

Evaluación de algoritmos de localización plana de emisión acústica

Cristian Martin Meinel

Trabajo de Investigación: Tesis de Maestría

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Oberá Argentina.

meinlcristian@fio.unam.edu.ar

Director: Thomas R. Clarke

Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre Brasil.

Grupo Colaborador: Grupo de Ensaios Não Destrutivos

Laboratorio de Metalurgia e Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre Brasil.

Resumen

En esta investigación es realizada una evaluación de diferentes algoritmos de localización plana de emisión acústica EA, basada en el método de diferencia de tiempo de llegada de las señales de EA a los sensores. También se realiza un análisis de velocidad de propagación de ondas acústicas, de manera de verificar como los diferentes modos de propagación afectan a los algoritmos de localización, usando una placa de acero con accesorios (soldaduras, perforación y refuerzos).

Palabras clave: Emisión Acústica, Localización de Fuentes, Modos de Onda

1. Introducción

La creciente demanda de recursos energéticos derivados del petróleo en Argentina y en el mundo hace la necesidad de aumentar la producción y almacenamiento de combustibles, generando así estructuras mayores y más complejas como tanques de almacenamiento, plataformas de extracción, etc. Estas estructuras están sobre la acción de esfuerzos y ambientes corrosivos que a lo largo del tiempo pueden nuclear fisuras y desencadenar en la falla catastrófica de la estructura produciendo enormes daños ambientales y económicos. La detección prematura de estos defectos es muy importante para prevenir estos desastres. El método de inspección de emisión acústica (EA) basado en la detección de fuentes de señales acústicas que son emitidos durante la nucleación o propagación de discontinuidades [1], [2], [3], es un método que cada vez más está siendo utilizado. La localización de fuentes de señales de Emisión Acústica (EA) es una de las principales cuestiones en el estudio de la técnica. El hecho de encontrar la zona próxima o el punto donde ocurre un evento que genera una señal de EA en la superficie o interior de un material bajo cargamento hace a la localización un área

desafiante, debido a que diferentes tipos de materiales y geometrías modifican las características de la forma y propagación de las señales, donde es necesario desarrollar diferentes técnicas de localización que se adapten a cada caso en particular.

En el siguiente trabajo se realizará una evaluación de diferentes algoritmos de localización plana de EA, basados en la técnica de diferencia de tiempo de llegada de las señales a los sensores TDOA (Time difference of Arrival). También se realizará un análisis de velocidad, considerando los diferentes modos de propagación y como estos influyen en la localización de las fuentes de EA.

2. Metodología

2.1 Diferencia de Tiempo de llegada TDOA (Time Difference Of Arrival)

El método de TDOA localiza la fuente por cálculo geométrico basado sobre un grupo de diferencias de tiempo de las señales detectadas por los diferentes sensores colocados en la pieza [4] (Figura 1).

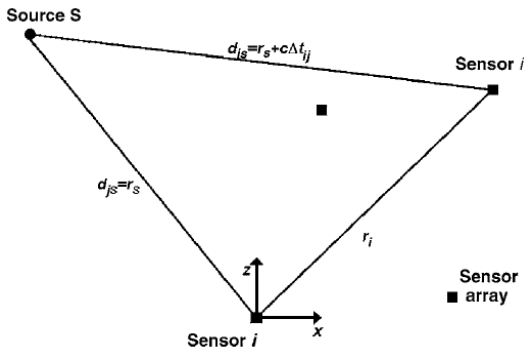


Figura 1. Disposición plana de sensores y fuente de EA [4]

Dado una configuración de sensores dispuestos en una placa en forma arbitraria la diferencia en el tiempo de llegada t_{ij} de una señal generada por una fuente puntual S, es detectado por el sensor i y j, con la consideración de propagación circular de la onda y velocidad constante y sin errores en el registro de señal de llegada puede ser escrito como:

$$c\Delta t_{ij} = d_{iS} - d_{jS}, \quad i, j = 1, N.$$

Donde c es la velocidad de propagación de la onda, d_{iS} y d_{jS} son las distancias entre la fuente y los sensores i y j respectivamente y N es el número de sensores.

$$d_{iS}^2 = \sum_{k=1}^K (x_{ki} - x_{ks})^2.$$

Donde K es el número de dimensiones espaciales asociadas con la propagación de la señal y x_{ki} e x_{ks} , son las distancias direccionales cartesianas del origen del sistema cartesiano al sensor i y a la fuente S respectivamente. El problema en la localización de fuentes es la determinación de x_{ks} dado t_{ij} , la velocidad de propagación de la señal y la posición de los sensores [4], [5].

2.2 Materiales Utilizados

El cuerpo de prueba utilizado fue una chapa de acero 1020 lisa, de dimensiones 1900x1520mm y 5mm de espesor. Con agujeros y angulos de 20x20mm soldados en forma de X y en los contornos laterales mayores, (Figura 2). El sistema de Emisión Acústica utilizado fue de Vallen Systeme AMSY-5, 10 canales. Para la detección de las señales fueron utilizados sensores modelo VS-150-RIC, con frecuencia de resonancia en 150kHz y pré-amplificadores de 34db. También fueron usados filtros de frecuencia

digital con paso de banda, en el sistema de adquisición de 100 a 300kHz. Los sensores fueron fijados con prendedores magnéticos, desarrollados por la Vallen Systeme, y el acoplamiento entre sensor y chapa fué usado vaselina líquida. Las señales de las fuentes de EA simuladas fueron generadas con la quiebra de barra de grafito, realizadas con barras de grafito HB 0.5mm [6]



Figura 2. Esquema de montaje de sensores en la chapa.

Los algoritmos de localización y análisis de velocidad fueron desarrollados en el software MATLAB r2010b en la plataforma Windows 7.

2.3 Algoritmos de Localización Utilizados

Método de aproximación por mínimos cuadrados (Rutina Matlab lsqnonlin [7]) (Cuatro sensores), Método the best matched point [5] o de la Matriz (Cuatro sensores) y el Método delta T [8], [9] (Cuatro sensores). Todos estos algoritmos de localización fueron comparados con un algoritmo propio de la instrumentación utilizada, de la marca Vallen Systeme.

2.4 Ensayos Realizados

Fueron realizados 2 ensayos para garantizar la eficiencia de cada algoritmo de localización. Estos dos ensayos consisten en: Ensayo 1 (tres fuentes simuladas dentro del cuadro formado por los sensores), Ensayo 2 (dos fuentes simuladas fuera del cuadro de sensores). La colocación de sensores fué dispuesta de forma que cada uno representa las aristas de un cuadrado.

3. Resultados y Discusión

3.1 Análisis de Velocidad en la Chapa de acero 5mm de espesor con Refuerzos y Soldaduras

En la Figura 3 se puede observar la señal obtenida por el sensor 2 indicando el limite de detección del sistema de adquisición en 70dB. En la figura solo es observado parte de la señal para mejor visualización, en el intervalo de tiempo 0-150 μ S. En la misma figura también se observa a lo largo de la longitud de la señal en función del tiempo, tres paquetes principales de onda. El primer paquete de pequeña amplitud y menor tiempo de llegada al sensor se define como modo So. El segundo paquete de señal con mayor amplitud y un retardo en la llegada al sensor se define como modo Ao y el tercer paquete de onda se define como una combinación de modos de alta frecuencia [6]. En la señal obtenida por el sensor 2, observada en la Figura 4, el cruce del limite (40dB) para el primer paquete de onda es en entorno a 1×10^{-4} seg. Y el cruce del limite (70dB) para el segundo paquete de onda es entorno a $1,45 \times 10^{-4}$ seg.

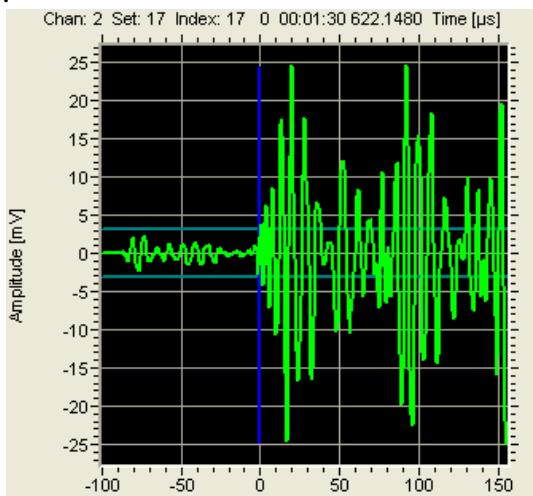


Figura 3. Señal de adquisición sensor 2, chapa acero 5mm, limite 70dB. Vallen Systeme.

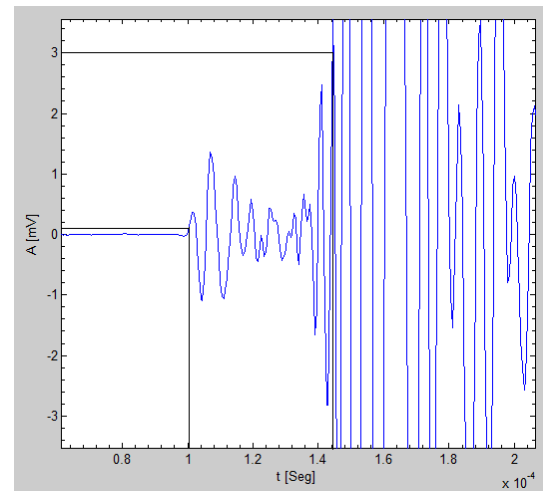


Figura 4. Señal de adquisición sensor 2, indicando limite para 40dB y 70dB.

Calculando la velocidad de propagación de la onda a partir de estos tiempos, y para una distancia conocida entre la fuente simulada y el sensor, se obtiene:

$$V_{40dB} = 0,5m/1 \times 10^{-4}s = 5000m/s, \text{ Modo So (Extensional)}$$

$$V_{70dB} = 0,5m/1,45 \times 10^{-4}s = 3448m/s, \text{ Modo Ao (Flexural)}$$

Esos valores de velocidad obtenidos van a ser comparados con los valores teóricos de velocidad calculados para una chapa de acero de 5mm de espesor con el software DISPERSSE. También serán comparados con valores de velocidad experimentales obtenidos a través de la diferencia de tiempo de llegada de las señales generadas entre dos sensores con distancias conocidas.

3.2 Cálculo Velocidad Teórica

Para el cálculo de la velocidad teórica para una chapa de acero de espesor conocido, se obtiene la señal generada a partir de la quiebra del grafito, Figura 3. Luego la señal es transformada en frecuencia mediante un FFT (Fast Fourier Transform), de manera de obtener la frecuencia dominante de la señal [6]. Para la señal estudiada la frecuencia dominante cae en el entorno de 100kHz, Figura 5.

Con la frecuencia obtenida en el FFT, vamos a entrar en el gráfico de las curvas de dispersión de velocidad de grupo (obtenidas con el software "DISPERSSE") y obtener las velocidades de propagación para los modos Ao e So, Figura 6.

Para una frecuencia de 100kHz (frecuencia dominante observada en la Figura 5 del FFT). Las velocidades obtenidas fueron:

$$V_{So} = 5419\text{m/s}, V_{Ao} = 2974\text{m/s}$$

Aquí podemos ver la proximidad de los valores de las velocidades calculadas experimentalmente a partir de la señal de EA y los valores de velocidad teóricos obtenidos a partir de las curvas de dispersión.

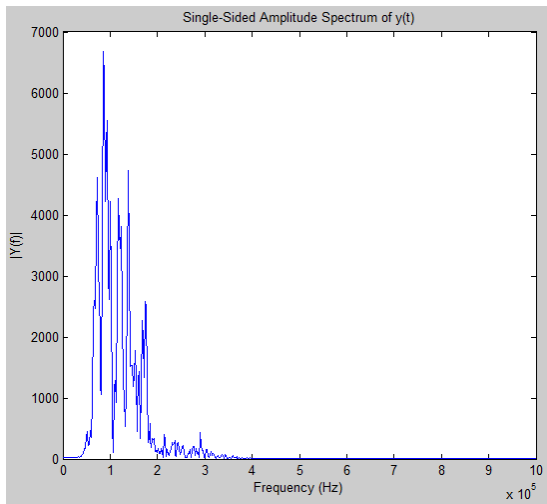


Figura 5 Transformada FFT, señal de entrada sensor 2.

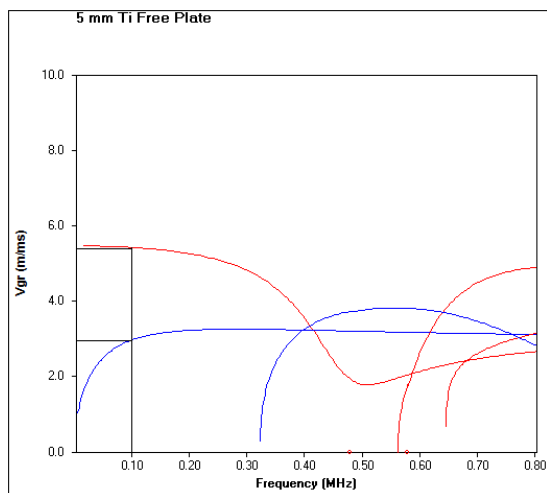


Figura 6. Velocidad de grupo teórica de los modos Ao y So para la chapa de acero de 5mm de espesor.

Cálculo de Velocidad Experimental

Para el cálculo experimental de la velocidad, fueron utilizados dos sensores, uno de ellos en una posición fija y el otro moviéndose en un semicírculo de radio constante, de manera de conseguir varias medidas de velocidad en diferentes orientaciones en el material [9]. Las quebras de grafito fueron realizadas cerca de la

posición del sensor móvil, para radios de semicírculo de 30cm y 60cm, Figura 7.

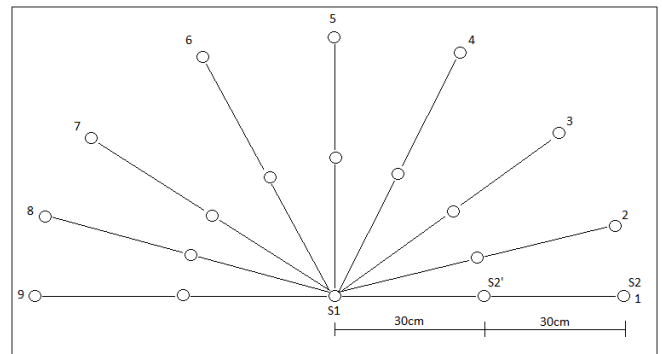


Figura 7. Posiciones a 30cm y 60cm de los sensores para el cálculo experimental de velocidad.

Así fueron medidas las diferencias de tiempo de llegada de la señal con límite de 40db y 70db a los sensores, y con la distancia entre ellos conocidas. Se calcula la velocidad de la siguiente forma:

$$V = \text{Distancia entre sensores} / \text{diferencia de tiempo entre S1 y S2}$$

$$V = D_{12} / \Delta T_{12}$$

Después fué realizada una media de las velocidades obtenidas, dando: Para la chapa de acero de 5mm de espesor:

$$V_{So} = 5441\text{m/s}, V_{Ao} = 3018\text{m/s}$$

Se puede observar que las velocidades calculadas en forma experimental son muy próximas a las velocidades teóricas obtenidas a través de las curvas de dispersión [9]. Con esto podemos comprobar que dependiendo del límite de detección utilizado en el ensayo, vamos a detectar uno o otro modo de propagación de la onda, lo que va a influenciar directamente en el análisis de localización.

Análisis de Localización

Para el análisis de algoritmos de localización fueron utilizadas las siguientes velocidades para la chapa en estudio:

$$V_{So} = 5440\text{m/s}, \text{ límite } 40\text{dB}, V_{Ao} = 3010\text{m/s}, \text{ límite } 70\text{dB}.$$

En la secuencia de figuras solo serán mostradas las coordenadas de localización de la fuente 2 para 40db y 70db y de la fuente 5 para 40db y 70db. Luego serán presentadas tablas con las restantes coordenadas de localización para las otras fuentes simuladas.

Ensayo 1 (Fuentes adentro del cuadro de sensores)

En la Figura 8 son mostrados los resultados de localización para los algoritmos estudiados, se puede observar que para el caso de limite 40db la exactitud en la localización es muy buena para todos los algoritmos. Ya en la Figura 9 se observa la localización con zoom, de manera de apreciar mejor el error. El método iterativo junto con el método de la Vallen Systeme fueron los mejores posicionados y presentan un error menor a 1cm. El método de la matriz cae fuera del área de cruzamiento de las hipérbolas del método delta T y presenta un error de 1cm aproximadamente.

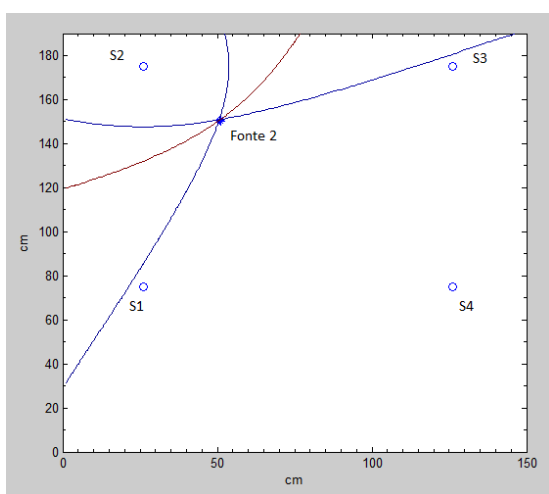


Figura 8. Localización fuente 2, limite 40db

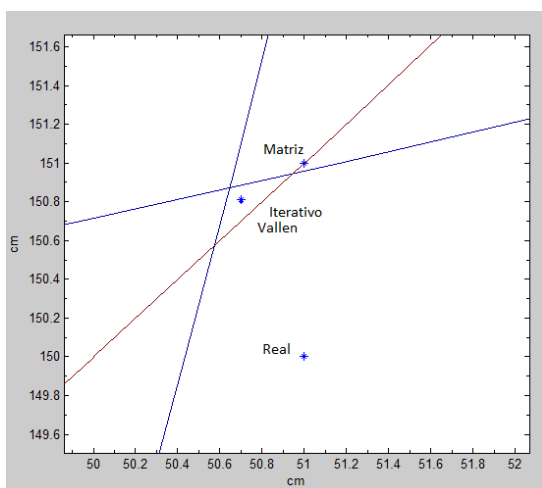


Figura 9. Localización fuente 2 con zoom, identificando los diferentes algoritmos y la coordenada real, limite 40db

En la Figura 10, se observa las coordenadas de localización de la fuente 2 para 70db. Aquí vemos que el error es mayor que para el umbral de detección de 40db. Todos los algoritmos ensayados tuvieron errores mayores a 1cm incluyendo el algoritmo de la Vallen Systeme. Esto puede ser debido a que para 70db el modo de velocidad que el sensor detecta primero es el Ao, donde el mismo es un modo de propagación de menor velocidad, y es posible que para esa velocidad el modo Ao tenga algunas componentes de modos de alta frecuencia o múltiples reflexiones de modos que alteran el valor de la velocidad real.

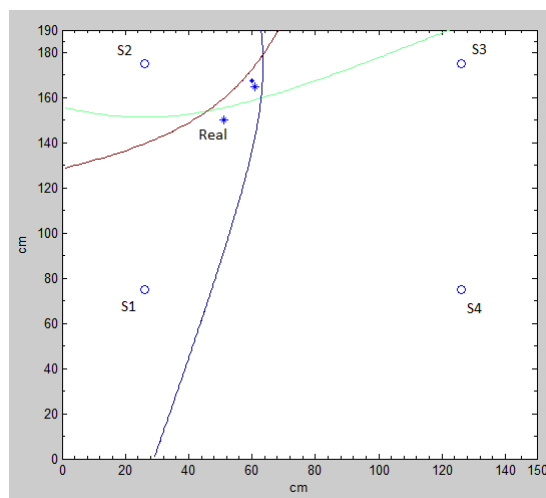


Figura 10 Localización fuente 2 chapa acero 5mm con refuerzos, umbral de detección 70db

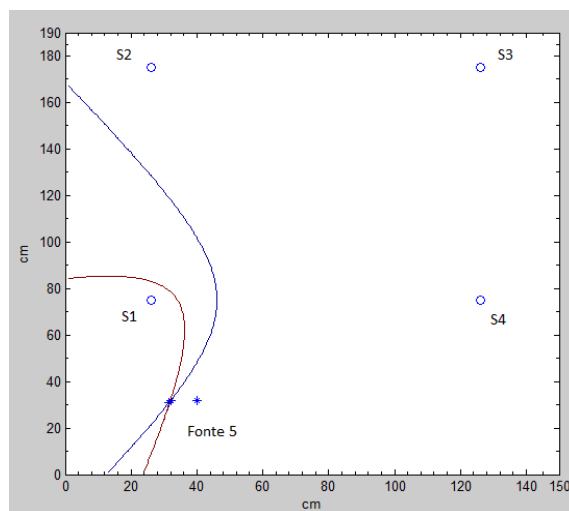


Figura 11. Localización fuente 5 , umbral de detección 40db

Ensayo 2 (Fuentes afuera del cuadro de los sensores)

En la Figura 11 y 12 se muestra los resultados de localización para la fuente simulada 5 para 40db, donde se puede ver que todos los algoritmos convergen a una coordenada diferente de la coordenada real de la fuente, presentando un error mayor que para el caso de fuentes dentro del la disposición de sensores. La Figura 12 muestra las coordenadas de localización con zoom para mejor visualización y puede observarse que el error es mayor a 1cm. Este error puede ser debido a que muy próximo de la fuente se encuentra un agujero en la chapa que puede causar dispersión y múltiples reflexiones de la onda de sonido que pode alterar la señal detectada, con lo cual incurre en un error en el cálculo de la velocidad.

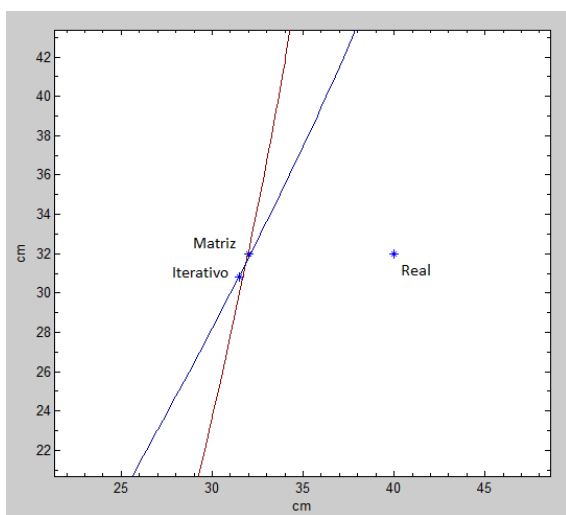


Figura 12. Localización fuente 5 con zoom, identificando los diferentes algoritmos y la coordenada real, umbral 40db

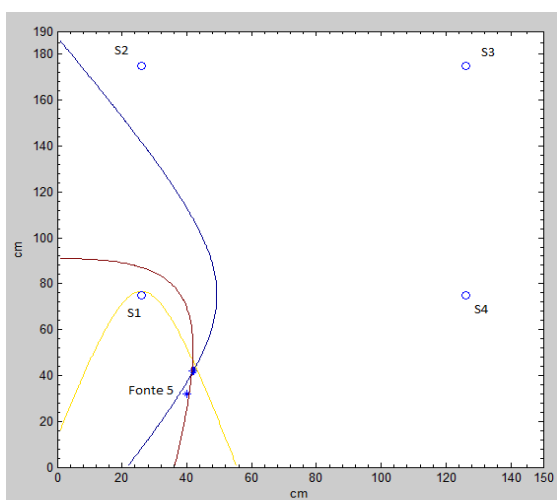


Figura 13. Localización fuente 5, chapa acero 5mm con refuerzos, umbral de detección 70db

En la Figura 13 y 14, se muestran las localizaciones para todos los algoritmos para la fuente 5 (afuera del arreglo de sensores) y umbral

de detección 70db. Se puede observar que el error es mayor que en el caso de fuentes adentro de la matriz de sensores. En este caso todos los algoritmos convergen en una coordenada diferente a la coordenada real, presentando un error mayor a 1cm.

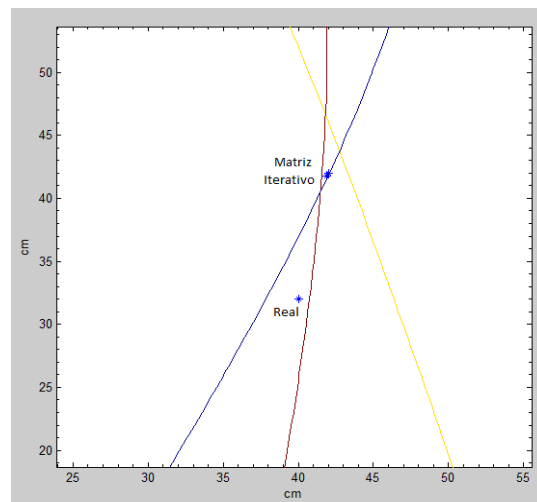


Figura 14. Localización fuente 5 con zoom, identificando los diferentes algoritmos y la coordenada real, umbral 70db.(Vallen Systeme no localiza)

En la tabla 1 son presentados los resultados de localización para las fuentes 1, 2 y 3 que estan localizadas adentro del arreglo de sensores, y en la tabla 2 son presentados los resultados de las fuentes 4 y 5 localizadas fuera del arreglo de sensores.

Tabla 1. Coordenadas [x,y][cm], de las fuentes 1, 2 y 3, adentro del arreglo de sensores, para los diferentes algoritmos de localización para 40dB y 70dB

| Algoritmo | Fuente 1 | | | |
|-----------|--------------|------------|--------------|------------|
| | 40dB | | 70dB | |
| Real | [26,125] | Error [cm] | [26,125] | Error [cm] |
| Vallen | [25.1,124.7] | 0.4 | [18.5,117.1] | 9.1 |
| Iterativo | [24,125] | 0.4 | [18,117] | 9.2 |
| Matriz | [24,125] | 0.4 | [18,117] | 9.2 |
| Delta T1* | [@ , @]** | - | [@ , @]** | - |
| Algoritmo | Fuente 2 | | | |
| | 40dB | | 70dB | |
| Real | [51,150] | Error | [51,150] | Error |

| | | | | |
|-----------|--------------|---------------|-----------------|---------------|
| | | [cm] | | [cm] |
| Vallen | [50.7,150.8] | 0.6 | [60,167.4] | 19.3 |
| Iterativo | [50.7,150.8] | 0.6 | [59,169] | 20.5 |
| Matriz | [51,151] | 0.9 | Nao Localiza | - |
| Delta T1* | [® , x]** | - | [® , x]** | - |
| Algoritmo | Fuente 3 | | | |
| | 40db | | 70dB | |
| Real | [76,125] | Error [cm] | [76;125] | Error [cm] |
| Vallen | [75.2,125.1] | 0.3 | [74.4,125,3] | 0.5 |
| Iterativo | [75.2,125.1] | 0.3 | [74.8,125,3] | 0.3 |
| Matriz | [75,125] | 0.5 | [74,125] | 1 |
| Delta T1* | [® , x]** | - | [® , x]** | - |

* Para el método delta T no son indicadas las coordenadas de localización, si un símbolo que indica si la coordenada localizada por los otros algoritmos caen adentro del área de cruzamiento de las tres curvas de las hipérbolas [® ; x].

** El símbolo “®” , indica que la coordenada localizada por los algoritmos está dentro del área de cruzamiento de las hipérbolas, el símbolo “x” indica que la coordenada localizada por los algoritmos caen fuera del área de cruzamiento de las hipérbolas.

Tabla 2. Coordenadas [x,y] de las fuentes 4 y 5, afuera del arreglo de sensores, para los diferentes algoritmos de localización en 40dB y 70dB.

| | | | | |
|-----------|----------------|---------------|----------------|------------|
| Algoritmo | Fuente 4 | | | |
| | 40dB | | 70dB | |
| Real | [25,62] | Error [cm] | [25,62] | Error [cm] |
| Vallen | [22.7,56.2] | 6.2 | [29.6;77.4] | 16 |
| Iterativo | [23;61.6] | 1 | [30.2;75.8] | 14 |
| Matriz | [22;59] | 3.8 | [30;77] | 15.7 |
| Delta T1* | [x ; x]** | - | [® ; x]** | - |
| Algoritmo | Fuente 5 | | | |
| | 40dB | | 70dB | |
| Real | [40,32] | Error [cm] | [40,32] | Error [cm] |
| Vallen | No localiza | - | No localiza | - |
| Iterativo | [31.5;30.8] | 7.1 | [41.8;41.7] | 7.8 |
| Matriz | [36;27] | 6.2 | [42;42] | 8.1 |

| | | | | |
|-----------|-----------|---|-----------|---|
| Delta T1* | [31;30]** | - | [® , ®]** | - |
|-----------|-----------|---|-----------|---|

*** Para la coordenada de la fuente 5 y 40db, solo dos curvas de las hipérbolas fueron calculadas por el algoritmo delta T, definiendo para ese caso un punto de intersección, identificando la coordenada.

4. Conclusiones

En este trabajo se há realizado una evaluación de algoritmos de localización plana de emisión acústica, en una chapa de acero con refuerzos y soldaduras.

Se há realizado un análisis de velocidad de propagación de la onda acústica en la chapa de manera de evaluar la localización con los modos de propagación Ao y So.

Los resultados de localización obtenidos con los diferentes algoritmos demostraron una gran dispersión de resultados dependiendo de la disposición de los sensores, umbral de detección ou threshold utilizado y el tipo de algoritmo.

En general los algoritmos tuvieron buena exactitud en la localización para el caso de umbral 40db, donde los errores son menores a 1cm en el caso de fuentes adentro del arreglo de sensores, y un poco mayor en el caso de fuentes afuera del arreglo de los sensores.

Los algoritmos con umbral de detección de 70db tuvieron una exactitud menor, dando errores arriba de 2 cm, en el caso de las fuentes adentro del arreglo de sensores el error fué menor y para las fuentes afuera del arreglo de sensores el error fué mayor.

Referencias

- [1] POLLOCK Adrian A. (1989). ASM Metal Handbook vol.17 Nondestructive Evaluation and Quality Control.
- [2] SCHULL Peter J. (2001). Nondestructive Evaluation. Theory, Techniques and Applications. Marcel Dekker, Inc.
- [3] HELLIER Charles J. (2003). Handbook of Nondestructive Evaluation, McGRAW-HILL.
- [4] SCHOLEY J., WILCOX P. (2008). Two dimensional source location techniques for large composites plates, EWGAE (28):160-165.
- [5] SCHOLEY J., WILCOX P. (2009). A generic technique for acoustic emission source location. J. Acoustic Emission, (27) : 291-298.

-
- [6] KAPHLE Manindra, TAN Andy. (2010). Identification of acoustic emission wave modes for accurate source location in plate-like. *Struct. Control Health Monit.* DOI: 10.1002/stc.413.
- [7] MATLAB User Guide. (2010). Matlab R2010b structures.
- [8] BAXTER Matthew, PULLIN Rhys. (2006). Delta T source location for acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing* (21): 1512–1520.
- [9] PENG F B, JAQUES Ricardo, STROHAECKER Roberto. (2011). Localização planar através da intersecção de hiperboles com solução por Newton Raphson em placa de aço utilizando sensores de emision acustica. 7to Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica.
- [10] JAQUES Ricardo. (2009). Avaliação de parâmetros de emissão acústica para monitoramento de risers flexíveis. Tese Doutorado PPGEM UFRGS.
- [11] DAMASCENO Sergio. (2008). Correlações entre emissão acústica de defeitos e parâmetros de mecânica da fratura na avaliação da integridade de dutos. Tese Doutorado UFRJ.
- [12] CIAMPA F., MEO M. (2010). Acoustic emission source localization and velocity determination of the fundamental mode A_0 using wavelet analysis and a Newton-based optimization technique. *Smart Mater. Struct.* (19) : 1-14
- [13] ALJETS Dirk, CHONG Alex, WILCOX Steve. (2010). Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array. *J. Acoustic Emission*, (28) : 85-98.
- [14] MIX Paul E. (2005). *Introduction to Nondestructive Testing*. Second Edition. John Wiley&Sons, Inc. Publication.
- [15] TOBIAS A. (1976). Acoustic-emission source location in two dimensions by three sensors. *Non-Destructive Testing*, (9): 9-12.
- [16] SPENCER S. (2007). The two dimensional source location problems for time differences of arrival at minimal element monitoring arrays. *Journal Acoust. Soc. Am.* 121 (6): 3579–3594.