%
	C	0.518	Manto: 80% / Base: 20%	0.092	34.02%
	D	0.513	Manto: 100% / Base: 0%	0.005	33.69%
	E	0.043	Manto: 100% / Base: 0%	0.002	2.81%
	F	0.055	Manto: 100% / Base: 0%	0.001	3.61%
	G	0.305	Manto: 0% / Base: 100%	0.002	20.01%
	H	0.562	Manto: 100% / Base: 0%	0.004	36.89%
1%	A	0.152	Manto: 100% / Base: 0%	0.055	9.98%
	B	0.613	Manto: 100% / Base: 0%	0.181	40.25%
	C	0.511	Manto: 100% / Base: 0%	0.089	33.55%
	D	0.512	Manto: 100% / Base: 0%	0.004	33.61%
	E	0.056	Manto: 100% / Base: 0%	0.044	3.71%
	F	0.055	Manto: 100% / Base: 0%	0.002	3.61%
	G	0.307	Manto: 20% / Base: 80%	0.008	20.14%
	H	0.570	Manto: 100% / Base: 0%	0.011	37.40%
2.5%	A	0.158	Manto: 100% / Base: 0%	0.036	10.40%
	B	0.339	Manto: 100% / Base: 0%	0.026	22.28%
	C	0.515	Manto: 100% / Base: 0%	0.071	33.81%
	D	0.503	Manto: 100% / Base: 0%	0.014	33.06%
	E	0.256	Manto: 100% / Base: 0%	0.104	16.84%
	F	0.086	Manto: 100% / Base: 0%	0.066	5.63%
	G	0.485	Manto: 100% / Base: 0%	0.027	31.83%
	H	0.604	Manto: 100% / Base: 0%	0.059	39.65%
5%	A	0.132	Manto: 100% / Base: 0%	0.006	8.65%
	B	0.358	Manto: 80% / Base: 20%	0.332	23.50%
	C	0.429	Manto: 40% / Base: 60%	0.104	28.16%

	D	0.487	Manto: 100% / Base: 0%	0.146	31.98%
	E	0.224	Manto: 100% / Base: 0%	0.023	14.74%
	F	0.270	Manto: 100% / Base: 0%	0.050	17.74%
	G	0.523	Manto: 100% / Base: 0%	0.011	34.37%
	H	0.383	Manto: 100% / Base: 0%	0.224	25.15%

Finalmente, las tablas condensadas Tabla 21 y Tabla 22 nos muestran el error promedio por cada nivel de umbral. Observando las tablas podemos notar que tal como ocurrió cuando se restringió la fuente al manto, el mejor método para localizar fuentes en el manto del tambor sin restricción es el método PSO con un umbral del 0.5%, con un error promedio de 0.130 m y una desviación estándar baja de 0.024 m, logrando localizar además la superficie correcta de la fuente con un 85% de probabilidad.

Por otro lado, a pesar de que el método TRF tuvo un resultado con mayor error en esta ocasión, es importante mencionar que su error promedio se mantuvo constante al caso en que la localización estaba restringida al manto, al igual que su desviación estándar.

*Tabla 21: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método PSO sin restricción en el manto del tambor*

Umbral	Error Promedio (m)	Lugar Localización	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.172	Manto: 87.5% / Base: 12.5%	0.076	11.28%
0.5%	0.130	Manto: 85% / Base: 15%	0.024	8.51%
1%	0.176	Manto: 90% / Base: 10%	0.142	11.56%
2.5%	0.256	Manto: 90% / Base: 10%	0.126	16.82%
5%	0.219	Manto: 87.5% / Base: 12.5%	0.061	14.40%

*Tabla 22: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método TRF + Huber (adaptativo) sin restricción en el manto del tambor*

Umbral	Error Promedio (m)	Lugar Localización	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.349	Manto: 87.5% / Base: 12.5%	0.082	22.89%
0.5%	0.353	Manto: 85% / Base: 15%	0.030	23.16%
1%	0.347	Manto: 90% / Base: 10%	0.049	22.78%
2.5%	0.368	Manto: 100% / Base: 0%	0.051	24.19%
5%	0.351	Manto: 87.5% / Base: 12.5%	0.112	23.04%

## 5.5 Velocidad de Onda en Estructura de Vigas Soldadas

Las velocidades de onda promedio obtenida para cada nivel de umbral resultaron tener un valor mucho más bajo de lo normal considerando la velocidad de onda longitudinal típica encontrada en la literatura para el acero o materiales similares, resultando en un promedio entre los 5 resultados de 3380 m/s. En la Tabla 23 pueden encontrar las velocidades promedio por cada nivel de umbral.

Tabla 23: Velocidades Calculadas por Nivel de Umbral para la Estructura de Vigas Soldadas.

Umbral	Velocidad Promedio m/s
0.25%	4556
0.5%	3864
1%	3389
2.5%	2757
5%	2346

## 5.6 Localización en la Estructura de Vigas Soldadas

Para la estructura de vigas soldadas, el método PSO obtuvo errores promedio mucho más elevados que los logrados en el tambor, lo cual es normal dado que sus dimensiones totales también son más grandes, lo cual se ve reflejado en su error relativo. La otra característica que, si comparten estos resultados con los del tambor, es que el método PSO mantiene un error relativo con poca desviación estándar (considerando igualmente sus más grandes dimensiones) entre todas sus fuentes, teniendo poca variabilidad de los datos. Esto último se puede ver fácilmente en la Figura 26 donde en el centro todo mantiene aproximadamente el mismo color.

En la Tabla 24 podemos ver todo con más detalles y podemos observar que el error promedio mayor se encuentra en el umbral del 5% en la fuente B con un valor de 2.141 m, a pesar de que la fuente que constantemente mantiene un error elevado es la fuente J estando por sobre 1.25 m en todos los umbrales. Por otro lado, también en el umbral del 5% en la fuente C se obtiene el error promedio mínimo con un valor de 0.099 m.

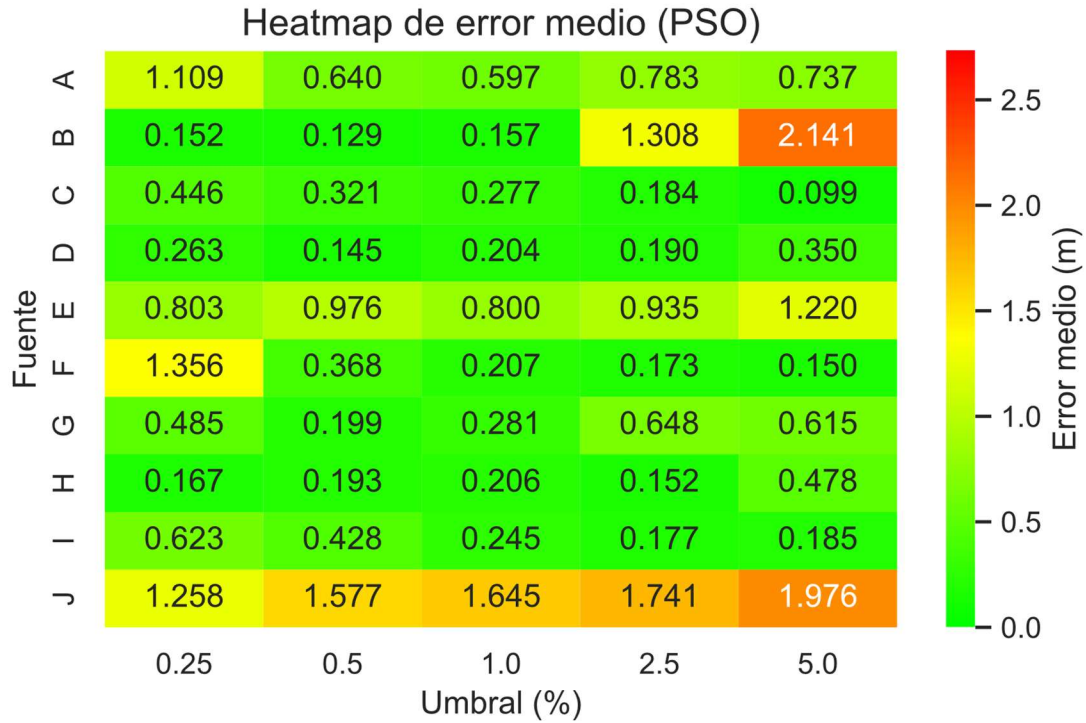


Figura 26: Mapa de calor de errores medios por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en la estructura de vigas soldadas

Tabla 24: Resultados de errores promedio por fuente y nivel de umbral usando el método PSO en la estructura de vigas soldadas

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	A	1.109	0.669	20.32%
	B	0.152	0.145	2.79%
	C	0.446	0.154	8.16%
	D	0.263	0.136	4.82%
	E	0.803	0.211	14.70%
	F	1.356	1.538	24.84%
	G	0.485	0.449	8.89%
	H	0.167	0.320	3.06%
	I	0.623	0.244	11.41%
	J	1.258	0.330	23.04%
0.5%	A	0.640	0.573	11.72%

	B	0.129	0.102	2.36%
	C	0.321	0.131	5.89%
	D	0.145	0.136	2.65%
	E	0.976	0.111	17.87%
	F	0.368	0.675	6.74%
	G	0.199	0.156	3.64%
	H	0.193	0.294	3.53%
	I	0.428	0.203	7.83%
	J	1.577	0.448	28.88%
	1%	A	0.597	0.583
B		0.157	0.103	2.88%
C		0.277	0.125	5.08%
D		0.204	0.104	3.73%
E		0.800	0.230	14.66%
F		0.207	0.132	3.79%
G		0.281	0.153	5.14%
H		0.206	0.268	3.77%
I		0.245	0.223	4.49%
J		1.645	0.260	30.13%
2.5%	A	0.783	0.477	14.34%
	B	1.308	1.116	23.96%
	C	0.184	0.117	3.36%
	D	0.190	0.164	3.47%
	E	0.935	0.197	17.13%
	F	0.173	0.172	3.18%
	G	0.648	1.195	11.86%
	H	0.152	0.201	2.78%
	I	0.177	0.041	3.24%
	J	1.741	0.311	31.88%

5%	A	0.737	0.500	13.50%
	B	2.141	0.240	39.22%
	C	0.099	0.081	1.82%
	D	0.350	0.058	6.42%
	E	1.220	0.177	22.34%
	F	0.150	0.106	2.75%
	G	0.615	0.972	11.26%
	H	0.478	0.658	8.75%
	I	0.185	0.172	3.38%
	J	1.976	0.093	36.20%

Por último, en la Tabla 25 podemos observar los errores promedio por cada umbral, obteniendo que el umbral más adecuado para detectar fuentes de EA en la estructura, con las características y consideraciones dadas, es el umbral de 1%, el cual tiene un valor de 0.462 m y una desviación estándar de 0.218 m, con un error relativo del orden de 8.46%, valor similar al logrado con el mismo método PSO en la base del tambor igual a 8.51% (menor error relativo logrando en el tambor con dicho método).

*Tabla 25: Resumen de errores promedio por nivel de umbral usando el método PSO en la estructura de vigas soldadas*

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.666	0.420	12.20%
0.5%	0.497	0.283	9.11%
1%	0.462	0.218	8.46%
2.5%	0.629	0.399	11.52%
5%	0.795	0.306	14.57%

## 6 Discusión de Resultados

Algunos resultados terminaron con un error alto y otros con un error bajo, pero lo que sí se puede notar en todos ellos es que los umbrales muy altos y bajos utilizados en nuestro trabajo (los de los extremos), obtienen generalmente resultados de localización peores que los de en medio, siendo específicamente los umbrales de 0.5% y 1% los que mejor se comportaron.

Por otra parte, en el Anexo A se pueden encontrar los resultados de los métodos TRF + Huber con punto inicial de iteración fijo, Thurber con punto inicial de iteración adaptativo y USBM, los cuales se dejaron aparte dado su baja precisión para localizar las fuentes de EA. Esto probablemente se deba a que son métodos con formulaciones más simples y menor capacidad de ajuste estadístico o probabilístico, lo que provoca una alta dependencia de parámetros conocidos de la estructura y de cómo las ondas interactúan con ella, tales como la velocidad de propagación, la dirección y el tipo de ondas, y la atenuación de sus amplitudes.

### 6.1 Variabilidad de los datos

- **Generación de la Fuente:** A pesar de utilizar un lápiz estandarizado, las roturas de mina de lápiz pueden provocarse con pequeñas variaciones en la fuerza, ángulo o longitud de la mina produciendo señales con amplitud y contenido frecuencial distintos.
- **Puntos Iniciales de Iteración:** En métodos como TRF + Huber adaptativo, la elección de los valores iniciales afecta la convergencia, puntos iniciales más alejadas de la solución pueden llevar a mínimos locales y generar mayor dispersión. Por otro lado, el método PSO toma como valores unitarios la cantidad de puntos que nosotros designemos para su cálculo, pero estos toman localizaciones aleatorias distribuidas en toda la superficie, pudiendo generar errores elevados si el conjunto de puntos está muy alejado de la fuente real, lo cual se ve correctamente reflejado en su menor dispersión del resultado, pero errores más grandes en la base del tambor.
- **Ruido y Detección de TOA's:** La detección de los TOA's también tiene una gran influencia en el error de localización, y esto se ve reflejado con los umbrales, donde con umbrales muy bajos se acaban generando falsos positivos que alteran los resultados haciendo creer que la onda llegó en ese punto cuando realmente pudo haber sido ruido, y, por otro lado, con umbrales muy altos se puede detectar un tiempo incorrecto, uno que no es el tiempo de llegada de la onda real, si no un tiempo en que el sensor está viéndose influenciado por las ondas transversales, de Rayleigh o de Lamb.
- **Geometría y Atenuación:** En cilindros delgados las ondas se deberían propagar esencialmente como modos Lamb con poca atenuación dado su bajo espesor; en

la estructura de vigas, la energía se dispersa en un volumen mayor y las uniones soldadas introducen reflexiones y pérdidas. Además, ambas estructuras podrían tener imperfecciones en su construcción y secciones deformadas no consideradas en el cálculo, o características anisotrópicas por la composición del material mismo, provocando una dependencia en sus propiedades y alterando variables como la velocidad de onda, con distintas magnitudes según la dirección de propagación.

La fuente B del tambor es probablemente un buen ejemplo de esto, donde se pudo observar que, sin importar el umbral o el método utilizado, los resultados para localizar dicha fuente tenían un error mucho más elevado que las demás fuentes, lo cual se puede deber a su cercanía con dos líneas de soldadura distintas, estando además en la parte baja del tambor, pudiendo haber alterado la onda con fenómenos de reflexión.

- **Alteraciones adicionales:** Existen más variables adicionales que pudieron haber influenciado en los cálculos, una de ellas, aunque poco probable es importante mencionarlo, es la reflexión de las ondas por el suelo (en el manto las fuentes se generaron estando el tambor a ras de suelo). Por lo anterior, también pudieron haberse generado pequeñas vibraciones en el suelo que alterarían las mediciones.

Otra variable adicional es la pintura de la estructura y del tambor, la cual pudo haber alterado la velocidad de la onda o haber provocado que el contacto entre los sensores y la superficie no fuera el más adecuado.

La última variable que mencionaremos está relacionada con la última, y es que la forma de adhesión de los sensores a la superficie pudo haber generado pérdidas en la señal, y es que, por ejemplo, en el tambor, su superficie curva provocaba que ciertas partes de los sensores quedarán “en el aire”.

La detección de los TOA's se puede decir que teóricamente hablando es una de las variables más críticas junto con las geometrías complejas de las estructuras en estudio y sus anisotropías difíciles de considerar en los cálculos, esto dado que, conociendo el punto exacto en que llega la onda longitudinal a un sensor (la primera onda), conociendo con exactitud las distancias que puede recorrer la onda de EA, y conociendo las distintas velocidades con las que se mueve la onda en el proceso según su dirección, la localización de la fuente se debería obtener con un error de casi 0, sin importar el estímulo de la fuente (rotura de mina de lápiz en nuestro caso), ni la magnitud, ni el punto inicial de iteración.

## 6.2 Localización restringida al manto del tambor

- **Método PSO:** Para las fuentes restringidas al manto, se puede ver que el método PSO obtuvo los errores promedio más bajos (0.136 m y desviación de 0.073 m en el umbral del 0.5%).

- **Método TRF + Huber adaptativo:** Este método mostró resultados consistentes en el manto para el umbral de 0.5%, aunque con medias ligeramente superiores (0.36 m y desviación de 0.007 m en umbral del 0.5%).

### 6.3 Localización restringida a la base del tambor

- **Método TRF + Huber adaptativo:** Al restringir la fuente a la base, el TRF + Huber adaptativo alcanzó los mejores resultados, con errores promedio tan bajos como 0.107 m con una desviación de 0.118 m al 1 % de umbral.
- **Método PSO:** Este método consiguió errores medios más altos, pero con una dispersión menor que con el método TRF (promedio de 0.179 m con dispersión de 0.062 m al umbral del 0.5%)

### 6.4 Localización sin restricción en el tambor

- **Diferencias respecto a los casos independientes:** al no imponer restricciones, los métodos deben indicar además la superficie en que están detectando la fuente. Al mismo tiempo, se observan errores promedio generalmente menores, lo cual se puede deber a que, dado que no se imponen restricciones de donde pueda estar la fuente, las iteraciones para calcularla pueden caer en puntos de la otra superficie para acercarse más al resultado, la cual, aunque no sea la superficie real donde está la fuente, le permite acercarse más a puntos que por ejemplo estén en el borde, así como para localizar las fuentes de la base fuente X y la fuente V, fuentes que están en el borde, pudiendo localizar la fuente en el manto pero sólo a centímetros de distancia.
- **Interpretación:** estas tablas muestran que la localización integrada puede identificar correctamente la superficie si el umbral está bien calibrado. Por lo anterior, para localizar fuentes de EA en nuestro tambor lo ideal sería utilizar el método PSO con umbral de 0.5% para fuentes en el manto y el método TRF + Huber adaptativo con umbral de 1% para fuentes en la base, tal como se hizo ahora, es decir, aplicando ambos métodos a la vez, y comparándolos según el coste de los residuos calculados.
- **Resultados:** los resultados más bajos en la base fueron con el método TRF + Huber adaptativo con un valor de 0.075 m, mientras que para la base fue con el método PSO con un valor de 0.130 m, logrando así en ambos casos un error menor a 15 cm, ayudando esto a localizar una fuente de EA en un radio de 15 cm, haciendo la localización detectable a simple vista.

## 6.5 Localización en estructura de vigas soldadas

- **Errores absolutos:** las tablas muestran que los errores en la estructura de vigas son significativamente mayores. El mejor umbral (1%) arroja un error medio de 0.462 m con una desviación de 0.218 m y el peor (5%) llega a 0.795 m con una desviación de 0.306 m. Esto se debe a:
  - a) **Atenuación y forma:** las ondas deben recorrer caminos distintos a los considerados dado que la estructura tiene reforzamientos diagonales entre sus patas y las vigas horizontales superiores que no se consideran como parte de un posible recorrido de la onda, a esto le falta sumarle el error que puede aumentar por la cantidad de soldaduras que las ondas deben cruzar dado que por cada unión entre pata y viga horizontal que debe cruzar la onda hay una línea de soldadura, lo que introduce pérdidas y reflexiones que no se modelan en la metodología de cálculo basada en la distancia Manhattan.
  - b) **Dimensiones:** Las dimensiones de la estructura son mucho más grandes que las del tambor, por lo cual era previsible que tuviera un error mayor, pero, comparando los errores relativos con el mismo método para el tambor se logra llegar al mismo resultado con un 8.46% de error relativo.

## 7 Conclusión

Para estructuras con sólo una dimensión predominante los resultados de la localización de fuentes de emisiones acústicas logran tener una precisión cercana al 100%, o en otras palabras, 0% de error, siempre que se cumplan las condiciones necesarias, esto gracias a que generalmente estos estudios se realizan simplemente en una viga o cañería, sin soldaduras ni desviaciones que puedan alterar los resultados, y en este caso, su única dificultad es apartar las señales del ruido y asignar un umbral correcto para obtener un TOA cercano al real.

Para estructuras cerradas huecas, como en el caso del tambor, el resultado de la localización se vuelve ligeramente impreciso, haciendo que en nuestro caso el error promedio más bajo, considerando sólo el manto del tambor (por su espesor bajo se puede considerar como un cuerpo 2D), fuera de 0.136, y, 0.107 m considerando sólo la base del tambor (igualmente con los sensores en el manto por lo que se puede considerar ya un cuerpo 3D por incluir 3 dimensiones en su cálculo). Estos errores se pueden comparar a los encontrados en la literatura como los indicados en el punto 1.3.4, logrando un resultado incluso mejor con dimensiones más pequeñas, pero considerando una mayor cantidad de datos, fuentes y sensores en posiciones aleatorias, y realizando pruebas de detección en ambas superficies al mismo tiempo, situación que incluso ayudo a disminuir más el error.

La condición de localizar fuentes en la base con los sensores en el manto no fue un impedimento para lograr obtener un error promedio bajo, lo cual indica que mientras existan sensores en la estructura, usando el método adecuado, el nivel de umbral correcto y conociendo bien la estructura para tomar las consideraciones adecuadas, es posible localizar fuentes de emisión acústica en cualquier parte de la estructura mientras el modelo este bien confeccionado.

La estructura de vigas soldadas logro resultados proporcionalmente similares a los del tambor, pero dado que sus errores fueron mucho más grandes (mínimo error promedio de 0.462 m), se concluye que los métodos utilizados, los umbrales, o las consideraciones tomadas, no son suficientes para utilizar en la práctica esta metodología para localizar fuentes de emisión acústica.

Nuestra metodología para localizar las fuentes de emisiones acústicas en nuestro tambor es válida para localizar fuentes de emisiones acústicas en estructuras similares con igualdad de condiciones, logrando una precisión con un error de menos de 13 cm para el manto y un valor de 7.5 cm para la base, incluso considerando su desviación estándar, donde los errores no pasarán de los 20 cm.

### 7.1 Trabajos Futuros

Existen métodos de localización de fuentes de emisión acústica, también no destructivos, que pueden localizar las fuentes a través de otras metodologías, como por ejemplo a través del método modal, el cual requiere un solo sensor y calcula la localización a través de los distintos tipos de onda que llegan con una fuente, los cuales se conoce que poseen distintas velocidades y frecuencias, lo que puede usarse para calcular la localización.

Este método podría utilizarse para compararse con nuestros métodos utilizados en el tambor, de forma tal de conocer su precisión considerando fuentes en la base y en el manto, pero con los sensores sólo en el manto y con sensores limitados a 4.

Otro trabajo futuro que se podría realizar es la confección de un sistema de localización de fuentes de emisiones acústicas en tiempo real, de forma de poder utilizarlo como banco de pruebas para distintos métodos de localización de fuentes.

También se podría analizar como otro tipo de fuentes de emisión acústica pueden cambiar la forma, velocidad y amplitud de la onda generada, como, por ejemplo, en vez del impacto de una mina de lápiz, aplicar una fuerza constante que genere una deformación plástica en la estructura o pieza.

Finalmente, se podrían combinar las dos últimas ideas, y con el banco de pruebas analizar cómo se va generando la onda de emisión acústica y como va cambiando con el tiempo mientras voy provocando en la estructura una deformación plástica.

## Referencias

- Baxter, G., Pullin, R., Holford, K. M., & Evans, S. L. (2007). Delta T source location for acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(3), 1512–1520. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.05.003>
- Ciaburro, G. (2022). Machine-learning-based methods for acoustic emission testing: A review. *Applied Sciences*, 12(20), 10476. <https://doi.org/10.3390/app122010476>
- Dehghan Niri, E., Farhidzadeh, A., & Salamone, S. (2015). Determination of the probability zone for acoustic emission source location in cylindrical shell structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60–61, 971–985. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.02.004>
- Dehghan Niri, E., Salamone, S., & Farhidzadeh, A. (2015). A probabilistic framework for acoustic emission source localization in cylindrical structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60, 971–985. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.02.004>
- Ge, M. (2005). Analysis of source location algorithms, Part II: Iterative methods. *Journal of Acoustic Emission*, 23(1), 36–48. <https://www.ndt.net/article/jae/papers/23-036.pdf>
- Ghadarah, N., & Ayre, D. (2023). A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of polymer-based composites. *Sensors*, 23(15), 6945. <https://doi.org/10.3390/s23156945>
- Habel, W. R. (2013). SHM systems supporting extension of the structures' service life. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 3(4), 225–226. <https://doi.org/10.1007/s13349-013-0068-x>
- Holford, K. M., Pullin, R., Evans, S. L., Eaton, M. J., Hensman, J., & Worden, K. (2009). Acoustic emission for monitoring aircraft structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 223(5), 525–532. <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO404>
- Jierula, A., Wu, C., Kali, A., & Fu, Z. (2024). A review of acoustic emission source localization techniques in different dimensions. *Applied Sciences*, 14(19), 8684. <https://doi.org/10.3390/app14198684>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. C. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942–1948). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Kohn, D. H. (1995). Acoustic emission and nondestructive evaluation of biomaterials and tissues. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 23(3–4), 221–306. <https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.v23.i3-4.20>
- Liu, W., Wang, H., Xiao, Y., Hou, M., Dong, S., & Zhang, Z. (2024). Study on joint method of 3D acoustic emission source localization simplex and grid search scanning. *Applied Geophysics*, 21, 456–467. <https://doi.org/10.1007/s11770-023-1042-y>
- Moré, J. J., & Sorensen, D. C. (1983). Computing a trust region step. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 4(3), 553–572.

<https://doi.org/10.1137/0904038>

- Nguyen, T.-K., Ahmad, Z., & Kim, J.-M. (2024). Leak localization on cylinder tank bottom using acoustic emission. *Sensors*, 24(3), 749. <https://doi.org/10.3390/s24030749>
- Pollock, A. A. (1986). Acoustic emission capabilities and applications in monitoring corrosion. In *Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems* (pp. 71–83). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP17435S>
- Sause, M. G. R. (2011). Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources. *Journal of Acoustic Emission*, 29(1), 184–196.
- Thurber, C. H. (1985). Nonlinear earthquake location: Theory and examples. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(3), 779–790.
- Tonelli, D. (2020). Structural health monitoring based on acoustic emissions. *Sensors*, 20(24), 7272. <https://doi.org/10.3390/s20247272>
- Won, J., Oh, H., & Sakong, J. (2024). Research on the acoustic emission source localization methodology in composite materials based on artificial intelligence. *arXiv preprint arXiv:2407.05405*. <https://arxiv.org/abs/2407.05405>
- Yuyama, S., & Kishi, T. (1985). Acoustic emission from environmental cracking of a high-strength titanium alloy. *Corrosion*, 41(1), 46–53. <https://doi.org/10.5006/1.3581950>

## Anexo A: Resultados de Métodos Adicionales

a) Resultados de error por fuente de método TRF + Huber Fijo con fuentes restringidas al manto del tambor.

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	A	0.838	0.004	55.03%
	B	0.678	0.008	44.50%
	C	0.293	0.378	19.25%
	D	0.312	0.318	20.49%
	E	0.250	0.007	16.41%
	F	0.208	0.001	13.64%
	G	0.403	0.011	26.44%
	H	0.413	0.083	27.11%
0.5%	A	0.840	0.013	55.16%
	B	0.664	0.024	43.58%
	C	0.119	0.190	7.84%
	D	0.079	0.005	5.18%
	E	0.248	0.006	16.27%
	F	0.206	0.002	13.56%
	G	0.402	0.006	26.41%
	H	0.447	0.008	29.36%
1%	A	0.765	0.026	50.23%
	B	0.610	0.070	40.06%
	C	0.202	0.369	13.25%
	D	0.079	0.001	5.16%
	E	0.253	0.010	16.58%
	F	0.208	0.003	13.64%
	G	0.432	0.053	28.37%
	H	0.385	0.083	25.26%
2.5%	A	0.749	0.000	49.16%

	B	0.527	0.072	34.57%
	C	0.100	0.049	6.57%
	D	0.100	0.033	6.57%
	E	0.427	0.166	28.06%
	F	0.179	0.064	11.74%
	G	0.591	0.004	38.84%
	H	0.310	0.085	20.38%
	5%	A	0.749	0.000
B		0.484	0.008	31.78%
C		0.079	0.044	5.18%
D		0.544	0.147	35.74%
E		0.568	0.027	37.31%
F		0.323	0.141	21.18%
G		0.591	0.000	38.80%
H		0.268	0.009	17.58%

b) Resultados de error por umbral de método TRF + Huber Fijo con fuentes restringidas al manto del tambor.

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.424	0.101	27.86%
0.5%	0.376	0.032	24.67%
1%	0.367	0.077	24.07%
2.5%	0.373	0.059	24.49%
5%	0.451	0.047	29.59%

c) Resultados de error por fuente de método Thurber adaptativo con fuentes restringidas al manto del tambor.

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	A	0.355	0.001	23.29%

	B	0.398	0.027	26.14%
	C	0.630	0.159	41.35%
	D	0.416	0.123	27.30%
	E	0.225	0.009	14.77%
	F	0.524	0.206	34.41%
	G	0.574	0.219	37.72%
	H	0.619	0.098	40.67%
0.5%	A	0.357	0.003	23.44%
	B	0.424	0.037	27.82%
	C	0.549	0.068	36.02%
	D	0.539	0.064	35.40%
	E	0.222	0.009	14.56%
	F	0.535	0.253	35.13%
	G	0.665	0.189	43.64%
1%	H	0.641	0.007	42.11%
	A	0.323	0.129	21.19%
	B	0.478	0.073	31.40%
	C	0.487	0.046	32.00%
	D	0.513	0.008	33.71%
	E	0.194	0.057	12.73%
	F	0.535	0.253	35.13%
2.5%	G	0.688	0.137	45.18%
	H	0.712	0.102	46.76%
	A	0.339	0.038	22.28%
	B	0.603	0.107	39.62%
	C	0.514	0.032	33.77%
	D	0.537	0.062	35.25%
	E	0.171	0.146	11.22%
F	0.543	0.229	35.66%	
G	0.703	0.100	46.13%	

	H	0.678	0.151	44.54%
5%	A	0.315	0.097	20.72%
	B	0.529	0.144	34.74%
	C	0.447	0.011	29.32%
	D	0.395	0.101	25.93%
	E	0.283	0.056	18.61%
	F	0.544	0.215	35.74%
	G	0.687	0.170	45.11%
	H	0.639	0.063	41.95%

d) Resultados de error por umbral de método Thurber con fuentes restringidas al manto del tambor.

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.468	0.105	30.71%
0.5%	0.491	0.079	32.26%
1%	0.491	0.101	32.26%
2.5%	0.511	0.108	33.56%
5%	0.480	0.107	31.51%

e) Resultados de error por fuente de método USBM con fuentes restringidas al manto del tambor.

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	A	0.941	0.006	61.79%
	B	0.981	0.002	64.42%
	C	0.383	0.303	25.12%
	D	0.407	0.335	26.70%
	E	0.150	0.003	9.85%
	F	0.369	0.001	24.20%
	G	0.544	0.001	35.70%

	H	0.933	0.123	61.27%
0.5%	A	0.955	0.024	62.69%
	B	0.977	0.007	64.14%
	C	0.236	0.053	15.50%
	D	0.215	0.006	14.15%
	E	0.150	0.002	9.84%
	F	0.369	0.001	24.26%
	G	0.543	0.003	35.68%
	H	0.877	0.001	57.61%
1%	A	1.253	0.324	82.26%
	B	1.008	0.091	66.21%
	C	0.257	0.118	16.85%
	D	0.215	0.003	14.15%
	E	0.146	0.005	9.56%
	F	0.369	0.002	24.20%
	G	0.530	0.026	34.79%
	H	0.828	0.072	54.35%
2.5%	A	1.680	0.187	110.30%
	B	1.141	0.038	74.95%
	C	0.226	0.078	14.87%
	D	0.200	0.023	13.10%
	E	0.204	0.145	13.37%
	F	0.296	0.120	19.46%
	G	0.380	0.175	24.94%
	H	0.868	0.150	57.02%
5%	A	1.979	0.234	129.91%
	B	0.973	0.076	63.92%
	C	0.644	0.201	42.29%
	D	0.947	0.314	62.15%
	E	0.156	0.024	10.22%

	F	0.196	0.060	12.85%
	G	0.520	0.150	34.17%
	H	1.003	0.017	65.88%

f) Resultados de error por umbral de método USBM con fuentes restringidas al manto del tambor.

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	0.588	0.097	38.63%
0.5%	0.540	0.012	35.49%
1%	0.576	0.080	37.80%
2.5%	0.624	0.115	41.00%
5%	0.802	0.134	52.67%

g) Resultados de error por fuente de método TRF + Huber Fijo con fuentes restringidas a la base del tambor.

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	V	0.908	0.000	59.62%
	W	0.723	0.167	47.46%
	X	0.041	0.022	2.66%
	Y	0.195	0.119	12.80%
	Z	0.267	0.150	17.55%
0.5%	V	0.908	0.000	59.62%
	W	0.884	0.000	58.05%
	X	0.024	0.006	1.60%
	Y	0.036	0.004	2.39%
	Z	0.057	0.041	3.72%
1%	V	0.908	0.000	59.62%
	W	0.884	0.000	58.05%
	X	0.025	0.003	1.65%
	Y	0.039	0.005	2.54%

	Z	0.100	0.016	6.54%
2.5%	V	0.908	0.000	59.62%
	W	0.884	0.000	58.05%
	X	0.025	0.005	1.66%
	Y	0.019	0.017	1.25%
	Z	0.117	0.003	7.70%
5%	V	0.908	0.000	59.62%
	W	0.884	0.000	58.05%
	X	0.027	0.002	1.77%
	Y	0.059	0.015	3.90%
	Z	0.090	0.065	5.93%

h) Resultados de error por umbral de método TRF + Huber Fijo con fuentes restringidas a la base del tambor.

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
V	0.427	0.091	28.02%
W	0.382	0.010	25.08%
X	0.391	0.005	25.68%
Y	0.391	0.005	25.65%
Z	0.394	0.016	25.85%

i) Resultados de error por fuente de método Thurber adaptativo con fuentes restringidas a la base del tambor.

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	V	0.845	0.077	55.51%
	W	0.488	0.197	32.07%
	X	0.656	0.216	43.07%
	Y	0.708	0.224	46.49%
	Z	0.379	0.148	24.91%
0.5%	V	0.837	0.051	54.99%

	W	0.768	0.141	50.42%
	X	0.158	0.222	10.39%
	Y	0.082	0.001	5.40%
	Z	0.220	0.001	14.44%
1%	V	0.835	0.048	54.85%
	W	0.870	0.002	57.14%
	X	0.161	0.220	10.57%
	Y	0.083	0.002	5.48%
	Z	0.219	0.000	14.40%
2.5%	V	0.860	0.056	56.48%
	W	0.783	0.118	51.39%
	X	0.054	0.033	3.55%
	Y	0.085	0.001	5.60%
	Z	0.219	0.000	14.40%
5%	V	0.987	0.226	64.80%
	W	0.816	0.105	53.61%
	X	0.071	0.028	4.66%
	Y	0.089	0.007	5.83%
	Z	0.220	0.000	14.42%

j) Resultados de error por umbral de método Thurber adaptativo con fuentes restringidas a la base del tambor.

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
V	0.615	0.172	40.41%
W	0.413	0.083	27.13%
X	0.434	0.054	28.49%
Y	0.400	0.042	26.29%
Z	0.437	0.073	28.66%

k) Resultados de error por fuente de método USBM con fuentes restringidas a la base del tambor.

Umbral	Fuente	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
0.25%	V	0.594	0.043	39.00%
	W	1.566	1.048	102.81%
	X	0.245	0.218	16.07%
	Y	0.250	0.174	16.43%
	Z	0.669	0.187	43.92%
0.5%	V	0.612	0.017	40.16%
	W	0.553	0.009	36.34%
	X	0.731	0.254	47.98%
	Y	0.844	0.008	55.42%
	Z	0.936	0.019	61.43%
1%	V	0.638	0.016	41.89%
	W	0.521	0.026	34.22%
	X	0.730	0.253	47.93%
	Y	0.827	0.017	54.27%
	Z	0.914	0.008	60.04%
2.5%	V	0.747	0.013	49.04%
	W	0.548	0.022	35.97%
	X	0.829	0.057	54.42%
	Y	0.824	0.015	54.09%
	Z	0.947	0.008	62.19%
5%	V	1.061	0.152	69.68%
	W	0.637	0.032	41.83%
	X	0.831	0.062	54.57%
	Y	0.803	0.036	52.74%
	Z	0.955	0.014	62.73%

l) Resultados de error por umbral de método USBM con fuentes restringidas a la base del tambor.

Umbral	Error Promedio (m)	Desviación Estándar (m)	Error Relativo (%)
V	0.665	0.334	43.65%
W	0.735	0.061	48.27%
X	0.726	0.064	47.67%
Y	0.779	0.023	51.14%
Z	0.858	0.059	56.31%