

MINISTERIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO PLANAR DE FONTES DE
EMISSÃO ACÚSTICA EM CHAPAS DE AÇO COM E SEM ACESSÓRIOS

Cristian Martin Meinel

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2014

MINISTERIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO PLANAR DE FONTES DE
EMISSÃO ACUSTICA EM CHAPAS DE AÇO COM E SEM ACESSÓRIOS

Cristian Martin Meinl

Engenheiro Electromecânico

Dissertação realizada no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Ph.D. Thomas R. Clarke

Porto Alegre

2014

AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO PLANAR DE FONTES DE
EMISSÃO ACUSTICA EM CHAPAS DE AÇO COM E SEM ACESSÓRIOS

Esta Dissertação foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Ph.D. Thomas R. Clarke

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Reguly, PPGE3M - UFRGS

Dr. Ricardo Callegari Jaques, FAURGS

Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima, FAURGS

Prof. Dr. Telmo R. Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Historia da Emissão Acústica	3
2.2. Princípios do Ensaio de EA	3
2.3. Fontes de Emissão Acústica	5
2.4. Propagação de Ondas EA	5
2.4.1. Ondas Longitudinais.....	5
2.4.2. Ondas Transversais.....	6
2.4.3. Ondas Superficiais (Rayleigh).....	7
2.4.4. Ondas de Lamb	7
2.5. Propagação de Ondas Acústicas em Chapas Planas de Pequena Espessura.....	9
2.6. Atenuação	10
2.7. Sensores e Processamento de Sinais	10
2.7.1. Parâmetros do Sinal	11
2.8. Ruído em EA	12
2.9. Vantagens e Limitações do Método de EA	13
2.10. Localização de fontes de EA	13
2.11. Localização Planar de Fontes de Emissão Acústica.....	16
2.11.1. Técnicas de Análise de Localização	17
2.11.2. Diferença no Tempo de Chegada TDOA	18
2.11.3. Sistema de Equações não Lineares para Localização com o TDOA no Plano com Três Sensores.....	19
2.12. Técnicas de Localização Utilizando TDOA com Três e Quatro Sensores	19
2.13. Algoritmos de Localização Baseados no TDOA	22
2.13.1. Método do Delta T.....	23
2.13.2. Método da Matriz ou The Best Matched Point.....	24
2.13.3. Método Três Sensores (disposição linear).....	26
2.13.4. Metodo Iterativo	28
2.14. Velocidade de Propagação e Localização	29
2.14.1. Análise da Forma de Onda	29

2.14.2.	Identificação dos Modos de Propagação	32
2.14.3.	Análise em Frequência	33
2.14.4.	Modos de Lamb	35
2.14.5.	Uso do Modo So para Localização em EA.....	35
2.14.6.	Uso do Modo Ao para Localização em EA	35
2.14.7.	Cálculo Experimental de Velocidade	36
3.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	37
3.1.	Corpos de Prova:.....	37
3.2.	Sistema de Emissão Acústica:	38
3.3.	Análise de velocidade de propagação onda acústica	40
3.4.	Algoritmos de Localização Utilizados.....	41
3.4.1.	Algoritmo da Matriz	42
3.4.2.	Algoritmo Iterativo	42
3.4.3.	Algoritmo Delta T	43
3.4.4.	Algoritmo com Três Sensores em disposição linear de ZHANG.....	43
3.5.	Ensaio Realizados	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1.	Análise de Velocidade Chapa Aço 5mm com Reforços e Soldas	46
4.1.1.	Cálculo Velocidade Teórica	47
4.1.2.	Cálculo Velocidade Experimental	48
4.2.	Análise de Velocidade Chapa Sem Acessórios Aço 12,7mm	49
4.3.	Análise de Localização Chapa Aço 5mm com Reforços e Soldas.....	50
4.3.1.	Ensaio 1	51
4.3.2.	Ensaio 2	59
4.3.3.	Ensaio 3	65
4.4.	Análise de Localização Chapa Aço Sem Acessórios de 12,7mm.....	72
4.4.1.	Ensaio 1	72
4.4.2.	Ensaio 2	77
5.	CONCLUSÕES.....	82
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
8.	ANEXO.....	88

8.1.	Exemplo algoritmo método da Matriz	88
8.2.	Exemplo algoritmo método iterativo	90
8.3.	Exemplo algoritmo método Delta T	91
8.4.	Exemplo algoritmo localização método 3 sensores disposição linear	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Princípio básico do método de emissão acústica [2].....	4
Figura 2. Histograma básico mostrando o efeito Kaiser (B), efeito Felicity (F), durante o carregamento [2]	4
Figura 3. Esquema das ondas longitudinais, a) Oscilação de rarefação e compressão, b) Amplitude do deslocamento da partícula versus a distância de propagação [2].....	6
Figura 4. Esquema onda transversal, o comprimento de onda é a distância correspondente a um ciclo [2].	6
Figura 5. Esquema de uma onda de superfície propagando através de uma superfície metal/ar [2].....	7
Figura 6. Diagrama dos padrões básicos das ondas de Lamb, a) extencional, b) flexural [2]. ..	8
Figura 7. Modos de propagação num sinal de EA [5].....	9
Figura 8. Velocidade propagação de grupo de ondas Lamb em função da frequência para uma chapa de aço de 5 mm espessura [DISPERSE].	10
Figura 9. Parâmetros característicos de um sinal transiente característico de EA [2].....	12
Figura 10. Método da zona para localização de fontes de EA [5].....	14
Figura 11. Localização linear de fontes de emissão acústica [6].....	16
Figura 12. Princípio básico de localização planar em EA [7].	17
Figura 13. Técnicas de análise de localização planar de fontes de EA.	17
Figura 14. Disposição no plano de sensores e fonte S de EA [8].....	18
Figura 15. Pontos que produzem soluções ambíguas numa configuração com três sensores a) Sensores dispostos em triângulo equilátero b) sensores dispostos em triângulo reto. [10].....	20
Figura 16. Localização planar com 3 sensores, zonas com soluções ambíguas [8].	22
Figura 17. Localização planar com 4 sensores, não apresentam zonas com solução ambíguas [8].....	22
Figura 18. Curvas das hipérbolas geradas artificialmente em cada nó da malha, e a hipérbole de uma fonte simulada para a localização com o método do delta T [16].....	24
Figura 19. Matriz de pontos e posição dos sensores sobre o espécime de ensaio [17].	25
Figura 20. Matriz de delta T tridimensional [17].	26
Figura 21. Disposição linear de sensores, método com 3 sensores [18].	26

Figura 22. Forma de onda mostrando o efeito da orientação da fonte para uma fonte simulada aplicando deslocamento normal a superfície [6].	31
Figura 23. Forma de onda mostrando o efeito da orientação da fonte para uma fonte simulada aplicando deslocamento no borde da superfície [6].....	31
Figura 24. Sinais de emissão acústica identificando os modos de propagação [21].	33
Figura 25. Sinal de emissão acústica transformado através FFT (Fast Fourier Transform) transformada rápida de Fourier [21].	34
Figura 26. Curvas de dispersão de velocidades dos modos simétrica So e Assimétrico Ao para uma chapa de aço de 3mm de espessura [21].	34
Figura 27. Chapa aço 5mm de espessura com reforços utilizada no ensaio de localização.	37
Figura 28. Chapa lisa de aço 12,7mm de espessura sem reforços e soldas utilizada no ensaio de localização.	38
Figura 29. Sistema de aquisição AMSY-5 da Vallen Systeme, utilizado no ensaio de localização, indicando as entradas dos canais para conexão aos sensores.....	38
Figura 30. Resposta em frequência sensor VS150-RIC [25].....	39
Figura 31. Prendedor magnetico para acoplamento do sensor na peça de ensaio [Vallen Systeme].....	39
Figura 32. Posições a 30cm e 60cm dos sensores para o cálculo experimental da velocidade.	41
Figura 32. Esquema do algoritmo método da matriz.....	42
Figura 33. Esquema do algoritmo iterativo	43
Figura 34. Esquema do algoritmo delta T	43
Figura 35. Esquema do algoritmo três sensores em disposição linear	43
Figura 37. Sinal de aquisição sensor 2, indicando limiar para 40dB e 70dB.	46
Figura 38. Transformada FFT, sinal de entrada sensor 2.	47
Figura 39. Velocidade de grupo teórica dos modos Assimétrico e Simétrico para uma chapa de aço de 5mm de espessura.	48
Figura 40. Transformada FFT sinal obtida sensor chapa lisa 12,7mm.....	49
Figura 41. Curvas de dispersão velocidade grupo chapa aço 12 mm espessura.	50
Figura 42. Coordenadas de posições dos sensores e as fontes para o ensaio1.	51
Figura 43. Localização fonte 1, com zoom, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40db.....	52

Figura 44. Localização fonte 1, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 70db.	53
Figura 45. Localização fonte 2, com zoom, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40db.....	53
Figura 46. Localização fonte 2 chapa aço 5mm com reforços, limiar 70db.....	54
Figura 47. Localização fonte 3 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 40db.....	55
Figura 48. Localização fonte 3, com zoom , identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 70db.....	55
Figura 49. Localização fonte 1, 2 e 3, com três sensores chapa aço 5mm com reforços, limiar 40db.....	57
Figura 50. Localização fonte 1, chapa aço 5mm com reforços, limiar 70db.....	57
Figura 51. Posições das coordenadas das fontes simuladas 4 e 5, fora da matriz de sensores; chapa aço 5mm com reforços.	60
Figura 52. Localização fonte 4, com zoom, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40db.....	60
Figura 53. Localização fonte 4, chapa aço 5mm com reforços, limiar 70db.....	61
Figura 54. Localização fonte 5, com zoom, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40db.....	62
Figura 55. Localização fonte 5 com zoom, chapa com acessórios, limiar 70db.	62
Figura 56. Localização fonte 4, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40dB e 70db.	63
Figura 57. Localização fonte 5, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40dB e 70db.	64
Figura 58. Localização fonte 4 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 40db.....	66
Figura 59. Localização fonte 4, identificando os diferentes algoritmos chapa aço 5mm com reforços, limiar 70dB.	67
Figura 60. Localização fonte 5 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 40db.....	67
Figura 61. Localização fonte 5 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 70db.....	68
Figura 62. Localização fonte 4, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40dB.....	69
Figura 63. Localização fonte 4, chapa aço 5mm com reforços, limiar 70dB.....	69
Figura 64. Localização fonte 5, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40dB.....	70
Figura 65. Localização fonte 5, chapa aço 5mm com reforços, limiar 70dB.....	70

Figura 66. Localização fonte 1 com zoom, identificando as localizações para os diferentes algoritmos com quatro sensores, chapa sem acessórios, limiar 40db.	73
Figura 67. Localização fonte 3 com zoom, chapa sem acessórios, limiar 70db.....	74
Figura 68. Localização fonte 1, 2 e 3, chapa aço lisa 12,7mm sem reforços, limiar 40dB.	75
Figura 69. Localização fonte 1, 2 e 3, chapa aço lisa 12,7mm sem reforços, limiar 70dB.	75
Figura 67. Localização fonte 4. Chapa aço 12,7mm sem acessórios, limiar 40dB.	78
Figura 68. Localização fonte 4. Chapa aço lisa 12,7mm sem acessórios, limiar 70dB.....	78
Figura 69. Localização fonte 4 e 5, chapa aço lisa 12,7mm sem acessórios, limiar 40dB (Vallen não localiza).	79
Figura 70. Localização fonte 4 e 5, chapa aço lisa 12,7mm sem acessórios, limiar 70dB (Vallen localiza no sentido oposto).....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características do sensor VS-150-RIC, usado no ensaio de localização [23].	39
Tabela 2. Velocidades calculadas experimentalmente através da diferença de tempo de chegada dos sinais aos sensores utilizando o limiar como tempo inicial.	48
Tabela 3. Coordenadas dos sensores em [cm], ensaio N°1, fontes simuladas dentro da matriz de sensores.	51
Tabela 4. Coordenada dos sensores [cm], ensaio N°1, fontes simuladas dentro da matriz de sensores.	56
Tabela 5. Coordenadas [x,y][cm], das fontes 1, 2 e 3, dentro do arranjo dos sensores, para os diferentes algoritmos de localização para 40dB e 70dB.	58
Tabela 6. Coordenadas [x,y] das fontes 4 e 5, fora do arranjo de sensores, para os diferentes algoritmos de localização em 40dB e 70dB.	65
Tabela 7. Coordenadas dos sensores [cm], ensaio N°3, fontes simuladas 4 e 5 dentro da matriz de sensores.	66
Tabela 8. Coordenadas [x,y] das fontes 4 e 5, dentro da matriz dos sensores, para os diferentes algoritmos de localização em 40dB e 70dB.	71
Tabela 9. Coordenadas em [cm] de posicionamento dos sensores na chapa sem acessórios.	72
Tabela 10. Coordenadas [x,y] de localização das fontes 1, 2 e 3, dentro da matriz dos sensores, para os diferentes algoritmos de localização em 40dB e 70dB, chapa sem acessórios.	76
Tabela 11. Coordenadas [x,y] de localização das fontes 4 e 5, fora do arranjo dos sensores, para os diferentes algoritmos de localização em 40dB e 70dB.	80

LISTA DE SIMBOLOS

EA – Emissão Acústica.

END – Ensaio Não Destrutivos

NDE – Avaliação Não Destrutiva (Non Destructive Evaluation)

TDOA – Diferença no tempo de chegada da onda aos sensores (Time Difference Of Arrival).

FFT – Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform).

CWT – Transformada continua wavelet (Continuous Wavelet Transform).

[\otimes] – Coordenada real localizada dentro da área de cruzamento das hipérbolas, algoritmo delta T.

[X] – Coordenada real localizada fora da área de cruzamento das hipérbolas, algoritmo delta T.

LAMEF – Laboratorio de Metalurgia e Fisica.

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

V_{gr} – Velocidade de propagação de grupo das ondas acústicas de Lamb.

RESUMO

A indústria do petróleo no Brasil está tendo um enorme desenvolvimento devido as descobertas da reserva do Pré-sal, as condições de extração e transporte do petróleo estão submetidas a condições extremas, que faz a necessidade da construção de grandes e complexas estruturas. Estas estruturas estão submetidas a esforços e ambientes agressivos, que ao longo do tempo podem nuclear trincas e desencadear em ruptura catastrófica, gerando assim enormes danos ambientais e econômicos. Nesse contexto é preciso utilizar técnicas que permitam o monitoramento das estruturas para prevenir esses desastres. A técnica de inspeção de Emissão Acústica, baseado na detecção de fontes de sinais acústicos que são emitidos durante a nucleação ou propagação de descontinuidades nos materiais de (ou com) baixo carregamento faz um método atrativo. A capacidade para localizar a fonte de emissão acústica é uma importante vantagens da técnica. Nesta pesquisa foi realizada uma avaliação de diferentes algoritmos de localização planar de fontes de emissão acústica, verificando qual algoritmo apresenta uma melhor exatidão na localização. Comparando o erro na localização entre uma chapa com acessórios (soldas, furos e reforços, geralmente encontrada em diferentes segmentos na industria) e uma chapa sem acessórios (considerado como uma condição ideal na propagação de ondas acústicas). As fontes foram simuladas através da quebra do grafite, considerando duas amplitudes para o limiar de detecção 40db e 70db, como método de avaliação de condições de baixa amplitude de ruído e altas amplitudes de ruído, geralmente encontradas em ambientes industriais. As fontes foram posicionadas dentro e fora do arranjo de sensores para verificação de qual disposição resulta numa melhor exatidão. Também foi realizada uma análise da velocidade de propagação das ondas acústicas nas chapas utilizadas, verificando os modos de propagação presentes e como estes se relacionam com o limiar escolhido e também como influenciam na coordenada de localização para os algoritmos ensaiados. Os resultados obtidos nas coordenadas de localização para os algoritmos estudados também foram comparados com um algoritmo próprio da instrumentação utilizada para aquisição e análise de sinal da marca Vallen Systeme GmbH. No análise de velocidade verificou-se que para 40db o modo de propagação presente é o So e para 70db o modo Ao. Os resultados de localização obtidos mostraram que os algoritmos com limiar 40db tiveram uma melhor exatidão em comparação com valores obtidos para 70db. Os menores erros nas coordenadas de localização foram obtidos para os algoritmos com 4 sensores e fontes dentro do arranjo de sensores. Dentre os algoritmos estudados, a melhor

exatidão foi para o método iterativo que teve valores muito próximos ao algoritmo da Vallen Systeme GmbH.

ABSTRACT

The oil industry in Brazil is having a huge development because the findings of the pre-salt reserves, the conditions of extraction and transport of oil are subject to extreme hardship, which makes the need for large and complex structures. These structures are subject to harsh environments and efforts which, over time, can trigger crack initiation and catastrophic rupture, generating enormous environmental and economic damage. In this context it is necessary to use techniques that allow the monitoring of the structure to prevent such disasters. The inspection technique based on Acoustic Emission detection of sources of acoustic signals that are emitted during the nucleation and propagation of discontinuities in stressed materials is an attractive method. The ability to locate the source of acoustic emission is an important technique advantage. In this research an assessment of different algorithms for planar location of acoustic emission sources was made in order to verify which algorithm has a better accuracy in location. Comparing the error in the location of a plate with accessories (welds, holes and reinforcements, usually found in different parts of industry) and a flat plate without fittings (considered as an ideal condition in acoustic wave propagation). The sources were simulated by pencil lead break considering two amplitudes for the detection threshold 40db and 70db, to assess conditions of low and high noise amplitude typically found in industrial environments. The sources were positioned inside and outside the array of sensors in order to ascertain what arrangement results in better accuracy. An analysis of the speed of propagation of acoustic waves in plates used was also performed, considering the propagation present modes and how these relate to the chosen threshold and also how they influence the coordinate location for the tested algorithms. The results obtained in the location coordinates for the algorithms studied were also compared with a standard algorithm of the instrumentation used for signal acquisition and analysis (Vallen Systeme GmbH). By means of the analysis, it was found that speed to 40db S_0 mode propagation is present and the mode A_0 when 70db is set. The results showed that the location algorithms with threshold 40db had a better accuracy compared with values obtained for 70db. The minor errors in the location coordinates were obtained by algorithms with 4 sensors and sources within the array of sensors. Among the studied algorithms for better accuracy, the iterative method worked best. It had values very close to the Vallen Systeme GmbH algorithm.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de recursos energéticos derivados do petróleo no Brasil e no mundo faz a necessidade de aumentar a produção, estocagem e transporte de combustíveis, gerando assim estruturas maiores e mais complexas como plataformas de extração, tanques de estocagem, navios para transporte, etc. Estas estruturas estão submetidas a esforços e ambientes agressivos que ao longo do tempo podem nuclear trincas e desencadear em falhas catastróficas produzindo danos ambientais e econômicos. A detecção prematura desses defeitos é muito importante para prevenir esses desastres. Nessas condições é necessário o monitoramento das estruturas ou componentes que estejam em serviço, sem a necessidade de parada de produção para inspeção. Existem métodos de ensaios não destrutivos (END) que permitem a caracterização, localização e dimensionamento de defeitos com a possibilidade de monitoramento em linha. Dentre estes métodos a técnica de inspeção de emissão acústica (EA) baseado na detecção de fontes de sinais acústicos, que são emitidos durante a nucleação ou propagação de descontinuidades nos materiais de baixo carregamento, é um método que cada vez mais está sendo utilizado devido as características que tem em comparação com outras técnicas de END. A localização de fontes de sinais de EA é uma das principais questões no estudo da técnica do ensaio de EA. O fato de localizar a zona próxima ou mesmo o ponto onde ocorre um evento que gera um sinal de EA na superfície ou interior de um material de baixo carregamento faz a localização uma área desafiante. Diferentes tipos de materiais e geometrias mudam as características da forma e propagação dos sinais, onde é preciso desenvolver diferentes técnicas de análise de localização que se adaptem a cada caso em particular. Na localização de fontes de EA tem especial atenção a velocidade de propagação da onda acústica que vai depender de parâmetros como o tipo de material, forma da peça ou componente ensaiado e a frequência. A maioria dos equipamentos de aquisição e análise de sinal dispõem de programas informáticos para localização de fontes de EA, em função da posição de sensores e a velocidade teórica de propagação da onda acústica dependendo do material ensaiado, e não especificam o tipo de algoritmo utilizado para a localização. Isto pode levar a erros na coordenada de posição da fonte de EA, dependendo da geometria e acessórios (reforços, soldas, furos, etc.) que possa ter a estrutura ou componente ensaiado. Com base nisto, nesta pesquisa é realizada uma avaliação de diferentes algoritmos de localização planar baseados no método de diferença do tempo de chegada dos sinais de EA

aos sensores (Time Difference Of Arrival TDOA), de maneira de verificar qual algoritmo apresenta uma melhor exatidão na localização. Comparando os resultados de localização com um algoritmo próprio da instrumentação utilizada para aquisição de sinal da marca Vallen Systeme GmbH, disponíveis no Laboratório de Metalurgia e Física (LAMEF) da UFRGS.

Os ensaios foram realizados em duas chapas de aço, onde uma das chapas contém acessórios (soldas, furos e reforços, normalmente encontrada em estruturas ou componentes mecânicos na indústria), e a outra chapa sem acessórios ou soldas (considerando uma condição ideal de propagação das ondas acústicas). O limiar de detecção de registro do tempo de chegada da onda acústica aos sensores é realizada com a técnica do primeiro cruzamento do limiar (First Threshold Crossing), onde foram utilizadas duas amplitudes de limiar de detecção: 40db usado geralmente em ambientes com baixo ruído (ensaios de laboratórios) e 70db usado em ambientes com altos valores de ruído (indústrias). Também foi realizada uma análise da velocidade de propagação das ondas acústicas, verificando os modos de propagação da onda presentes em função do limiar de detecção escolhido, e como as velocidades de propagação dos diferentes modos influenciam nos algoritmos de localização. Nos algoritmos avaliados foram utilizadas configurações com 3 e 4 sensores, com fontes dentro e fora do arranjo de sensores de maneira de verificar qual disposição de sensores e fontes produzem melhores resultados nas coordenadas de localização. Todos os trabalhos de pesquisa e ensaios de localização foram desenvolvidos no LAMEF.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Historia da Emissão Acústica

A palavra "acústica" é derivada da palavra grega "akoustikos", que tem a ver com "Audição". Durante séculos, o precursor do colapso estrutural tem sido sons que são emitidos antes da falha de um membro de suporte. Um galho de árvore emite um som de estalido antes que ele realmente quebre e pisar em gelo fino produz sons que avisam do iminente colapso. A EA neste caso é para os ouvidos como uma inspeção visual para os olhos. Já no nível de falhas como propagação de trincas no interior de materiais o som é imperceptível ao ouvido humano, e requer de técnicas e instrumentação especiais para serem detectados. A EA tornou-se um método de END reconhecido, normalmente utilizado para detectar e localizar falhas em estruturas e componentes mecanicamente carregados. A EA pode fornecer informações completas sobre a origem de uma descontinuidade (falha) em um componente carregado e também fornece informações relativas ao desenvolvimento desta falha como o componente é sujeita a tensão contínua ou repetitiva (HELLIER, 2003).

2.2.Princípios do Ensaio de EA

Na propagação de trincas nos materiais quando estão sujeitos a cargas de tensão, é liberada uma quantidade de energia que viaja em forma de ondas mecânicas de tensão a uma determinada frequência e velocidade. Estas oscilações são detectadas por sensores piezoelétricos que convertem essa oscilação mecânica em uma tensão elétrica que logo é amplificada e processada como sinal de emissão acústica, conforme Figura 1 (POLLOCK, 1989). Então a principal diferença da EA para com outros métodos de END, é que a EA é um método de ensaio passivo, isto é que apenas são detectados sinais produzidos pelo próprio material, ou seja, defeitos ativos (crescimento de trincas, deformação plástica) quando o material está submetido a carregamento.

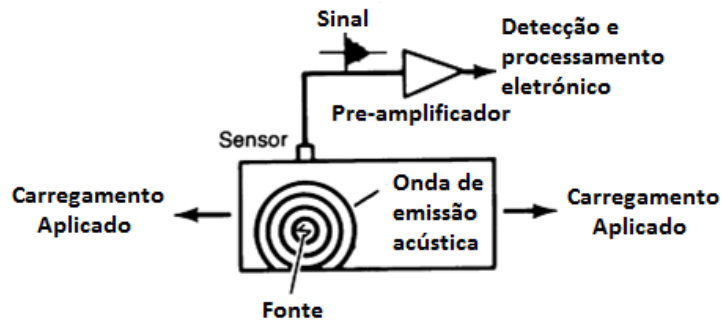


Figura 1. Princípio básico do método de emissão acústica (POLLOCK, 1989).

Uma das principais desvantagens do ensaio de EA, é que a emissão de uma fonte ativa só vai emitir som uma vez quando aplicada uma carga, e só vai emitir este som novamente quando a carga máxima anterior for superada. Este fenômeno é denominado efeito Kaiser, representado pelo ponto B da Figura 2, em referência ao descobridor J. Kaiser. Existem alguns materiais que emitem sinais de EA antes de alcançar o carregamento máximo prévio, estes materiais são alguns tipos de polímeros, e quando acontece isto, o fenômeno é denominado efeito Felicity, ponto F da Figura 2.

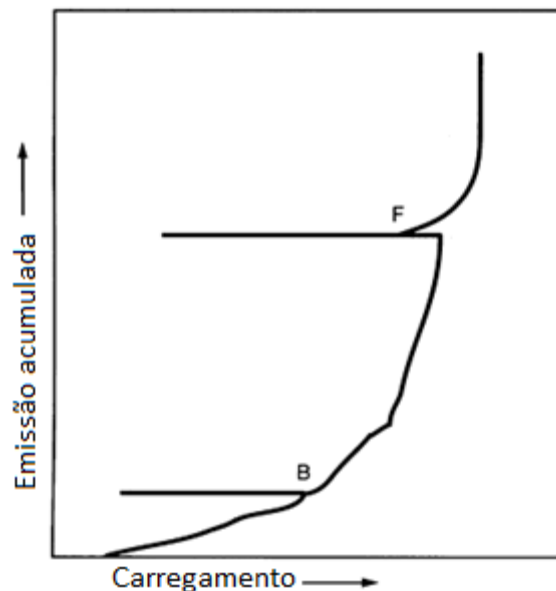


Figura 2. Histograma básico mostrando o efeito Kaiser (B), efeito Felicity (F), durante o carregamento (POLLOCK, 1989)

2.3. Fontes de Emissão Acústica

Na acústica são muitos os fenômenos que geram som e que podem ser classificados como fontes de EA, no entanto cada autor especifica a faixa de som que vai ser estudada e assim definir as principais fontes características. O restante será considerado “ruído” que representa um sinal não desejado, mas que pode ser omitido ou eliminado através de técnicas especiais.

Em nosso caso, no estudo de defeitos nos materiais a nível microscópico, as principais fontes de EA são: crescimento ou propagação de trincas, deformação plástica, vazamentos em vasos de pressão, corrosão, etc. Cada uma dessas fontes irá emitir um sinal característico que será analisado para a identificação e localização da mesma.

2.4. Propagação de Ondas EA

Quando um átomo é deslocado de sua posição de equilíbrio devido a uma força externa, ele gera um desequilíbrio de força entre os átomos vizinhos que tendem a restituí-lo a sua posição original. Isto provoca o deslocamento dos átomos vizinhos gerando assim uma onda ou oscilação que propaga em todo o material. A amplitude, modo de vibração e velocidade das ondas diferem em sólidos, líquido e gases justamente devido as diferenças na distância média entre as partículas em cada um desses casos. Assim ondas terão uma maior velocidade em sólidos e menores em gases (JAQUES, 2009).

Existe uma relação entre a velocidade de propagação, comprimento de onda e a frequência dada pela equação (1):

$$V = f * \lambda \quad (1)$$

Onde V é a velocidade [m/s], f é a frequência [Hertz] e λ é o comprimento de onda [m] (JAQUES, 2009).

Sobre a base dos modos de propagação das ondas, podem-se classificar como: ondas longitudinais, ondas transversais, ondas superficiais e ondas de Lamb.

2.4.1. Ondas Longitudinais

Também chamadas ondas de compressão, elas propagam no material como uma série de compressões e rarefações nas quais as partículas que transmitem a onda vibram nas mesmas

direções do deslocamento da onda Figura 3. As ondas longitudinais podem propagar em sólidos, líquido e gases (JAQUES, 2009).

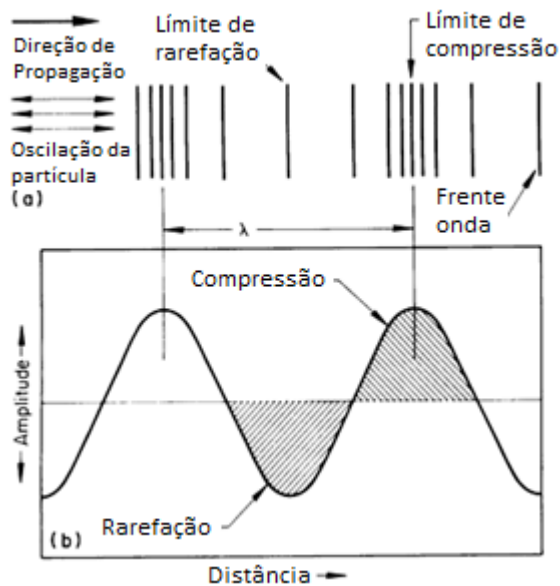


Figura 3. Esquema das ondas longitudinais, a) Oscilação de rarefação e compressão, b) Amplitude do deslocamento da partícula versus a distância de propagação (POLLOCK, 1989)

2.4.2. Ondas Transversais

Neste modo as partículas vibram de forma perpendicular a direção de propagação da onda, Figura 4. A diferença das ondas longitudinais, as ondas transversais não podem propagar em líquidos ou gases. A velocidade de propagação é 50% menor que a velocidade longitudinal para um mesmo material (JAQUES, 2009).

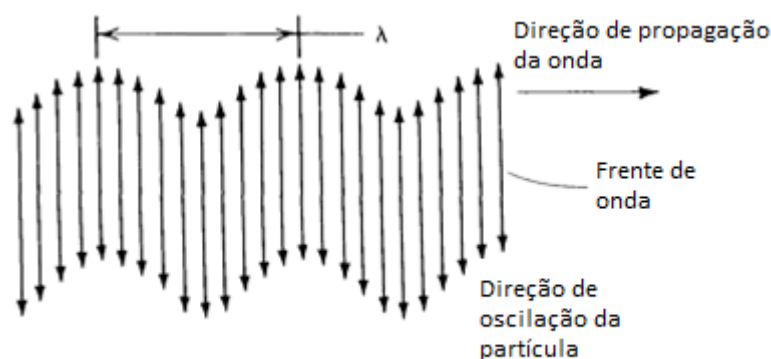


Figura 4. Esquema onda transversal, o comprimento de onda é a distância correspondente a um ciclo (POLLOCK, 1989)

2.4.3. Ondas Superficiais (Rayleigh)

É outro tipo de onda usada em inspeção de materiais. Estas podem propagar ao longo de superfícies planas e curvadas, ligadas por um lado por forças elásticas fortes de um material sólido e por outro lado por forças elásticas fracas, como moléculas de gás representado na Figura 5. A velocidade desse tipo de onda é aproximadamente 90% da velocidade de uma onda transversal no mesmo material (JAQUES, 2009).

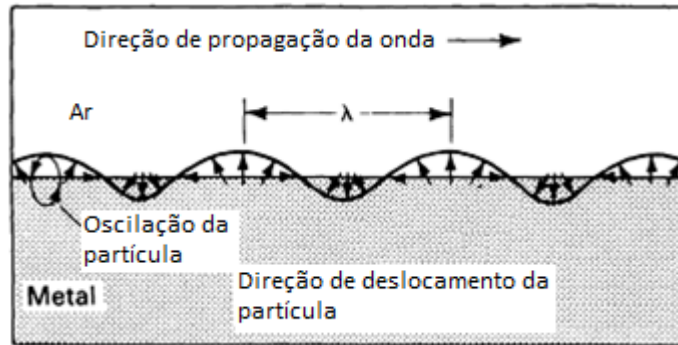


Figura 5. Esquema de uma onda de superfície propagando através de uma superfície metal/ar (POLLOCK, 1989)

2.4.4. Ondas de Lamb

Também conhecidas como ondas de chapa, são geradas por uma vibração complexa que ocorre através da espessura do material e suas características de propagação dependem de fatores como densidade, propriedades elásticas, geometria (espessura, diâmetro) e frequência (Figura 6). Uma complicação adicional das ondas de Lamb é que para uma determinada geometria, existem múltiplos modos que podem propagar. Teóricamente existem infinitos números de modos de propagação. Mas, para uma dada faixa de frequência contida num sinal capturado pelo sensor de EA, somente alguns poucos modos são detectados. A teoria aproximada da velocidade de propagação das ondas de Lamb desenvolve as equações que relacionam a dispersão de velocidade para os modos (PROSSER, 2001. Pg 387). Para o modo simétrico de menor ordem a teoria prediz que a velocidade não é dispersiva ou dependente da espessura da chapa e é dado por:

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (2)$$

Onde: E (Módulo de elasticidade), ρ (Densidade) e ν (Coeficiente de Poisson)

Para o Modo antisimétrico ou flexural a teoria estabelece a velocidade como:

$$v_f = \sqrt{\omega \sqrt{\frac{D}{\rho h}}} \quad (3)$$

Onde h é a espessura da chapa e D é o módulo de rigidez de flexão dado por:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4)$$

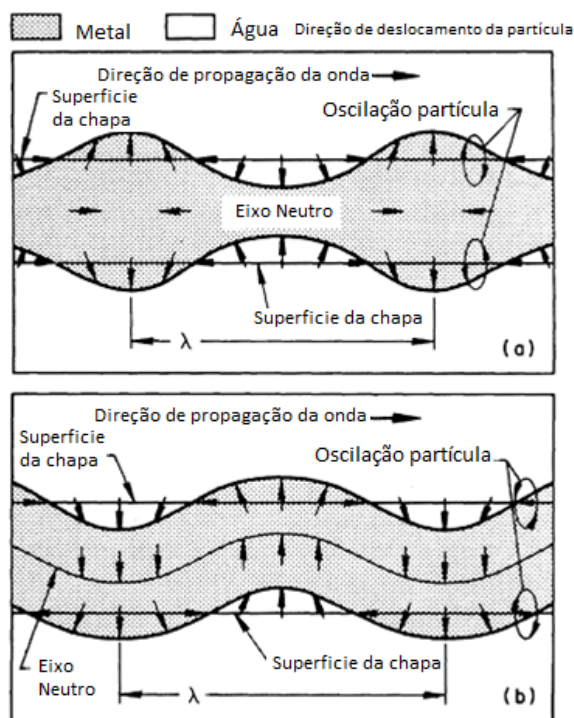


Figura 6. Diagrama dos padrões básicos das ondas de Lamb, a) extencional, b) flexural (POLLOCK, 2009)

A velocidade de propagação da onda acústica é um parâmetro importante no ensaio de emissão acústica, pois a utilização do seu valor correto permitirá a determinação precisa da localização da fonte do sinal de emissão acústica. Os valores de velocidade de propagação são característica de cada material (DAMASCENO SOARES, 2008)

Na Figura 7 observa-se um exemplo de sinal de EA, identificando os modos de propagação. Pwave indica o modo de propagação longitudinal, Swave indica o modo transversal e Rayleigh wave indica o modo de propagação superficial.

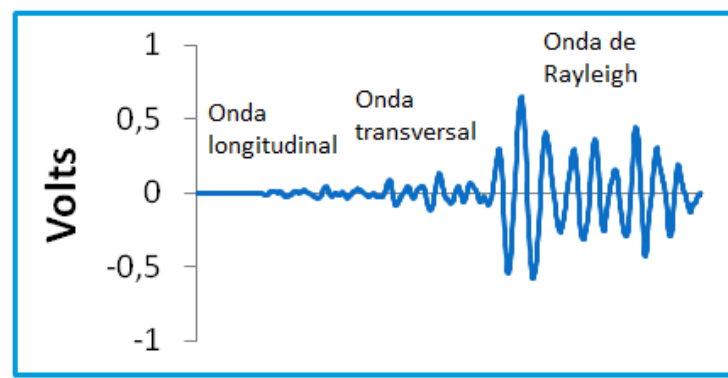


Figura 7. Modos de propagação num sinal de EA (MURAVIN, 2013)

2.5. Propagação de Ondas Acústicas em Chapas Planas de Pequena Espessura.

Quando o material ensaiado é uma chapa plana cujas dimensões de comprimento e largura são muito maiores do que a espessura, um tipo de propagação de onda tem principal atenção em emissão acústica e são as ondas de Lamb, onde as mesmas propagam em dois modos principais, modo extensional (deslocamento dentro do plano), e modo flexural (deslocamento fora do plano) representados na Figura 6. Ambos os modos são dispersivos, variam sua velocidade em função da frequência e a espessura da chapa. A Figura 8 apresenta as curvas de dispersão das velocidades de grupo dos modos extensional S e flexural A em função da frequência para uma chapa de aço de 5 mm de espessura. Na Figura 8 também é possível observar os modos de propagação de ordem superior A1, S1, etc. As curvas de dispersão mostradas na Figura 8, foram obtidas com um software desenvolvido por LOWE (1990), para estudar as ondas acústicas guiadas de LAMB em uma ampla gama de estruturas planas ou cilíndricas. O software permite traçar as curvas de dispersão de velocidade para vários tipos de materiais e geometrias predeterminadas e também pode-se configurar as propriedades de um material particular para traçar as curvas. Também é possível estabelecer um intervalo de frequências para o traçado das curvas. Usando essa ferramenta, é possível identificar e avaliar os possíveis modos de onda em uma estrutura para END ou outras aplicações.

As curvas de dispersão de velocidade de propagação podem ser usadas para melhorar a localização e caracterização de fontes de emissão acústica. Nos limites de frequência de emissão acústica 100kHz – 300kHz, para o caso da chapa de aço de 5mm de espessura, os principais modos de propagação são os modos fundamentais Ao e So.

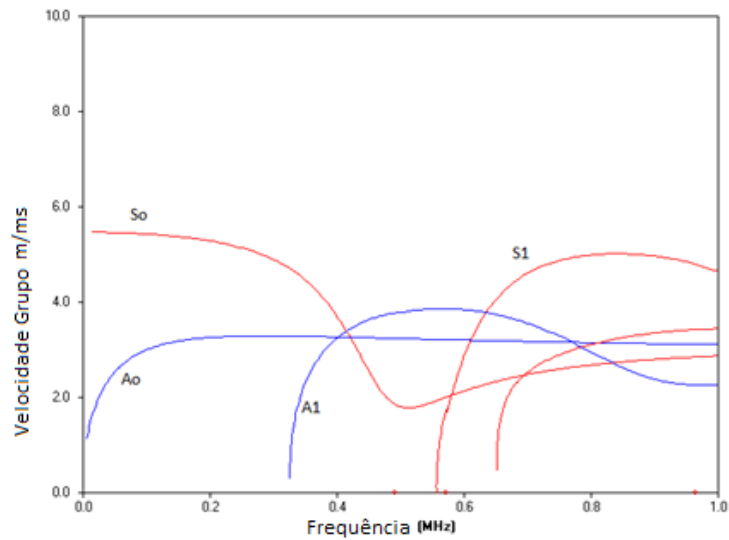


Figura 8. Velocidade propagação de grupo de ondas Lamb em função da frequência para uma chapa de aço de 5 mm espessura.

2.6. Atenuação

A atenuação é a perda de amplitude do sinal, devido a fatores geométricos e próprios do tipo de material. Os fatores que são responsáveis por esta perda de intensidade pode ser classificado como perdas por transmissão, perdas por interferência e perdas por espalhamento. Perdas por transmissão incluem absorção, dispersão e impedância acústica. As perdas por interferência incluem difração e outros efeitos como troca de fase ou troca de frequência. A atenuação governa a distância de detecção dos sensores, e é um fator importante na seleção da posição dos sensores e seu espaçamento (POLLOCK, 1989)

2.7. Sensores e Processamento de Sinais

Os sensores utilizados geralmente para detecção de sinais de emissão acústica são os sensores piezoelétricos, devido a sua facilidade de produção, além do baixo custo. A piezoelectricidade é um fenômeno que apresentam alguns materiais que quando são deformados geram uma tensão elétrica em seus extremos e quando aplicado um potencial elétrico se deforma. A frequência de ressonância de um sensor é identificada pela frequência onde ocorre a maior resposta em amplitude. A banda em frequência é a descrição da faixa porcentual da frequência de ressonância para uma resposta de até -3 dB (DAMASCENO SOARES, 2008).

Os sensores piezoelétricos muitas vezes possuem pré-amplificadores embutidos nos cabotes para compensar perdas nos cabos até os instrumentos de processamento. Outros tipos de sensores são: sensores ópticos, sensores eletromagnéticos e capacitivos (JAQUES, 2009)

Os sensores são acoplados na superfície da peça em estudo através de um acoplamento que pode ser um líquido ou uma pasta dependendo do tipo e modalidade de ensaio. Os meios de acoplamento mais usados na indústria são: graxas com base em silicone, óleos e colas. A fixação dos sensores é através de colas, fitas adesivas ou prendedores magnéticos, Estes devem ficar bem fixos para não inserir sinais adicionais de ruído que possam alterar as medições.

Os sinais emitidos pelas fontes de EA podem ser contínuos ou transientes, dependendo do tipo de evento ou falha que este se produzindo na peça. A forma dos sinais é importante, pois são eles o que trazem toda a informação do tipo de fonte e a localização.

2.7.1. Parâmetros do Sinal

POLLOCK (1989) determina os parâmetros de sinal que são importantes para o processamento e análise como:

- Amplitude de sinal de emissão acústica (A): O valor máximo de voltagem obtido pelo sinal de emissão acústica.

- Contagem de emissão acústica (n): É o número de vezes que o sinal de emissão acústica ultrapassa o limite de referência durante o ensaio.

- Limite de referência do sistema (Threshold): É o limite de referência do sistema eletrônico acima do qual os sinais serão detectados.

- MARSE (E): É a medida da área retificada do sinal de emissão acústica. E representa a energia do sinal.

- Duração do sinal (D): É o tempo que transcorre desde que o sinal cruza o limite (Threshold), até que o sinal atravessa por última vez o limite (Threshold). Na Figura 9 estão representados os parâmetros característicos de um sinal de emissão acústica típico.

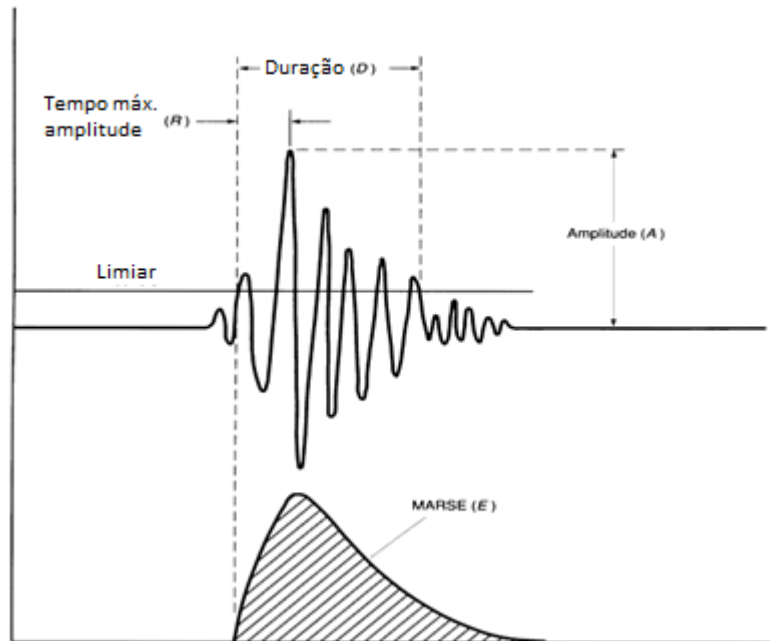


Figura 9. Parâmetros característicos de um sinal transiente característico de EA (POLLOCK, 1989)

2.8. Ruído em EA

Ruído é considerado como toda fonte de sinais indesejáveis que pode alterar ou até mascarar sinais de fontes reais de EA. Na indústria existem diversas fontes de ruídos que devem ser levados em conta na hora de realizar ensaios de EA.

Fontes de ruído podem ser vibrações de máquinas como bombas, turbinas, motores de combustão interna, etc. Também ocorrem fontes naturais de ruído como o vento, a chuva, ruídos de pessoas caminhando, etc.

Então, nesses ambientes com muitas fontes de ruído, os sinais indesejados detectados pelos sensores de EA, devem ser tratados em forma especial a fim de removê-los de maneira de não produzir alterações nos resultados.

Problemas com ruído podem ser vencidos de diferentes maneiras. Para os casos em que o ruído tenha uma faixa de frequência característica, pode-se fazer o uso de filtros do tipo passa alta ou passa baixa. No entanto, existem ruídos que se distribuem sobre uma larga faixa de frequência, que acaba dificultando esse tipo de solução. Em certos casos será possível eliminar o ruído na própria fonte, isso inclui proteger a estrutura da chuva ou vento e/ou colocando amortecedores no caso de estruturas que vibram.

O ruído elétrico pode ser vencido através do uso de aterramento, isolamento de cabos, e utilização de sensores diferenciais ou sensores com pré-amplificadores integrados. A utilização de um limiar de detecção mais alto é uma possibilidade, mas deve-se fazer uma avaliação de quantos dados não serão adquiridos e se o aumento do limiar não causa excessiva perda de informação (JAQUES, 2009)

2.9.Vantagens e Limitações do Método de EA

As principais vantagens do ensaio de EA são as seguintes: pode ser usado em todos os estágios do ensaio: em serviço, monitoramento em linha, menor intrusividade, monitoramento global, avaliação em tempo real.

Limitação: repetibilidade, atenuação, ruído.

2.10. Localização de fontes de EA

A localização de fontes é uma das principais metodologias de END utilizadas em pesquisas de laboratório ou ensaios em membros estruturais na indústria. É particularmente significativa em ensaios de grandes estruturas (POLLOCK, 1989).

A capacidade de localizar a fonte de emissão e seu potencial de dano, é uma das questões mais importantes da EA. Mesmo que o mecanismo exato do origem ou a sua criticidade não possam ser determinadas a partir do análise de EA, a localização pode ser utilizada para orientar inspeções não destrutivas em combinação com outras técnicas alternativas. Ao fazê-lo, a inspeção inicial com EA pode eliminar a necessidade de inspecionar grande parte da estrutura com o demorado e caro, método ponto por ponto das técnicas de END (PROSSER, 2001).

O análise de localização é baseado na captura de sinais de EA a partir da mesma fonte em vários sensores arranjados na peça em estudo. Os tempos de chegada desses sinais nos diferentes sensores é utilizado juntamente com o conhecimento da velocidade de propagação das ondas acústicas para a localização. Em geral, os métodos de localização para o análise de EA pode ser dividido em duas categorias, zonal e pontual (PROSSER, 2001)

Localização zonal.

Como seu nome indica, a localização zonal não identifica a posição exata da fonte, mas define a mesma dentro de uma zona ou região definida em torno de um ou mais sensores. O Método da Zona é frequentemente utilizado em situações em que a localização pontual não é possível ou não produz resultados confiáveis. Um exemplo desta situação é quando os transdutores estão muito espaçados ou quando o material apresenta uma atenuação muito elevada, que não permite que os sinais sejam detectados por um número suficiente de sensores. A localização pontual também pode ser de difícil utilização quando a estrutura permite vários modos de propagação de onda com diferentes velocidades. A localização zonal também é usada frequentemente para materiais anisotrópicos, onde o conhecimento exato da variação da velocidade com a direção seriam necessários para localização pontual. Para matrizes de sensores unidimensionais ou lineares, a zona é definida como uma dimensão de cada lado de um sensor. Para matrizes de sensores bidimensionais ou planares, a zona é uma área, para matrizes de sensores tridimensionais, a zona é um volume, consecutivamente. Quando o sinal é detectado através de um único sensor da matriz, a fonte é assumida que será localizada no interior da região em torno do sensor de tal forma que a fonte não está mais longe do que o ponto médio entre os dois sensores. Esta situação é ilustrada na Figura 10 para uma matriz de sensores planares. Se o sinal for detectado por mais de um sensor, a informação adicional, como os tempos de chegada ou amplitudes dos diferentes sensores podem ser utilizados para refinar mais a região (PROSSER, 2001).

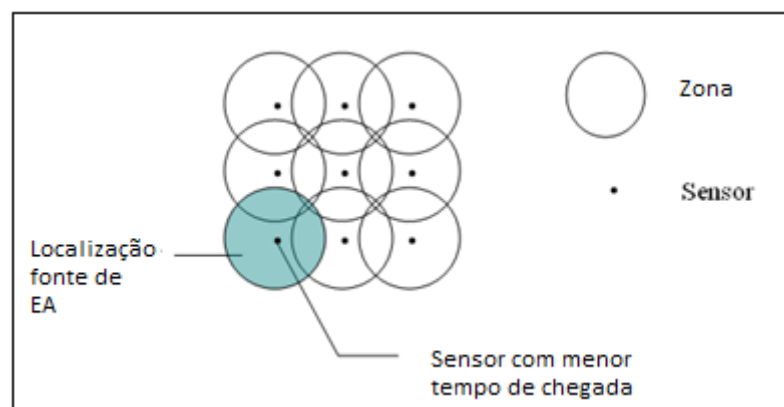


Figura 10. Método da zona para localização de fontes de EA (MURAVIN, 2013)

Localização pontual.

Uma série de critérios devem ser satisfeitos para permitir a localização pontual. Em primeiro lugar, o sinal deve ser detectado para um número suficiente de sensores. Para a localização linear ao longo de uma matriz de sensores unidimensional, o sinal deve ser detectado por pelo menos dois sensores. O número mínimo de sensores é três para a localização planar e quatro para a localização volumétrica ou tridimensional. Se o sinal é detectado por mais sensores do que o mínimo exigido, outras técnicas de otimização podem melhorar a precisão da localização pontual. Em adição à detecção de um número mínimo de sensores, é necessária uma medida exata do tempo de chegada para o mesmo modo de propagação, em cada sensor. As técnicas mais frequentemente utilizadas para o registro do tempo de chegada é a do primeiro cruzamento do sinal no limiar (First threshold crossing); ou a técnica que utiliza o tempo em que a amplitude de pico ocorre. Outra condição necessária para a localização pontual é um conhecimento preciso da velocidade de propagação das ondas acústicas no material. Por fim, são necessárias medições precisas das posições dos sensores. O caso mais fácil a considerar é a localização linear ao longo de uma matriz unidimensional de sensores. Tal matriz de sensores pode ser utilizada para monitorizar uma haste ou tubo. Por esse caso, a fonte é assumida para ser localizada entre dois sensores, conforme ilustrado em Figura 11 para o caso da localização linear ao longo de um tubo. A distância entre a fonte e o sensor mais próximo é definida como d , enquanto que a distância entre os sensores é D . Se v é a velocidade do modo de propagação cujo tempo de chegada é medido em ambos os sensores, o tempo necessário para que o sinal chegue para o sensor mais próximo é dada por:

$$t_1 = \frac{d}{v} \quad (5)$$

No entanto o tempo quando ocorre a emissão acústica não é conhecido, então é necessário o tempo de chegada de um segundo sensor. O tempo de propagação do segundo sensor é:

$$t_2 = \frac{(D-d)}{v} \quad (6)$$

A diferença no tempo de chegada Δt , é calculado como:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{(D-d)}{v} - \frac{d}{v} \quad (7)$$

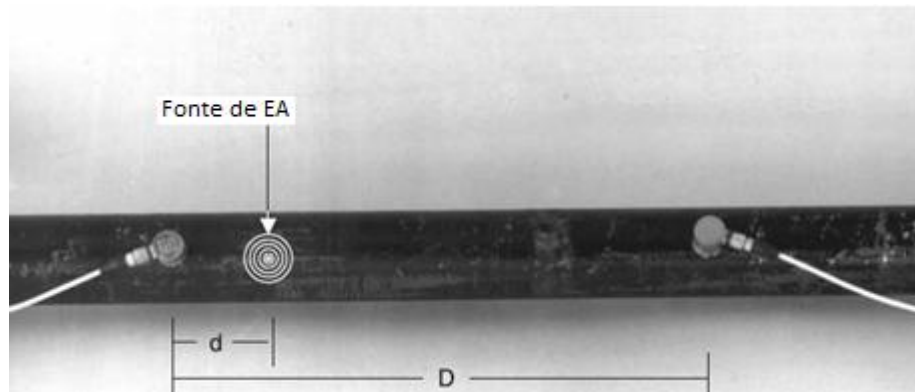


Figura 11. Localização linear de fontes de emissão acústica (PROSSER, 2001)

Onde pode ser escrito como

$$\Delta t = \frac{D-2d}{v} \quad (8)$$

Resolvendo a expressão para d

$$d = \frac{D-\Delta t v}{2} \quad (9)$$

Note-se que se a fonte não está localizada na região entre os dois sensores, a solução não é única. Se assim for, o ΔT medido será o mesmo valor, independentemente da distância da fonte (PROSSER, 2001)

2.11. Localização Planar de Fontes de Emissão Acústica

O cálculo de localização é baseado no tempo de chegada do sinal de EA que propaga da fonte até os diferentes sensores arranjados na peça em ensaio. As ondas de EA propagam em forma de círculos concêntricos a partir da fonte e chegam aos sensores a diferentes tempos. Este tempo de retardo entre cada sensor é proporcional à distância entre a fonte e os sensores (MIX, 2005)

Na Figura 12 observa-se uma onda propagando a partir de uma fonte ativa F, a mesma propaga em forma esférica ao redor da fonte atingindo primeiro ao sensor 1 logo depois ao

sensor 2 e finalmente ao sensor 3. O primeiro sinal ocorre no sensor 1 no tempo $r1/c$ após o evento da fonte, onde r é a distância entre o sensor e a fonte, e c é a velocidade de propagação da onda. Observe-se que o equipamento de aquisição não tem conhecimento direto da hora do evento da fonte de EA, só é possível medir os tempos de entrada nos sensores, mais a partir das diferenças entre os tempos de chegada a cada um dos sensores é possível calcular a localização e a hora do evento (HELLIER, 2003)

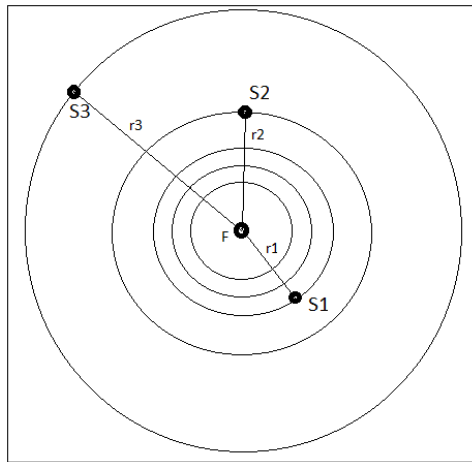


Figura 12. Princípio básico de localização planar em EA (MIX, 2005)

2.11.1. Técnicas de Análise de Localização

As principais técnicas de análise de localização planar de fontes desenvolvidas para as diferentes formas de tratamento de sinais para o cálculo do tempo de chegada e velocidade de propagação estão resumidas na Figura 13.

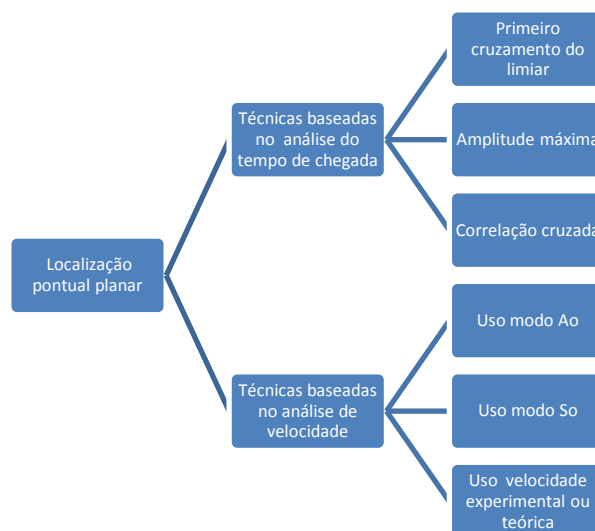


Figura 13. Técnicas de análise de localização planar de fontes de EA.

2.11.2. Diferença no Tempo de Chegada TDOA

O método do TDOA localiza a fonte por cálculo geométrico baseado sobre um grupo de diferenças no tempo dos sinais detectados por os diferentes sensores arranjados na peça, exemplo: Dado um arranjo de sensores dispostos numa placa em forma arbitrária, Figura 14.

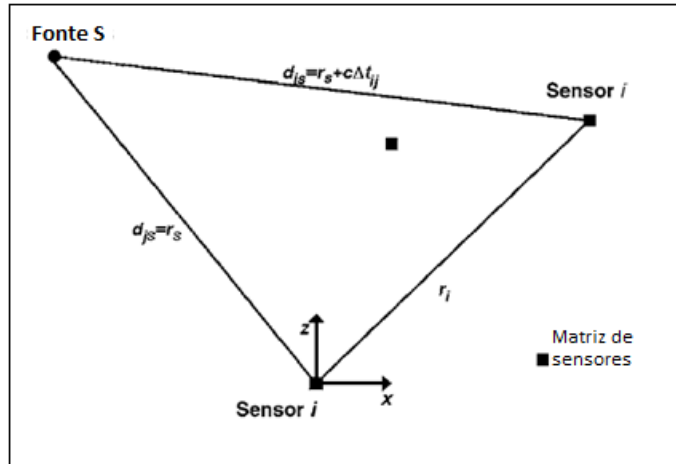


Figura 14. Disposição no plano de sensores e fonte S de EA (SPENCER, 2007)

A diferença no tempo de chegada t_{ij} de um sinal gerado por uma fonte pontual S, e detectado pelo sensor i e j, na suposição de propagação circular da onda e velocidade constante, e sem erros no registro do sinal de chegada pode ser escrito como:

$$c\Delta t_{ij} = d_{is} - d_{js}, \quad i, j = 1, N. \quad (10)$$

Onde c é a velocidade de propagação da onda no meio, d_{is} e d_{js} são as distâncias entre a fonte e os sensores i e j respectivamente, e N é o número de sensores. Expressando as distâncias na equação (10) em coordenadas cartesianas:

$$d_{is}^2 = \sum_{k=1}^K (x_{ki} - x_{ks})^2. \quad (11)$$

Onde K é o número de dimensões espaciais associadas com a propagação do sinal e x_{ki} e x_{ks} , são as distâncias direcionais cartesianas da origem do sistema cartesiano ao sensor i e a fonte S, respectivamente. O problema na localização de fontes é a determinação do x_{ks} dado t_{ij} , a velocidade de propagação do sinal e a posição dos sensores (SPENCER, 2007).

2.11.3. Sistema de Equações não Lineares para Localização com o TDOA no Plano com Três Sensores.

Para o problema de localização no plano utilizando o TDOA. Com a informação dos tempos de chegada a cada um dos três sensores, as posições dos sensores e a velocidade de propagação da onda acústica, as equações 10 e 11 podem ser combinadas e escritas num sistema cartesiano de coordenadas como um sistema de equações não lineares. Ex.

$$c\Delta t_{12} = \sqrt{(x_1 - x_S)^2 + (z_1 - z_S)^2} - \sqrt{(x_2 - x_S)^2 + (z_2 - z_S)^2} \quad (12)$$

$$c\Delta t_{13} = \sqrt{(x_1 - x_S)^2 + (z_1 - z_S)^2} - \sqrt{(x_3 - x_S)^2 + (z_3 - z_S)^2}. \quad (13)$$

As diferenças nos tempos de chegada entre cada par de sensores e definida como:

$$\Delta t_{12} = t_1 - t_2; \quad \Delta t_{13} = t_1 - t_3. \quad (14)$$

A condição de consistência para as diferenças no tempo de chegada é:

$$\Delta t_{23} = \Delta t_{13} - \Delta t_{12}. \quad (15)$$

Onde t_1 , t_2 e t_3 são os tempos de chegada ao sensor 1, 2 e 3 respectivamente. Os pares (x_1, z_1) , (x_2, z_2) , (x_3, z_3) , e (x_S, z_S) , são as coordenadas cartesianas dos sensores 1, 2 e 3, e a fonte S respectivamente (SPENCER, 2010)

Na utilização do TDOA para a localização planar obtém-se um sistema de equações não lineares, equações 12 e 13, cuja solução são as coordenadas $[x_S, z_S]$ de localização da fonte de EA. As equações 12 e 13 definem a equação de uma hipérbole onde a solução do sistema é o ponto de interseção entre ambas curvas.

2.12. Técnicas de Localização Utilizando TDOA com Três e Quatro Sensores

Os primeiros trabalhos de localização planar de fontes de EA com três sensores numa configuração arbitrária foram atribuídos a TOBIAS 1976, onde ele utiliza a diferença de tempo de chegada entre sensores (TDOA), estabelecendo um sistema de equações cuja solução define um ponto de intersecção entre duas hipérboles definindo a coordenada de localização da fonte. A solução do sistema de equações é resolvida através de um método

iterativo. No seu trabalho TOBIAS, verifica que numa certa quantidade de casos a configuração com três sensores obtêm soluções ambíguas, ou seja, que se podem determinar duas soluções para o ponto de intersecção das hipérbolas. Numa avaliação mais extensa identifica-se que os pontos que produzem soluções ambíguas estão próximo aos sensores.

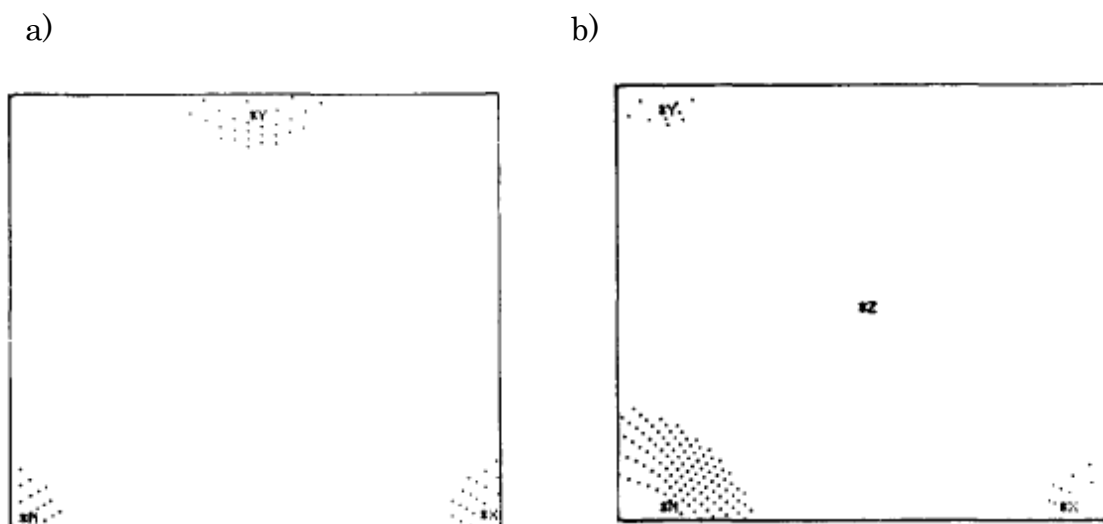


Figura 15. Pontos que produzem soluções ambíguas numa configuração com três sensores a) Sensores dispostos em triângulo equilátero b) sensores dispostos em triângulo reto. (TOBIAS, 1976)

A adição de um quarto sensor ao sistema permite eliminar esses pontos onde a solução não é única, gerando um sistema de equações sobre-determinado. Estes problemas de soluções ambíguas no caso de três sensores geralmente é devido ao fato que fontes próximas aos sensores acusam um delta T muito semelhante entre dois sensores, por exemplo, para uma disposição de sensores em triângulo equilátero Figura 15 a. Observam-se os pontos que geram duas soluções. Na Figura 15 b. observam-se os pontos de soluções ambíguas para o caso de sensores dispostos em triângulo reto.

ASTY (1978) Utilizando o TDOA com vários sensores desenvolveu um método matemático a partir das equações obtidas por TOBIAS, utilizando um sistema de coordenadas polares que permite a localização de fontes em superfícies esféricas como vasos de pressão e tubulações, e se o raio de curvatura tende ao infinito pode ser aplicado a superfícies planas.

CASTAGNEDE et al. (1989) Utiliza o método do TDOA para localização de fontes em chapas planas de material anisotrópico, ele propõe uma configuração com vários sensores, onde o sistema de equações não linear fica com uma sobre determinação, produzindo assim um menor tempo computacional na solução das equações com o método de minimização.

ZIOLA e GORMAN (1991) Apresentam um método alternativo para localização planar em meios dispersivos onde a técnica do first threshold crossing, não é adequada, devido à mudança na velocidade nas diferentes direções do material, e utiliza o método de correlação cruzada (Cross-Correlation). A idéia de isto é que, se uma só frequência do sinal de entrada em cada transdutor pode ser isolada, então as diferenças de tempo devidas à propagação daquele componente de frequência podem ser usadas para o análise de localização. A velocidade de essa componente de frequência pode ser calculada em forma experimental ou teórica.

CHAN e HO (1994) Desenvolveram a solução matemática para um sistema de “n” sensores dispostos em “forma linear e arbitrária” para a localização de fontes de EA baseados em TDOA onde a solução do sistema com o método de minimização de quadrados é alcançada só com dois estágios de iteração.

SPENCER (2007) Faz uma ampliação do trabalho de Tobias, onde avalia a localização de fontes de EA em duas dimensões, utilizando o TDOA com a mínima quantidade de sensores necessários, encontrando as soluções do sistema de equações não lineares com o método de mínimos quadrados, baseado na assunção que a propagação de velocidade é constante e caracterizando as áreas onde ocorrem soluções duais Figura 16. SPENCER (2007) obtém que as soluções duais para o problema de três sensores são associadas com uma pequena gama de diferenças de tempo de chegada, mas grandes regiões no espaço físico. Estas soluções duais tem sido demonstradas que podem ocorrer tanto dentro como fora do plano gerado pelos três sensores, embora geralmente o problema ocorra para diferenças de tempo associadas com fontes externas à área formada pelos sensores. Para o caso de única solução na localização planar é em todos os casos obtida com o uso de quatro sensores dispostos em forma não colineares. A Figura 17. Mostra que para o caso de quatro sensores não aparecem zonas que apresentem soluções ambíguas.

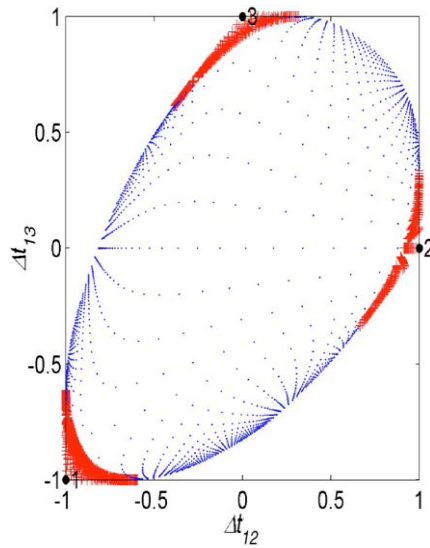


Figura 16. Localização planar com 3 sensores, zonas com soluções ambíguas (SPENCER, 2007)

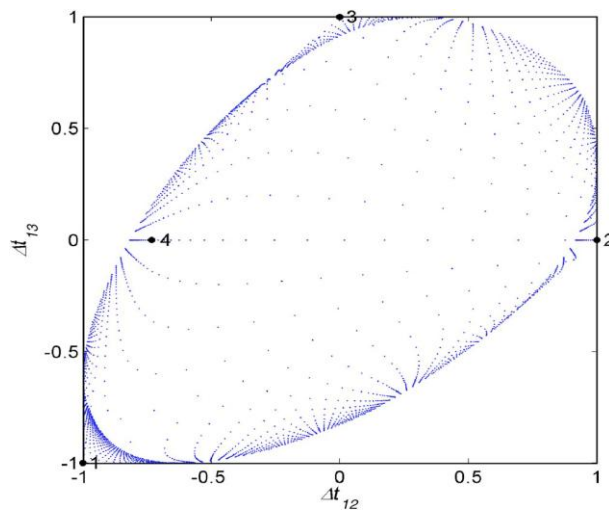


Figura 17. Localização planar com 4 sensores, não apresenta zonas com solução ambígua (SPENCER, 2007)

2.13. Algoritmos de Localização Baseados no TDOA

Um algoritmo é uma sequência finita de instruções bem definidas e não ambíguas, cada uma das quais pode ser executada mecanicamente num período de tempo finito e com uma quantidade de esforço finita. O conceito de algoritmo é frequentemente ilustrado pelo exemplo de uma receita culinária. Eles podem repetir passos (fazer iterações) ou necessitar de decisões (tais como comparações ou lógica) até que a tarefa seja completada (CRUZ, 2013) No estudo de algoritmos de localização estão referidos a uma sequência de passos ou processos para a resolução numérica ou analítica das equações de diferença de tempo, a partir

de uma serie de dados de entrada como as posições dos sensores, tempo de entrada do sinal nos sensores, velocidade propagação ondas acústicas, etc. No seguinte apartado vamos a introducir algunos algoritmos de localização de fontes maiormente encontrados na literatura utilizando o método do TDOA.

2.13.1. Método do Delta T

BAXTER et al. (2006) Desenvolveram o método Delta T para localização de fontes em superfícies complexas onde o método não requer as coordenadas de posicionamento dos sensores nem a velocidade de propagação do sinal. Ele e baseado na geração de uma malha sobre a peça em estudo onde cada nó representa uma fonte artificial que é medida experimentalmente, assim gerando uma matriz de diferença de tempos de chegada para cada um dos sensores, gerando assim curvas de igual Delta T, que logo dado um evento de EA, é obtida à diferença de tempo do mesmo e pode-se sobrepor a essas curvas obtidas anteriormente para cada par de sensores e determinar um ponto de intersecção da hipérbole, onde define a posição da fonte. Esta metodologia propõe cinco passos para o desenvolvimento da técnica de localização:

- 1-Determinação da área de interesse,
- 2-Construção da malha,
- 3-Obtenção tempos chegada mediante quebra de grafite,
- 4-Calculo do mapa delta T
- 5-Comparação com dados reais.

Na Figura 18. Podem-se observar as curvas das hipérbolas da matriz de fontes artificiais gerada e superposta a curva de igual delta T para uma fonte simulada.

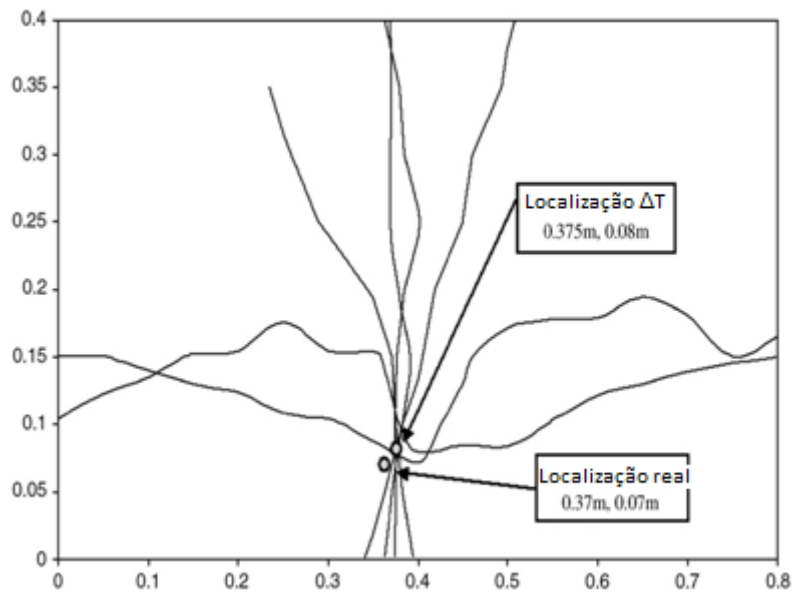


Figura 18. Curvas das hipérboles geradas artificialmente em cada nó da malha, e a hipérbole de uma fonte simulada para a localização com o método do delta T (BAXTER, 2006)

2.13.2. Método da Matriz ou The Best Matched Point

J. SCHOLEY et al. (2008) Desenvolveram uma técnica genérica para localização de fontes de EA denominada The Best-Matched Point (Melhor ponto de concordância), cuja técnica permite operar sobre estruturas com complicados padrões de velocidades de grupo como apresentam os materiais anisotrópicos ou materiais de geometrias complicadas que gerem múltiplas reflexões na propagação da onda. O método Best-matched point, é um simples método numérico para determinação da localização de fontes em uma, duas ou três dimensões. O método se divide em dois estágios: O primeiro é a geração de pontos e o segundo e a concordância de pontos. Na geração de pontos a geometria do espécime é representada por uma matriz de pontos. Para cada ponto e calculado a distância e ângulo relativo a cada posição do sensor. O tempo ideal de propagação da onda, do ponto a cada sensor é calculado usando a expressão:

$$t = D/V_{gr} \quad (16)$$

Onde D é a distancia entre o ponto e o sensor, e V_{gr} e a velocidade de grupo a uma determinada frequência.

A diferença no tempo de chegada entre dois sensores logo é calculada para cada ponto da matriz gerada. Cada ponto possui uma única combinação de valores de delta T que corresponde a uma localização sobre o espécime. A matriz de delta T só necessita ser compilada uma vez para qualquer configuração de espécime - sensor dado.

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j \quad i > j \quad (17)$$

Onde t é o tempo de propagação ideal de um ponto ao sensor e os subscritos denotam as diferentes posições dos sensores. O numero de valores de delta T independentes N , para um dado numero de sensores S é dado por:

$$N = \frac{(s^2 - s)}{2} \quad (18)$$

No estagio de concordância do ponto, a matriz de delta T gerada busca o melhor ponto de concordância para um delta T medido experimentalmente ou real (defeito ativo), definido como:

$$\min \sum (\Delta t_{ij}^{\text{exp}} - \Delta t_{ij})^2 \quad (19)$$

Logo o melhor ponto de concordância da matriz de delta T corresponde à coordenada de localização da fonte sobre o espécime. (Figura 19 e Figura 20).

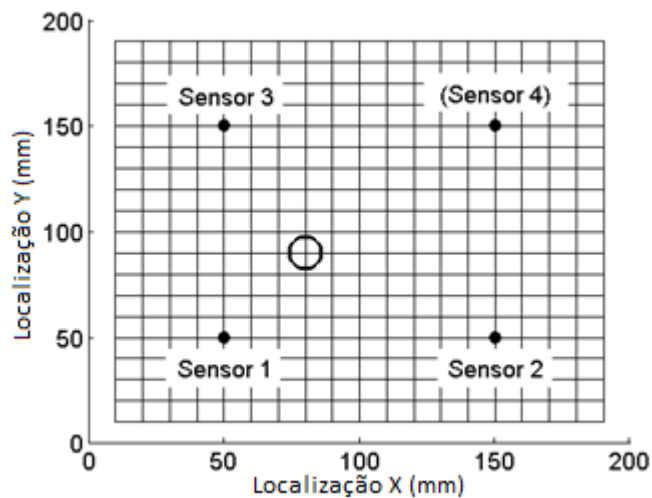


Figura 19. Matriz de pontos e posição dos sensores sobre o espécime de ensaio (SCHOLEY, 2008)

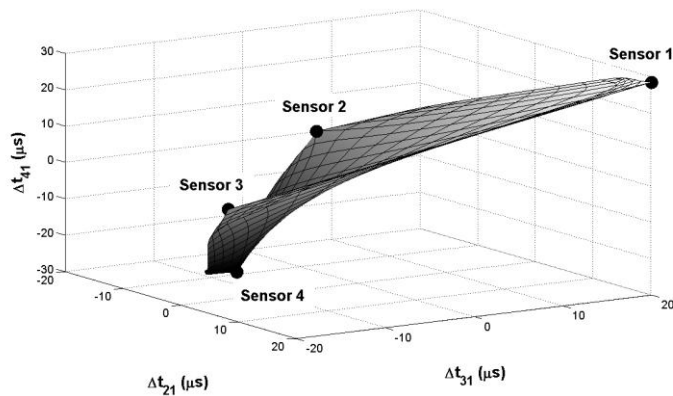


Figura 20. Matriz de delta T tridimensional (SCHOLEY, 2008)

2.13.3. Método Três Sensores (disposição linear)

ZHANG et al. (2010) Apresenta um método de localização planar baseado no método do TDOA, com três sensores arranjados numa disposição linear. Permitindo um arranjo de sensores de fácil e simples montagem. Dando assim formulas de cálculos concisos e fáceis. Também é possível a aplicação deste método em lugares onde devido à geometria da peça ou disposição da mesma não permitem a colocação dos sensores em toda a área do plano.

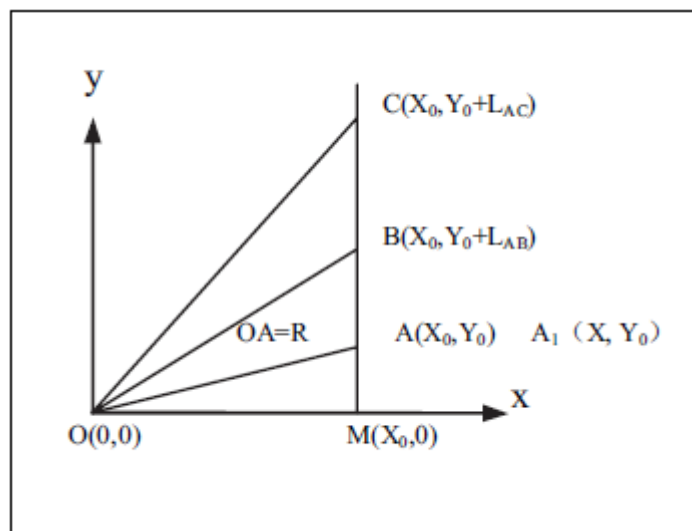


Figura 21. Disposição linear de sensores, método com 3 sensores (ZHANG, 2010)

A figura 21, apresenta o arranjo dos três transdutores A, B, C e a fonte de EA na origem do sistema de coordenadas O. Onde as coordenadas para os transdutores são: A (X_0, Y_0) , B $(X_0, Y_0 + L_{AB})$, C $(X_0, Y_0 + L_{AC})$, onde $OA=R$, $OB=R+L_{AB}$, $OC=R+L_{AC}$. A diferença de tempo

de chegada do sinal na posição dos sensores B e C relativas a posição do transdutor A são: T_{ab} e T_{ac} respectivamente. Se o sinal de EA propaga na velocidade V (Calculado experimentalmente), então $R_{ab}=V.T_{ab}$ e $R_{ac}=V.T_{ac}$. Se $M(X_0,0)$ é o ponto de intersecção com a linha AC e o eixo X, os triângulos MOA, MOB, MOC são retângulos e por tanto:

$$\begin{cases} R^2 = X_0^2 + Y_0^2 & (20) \\ (R + R_{AB})^2 = X_0^2 + (Y_0 + L_{AB})^2 & (21) \\ (R + R_{AC})^2 = X_0^2 + (Y_0 + L_{AC})^2 & (22) \end{cases}$$

Subtraindo de (20) de (21) e (22) respectivamente,

$$\begin{cases} 2R_{AB}R - 2L_{AB}Y_0 = L_{AB}^2 - R_{AB}^2 & (23) \\ 2R_{AC}R - 2L_{AC}Y_0 = L_{AC}^2 - R_{AC}^2 & (24) \end{cases}$$

Resolvendo (23) e (24) para R e Y_0

$$\begin{cases} R = \frac{L_{AB}(L_{AC}^2 - R_{AC}^2) - L_{AC}(L_{AB}^2 - R_{AB}^2)}{2(L_{AB}R_{AC} - L_{AC}R_{AB})} & (25) \\ Y_0 = \frac{R_{AB}(L_{AC}^2 - R_{AC}^2) - R_{AC}(L_{AB}^2 - R_{AB}^2)}{2(L_{AB}R_{AC} - L_{AC}R_{AB})} & (26) \end{cases}$$

Aplicando (25) e (26) em (20)

$$X_0 = \pm \frac{\sqrt{(L_{AC}^2 - R_{AC}^2)(L_{AB}^2 - R_{AB}^2)[(L_{AC} - L_{AB})^2 - (R_{AC} - R_{AB})^2]}}{2(L_{AB}R_{AC} - L_{AC}R_{AB})} \quad (27)$$

Assim a fonte de EA pode ser exatamente obtida usando qualquer dois grupos de dados de X_0 , Y_0 e R.

Agora aqui tem uma questão que é importante, que é a posição relativa da fonte respeito a linha AC. A fonte poderia estar de um lado ou outro da linha AC. Mais com a adição de um sensor direcional de um ou outro lado da linha de transdutores o problema pode ser resolvido.

Como conclusão, o mérito para o método proposto para TDOA é:

A geometria do arranjo dos transdutores é simples; As formulas para resolução da locação da fonte de EA são concisas; O método pode ser aplicado em outros problemas de localização mais é adequado para superfícies planas.

Em contraposição se a posição da fonte estiver localizada numa distância muito grande X_0 comparada com a distância AC, da linha de transdutores, a diferença no tempo de chegada dos sinais entre os transdutores A, B e C serão muito pequenas havendo possibilidade de erro, para salvar isso o espaçamento dos sensores deve aumentar sobre a linha AC assim que a distância da fonte seja maior. O que vai depender das dimensões da peça em estudo.

2.13.4. Metodo Iterativo

O método iterativo é baseado na solução do sistema de equações obtidas a partir do TDOA, suposta uma fonte de defeito qualquer num sistema cartesiano para um caso de quatro sensores dispostos de forma não colinear, utilizando a aproximação de mínimos quadrados para equações não lineares (HELLIER, 2003)

Para o método TDOA para localização de fontes de EA no plano com a informação dos tempos de chegada dos sensores, as coordenadas de posição dos sensores e o valor da velocidade de propagação da onda acústica as equações podem ser escritas como:

Para quatro sensores:

$$v\Delta T_{21} = \sqrt{((x - x_2)^2 + (y - y_2)^2)} - \sqrt{((x - x_1)^2 + (y - y_1)^2)} \quad (28)$$

$$v\Delta T_{31} = \sqrt{((x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2)} - \sqrt{((x - x_1)^2 + (y - y_1)^2)} \quad (29)$$

$$v\Delta T_{41} = \sqrt{((x_4 - x)^2 + (y - y_4)^2)} - \sqrt{((x - x_1)^2 + (y - y_1)^2)} \quad (30)$$

As diferenças no tempo de chegada são definidas por

$$\Delta T_{21}=t_2-t_1; \Delta T_{31}=t_3-t_1; \Delta T_{41}=t_4-t_1; \quad (31)$$

Onde t_1, t_2, t_3 e t_4 são os valores conhecidos experimentalmente dos tempos de chegada aos sensores 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Os pares $(x_1,y_1), (x_2,y_2), (x_3, y_4), (x_4,y_4)$ são as coordenadas dos sensores 1, 2, 3, 4 e a coordenada (x,y) é a fonte de defeito simulada.

Este sistema de equações pode ser resolvido através da aplicação de um esquema iterativo utilizando a rotina “lsqnonlin” no toolbox de otimização do MATLAB (2010). Obtendo assim as coordenadas (x,y), da posição da fonte.

2.14. Velocidade de Propagação e Localização

A velocidade é um fator adicional a ser considerado quando o sistema de EA é utilizado na localização de fontes. Devido a que valores de velocidade incorretos podem levar a erros nas coordenadas de localização. A velocidade real pode ser estabelecida experimentalmente com e sem a consideração dos diferentes modos de propagação das ondas. Quando não se considera a separação de modos na avaliação da velocidade, o erro na localização pode ser considerável, no entorno de 10% no caso de localização linear. No caso de detecção e separação dos diferentes modos de propagação, a avaliação de velocidade pode resultar numa melhor exatidão na localização. Em contrapartida a detecção e separação de modos levam a um custo computacional elevado e pouca exatidão no caso de geometrias complexas ou baixo ambientes com elevado ruído (MURAVIN,2012).

A exatidão na localização é limitada principalmente por a velocidade de propagação da onda mais que por características matemáticas. A maioria das técnicas assume que a onda se propaga diretamente da fonte ao sensor com uma velocidade definida. Em tanto na prática, reflexões, múltiplos modos de onda e outros efeitos na propagação produzem incertezas na velocidade real (HELLIER, 2003).

2.14.1. Análise da Forma de Onda

As características da forma de onda de uma emissão acústica fornece mais informações do que o monitoramento de “atividade”, a forma completa do sinal de EA permite mais detalhes a serem analisados. O análise da forma de onda pode ser utilizado para proporcionar mais precisão na localização, uma análise quantitativa da fonte e uma maior discriminação do ruído (PROSSER, 2001).

Análise Modal. Uma abordagem alternativa, conhecida como análise modal, tem sido desenvolvida, onde a mesma analisa os modos de propagação produzidos por fontes de EA. Embora a geometria estrutural determina os modos acústicos de propagação que podem

ocorrer, o tipo, localização e orientação da fonte tem uma influência significativa sobre a amplitude dos modos contidos num sinal. Isso é ilustrado pelas formas de onda mostradas na Figura 22 e 23. Estes sinais foram gerados por fontes de EA simulados (Quebra do grafite) numa placa de alumínio fino. Na Figura 22, a fonte simulada através da quebra do grafite ocorreu na superfície da placa. Ambos os modos de propagação de Lamb, extensionais e flexurais são produzidos e são identificadas na presente forma de onda. No entanto, a amplitude do modo flexural é muito maior devido à seu maior movimento fora do plano. Na Figura 23, a fonte simulada foi justamente posicionada ao longo da borda da placa no plano médio. Esta fonte produz um deslocamento dentro do plano, com uma grande componente de modo extensional e pouco modo flexural (PROSSER, 2001).

Uma dificuldade na implementação da análise modal em EA, é a falta de métodos automatizados para analisar os modos contidos num sinal. Em alguns casos, os diferentes modos são compostos de componentes de frequência diferentes, tais como os modos de Lamb mostrados na Figura 22. Neste caso, uma simples análise de frequência e de filtragem pode ser utilizada para identificar os diferentes modos. Para casos mais complicados, onde os modos contêm sobreposição de conteúdo de frequência, outras técnicas mais avançadas de processamento de sinal estão sendo investigadas. Estes incluem métodos de tempo-frequência, tais como a transformada curta de Fourier, wavelets, etc (PROSSER, 2001).

ALJETS et al. (2010) Desenvolveu uma configuração com três sensores para a localização em chapas de grandes extensões de material anisotrópico, cujos sensores estão dispostos em forma triangular separados por poucos centímetros, o algoritmo localiza fontes de EA determinando a direção de propagação da onda usando TDOA, e a distância que a onda há viajado usando a separação de modos de propagação através da transformada Wavelet de Gabor. Nesta técnica de detecção dos modos de propagação da onda, foi escolhida uma frequência onde ambos os modos estão presentes. Em geral ambos os modos S_0 e A_0 , são gerados no mesmo tempo e são separados devido a sua diferente velocidade, isto é possível observar, se a separação tanto da fonte como do sensor é considerável. Se a distância não é suficiente, os modos vão estar superpostos no sinal. Devido às características dos materiais anisotrópicos, o modo de propagação S_0 apresenta uma variação na sua velocidade em função da direção.

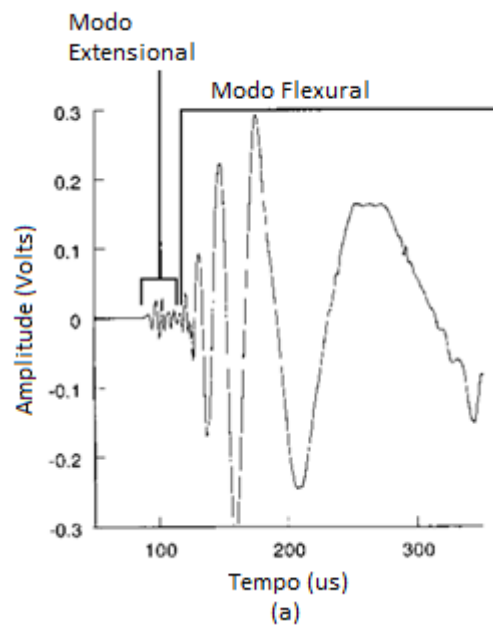


Figura 22. Forma de onda mostrando o efeito da orientação da fonte para uma fonte simulada aplicando deslocamento normal a superfície (PROSSER, 2001)

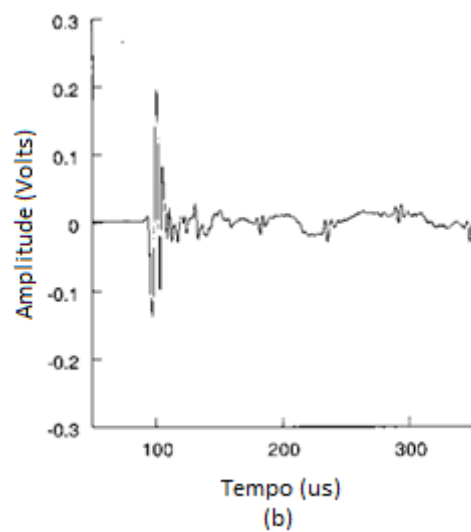


Figura 23. Forma de onda mostrando o efeito da orientação da fonte para uma fonte simulada aplicando deslocamento no borde da superfície (PROSSER, 2001)

Já no caso do modo A_0 , sua velocidade permanece constante em todas as direções. Isto é devido a que para determinado valor de frequência o modo S_0 apresenta um menor comprimento de onda que o modo A_0 , produzindo assim um maior espalhamento e dispersão da sua velocidade quando interage com as diferentes camadas de fibras. Em comparação, o modo A_0 em materiais anisotrópicos apresenta menor atenuação e distorção da sua velocidade

devido a que o comprimento de onda é muito maior que a dimensão das fibras do material compósito.

KAPHLE (2010) Utiliza o método TDOA para encontrar fontes de EA simuladas artificialmente através da quebra de grafite numa chapa de pequena espessura, avaliando a forma e modos de onda e como estas influenciam em diferentes técnicas de localização. Usando primeiramente a velocidade de onda longitudinal c_L e a velocidade de onda transversal c_T , observou-se que o uso da c_L não apresenta bons resultados na localização. Usando c_T dá uma aproximação muito melhor na localização. Em geral, os resultados mostram que o método baseado no threshold é geralmente fiável para determinar a localização, desde que a velocidade da onda obtida seja exata, o que significa que uma adequada identificação dos modos é importante.

2.14.2. Identificação dos Modos de Propagação

Como mencionado primeiramente no caso de propagação de ondas de EA em chapas, as ondas de Lamb são de primordial importância. Por tanto para a identificação dos diferentes modos verificou-se útil estudar em detalhe as formas das ondas registradas pelos sensores. A partir da Figura 24, observam-se três principais modos de propagação de onda diferentes, que são visíveis na parte inicial do sinal. O primeiro pacote do sinal que chega com menor amplitude que o threshold é o modo S_0 , logo depois um segundo pacote que atravessa o threshold identifica o modo A_0 , e em terceiro lugar um modo de maior amplitude definido como à superposição de modos de alta frequência. No caso do primeiro pacote de sinal, que não atravessa o threshold, não desencadeia um sucesso no sistema de aquisição por tanto não registra o tempo de chegada da onda. Já no segundo pacote num determinando tempo o sinal atravessa o threshold registrando o tempo de chegada da onda. Para o caso da Figura 24, o modo de propagação que o sensor vai registrar é o A_0 . Então é muito importante no ensaio de EA, qual vão ser o threshold escolhido, devido a que o mesmo vai incidir diretamente no modo de propagação que o sensor vai registrar. O que vai influenciar na velocidade de propagação da onda utilizada na hora da localização de fontes.

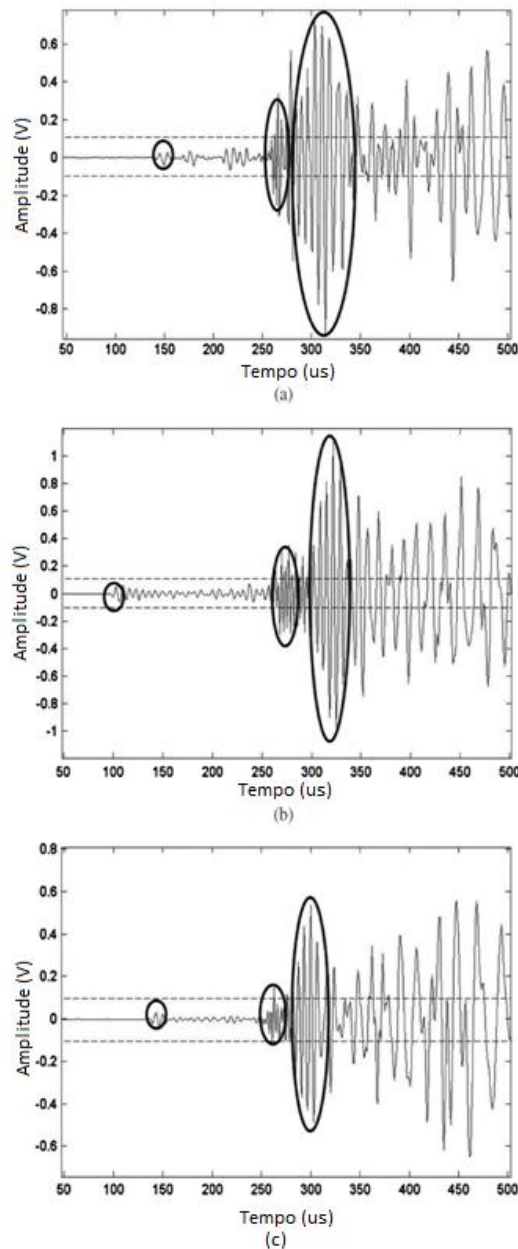


Figura 24. Sinais de emissão acústica identificando os modos de propagação (KAPHLE, 2010)

2.14.3. Análise em Frequência

O análise em frequência pode fornecer maior informação em quanto aos modos de propagação da onda atuantes num sinal determinado.

A Transformada de Fourier TF é geralmente a ferramenta utilizada para obter o conteúdo de frequência de um sinal. Para um sinal dado na Figura 23. Através da TF se obtêm um gráfico amplitude- frequência. Figura 25.

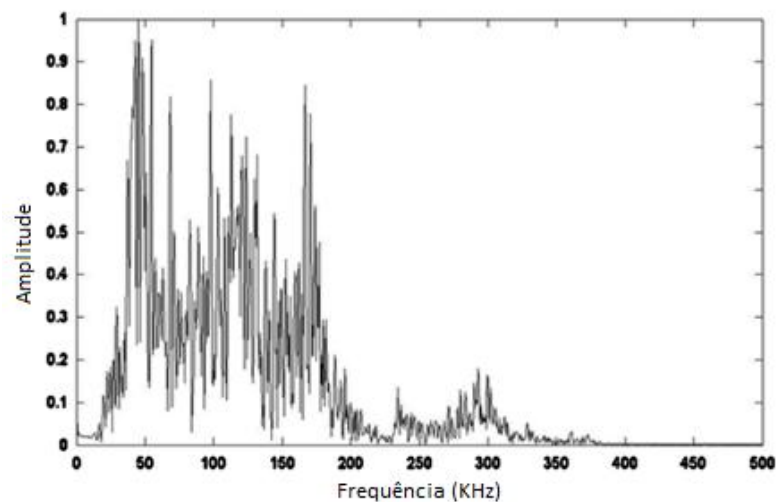


Figura 25. Sinal de emissão acústica transformado através FFT (Fast Fourier Transform) transformada rápida de Fourier (KAPHLE, 2010)

Onde se pode observar a frequência dominante do sinal, que é a frequência para o qual o sensor apresenta a maior resposta em amplitude. A partir desses dados é possível obter qual é o modo de propagação de velocidade atuante para essa determinada frequência dominante, através das curvas de dispersão de velocidade que estão estabelecidas em função da frequência para um determinado material e espessura Figura 26.

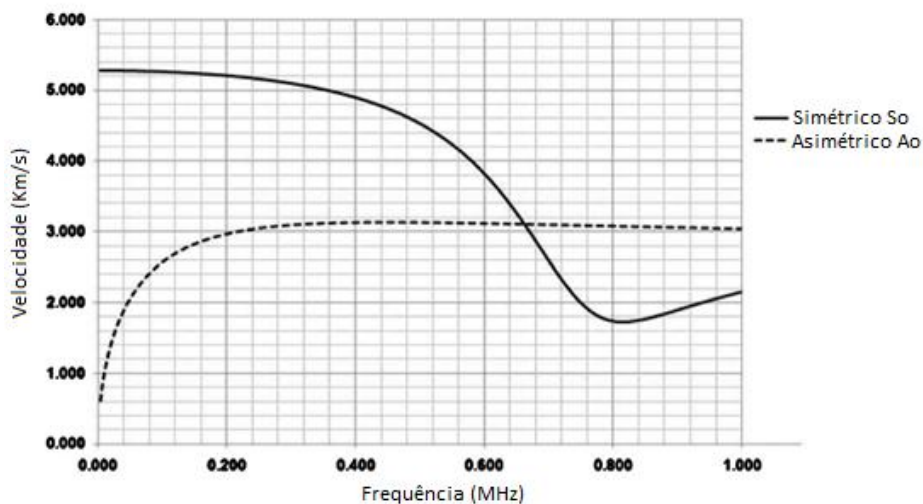


Figura 26. Curvas de dispersão de velocidades dos modos simétrica So e Assimétrico Ao para uma chapa de aço de 3mm de espessura (KAPHLE, 2010)

2.14.4. Modos de Lamb

Como mencionado anteriormente, as curvas de dispersão apresentam as velocidades dos modos de onda de Lamb em relação à frequência, espessura e material da chapa. A Figura 26 mostra a variação das velocidades de grupo dos modos Ao e So em função da frequência para uma placa de aço de 3mm de espessura. Em geral o modo Ao é um dos mais importantes modos de onda em ensaios de EA, devido a que este modo produz uma maior amplitude em comparação ao modo So, em contraposição a velocidade de propagação do modo Ao é menor do que o modo So. Outros membros das duas famílias de ondas de Lamb (A1, S1, etc) podem propagar com uma maior velocidade, mais sua amplitude cai rapidamente fazendo elas desprezíveis (HELLIER, 2003).

2.14.5. Uso do Modo So para Localização em EA

O modo So de propagação tem mostrado bons resultados na localização em materiais isotrópicos (KAPHLE, 2010), onde as propriedades do material não mudam com a direção de propagação da onda. Identificado o modo So na forma do sinal como o primeiro pacote de onda que chega ao sensor, e registrando o tempo de chegada do sinal utilizando um threshold adequado. Em ambientes com ruído, a baixa amplitude das ondas pode ser mascarada com sinais de ruído, pero estes problemas podem ser diferenciados através de um análise de tempo frequência.

2.14.6. Uso do Modo Ao para Localização em EA

Para casos de ensaio em materiais não - isotrópicos, onde as velocidades mudam com a direção de propagação das ondas, se demonstrou que a utilização do modo de propagação Ao tem uma boa concordância nos resultados de localização (KAPHLE, 2010).

CIAMPA e MEO (2010) Desenvolveram um algoritmo para a localização planar de fontes de EA provenientes de impactos, caracterizando a formação de ondas acusticas cuja propagação é fora do plano (modo flexural Ao), logo realiza uma análise de transformada continua de wavelet para determinar o tempo de chegada da onda.

DEGHAN e SALAMONE (2012) Propõem um método probabilístico para localização de fontes de EA em material isotrópico baseado em dois estágios primeiro: a medição do tempo de chegada das ondas de LAMB por transformada continua wavelet

(CWT) e segundo: usando o filtro estendido de Kalman para a determinação iterativa da fonte e a velocidade de propagação. Determinando o modo Ao como modo dominante de propagação.

2.14.7. Cálculo Experimental de Velocidade

PENG et al. (2011) Apresenta o método iterativo de Newton&Raphson para a solução analítica da localização de fontes em uma chapa de aço. Onde para o cálculo da velocidade foram realizadas quebras de grafite (fontes simuladas) entre os sensores onde foram calculadas as diferenças de tempo entre pares de sensores, logo com a distância conhecida entre pares de sensores, foi obtido um valor meio das velocidades. Logo também se faz uma análise da forma de onda gerada através da quebra do grafite, para determinar o modo de propagação, de maneira de fazer uma comparação entre a velocidade calculada experimentalmente e a velocidade teórica através das curvas de dispersão. O análise de sinal segue o mesmo caminho que KAPHLE 2010, onde é realizado um FFT (Fast Fourier Transform) a parte do sinal obtido pelo sensor e acha a frequência dominante, logo com essa frequência, entra nas curvas de dispersão e obtêm a velocidade Ao(assimétrica) e So(simétrica). E logo realiza a comparação com a velocidade obtida experimentalmente. O trabalho Obtém bons resultados na localização. O modo de velocidade utilizado é certamente relacionado com o threshold utilizado, que esta em função do ruído ambiente. Em ambientes com muito ruído as amplitudes do sinal de EA podem ser comparadas com a amplitude do sinal de ruído e pode dificultar o trabalho de separação e análise de sinal. Então nesses ambientes é preferencial trabalhar com um threshold mais elevado, só que isto diminuí a sensibilidade do sistema em captar o tempo real de chegada da onda ao sensor.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo se detalha os materiais empregados, as metodologías usadas no análise de velocidade, as instruções ou processos dos algoritmos de localização escolhidos e o procedimento de ensaio de localização nas chapas para cada algoritmo utilizado.

3.1. Corpos de Prova:

Os corpos de prova utilizados no ensaio de localização de fontes de EA, foram uma chapa de aço lisa de dimensões 1900x1520mm, de espessura 5mm. Com furos e cantoneiras de 20x20mm soldadas como reforço para sustentação como se observa na Figura 27.



Figura 27. Chapa aço 5mm de espessura com reforços utilizada no ensaio de localização.

O segundo corpo de prova foi uma chapa lisa de aço sem acessórios ou soldas, de dimensões 2570x2590mm, espessura 12,7mm. Como pode observar-se na Figura 28.



Figura 28. Chapa lisa de aço 12,7mm de espessura sem reforços e soldas utilizada no ensaio de localização.

Nas chapas utilizadas para o ensaio de localização não é identificado o tipo de aço (Aço carbono ou liga de aço) devido a que as variações na velocidade de propagação da onda acústica são pouco influenciadas com as variações nos porcentagens de carbono ou elementos de liga (BAR-COHEN, 1998). A chapa sem acessórios tem uma espessura maior que a chapa com acessórios, o que produz uma variação na velocidade de propagação das ondas acústicas de Lamb (PROSSER, 2001. Pg. 387), que será tido em conta no análise de velocidade. Esta chapa foi utilizada devido à indisponibilidade de uma chapa sem acessórios com a mesma espessura que a chapa com acessórios.

3.2.Sistema de Emissão Acústica:

O sistema de aquisição utilizado foi da Vallen Systeme AMSY-5, 10 canais de entrada de sensores mostrado na Figura 28.



Figura 29. Sistema de aquisição AMSY-5 da Vallen Systeme, utilizado no ensaio de localização, indicando as entradas dos canais para conexão aos sensores.

Os sensores utilizados foram o VS-150-RIC (VALLEN SYSTEME GmbH), com frequência de ressonância em 150kHz, Figura 30, e pré-amplificador integrado de 34db, cujas características são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1. Características do sensor VS-150-RIC, usado no ensaio de localização (VALLEN SYSTEME GmbH)

Modelo Sensor	Rango F[kHz]	F Pico [kHz]	Carcaça	Tamanho DxH[mm]	Peso[g]	Material carcaça	Wear Plate	Rango Temp [°C]	Conec.	Gan. dB
VS150-RIC	100-450	150	R	28.6 x 31.5	69	Aço Inox.	Cerâmica	-40 à +85	BNC	34

Também foi usado um filtro de frequência digital *passa faixa*, no sistema de aquisição de 100 a 300kHz. De maneira de eliminar sinais de ruído característicos fora dessa faixa de frequência.

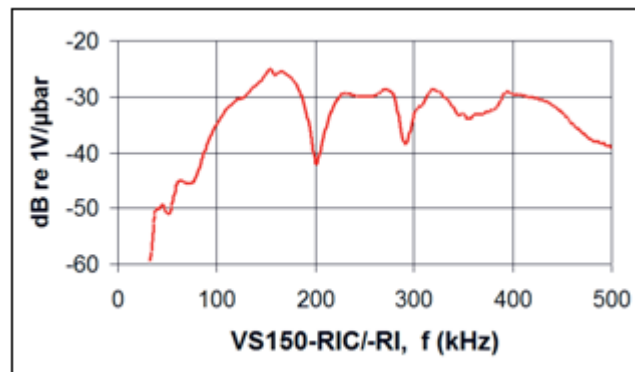


Figura 30. Resposta em frequência sensor VS150-RIC (VALLEN SYSTEME, GmbH)

Os sensores foram fixados com prendedores magnéticos, desenvolvidos pela Vallen Systeme. Figura 31, e o acoplamento entre sensor e chapa foi usada vaselina líquida.



Figura 31. Prendedor magnético para acoplamento do sensor na peça de ensaio (VALLEN SYSTEME GmbH)

Os algoritmos de localização e análise de velocidade foram desenvolvidas no software MATLAB r2010b na plataforma Windows 7.

Os sinais das fontes de EA simuladas foram gerados com a quebra do grafite, realizadas com barras de grafite HB 0,5mm (BOCZAR, 2004)

3.3. Análise de velocidade de propagação onda acústica

Para os ensaios de EA em chapas, as ondas de Lamb são o principal modo de propagação das ondas acústicas. Por tanto seu estudo e identificação dos modos de propagação é de primordial importância.

Primeiramente foi realizada uma aproximação da velocidade de propagação das ondas acústicas em função do tempo de cruzamento do sinal no limiar de detecção 40db e 70db, de maneira de verificar que modo de velocidade o sensor vai registrar com um ou outro limiar. A partir da quebra do grafite numa coordenada qualquer na chapa se obtém o sinal através do sensor e o equipamento de aquisição. Indicando os tempos que o sinal atravessou o limiar em 40db e 70db. Juntamente com o conhecimento da distância entre a fonte gerada artificialmente e a posição do sensor, é possível calcular a velocidade da seguinte maneira:

$$V_{(40db, 70db)} = D/T \quad (32)$$

D= Distância da fonte simulada ao sensor

T= Tempo de chegada do sinal da fonte ao sensor

Esses valores de velocidade vão ser comparados com os valores de velocidade teóricos obtidos através das curvas de dispersão de velocidade em função do tipo de material da chapa utilizada, suas dimensões e frequência. As curvas de dispersão de velocidade de Lamb são obtidas com o software DISPERSE. Também esses valores de velocidade vão ser comparados com as velocidades experimentais obtidas através da diferença de tempo de chegada do sinal gerado entre dois sensores com distâncias conhecidas em várias direções na chapa. Para assim verificar se existe variação de velocidade na chapa com acessórios em relação as posições dos mesmos (furos, cantoneiras, etc.). Para o cálculo experimental da velocidade, foram utilizados dois sensores, um deles numa posição fixa e outro se deslocando num semicírculo de raio constante Figura 32. As quebras de grafite foram realizadas justo na posição do sensor móvel, para raios de semicírculos de 300mm e 600mm.

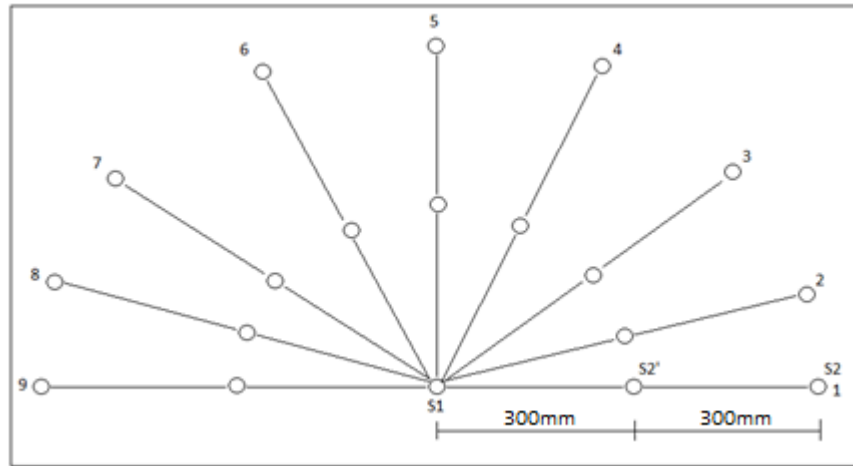


Figura 32. Posições a 300mm e 600mm dos sensores para o cálculo experimental da velocidade (ALJETS, 2010)

Assim foram calculadas as diferenças de tempo de chegada do sinal aos sensores com threshold 40db e 70db, e com a distância entre eles conhecidas. Calcula-se a velocidade da seguinte maneira:

$V = \text{Distância entre sensores} / \text{Diferença de tempo entre S1 e S2}$

$$V = D_{12} / \Delta T_{12} \quad (33)$$

O mesmo procedimento de análise de velocidade foi realizado na chapa sem acessórios.

3.4. Algoritmos de Localização Utilizados

Os algoritmos propostos para a localização em chapas foram escolhidos devido à que a maior parte dos trabalhos encontrados na revisão bibliográfica utilizam um ou outro de estes algoritmos (BAXTER, PULLIN, 2006), (SPENCER, 2007), (SCHOLEY, 2008) (ZHANG, 2010), (KAPHLE, 2010), (CIAMPA, 2010), (PENG, 2011). Principalmente em ensaios de localização planar de estruturas ou componentes com geometrias ou formas complicadas que são muito frequente na industria petroquímica, aérea, naval e civil. Os algoritmos propostos são os seguintes:

- Método Iterativo (quatro sensores), (MÍMINOS QUADRADOS)
- Métodos da Matriz (quatro sensores), (SCHOLEY, 2008)
- Método Delta T (quatro sensores), (BAXTER, PULLIN, 2006)

- Método com Três Sensores num arranjo linear ZHANG (2010)

Todos estes algoritmos de localização foram comparados com um algoritmo próprio da instrumentação utilizada, da marca Vallen Systeme, GmbH.

A Vallen Systeme GmbH não especifica o tipo de algoritmo que utiliza para localização. Seu manual instrutivo especifica que as fontes devem estar dentro do arranjo de sensores para que o algoritmo de localização possa ter uma exatidão adequada.

Seguidamente serão apresentados os diagramas de fluxo com os passos ou intruções para cada algoritmo utilizado:

3.4.1. Algoritmo da Matriz

Na Figura 32 é apresentado o fluxograma para o algoritmo de localização da matriz. Indicando os passos para a solução a partir do conhecimento da velocidade de propagação da onda acústica e as posições dos sensores.

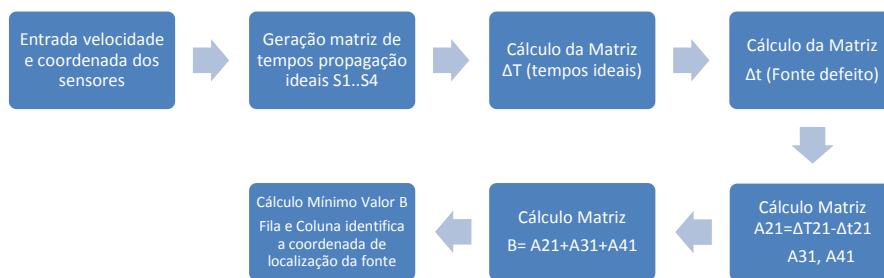


Figura 33. Esquema do algoritmo método da matriz

3.4.2. Algoritmo Iterativo

Na Figura 33 é apresentado o fluxograma para o algoritmo de localização Iterativo. Indicando os passos para a solução do sistema de equações não linear com a rotina LSQ nonlin do MATLAB por aproximação de mínimos quadrados. A partir do conhecimento da velocidade de propagação da onda acústica e as coordenadas de posição dos sensores.

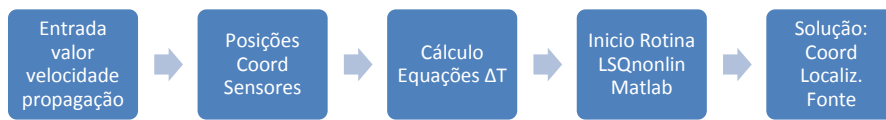


Figura 34. Esquema do algoritmo de localização iterativo

3.4.3. Algoritmo Delta T

Na Figura 34 é apresentado o fluxograma do algoritmo de localização Delta T. Indicando os passos para a obtenção da coordenada de localização.

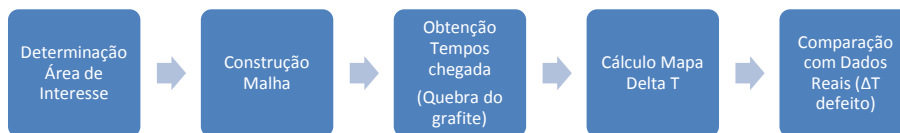


Figura 35. Esquema do algoritmo delta T

3.4.4. Algoritmo com Três Sensores em disposição linear de ZHANG

Na figura 35 é apresentado o fluxograma do algoritmo de ZHANG com três sensores em disposição linear. Indicando os passos para a solução das equações de diferença de tempo através da resolução analítica.

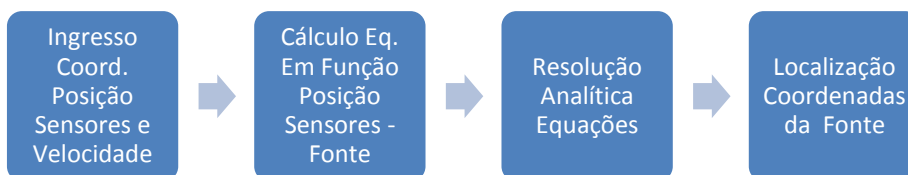


Figura 36. Esquema do algoritmo três sensores em disposição linear

3.5. Ensaios Realizados

Foram realizados três ensaios para garantir a eficiência de cada algoritmo de localização. Esses três ensaios consistem em:

Ensaio 1: As fontes 1, 2 e 3 colocadas dentro do arranjo dos sensores.

Ensaio 2: As fontes 4 e 5 colocadas fora do arranjo dos sensores.

Ensaio 3: Foi deslocado os sensores de maneira de colocar as fontes 4 e 5 que estavam fora do arranjo, dentro do arranjo dos sensores.

Na chapa com acessórios foram realizados os ensaios 1, 2 e 3. O ensaio 1 permite avaliar a eficiência dos algoritmos quando as fontes estão dentro da matriz de sensores. O ensaio 2 permite avaliar a eficiência dos algoritmos quando as fontes estão fora da matriz de sensores. O ensaio 3 permite avaliar a eficiência dos algoritmos fazendo uma comparação com o ensaio 1, devido a que as fontes foram colocadas em lugares que denominamos críticos devido a presença de furos e soldas que podem alterar a propagação circular dos sinais. Em tanto na chapa sem acessórios foram realizados só os ensaios 1 e 2, devido a que a mesma não apresenta lugares críticos para a propagação da onda acústica.

Os ensaios de emissão acústica na chapa com acessórios foi realizado dentro do laboratório. Num ambiente com baixos níveis de ruído, menor à 40db. A chapa já se encontrava dentro do laboratório devido a outros ensaios que estavam sendo realizados anteriormente. Na chapa sem acessórios os ensaios de emissão acústica foram realizados fora do laboratório. Devido as dimensões da mesma que dificultaram sua colocação dentro do laboratório. Esta condição propiciou os ensaios num ambiente com alto ruído em torno de 60db.

O erro na coordenada de localização para cada algoritmo é calculado como a distância entre a posição da coordenada real (quebra do grafite) e a posição da coordenada localizada pelo algoritmo.

$$\text{Erro} = \sqrt{(x_f - x_l)^2 + (y_f - y_l)^2} \quad (34)$$

Onde:

x_f = coordenada horizontal da fonte real

y_f = coordenada vertical da fonte real

x_l = coordenada horizontal de localização do algoritmo

y_l = coordenada vertical de localização do algoritmo

Como maiormente a EA é utilizada para a detecção de defeitos ativos em grandes estruturas onde é necessário considerar os erros na localização em função da dimensão da peça ensaiada. Determinando um valor máximo aceitado de erro para um determinado tamanho de estrutura. Neste trabalho será definido como valor máximo aceitado de erro:

1cm por metro do maior comprimento da peça ensaiada. Exemplo:

Se a peça ensaiada tem seu comprimento maior 10m, o erro máximo aceitado é 10cm. Se o erro obtido é maior do que esse valor o algoritmo será considerado inadequado.

Então, o erro máximo aceitado para a chapa com acessórios é: (comprimento maior = 1900mm), erro max. = 1,9cm

No caso da chapa sem acessórios o erro maximo aceitado é: (comprimento maior = 2590mm), erro max. = 2,5cm

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise de Velocidade Chapa Aço 5mm com Reforços e Soldas

Na Figura 37 pode-se observar o sinal obtido pelo sensor 2 indicando o limiar de detecção do sistema de aquisição em 40dB e 70dB respectivamente. Na figuras só é observada parte do sinal para melhor visualização, no intervalo de tempo 0-200 μ S. Observa-se que o cruzamento do limiar (40dB) para o primeiro pacote de onda é no entorno de 1×10^{-4} seg, depois de gerada a fonte. E o cruzamento do limiar (70dB) para o segundo pacote de onda é no entorno de $1,45 \times 10^{-4}$ seg, depois de gerada a fonte.

Calculando a velocidade de propagação da onda a partir de esses tempos, para uma distância conhecida entre a fonte e o sensor de 0,5m, obtém-se:

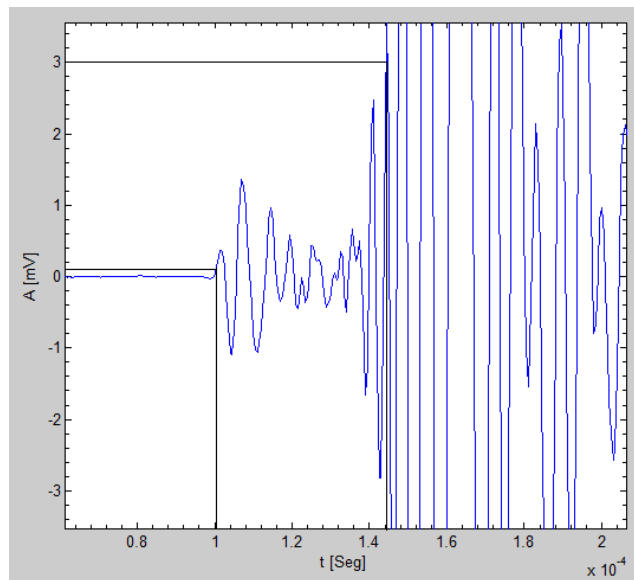


Figura 37. Sinal de aquisição sensor 2, indicando limiar para 40dB e 70dB.

$$\text{dB} = 20 * \log(\mu\text{V})$$

$$0,1\text{mV} = 100 \mu\text{V} \text{ para } 40\text{dB}$$

$$3\text{mV} = 3000 \mu\text{V} \text{ para } 70\text{dB}$$

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

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

Esses valores de velocidade obtidos como uma primeira aproximação vão ser comparados com os valores teóricos de velocidade calculados para as chapas de aço utilizadas. Também serão comparados com valores de velocidade experimentais obtidos através da diferença de tempo de chegada do sinal gerado entre dois sensores com distâncias conhecidas em varias direções.

4.1.1. Cálculo Velocidade Teórica

A partir do sinal gerado com a quebra do grafite Figura 37. A transformada de Fourier do sinal é mostrada na Figura 38. A frequência dominante cai em torno à 100kHz.

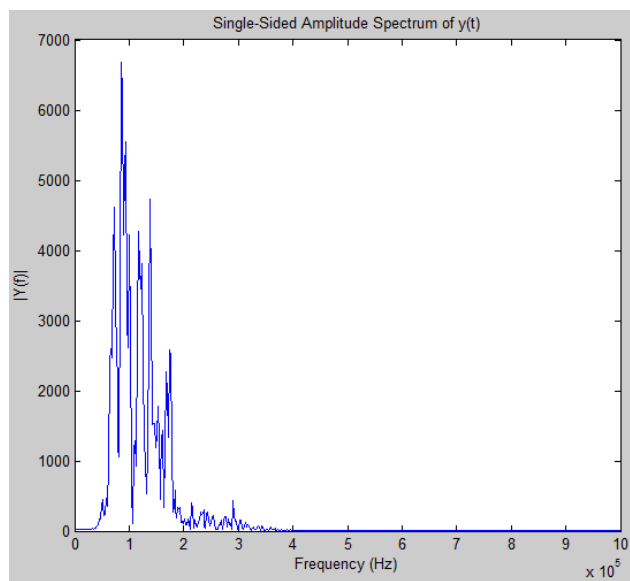


Figura 38. Transformada FFT, sinal de entrada sensor 2.

Entrando com esse valor de frequência nas curvas de dispersão para a chapa com espessura de 5mm com acessórios Figura 39. Obtemos as seguintes velocidades:

$$V_{S0} = 5419\text{m/s, limiar } 40\text{db}$$

$$V_{A0} = 2974\text{m/s, limiar } 70\text{db}$$

Aqui se pode ver a proximidade dos valores das velocidades calculadas a partir do tempo de propagação da onda ao sensor para os diferentes limiares de detecção, e os valores de velocidade teóricos obtidos a partir das curvas de dispersão para uma frequência de 100kHz como principal componente de frequência do sinal.

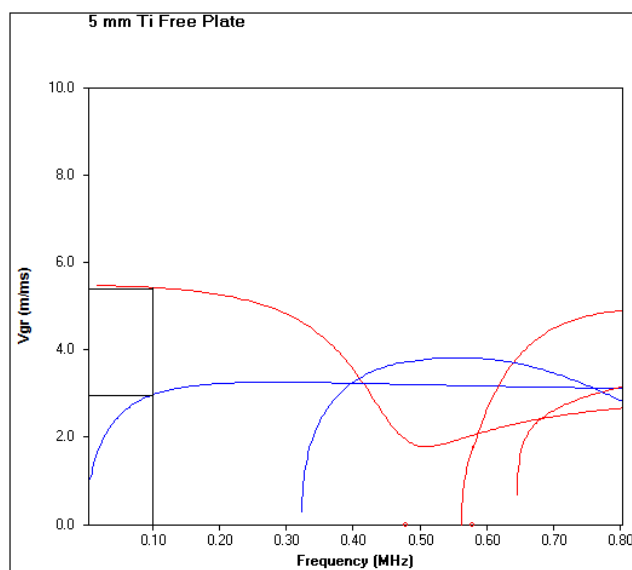


Figura 39. Velocidade de grupo teórica dos modos Assimétrico e Simétrico para uma chapa de aço de 5mm de espessura.

4.1.2. Cálculo Velocidade Experimental

Os valores de velocidade obtidos para cada uma das direções calculadas para 40db e 70db de limiar e para as duas distâncias são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Velocidades calculadas experimentalmente através da diferença de tempo de chegada dos sinais aos sensores utilizando o limiar como tempo inicial.

POSIÇÃO DO SENSOR	VELOCIDADE [m/s]			
	40dB		70dB	
	300mm	600mm	300mm	600mm
1	5154	5176	2970	3000
2	5110	5063	2895	2945
3	5319	5263	3061	3078
4	5190	5328	3080	3036
5	5454	5145	3128	3034
6	5736	5535	3154	3193
7	5859	-	3112	2986
8	6024	5692	2898	2974
9	6024	5535	2967	2925
Meia	5541	5342	3017	3019
Meia Total	5441		3018	

Com todos os dados de velocidade obtidas para cada direção foi realizada uma média das velocidades, dando: Para a chapa de aço de 5mm de espessura:

$$V_{So} = 5441\text{m/s, limiar } 40\text{db}$$

$$V_{Ao} = 3018\text{m/s, limiar } 70\text{db}$$

Pode-se observar que as velocidades calculadas em forma experimental são muito próximas as velocidades teóricas obtidas através das curvas de dispersão.

4.2. Análise de Velocidade Chapa Sem Acessórios Aço 12,7mm

Para a chapa de aço de 12,7mm de espessura as velocidades calculadas em forma teórica através das curvas de dispersão foi seguido da mesma forma que para a chapa de 5mm de espessura:

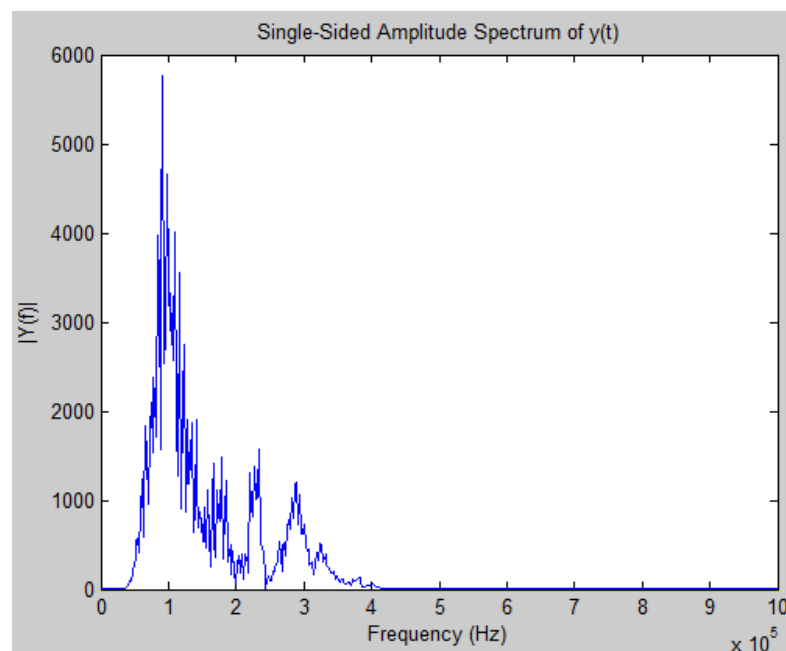


Figura 40. Transformada FFT sinal obtida sensor chapa lisa 12,7mm.

Aqui o FFT do sinal, Figura 40 mostra que a frequência dominante esta em torno a 90khz. Com esse valor de frequência entra-se nas curvas de dispersão para a chapa de 12,7 mm de espessura, Figura 41 e obtêm-se as velocidades para os modos Ao e So.

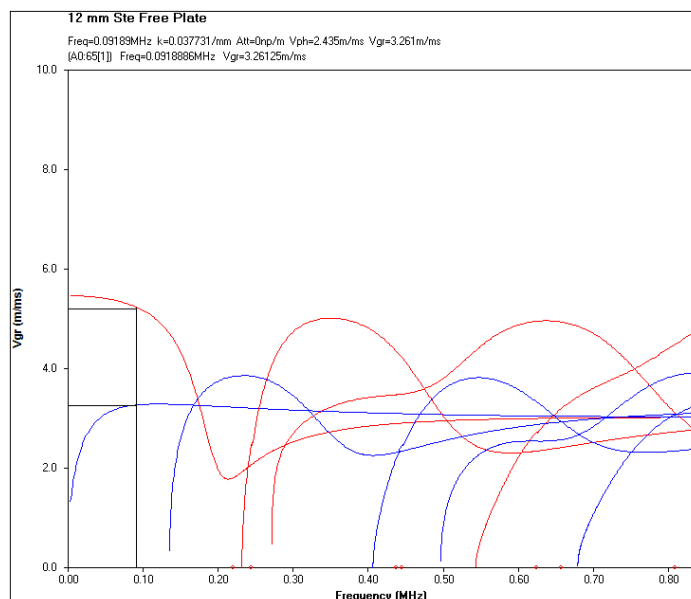


Figura 41. Curvas de dispersão velocidade grupo chapa aço 12 mm espessura.

$$V_{Ao} = 3261\text{m/s}$$

$$V_{So} = 5159\text{m/s}$$

A velocidade média calculada experimentalmente na chapa com o método anterior de deslocamento do sensor em varias direções foi:

$$V_{Ao} = 3200\text{m/s}$$

$$V_{So} = 5010\text{m/s}$$

Aqui vemos novamente a proximidade com a velocidade teórica através das curvas de dispersão obtidas com o software DISPENSE.

4.3. Análise de Localização Chapa Aço 5mm com Reforços e Soldas

Para o análise dos algoritmos de localização foram utilizadas as seguintes velocidades:

Chapa aço 5mm de espessura com reforços:

$$V_{So} = 5440\text{m/s, threshold 40dB}$$

$$V_{Ao} = 3010\text{m/s, threshold 70dB}$$

4.3.1. Ensaio 1

Seguidamente são apresentados os resultados de localização para o ensaio 1 onde as fontes estão colocadas no interior do arranjo de sensores.

4.3.1.1. Algoritmos Baseados em 4 sensores

Primeiramente são apresentadas as coordenadas de posicionamento dos sensores na chapa Tabela 3. Assumindo a origem, o canto inferior esquerdo da chapa.

Tabela 3. Coordenadas dos sensores em [cm], ensaio N°1, fontes simuladas dentro da matriz de sensores.

	X [cm]	Y [cm]
S1	26	75
S2	26	175
S3	126	175
S4	126	75

Na Figura 42 é apresentada as disposições dos sensores e as fontes na chapa com acessórios para o ensaio 1 (fontes dentro do arranjo de sensores). A mesma Figura representa aproximadamente a forma e as dimensões da chapa, de maneira de fazer as comparações entre as fontes reais simuladas e as coordenadas de localização dos diferentes algoritmos.

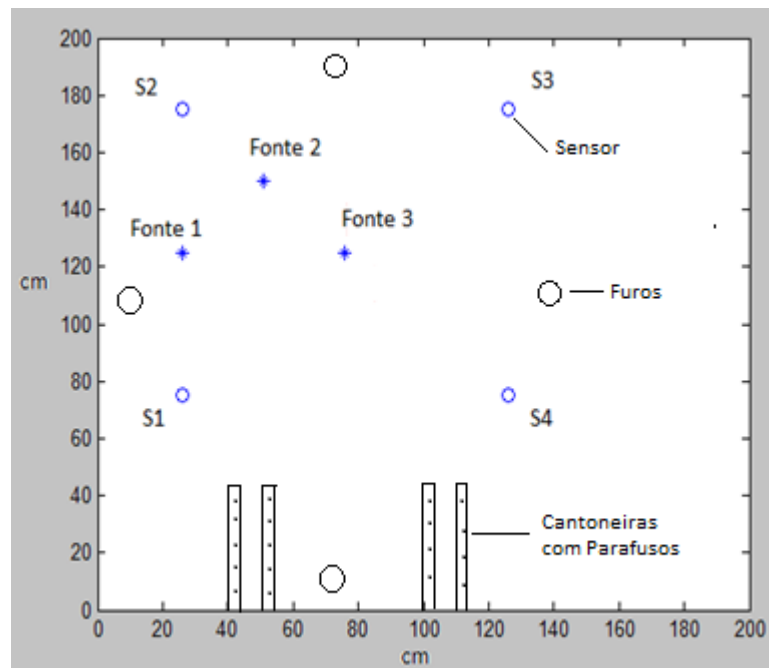


Figura 42. Coordenadas de posições dos sensores e as fontes para o ensaio 1.

Na figura 43 são apresentados os resultados da localização para a fonte 1, com zoom para uma melhor visualização, para os diferentes algoritmos com limiar de 40db. Pode-se observar que as coordenadas localizadas pelos algoritmos em geral tem uma boa exatidão. Embora para o caso da fonte 1 cuja posição esta na borda da linha do quadro formado pelos sensores, o algoritmo da Matriz e Iterativo apresentam um erro de 2 cm, em tanto que o algoritmo da Vallen Systeme, o erro e menor a 1 cm.

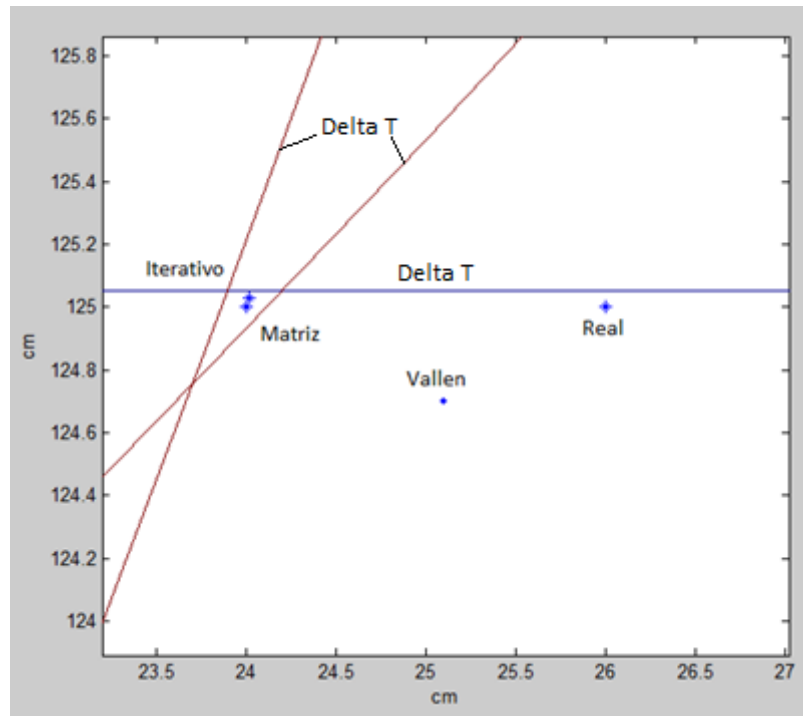


Figura 43. Localização fonte 1, com zoom, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40db.

Na Figura 44 observa-se os resultados de localização da fonte 1 para o limiar de 70db sem zoom. Aqui pode-se ver que a exatidão é menor, e os erros são maiores de 2 cm para todos os algoritmos.

Na Figura 45 são apresentados os resultados de localização para a fonte 2 com limiar 40db. Aquí também foi realizado um zoom na figura para obter uma melhor visualização das diferenças entre as coordenadas localizadas para os diferentes algoritmos. Novamente pode ser visto uma boa exatidão com todos os algoritmos cujo erro é menor ou igual a 1 cm para os algoritmos com quatro sensores.

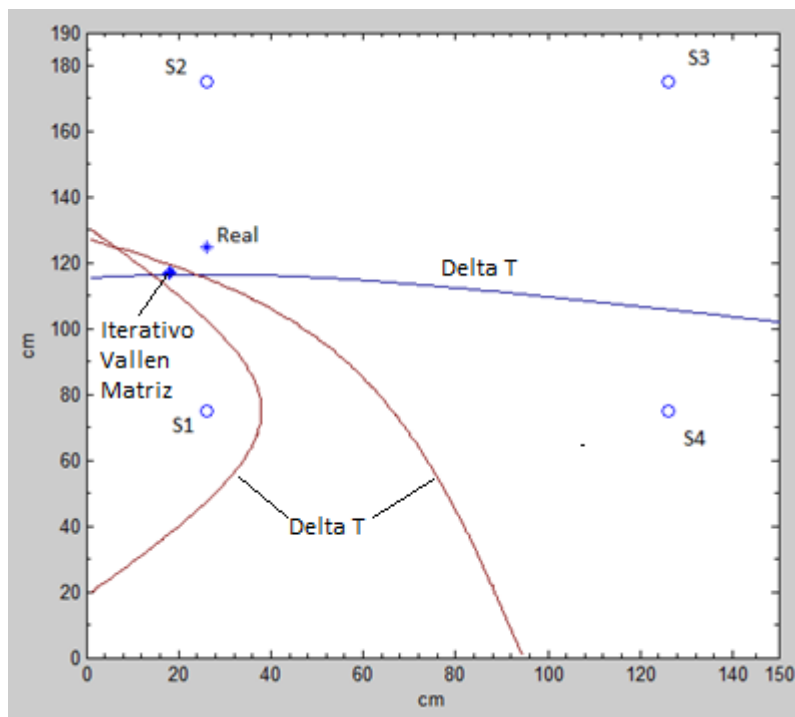


Figura 44. Localização fonte 1, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 70db.

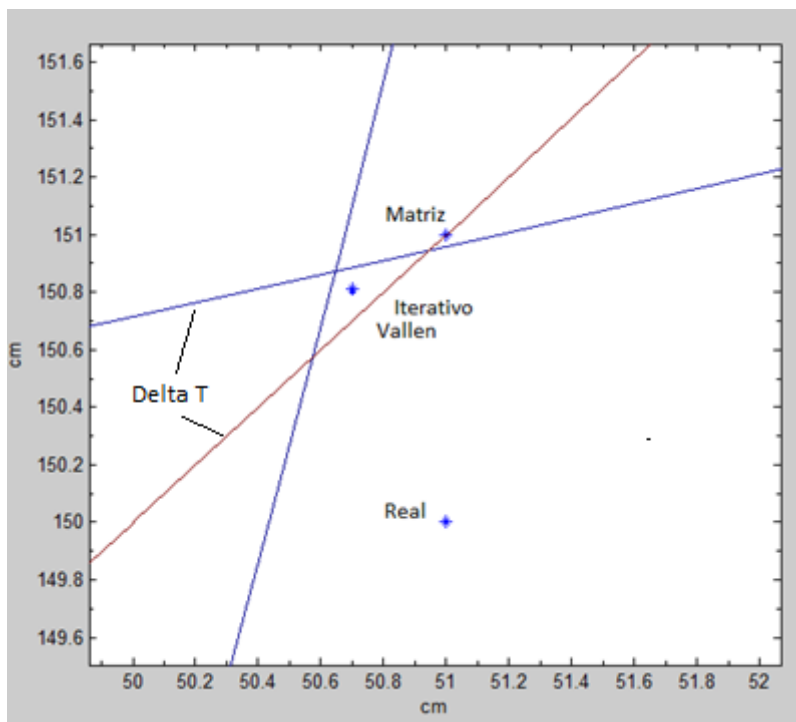


Figura 45. Localização fonte 2, com zoom, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40db.

Já na Figura 46 são apresentadas as localizações da fonte 2 para limiar de 70db, onde a exatidão ao igual que a fonte 1 é menor, com erros acima de 10 cm. No caso do algoritmo da matriz a fonte 2 não foi localizada para limiar de 70db.

Na Figura 47 são apresentados os resultados de localização para a fonte 3 com limiar 40db. Neste caso os algoritmos com quatro sensores apresentam uma localização muito próxima da fonte real, com erros menores ou igual à 1 cm.

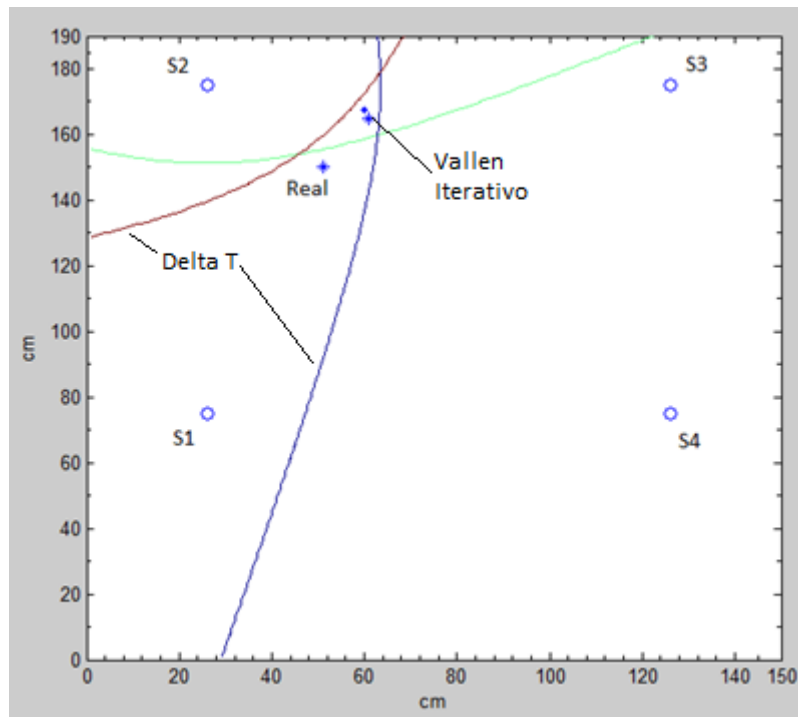


Figura 46. Localização fonte 2 chapa aço 5mm com reforços, limiar 70db.

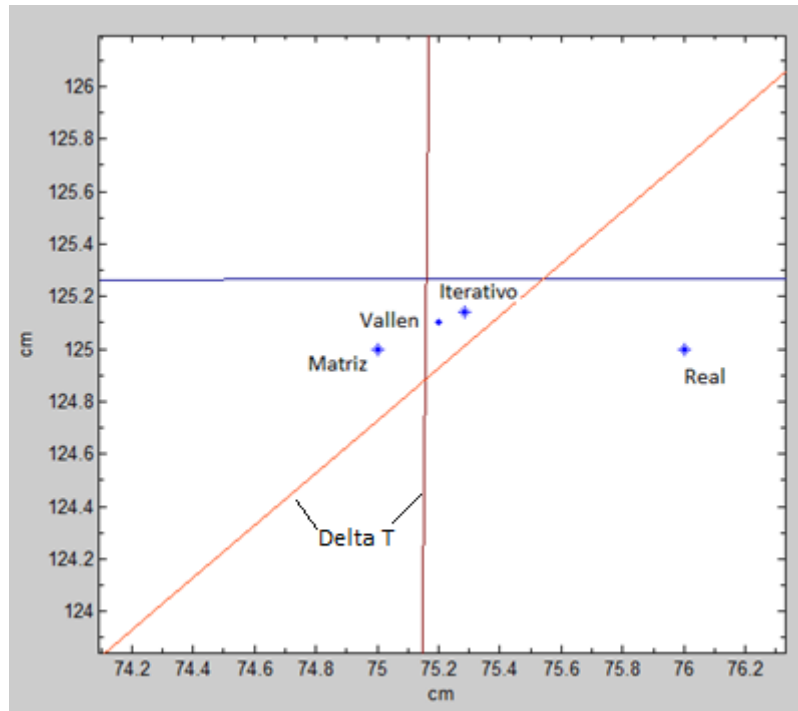


Figura 47. Localização fonte 3 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 40db.

Na Figura 48, observan-se os resultados na localização da fonte 3 com threshold 70db. Nesta situação todos os algoritmos apresentaram um erro menor, por debaixo de 2 cm.

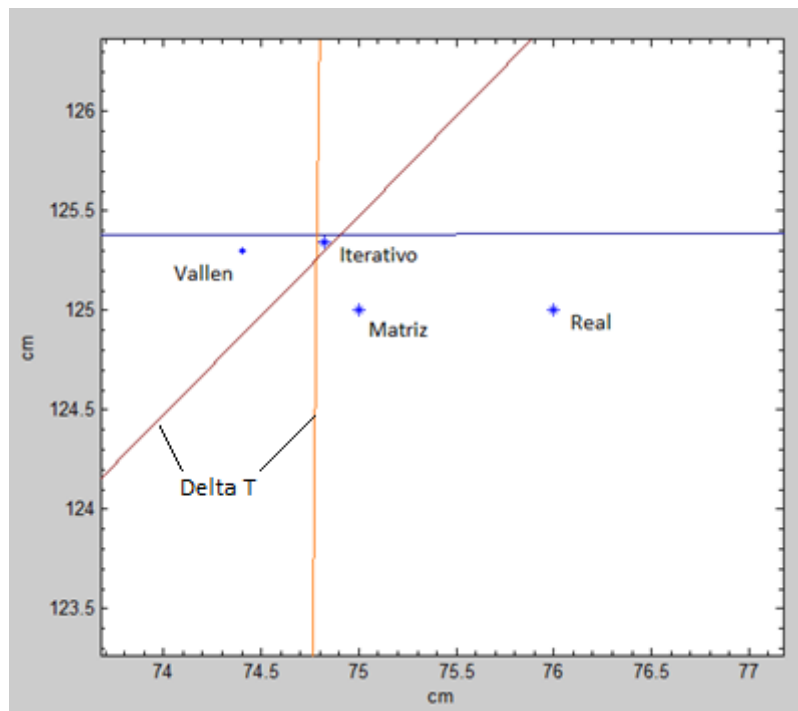


Figura 48. Localização fonte 3, com zoom , identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 70db.

Em geral pode-se observar que para as três fontes estudadas dentro do arranjo de quatro sensores a maior exatidão dá-se para o threshold de 40db, ou seja, para o caso do uso do modo de propagação So. Já para o caso de threshold em 70db o modo de propagação utilizado é Ao, que só apresenta menor erro para a fonte 3, cuja localização corresponde ao centro do arranjo de sensores.

4.3.1.2. Algoritmos Baseados em 3 Sensores

Para o caso do ensaio com o método de três sensores, as coordenadas das fontes simuladas seguem sendo as mesmas, só mudam as coordenadas de posição dos sensores. De maneira de fazer uma comparação com as coordenadas localizadas com os algoritmos de quatro sensores. Na Tabela 4 são apresentadas as coordenadas de posição dos sensores para o ensaio com 3 sensores.

Tabela 4. Coordenada dos sensores [cm], ensaio N°1, fontes simuladas dentro da matriz de sensores.

	X [cm]	Y [cm]
S1	126	75
S2	126	125
S3	126	175

Na figura 49 observam-se os resultados de localização para as fontes 1, 2 e 3 para o algoritmo 3 sensores do ZHANG em comparação com o algoritmo em disposição linear da Vallen Systeme com limiar 40db, pode ser visto que para as fontes 1 e 2, dão resultados de localização semelhantes, praticamente se sobrepõem as coordenadas para ambos os algoritmos. Os mesmos apresentam um erro de 5,5cm e 4,8cm respectivamente na localização em comparação com a coordenada real. Também se observa na Figura 49, que a coordenada da fonte 3 apresenta um erro menor na localização apenas 2,6cm. Isto pode ser devido a que para este tipo de algoritmo a diferença de tempo de chegada é mais pronunciada quanto menor é a distância entre a fonte e os sensores. Assim quanto mais longe esteja a fonte do arranjo de sensores para uma separação fixa, maior vai ser o erro na localização. As fontes 2 e 3 para limiar de 70dB, não foram localizadas pelo algoritmo proposto do ZHANG, nem por o algoritmo da Vallen Systeme. A fonte 1 foi localizada com um erro aproximadamente de 9 cm para o algoritmo de ZHANG e 2cm para o algoritmo da Vallen Systeme. Figura 50.

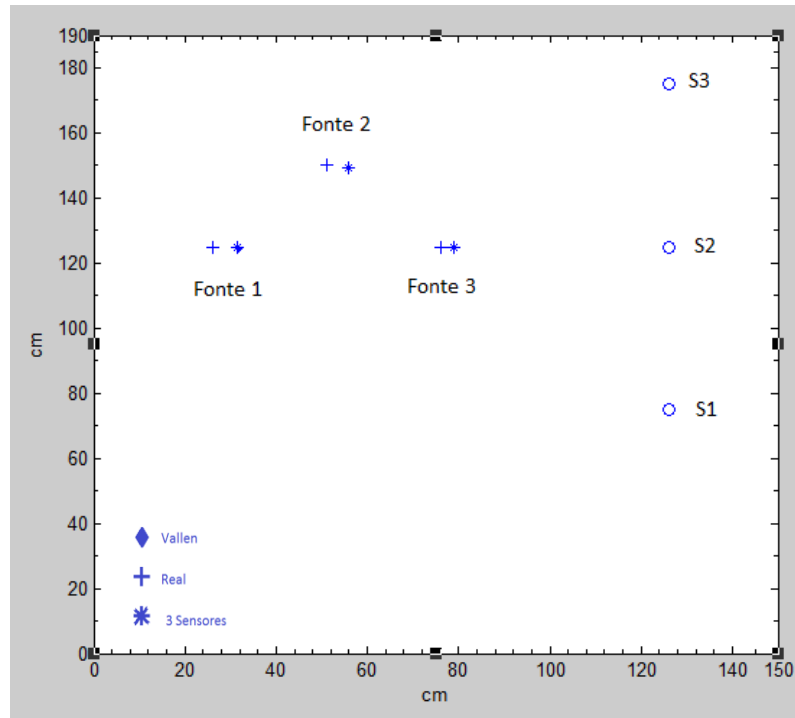


Figura 49. Localização fonte 1, 2 e 3, com três sensores chapa aço 5mm com reforços, limiar 40db.

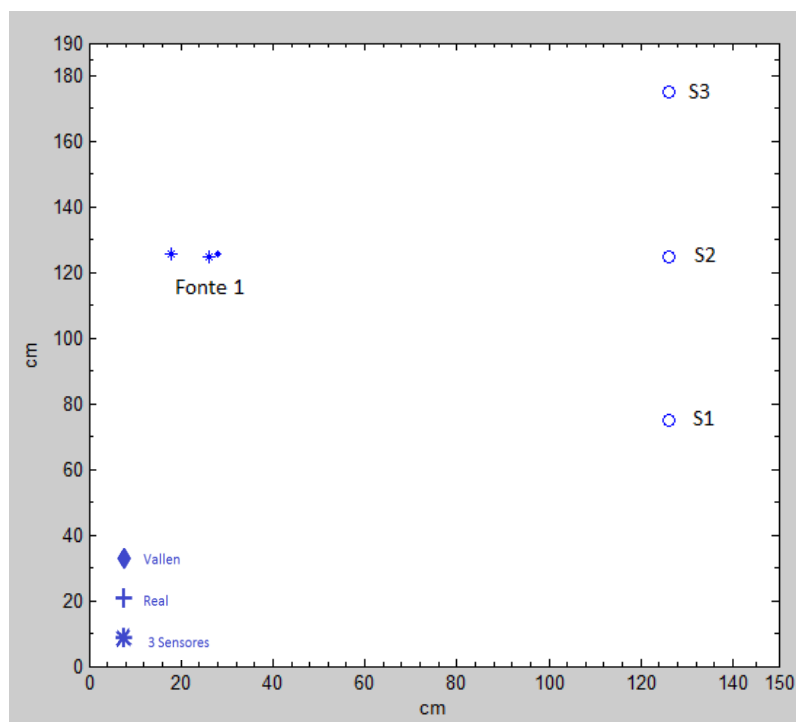


Figura 50. Localização fonte 1, chapa aço 5mm com reforços, limiar 70db.

Na Tabela 5 são apresentadas as coordenadas de localização para o ensaio 1 para todos os algoritmos com três e quatro sensores para 40db e 70db de limiar. Indicando os erros nas coordenadas obtidos para cada algoritmo em comparação com a coordenada real.

Para a chapa com acessórios em geral os algoritmos tiveram boa exatidão na localização para o caso de limiar 40db. Onde os erros são menores que 2 cm no caso de fontes dentro do arranjo de sensores. E maior à 2cm no caso de fontes fora do arranjo dos sensores. Para a chapa com assessórios os algoritmos com limiar de 70db, tiveram uma exatidão menor, dando erros acima de 2 cm para o caso fontes dentro do arranjo. E erros maior à 9cm para as fontes fora do arranjo dos sensores.

Tabela 5. Coordenadas [x,y][cm], das fontes 1, 2 e 3, dentro do arranjo dos sensores, para os diferentes algoritmos de localização para 40dB e 70dB.

Algoritmo	Fonte 1			
	40dB		70dB	
Real	[26;125]	Erro [cm]	[26;125]	Erro [cm]
Vallen	[25,1;124,7]	0,9	[18,5;117,1]	10,8
Iterativo	[24;125]	2	[18;117]	11,3
Matriz	[24;125]	2	[18;117]	11,3
Delta T*	[x ; x]**	Fora	[x ; x]**	Fora
ZHANG 3 Sen	[31,5;124,6]	5,5	[17 ; 125]	9
Vallen 3sen	[31,7;124,5]	5,7	[28,1;125,6]	2,1
Algoritmo	Fonte 2			
	40dB		70dB	
Real	[51;150]	Erro [cm]	[51;150]	Erro [cm]
Vallen	[50,7;150,8]	0,8	[60;167,4]	19,5
Iterativo	[50,7;150,8]	0,8	[59;169]	20,6
Matriz	[51;151]	1	Não Localiza	-
Delta T*	[x ; x]**	Fora	[x ; x]**	Fora
ZHANG 3 Sen	[55,8;149,4]	4,8	Não localiza	-
Vallen 3sen	[55,8;149,3]	4,8	Não localiza	-

Algoritmo	Fonte 3			
	40db		70dB	
Real	[76;125]	Erro [cm]	[76;125]	Erro [cm]
Vallen	[75,2;125,1]	0,8	[74,4;125,3]	1,6
Iterativo	[75,2;125,1]	0,8	[74,8;125,3]	1,2
Matriz	[75;125]	1	[75;125]	1
Delta T*	[x ; x]**	Fora	[x ; x]**	Fora
ZHANG 3 Sen	[78,6;124,9]	2,6	Não localiza	-
Vellen 3sen	[78,8;124,8]	2,8	Não localiza	-

* Para o método delta T não são indicadas as coordenadas de localização, e sim um símbolo que indica se a coordenada real cai dentro da área de cruzamento das três hipérbolas [® ; x].

** O símbolo ® , indica que a coordenada real esta dentro da área de cruzamento das hipérbolas, o símbolo [x] indica que a coordenada real cai fora da área de cruzamento das hipérbolas.

4.3.2. Ensaio 2

A continuação são apresentados os resultados de localização para o ensaio 2, com as fontes simuladas fora do arranjo de sensores, para os algoritmos baseados em quatro e três sensores.

4.3.2.1. Algoritmo Baseado em 4 Sensores

Na Figura 51 é apresentada a disposição dos sensores junto com as fontes 4 e 5, simuladas fora do arranjo de sensores. Aqui novamente a figura representa a forma e dimensões da chapa.

Na Figura 52 pode ser visto as coordenadas de localização para 40db com zoom para melhor visualização dos algoritmos. Observe-se que para o caso de fontes fora do arranjo de sensores começa a existir um erro maior que 2 cm, em comparação com as fontes dentro do arranjo e limiar de 40db, onde o erro estava em torno à 1 cm. Para o algoritmo delta T, só identifica uma curva da hipérbole, não podendo determinar a área ou ponto de cruzamento.

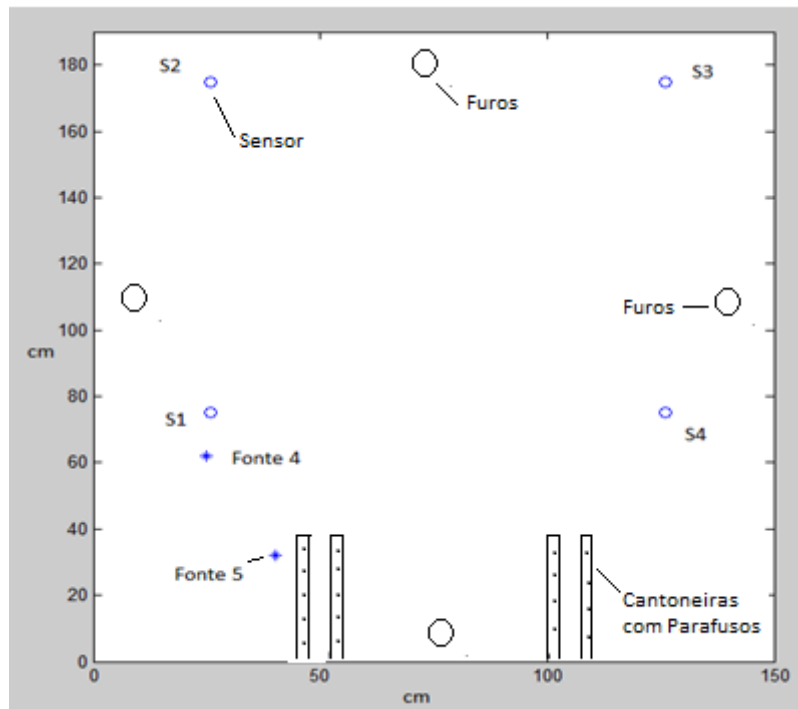


Figura 51. Posições das coordenadas das fontes simuladas 4 e 5, fora da matriz de sensores; chapa aço 5mm com reforços.

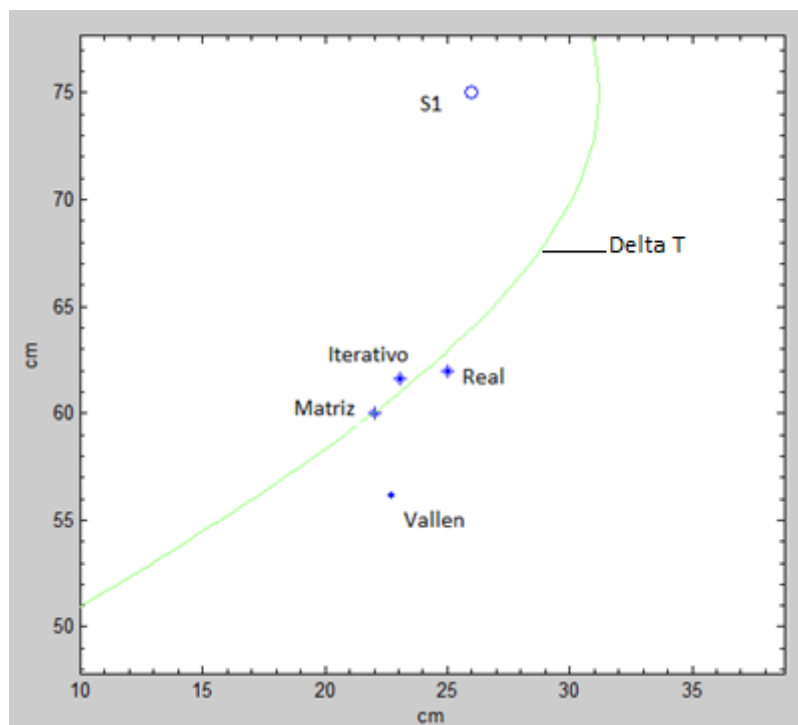


Figura 52. Localização fonte 4, com zoom, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40db.

No caso de limiar de 70db o erro é maior, com valores acima de 14 cm Figura 53. Neste caso todos os algoritmos convergeram numa coordenada pero diferente da coordenada real.

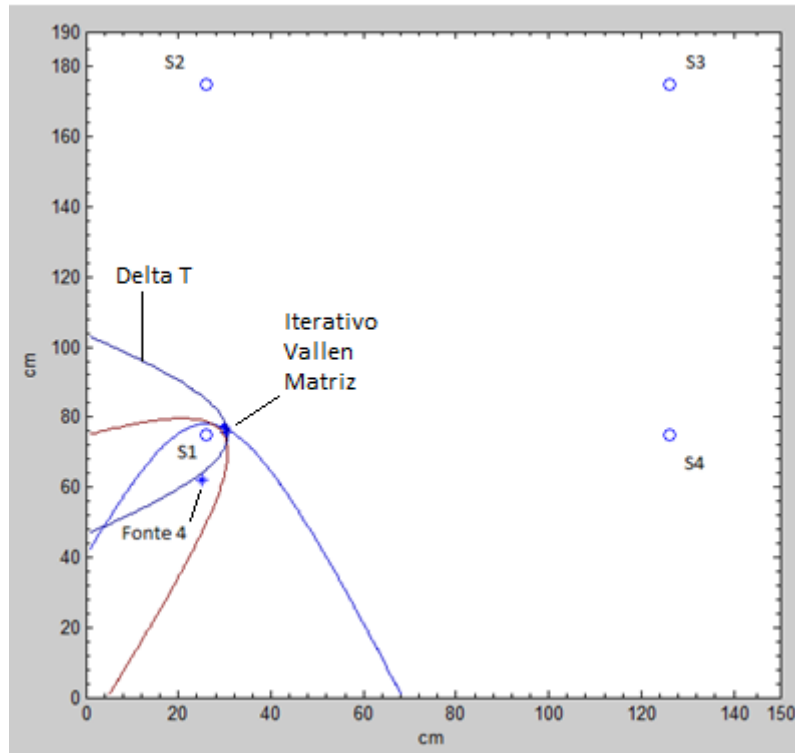


Figura 53. Localização fonte 4, chapa aço 5mm com reforços, limiar 70db.

Na Figura 54, se mostram as localizações para a fonte 5 com threshold 40db. Aqui também é apresentada a figura com zoom para melhor visualização dos algoritmos. Pode-se observar que o erro é maior que no caso de fontes dentro da matriz de sensores.

Na Figura 55 são apresentados os resultados de localização para a fonte 5 com threshold 70db com zoom para melhor visualização. Aqui todos os algoritmos convergem com boa precisão em uma determinada coordenada, pero diferente da coordenada real. Apresentando um erro maior a 9 cm para todos os algoritmos. O algoritmo da Vallen Systeme não localizou a fonte 5 para nenhum limiar, isto concôrda com as especificações dadas pelo fabricante sobre a localização de fontes fora da matriz de sensores.

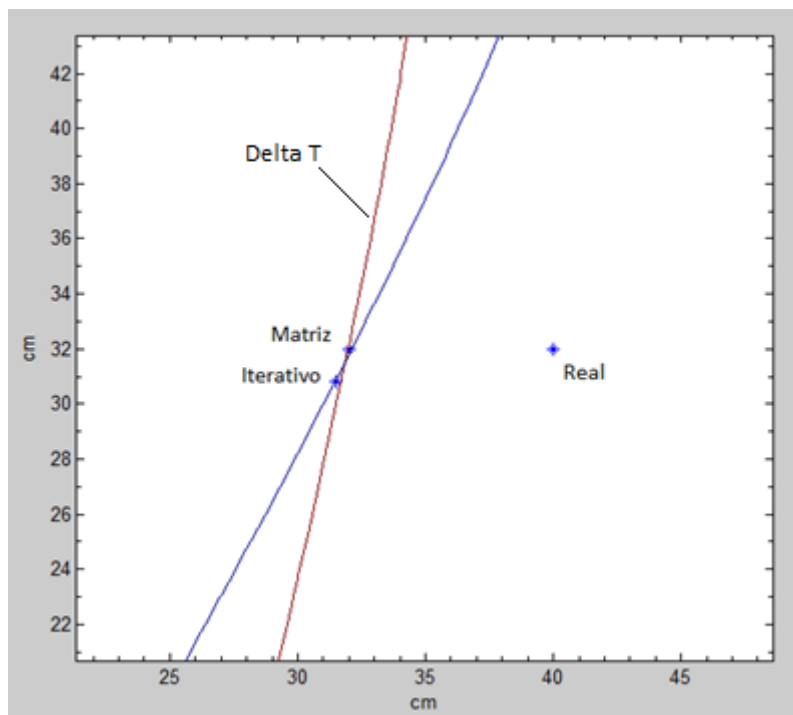


Figura 54. Localização fonte 5, com zoom, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40db.

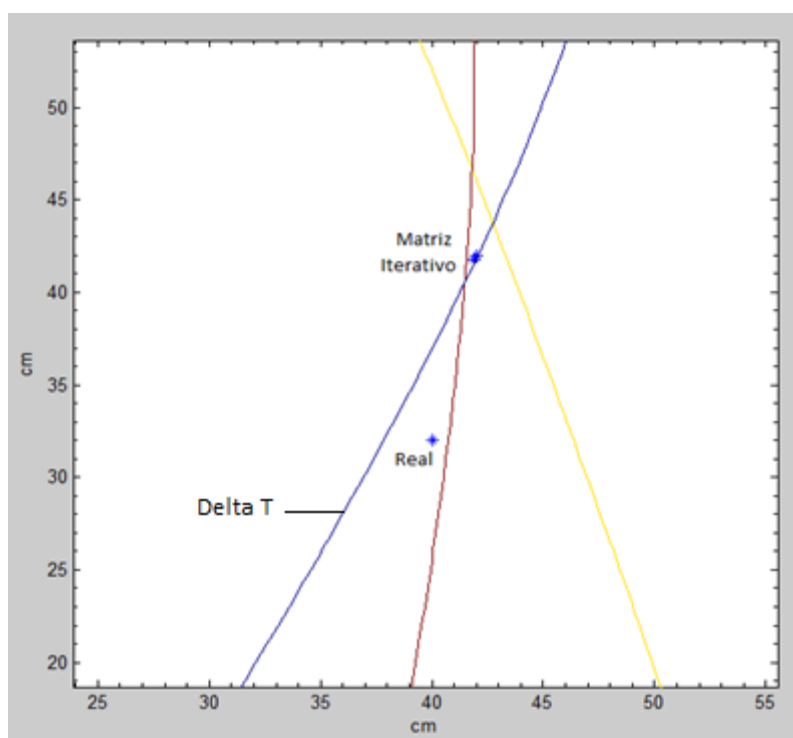


Figura 55. Localização fonte 5 com zoom, chapa com acessórios, limiar 70db.

4.3.2.2. Algoritmo Baseado em 3 Sensores

Na Figura 56 apresenta os resultados de localização para a fonte 4 para os algoritmos da Vallen Systeme e o algoritmo de três sensores em disposição linear de ZHANG. Pode ser visto que a localização é muito próxima para o algoritmo com limiar de 40db onde os resultados estão superpostos para ambos os algoritmos. No entanto para limiar de 70db, a localização apresenta um erro maior à 10 cm para os dois algoritmos.

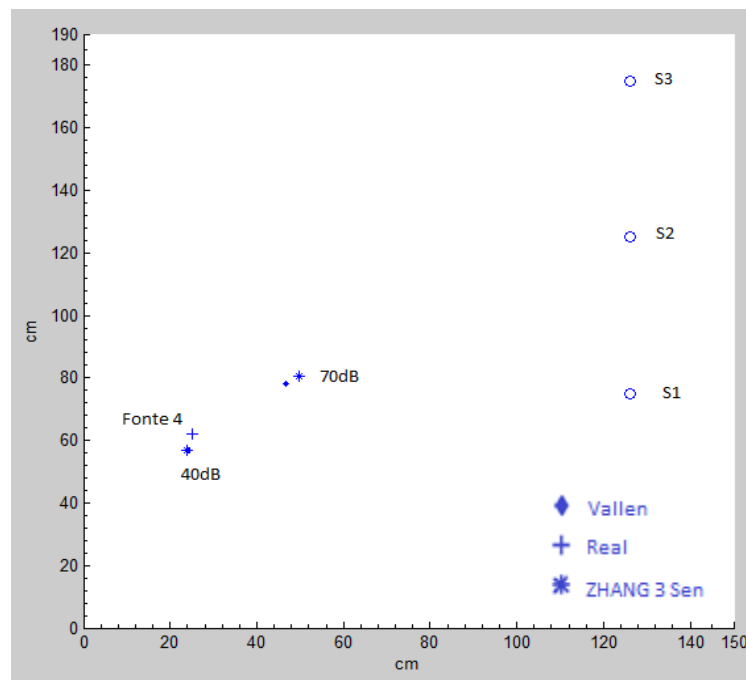


Figura 56. Localização fonte 4, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40dB e 70db.

Na Figura 57 são apresentados os resultados nas localizações para a fonte 5 para 40db e 70db. Aqui novamente pode ser visto que para 40db os dois algoritmos convergem numa coordenada muito próxima da real. Já os algoritmos com 70db apresentam um erro maior. Neste caso os dois algoritmos convergem praticamente na mesma coordena sendo sobreposto.

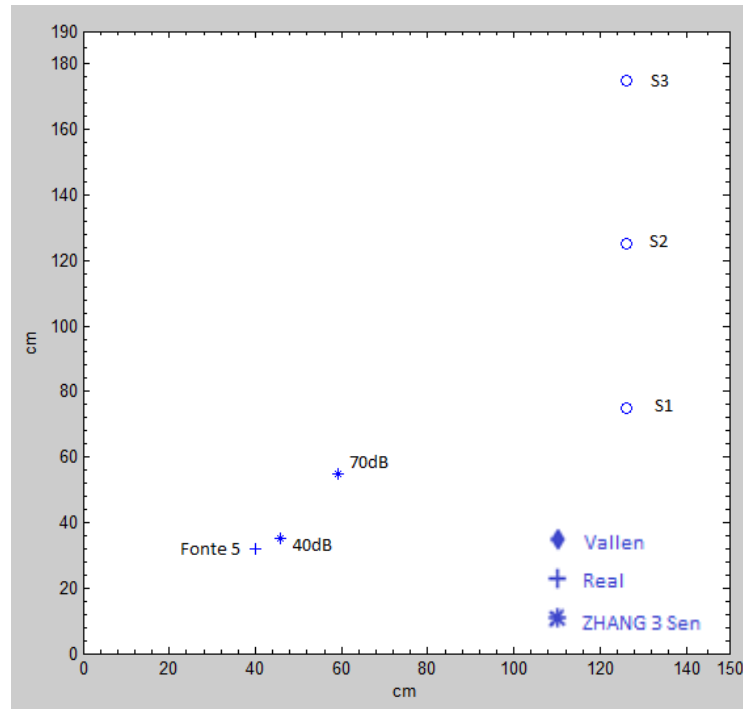


Figura 57. Localização fonte 5, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40dB e 70db.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados nas coordenadas de localização para o ensaio 2 para todos os algoritmos com três e quatro sensores para os limiares de 40db e 70db. Indicando o erro, como a distância entre a coordenada real da fonte e as coordenadas de localização para cada algoritmo.

Como pode ser visto, em linhas gerais o erro é menor para o limiar de 40db (modo propagação S_0), em comparação com os erros obtidos para 70db (modo propagação A_0). Só que agora as magnitudes do erro aumentam em comparação com o ensaio 1. Dando valores de erro acima de 2 cm para 40db e valores de erro acima de 9 cm para 70db.

Tabela 6. Coordenadas [x,y] das fontes 4 e 5, fora do arranjo de sensores, para os diferentes algoritmos de localização em 40dB e 70dB.

Algoritmos	Fonte 4			
	40dB		70dB	
Real	[25;62]	Erro [cm]	[25;62]	Erro [cm]
Vallen 4sen	[22,7;56,2]	6,2	[29,6;77,4]	16
Iterativo	[23;61,6]	2	[30,2;75,8]	14,7
Matriz	[22;59]	4,2	[30;77]	15,8
Delta T	[x]	Fora	[x]	Fora
ZHANG 3 Sen	[24;57]	5	[49;80]	30
Vallen 3sen	[24,1;56,8]	5,2	[46,7;78,1]	27
Algoritmos	Fonte 5			
	40dB		70dB	
Real	[40;32]	Erro [cm]	[40;32]	Erro [cm]
Vallen 4sen	Não localiza	-	Não localiza	-
Iterativo	[31,5;30,8]	8,5	[41,8;41,7]	9,8
Matriz	[36;27]	6,4	[42;42]	10,1
Delta T	[31;30]	9,2	[x]	Fora
ZHANG 3 Sen	[45;35]	5,8	[59;54]	29
Vallen 3sen	[45,9;35,2]	6,7	[59,3;54,8]	29,8

4.3.3. Ensaio 3

Neste ensaio, são simuladas as mesmas fontes 4 e 5 só que agora as posições dos sensores são deslocadas de forma que as fontes fiquem dentro do arranjo de sensores. A diferença das fontes 1, 2 e 3 que estavam ubicadas dentro do arranjo de sensores, as fontes 4 e 5 estão próximas a furos e reforços com solda, e o alvo é ver o comportamento de localização dos algoritmos para fontes nessas circunstâncias onde a propagação das ondas apresentam múltiplas reflexões.

4.3.3.1. Algoritmos Baseados em 4 Sensores

Na tabela 7 são apresentadas as coordenadas das posições dos sensores na chapa, assumindo que a origem de coordenadas é posicionado no canto inferior esquerdo da chapa.

Tabela 7. Coordenadas dos sensores [cm], ensaio N°3, fontes simuladas 4 e 5 dentro da matriz de sensores.

	X [cm]	Y [cm]
S1	26	30
S2	26	125
S3	126	125
S4	126	30

Nas figuras 58 (com zoom) e 59, se mostram as localizações da fonte 4 para 40db e 70db respectivamente. Para o caso de limiar 40db os algoritmos em geral apresentam uma melhor exatidão em comparação com o ensaio 2, dando erros menores a 2cm. Para o caso de limiar 70db as localizações para todos os algoritmos tiveram também uma melhor exatidão em comparação com o ensaio 2, com erros abaixo de 10cm.

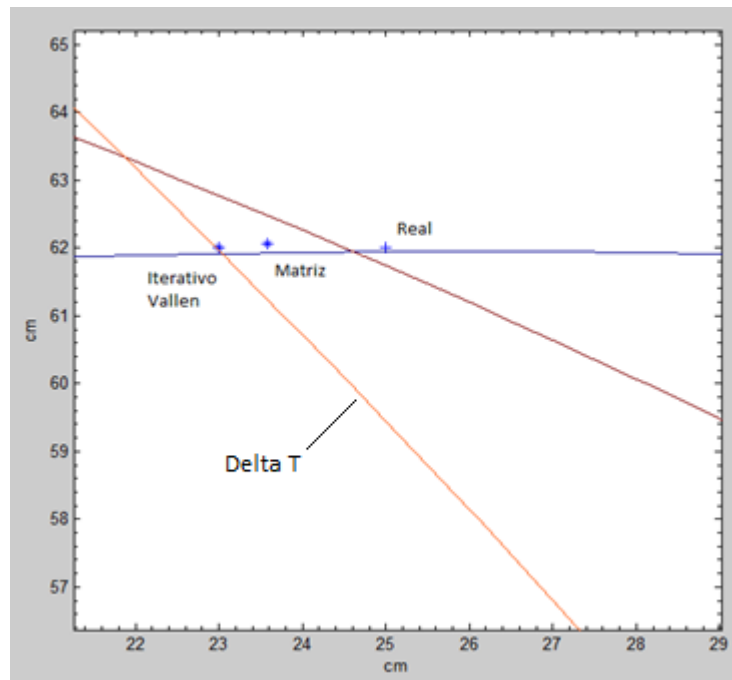


Figura 58. Localização fonte 4 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 40db.

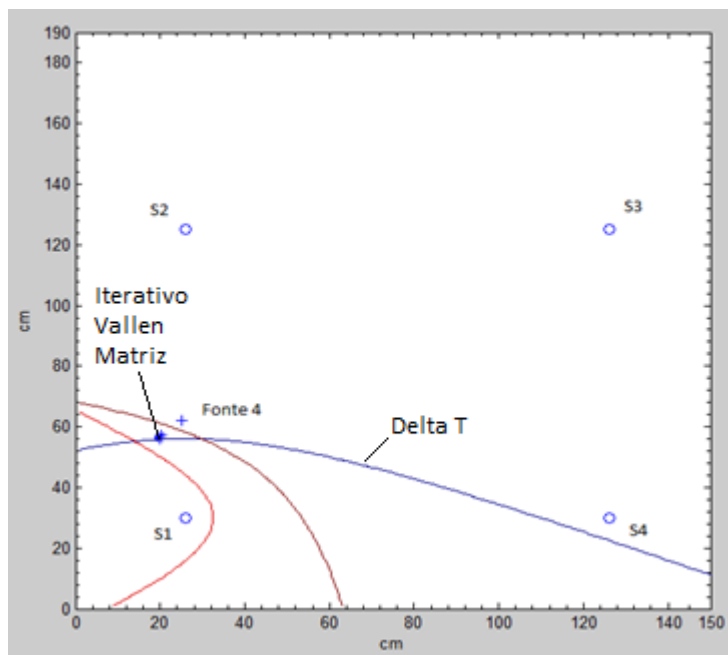


Figura 59. Localização fonte 4, identificando os diferentes algoritmos chapa aço 5mm com reforços, limiar 70dB.

Na Figura 60 e 61 (com zoom) se observam as localizações da fonte 5 para 40db e 70db respectivamente.

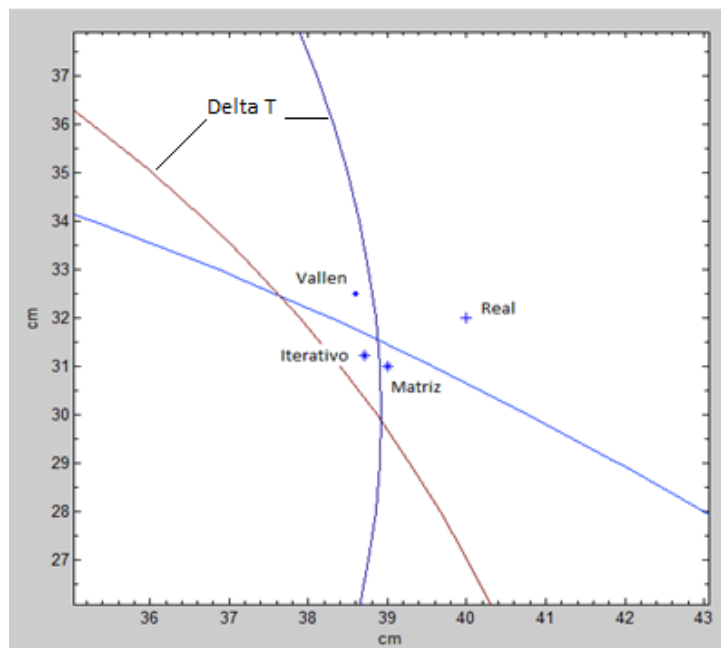


Figura 60. Localização fonte 5 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 40db.

Para o caso de 40db todos os algoritmos apresentam um erro menor à 2 cm, já para o caso de 70db o erro é maior à 2cm, exceto para o algoritmo de localização da Vallen Systeme, onde o erro na localização é menor à 1cm. Aqui também vemos a melhoria na localização para o caso de fontes dentro do arranjo de sensores para 40db e 70db de limiar.

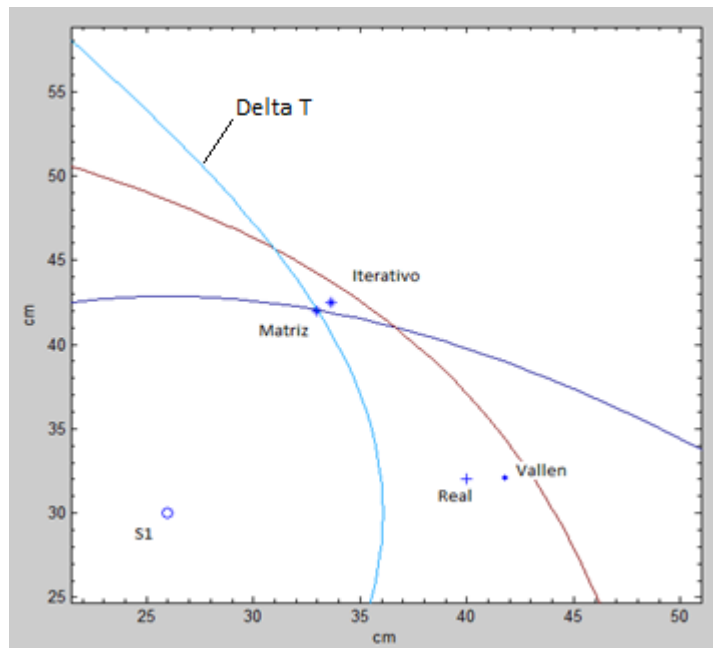


Figura 61. Localização fonte 5 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, limiar 70db.

4.3.3.2. Algoritmo Baseado em 3 Sensores

As Figuras 62 e 63, apresentam os resultados de localização para o método com 3 sensores em disposição linear e o algoritmo da Vallen Systeme para a fonte 4, para 40db e 70db respectivamente. É possível observar que os métodos apresentam um erro maior que para os métodos utilizados com quatro sensores. Também a melhor exatidão dá se para o limiar de 40db, onde para o algoritmo do ZHANG e da Vallen Systeme dão resultados muitos semelhantes e com um erro de 8 cm da coordenada real.

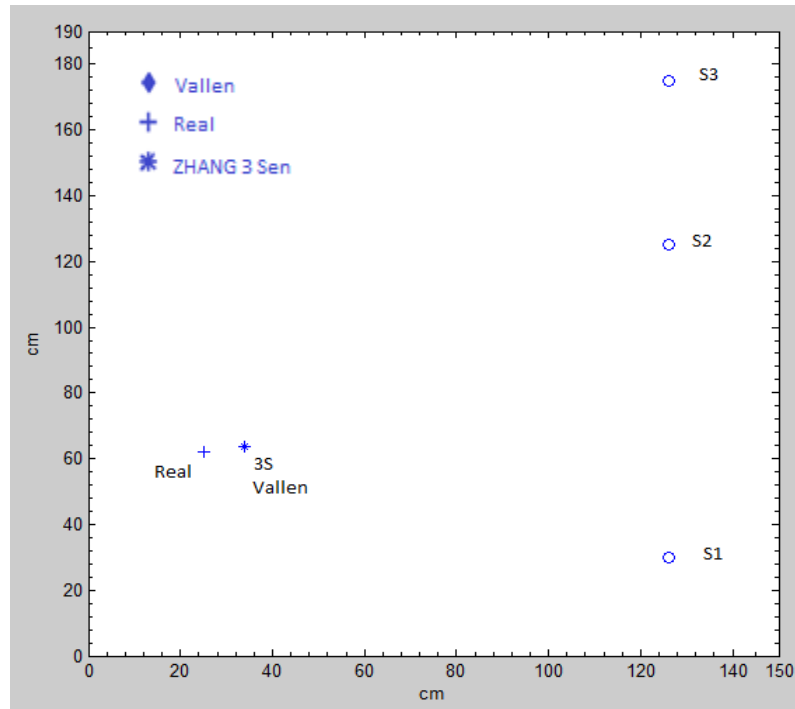


Figura 62. Localização fonte 4, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40dB.

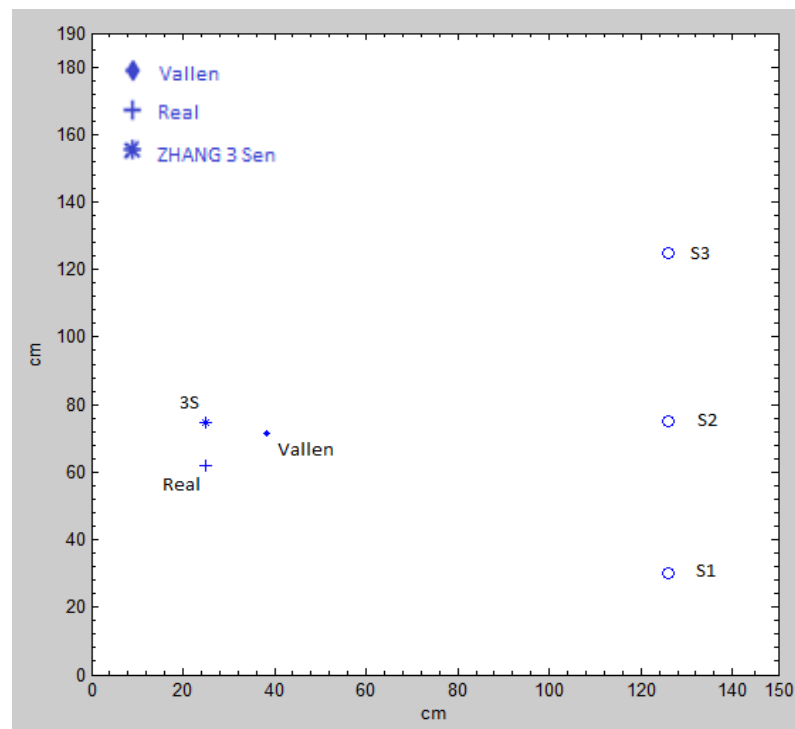


Figura 63. Localização fonte 4, chapa aço 5mm com reforços, limiar 70dB.

Nas Figuras 64 e 65, apresentam os resultados de localização para a fonte 5 com o método de ZHANG em disposição linear junto com o método da Vallen Systeme. Aqui

também é possível observar que o método apresenta maior erro que para o caso dos métodos utilizados com quatro sensores.

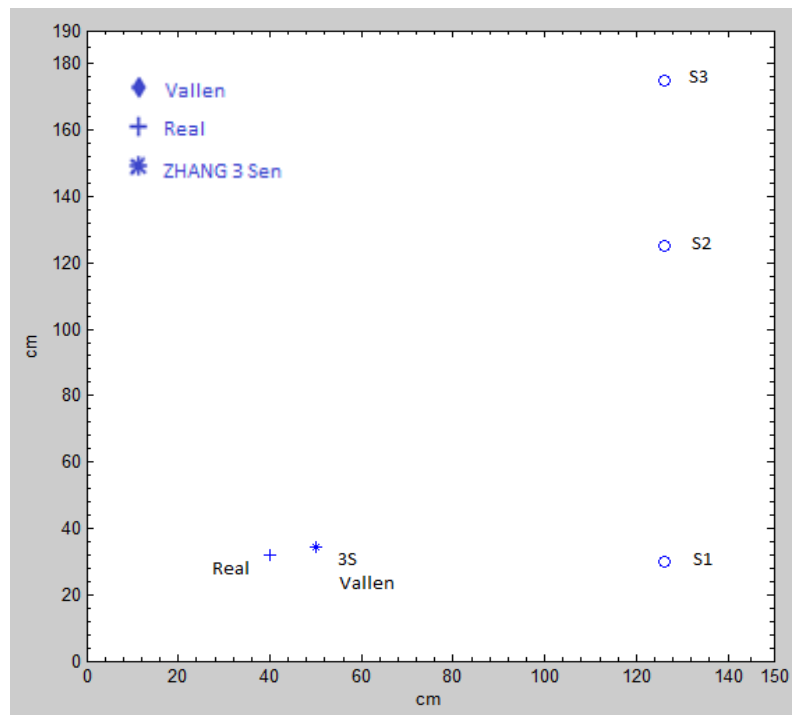


Figura 64. Localização fonte 5, chapa aço 5mm com reforços, limiar 40dB.

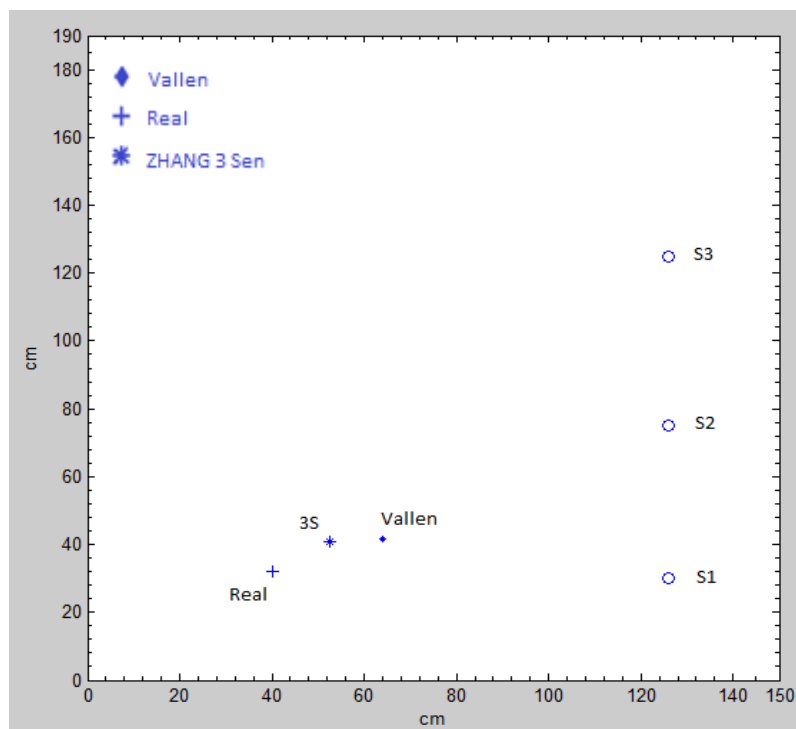


Figura 65. Localização fonte 5, chapa aço 5mm com reforços, limiar 70dB.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados de localização para todos os algoritmos para o ensaio 3. Indicando as coordenadas localizadas para as fontes 4 e 5 e o erro obtido para cada algoritmo em comparação com a coordenada real.

Em linhas gerais pode ser visto na Tabela 8 que a localização melhora muito para fontes posicionadas no interior da matriz de sensores tanto para 40db e 70db. Dando erros abaixo de 2 cm no caso de limiar de 40db e erros abaixo de 8 cm no caso de 70db, para algoritmos com quatro sensores. Para algoritmos com três sensores não tem uma mudança pronunciada no erro em comparação com o ensaio 2, devido a que a disposição linear não gera uma área onde as fontes fiquem dentro.

Tabela 8. Coordenadas [x,y] das fontes 4 e 5, dentro da matriz dos sensores, para os diferentes algoritmos de localização em 40dB e 70dB.

Algoritmos	Fonte 4			
	40dB		70dB	
Real	[25;62]	Erro [cm]	[25;62]	Erro [cm]
Vallen 4sen	[23,5;62]	1,5	[19,4;56.9]	7,5
Iterativo	[23,5;62]	1,5	[20;57]	7,1
Matriz	[24;62]	1	[20;56]	7,8
Delta T	[x]	Fora	[x]	Fora
ZHANG 3 Sen	[33;63]	8	[28;71]	10
Vallen 3sen	[34;63,3]	9	[38,3;71,6]	16,4
Algoritmos	Fonte 5			
	40dB		70dB	
Real	[40;32]	Erro [cm]	[40;32]	Erro [cm]
Vallen 4sen	[38,6;32,5]	1,4	[41,8;32,1]	1,8
Iterativo	[38,7;31,2]	1,5	[33;42]	12,2
Matriz	[39;32]	1,4	[33;42]	12,2
Delta T	[x]	Fora	[x]	Fora
ZHANG 3 Sen	[50;34]	10,1	[52,3;40,8]	15,1
Vallen 3sen	[50,2;34,3]	10,4	[63,9;41,5]	25,7

4.4. Análise de Localização Chapa Aço Sem Acessórios de 12,7mm

Para o análise de localização na chapa aço 12,7mm de espessura sem acessórios ou reforços foram utilizadas as seguintes velocidades de propagação da onda acústica:

$$V_{S0} = 5010\text{m/s, threshold } 40\text{dB}$$

$$V_{A0} = 3200\text{m/s, threshold } 70\text{dB}$$

Como mencionado anteriormente na chapa sem acessórios foi realizado o ensaios 1 e 2. O ensaio 3 não foi realizado devido à que a chapa sem acessórios não apresenta lugares críticos como furos, soldas ou reforços que possam mudar as características de propagação da onda acústica.

4.4.1. Ensaio 1

Seguidamente são apresentados os resultados de localização para o ensaio 1 com fontes colocadas dentro do arranjo de sensores para os algoritmos baseados em três e quatro sensores.

4.4.1.1. Algoritmo Baseado em 4 Sensores

A Tabela 9 apresenta as coordenadas de posição dos sensores para o ensaio 1 com quatro sensores.

Tabela 9. Coordenadas em [cm] de posicionamento dos sensores na chapa sem acessórios.

	X [cm]	Y [cm]
S1	65	127
S2	66	227
S3	167	227
S4	166	127

Na Figura 66, observa-se as coordenadas de localização da fonte 1 com zoom para os algoritmos com quatro sensores. Pode ser visto que para o caso da chapa sem acessórios com limiar de 40db a exatidão é muito boa, com erros menores à 1 cm.

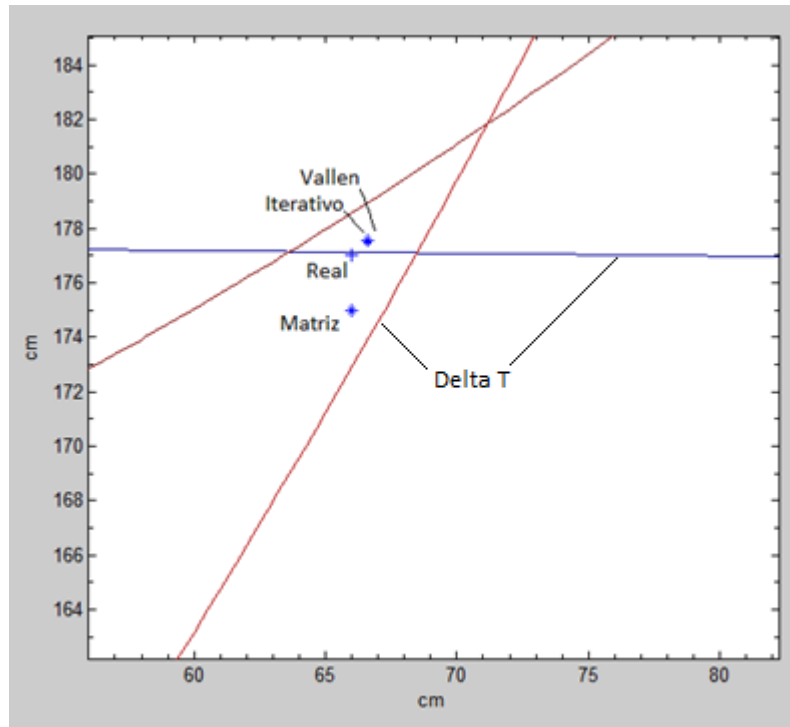


Figura 66. Localização fonte 1 com zoom, identificando as localizações para os diferentes algoritmos com quatro sensores, chapa sem acessórios, limiar 40db.

Para o caso de uma chapa lisa sem acessórios e reforços a exatidão melhora muito principalmente para o limiar de 70db Figura 67, que no caso da chapa com acessórios apresentava um erro maior. Isto pode ser devido a que para o limiar de 70db o registro de sinal é à uma maior amplitude onde tem uma menor incidência os sinais de ruído, além que a propagação do sinal na chapa sem acessórios tem uma menor reflexão, o que pode induzir num menor erro no cálculo da velocidade. As outras coordenadas de localização para as fontes 1 e 2 para os algoritmos baseados em 4 sensores estão resumidas na Tabela 10.

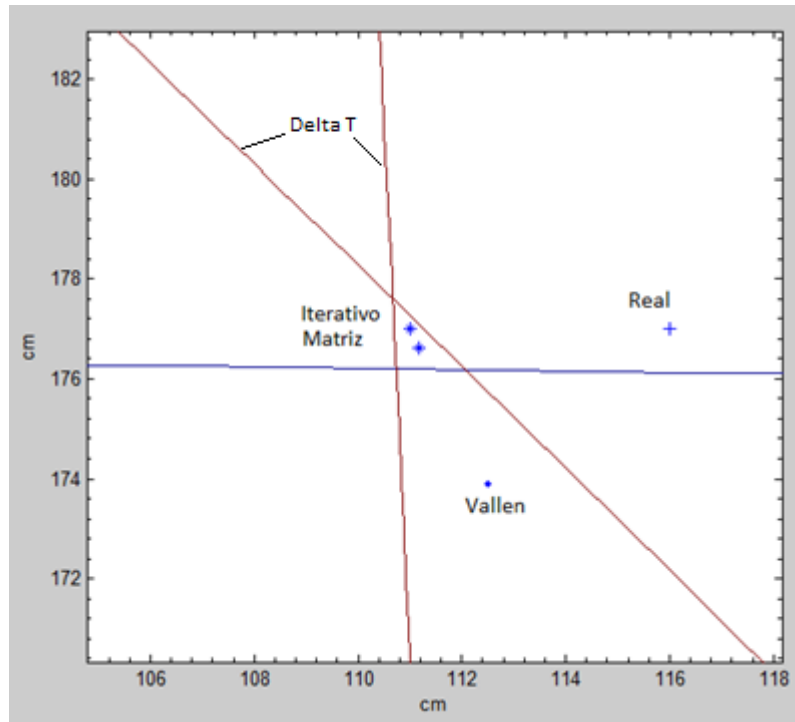


Figura 67. Localização fonte 3 com zoom, chapa sem acessórios, limiar 70db.

4.4.1.2. Algoritmo Baseado em 3 Sensores

Nas Figuras 68 e 69, pode ser visto que no caso do ensaio na chapa sem acessórios, e utilizando o método de 3 sensores em disposição linear de ZHANG, dão bons resultados na localização tanto para 40db (Modo So) e 70db (Modo Ao). Nóte-se também que para o caso de 70db o erro é menor que para o caso de 40db. As coordenadas de localização para o algoritmo da Vallen Systeme foram obtidas em sentido inverso, ou seja no quadrante oposto. Novamente podemos ver que o algoritmos da Vallen Systeme não obtem bons resultados quando as fontes estão fora do arranjo de sensores. Confirmando sua especificação de que as fontes devem estar dentro da matriz de sensores para uma correta localização.

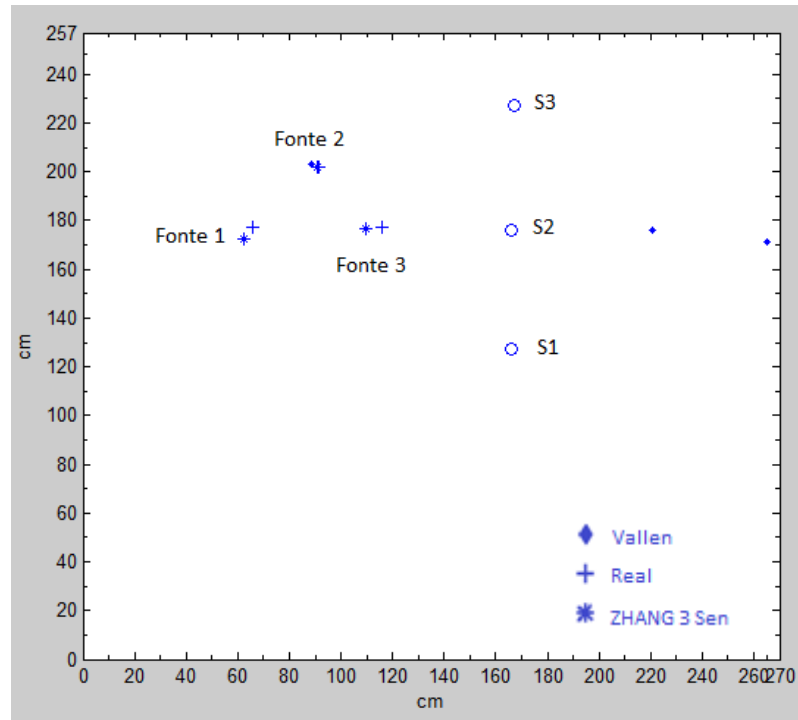


Figura 68. Localização fonte 1, 2 e 3, chapa aço lisa 12,7mm sem reforços, limiar 40dB.

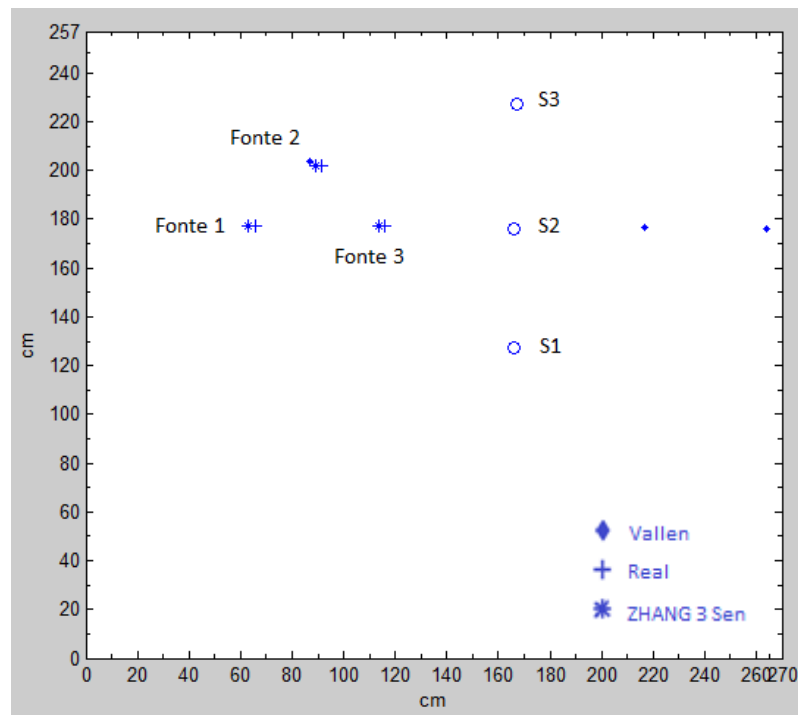


Figura 69. Localização fonte 1, 2 e 3, chapa aço lisa 12,7mm sem reforços, limiar 70dB.

Em geral todos os algoritmos com quatro sensores estudados para 40db, apresentam boa exatidão no caso da chapa sem acessórios com fontes dentro do arranjo de sensores, dando

valores de erro abaixo de 2,5cm. Para o caso de 70db e quatro sensores os erros vão acima de 3cm. Para os algoritmos com três sensores o método do ZHANG teve boa exatidão, já o algoritmo da Vallen Systeme com três sensores obtém resultados em direção oposta à real, dando erros maiores. Na Tabela 10 são apresentados os resultados de localização para o ensaio1 para todos os algoritmos em 40db e 70db, indicando os erros obtidos para todos os algoritmos.

Tabela 10. Coordenadas [x,y] de localização das fontes 1, 2 e 3, dentro da matriz dos sensores, para os diferentes algoritmos de localização em 40dB e 70dB, chapa sem acessórios.

Algoritmos	Fonte 1			
	40dB		70dB	
Real	[66 ; 177]	Erro [cm]	[66 ; 177]	Erro [cm]
Vallen 4sen	[66,6; 177,5]	0,78	[63,4;175]	3,2
Iterativo	[66,5; 177,5]	0,7	[61;175]	5,3
Matriz	[66; 175]	2	[56;179]	10,1
Delta T	[®]	Dentro	[x]	Fora
ZHANG 3 sen	[62,1; 172,2]	6,1	[62; 177]	4
Vallen 3sen	[265; 171]	199	[264; 176]	198
Algoritmos	Fonte 2			
	40dB		70dB	
Real	[91,5 ; 202]	Erro [cm]	[91,5 ; 202]	Erro [cm]
Vallen 4sen	[92; 203]	1,1	[85,4;200,5]	6,2
Iterativo	[92; 203]	1,1	[88;205]	4,6
Matriz	[90; 200]	2,5	[89;206]	4,7
Delta T	[x]	Fora	[x]	Fora
ZHANG 3 sen	[91,1; 201,9]	0,4	[89; 202]	2,5
Vallen 3sen	[88,7; 203,4]	3,13	[86,6; 203,8]	5,2
Algoritmos	Fonte 3			
	40db		70dB	
Real	[116 ; 177]	Erro [cm]	[116 ; 177]	Erro [cm]

Vallen 4sen	[114,7;177,2]	1,3	[112,5;173,9]	4,6
Iterativo	[117; 177]	1	[111;176]	5
Matriz	[116; 176]	1	[111;177]	5
Delta T	[x]	Fora	[x]	Fora
ZHANG 3 sen	[109,3;176,8]	6,7	[113; 177]	3
Vallen 3sen	[221; 176]	105	[216; 176,6]	100

Em linhas gerais pode ser visto que a melhor exatidão dá se para o limiar de 40db. Mais a diferença na magnitude do erro entre 40db e 70db é pequena. Também pode ser visto a melhoria na localização do algoritmo de três sensores de ZHANG dando erros muito próximos para 40db e 70db, e no caso das fontes 1 e 3 teve melhor exatidão para 70db.

4.4.2. Ensaio 2

Seguidamente são apresentados os resultados na localização para os algoritmos com três e quatro sensores para as fontes fora do arranjo de sensores.

4.4.2.1. Algoritmo Baseado em 4 Sensores

Nas Figuras 67 e 68 são observadas as localizações da fonte 4, cuja posição é fora do arranjo de sensores, para o caso de 40db e 70db respectivamente. Onde é visto que para o caso de 70db os algoritmos de localização apresentam uma melhor exatidão em comparação aos resultados obtidos para 40db. Isto pode ser devido a que o ensaio da chapa sem acessórios foi realizado fora do Laboratório, submetido a ruído do ambiente e vibrações, onde a velocidade para 40db (modo de propagação S_0), pode conter alguma componente de ruído superposta ao sinal da fonte simulada, que pode ter contribuído num tempo de registro diferente do sinal real.

Os resultados de localização da fonte 5, mostram que para o caso de limiar 70db, se obtém melhor exatidão para todos os algoritmos em comparação com a mesma fonte para chapa com acessórios onde os erros vão acima de 9cm. As outras coordenadas de localização para todos os algoritmos utilizados podem ser visualizadas na Tabela 11.

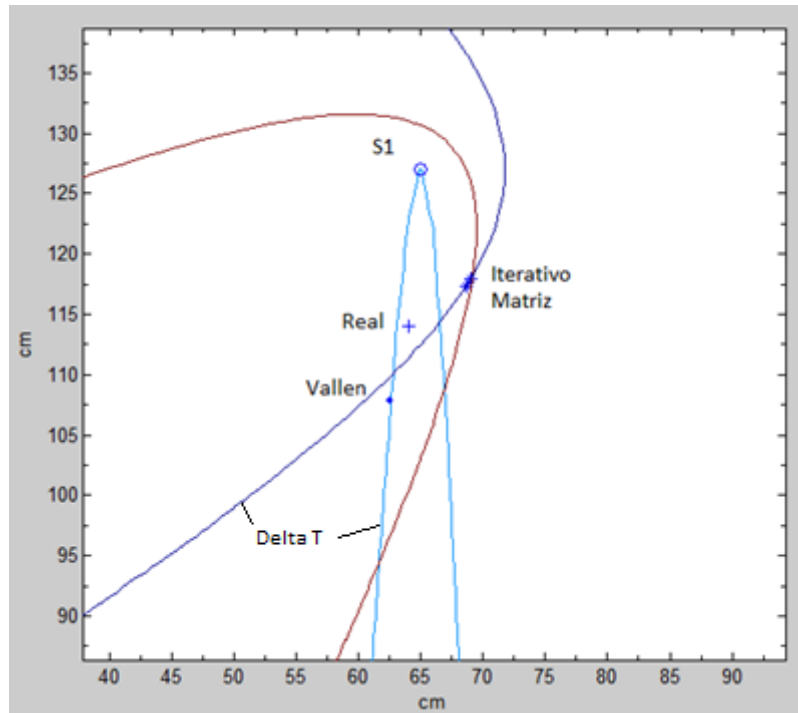


Figura 70. Localização fonte 4. Chapa aço 12,7mm sem acessórios, limiar 40dB.

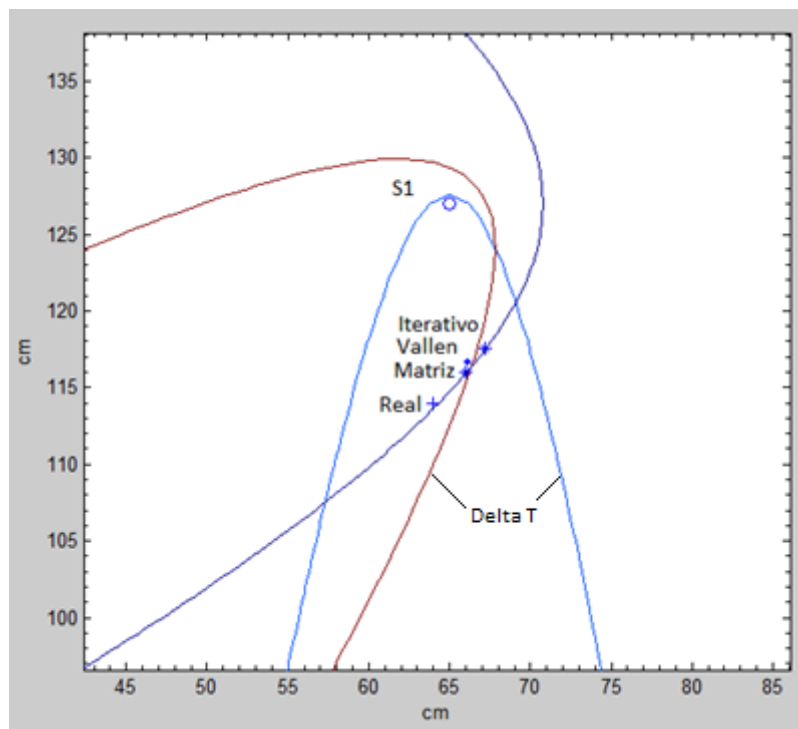


Figura 71. Localização fonte 4. Chapa aço lisa 12,7mm sem acessórios, limiar 70dB.

4.4.2.2. Algoritmo baseado em 3 sensores

Nas figuras 72 e 73, observam-se as coordenadas de localização na chapa sem acessórios, para 40db e 70db, para os algoritmos 3 sensores em disposição linear de ZHANG e o algoritmo da Vallen Systeme. As Figuras mostram que para ambos os limiares existe um erro substancial na localização, e no caso do algoritmo da Vallen Systeme não localiza para 40db Figura 72. Estes desvíos podem ser devido a presença de ruídos acoplados na propagação da onda ou devido ao tipo de algoritmo que utiliza a Vallen. Também se demonstra a ineficácia dos métodos com três sensores em ambientes com ruído em comparação com os métodos com quatro sensores. Na Figura 73 pode ser visto novamente que o algoritmo da Vallen Systeme obteve as coordenadas de localização no quadrante oposto, dando grandes valores de erro.

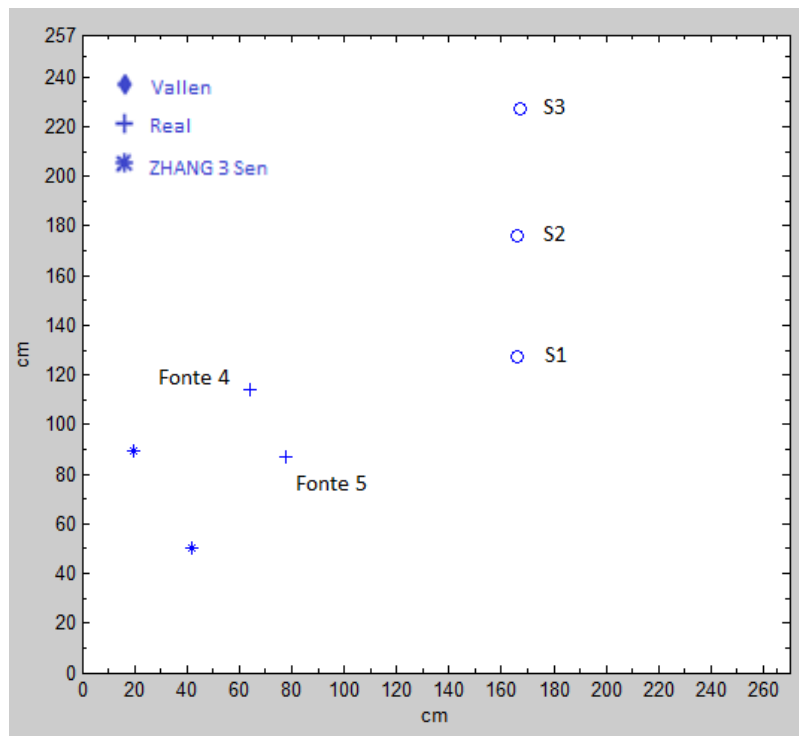


Figura 72. Localização fonte 4 e 5, chapa aço lisa 12,7mm sem acessórios, limiar 40dB (Vallen não localiza).

Na Tabela 11 são apresentados os resultados nas localizações do ensaio 2 para todos os algoritmos com limiar de 40db e 70db, indicando os erros nas coordenadas de localização. Em geral pode ser visto que os erros para a chapa sem acessórios e fontes fora do arranjo de sensores para 40db e 70db são muito semelhantes. No caso da fonte 4 o erro foi menor para

70db para os algoritmos com quatros sensores. Os algoritmos com 3 sensores tiveram uma extatidão menor tanto para 40db como para 70db.

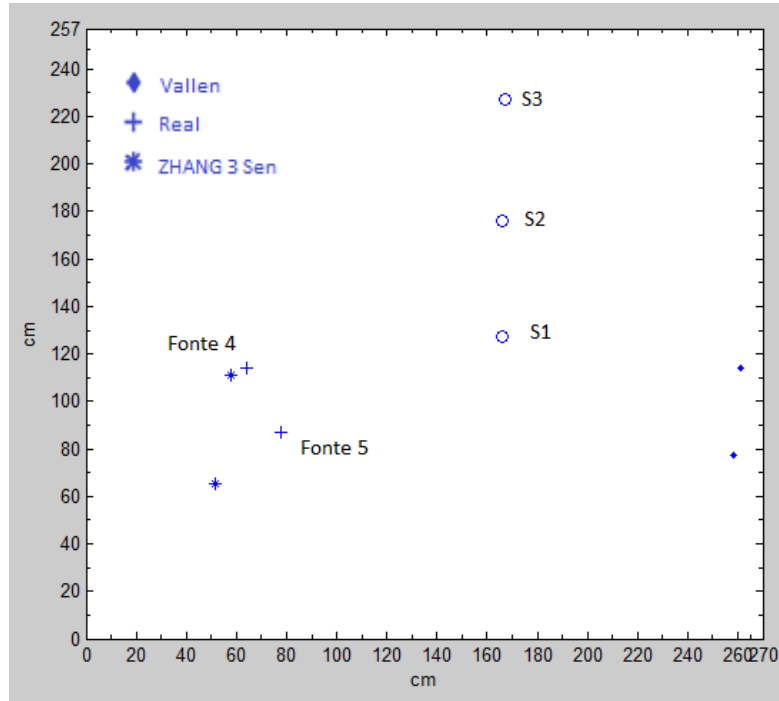


Figura 73. Localização fonte 4 e 5, chapa aço lisa 12,7mm sem acessórios, limiar 70dB (Vallen localiza no sentido oposto).

Tabela 11. Coordenadas [x,y] de localização das fontes 4 e 5, fora do arranjo dos sensores, para os diferentes algoritmos de localização em 40dB e 70dB.

Algoritmos	Fonte 4			
	40dB		70dB	
Real	[64; 114]	Erro [cm]	[64; 114]	Erro [cm]
Vallen 4sen	[62,5; 107,9]	6,2	[66,1; 116,7]	3,4
Iterativo	[68,7; 117,3]	5,7	[67,1; 117,5]	4,6
Matriz	[69; 118]	6,4	[66; 116]	2,8
Delta T	[x]	Fora	[x]	Fora
3 Sen	[19; 89]	51,4	[58; 111]	6,7
Vallen 3sen	Não localiza	-	[261; 114]	197

Continuação Tabela 11.

Algoritmos	Fonte 5			
	40dB		70dB	
Real	[78; 87]	Erro [cm]	[78; 87]	Erro [cm]
Vallen 4sen	Não localiza	-	Não localiza	-
Iterativo	[77; 81,2]	5,8	[80; 91]	4,4
Matriz	[78; 84]	3	[81; 92]	5,8
Delta T	[78,5; 84,5]	2,5	[75; 81]	6,7
3 Sen	[42; 50]	51,6	[51,7; 65,2]	34,1
Vallen 3sen	Não localiza	-	[258; 77,6]	196,7

5. CONCLUSÕES

Os resultados de localização obtidos com os diferentes algoritmos demonstraram uma grande dispersão de resultados dependendo das condições da chapa ensaiada, limiar utilizado, posições das fontes e tipo de algoritmo.

Para a chapa com acessórios em geral os algoritmos tiveram boa exatidão na localização para o caso de limiar de 40db (Modo de propagação So), onde a melhor exatidão foi para o algoritmos iterativo e da Vallen Systeme.

Para a chapa com acessórios os algoritmos com limiar de 70db (Modo de propagação Ao) tiveram uma exatidão menor, onde a melhor exatidão foi para o algoritmo da Vallen Systeme e o algoritmo iterativo.

Para o caso de fontes posicionadas perto de lugares críticos (furos, soldas) dentro da matriz de sensores o erro na localização diminuí em grande porcentagem em comparação com as mesmas fontes fora do arranjo de sensores.

Para a chapa sem acessórios os algoritmos com threshold de 40db e 70db tiveram resultados de localizações muito próximas dando erros muito semelhantes. Em geral o algoritmo que apresentou a melhor concordância nas coordenadas de localização para a chapa sem acessórios foi o iterativo seguido da Vallen Systeme. Isto dá uma indicação que o algoritmo da Vallen Systeme pode ser baseado em um método iterativo.

Os resultados nas localizações em chapas obtidas para todos os algoritmos podem gerar uma base para a seleção do tipo de algoritmo para uma geometria determinada e possíveis localizações de fontes para futuros análises.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Fazer uma avaliação da exatidão dos diferentes algoritmos com diferentes fontes de sinais. Por exemplo, gerar fontes dentro do plano (crescimento de trincas) e fontes fora do plano (impactos).
- 2) Utilizar outros equipamentos de aquisição de sinais e comparar os resultados
- 3) Utilizar outro método de registro de tempo no sistema de aquisição, exemplo correlação cruzada, amplitude máxima e comparar os resultados de localização para todos os algoritmos.
- 4) Verificar o comportamento dos algoritmos para outros tipos de materiais ex. Materiais compósitos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALJETS Dirk, CHONG Alex, WILCOX Steve. **Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array.** J. Acoustic Emission. Cardiff, UK. 28 (2010): 85-98. 2010.

ASTY M. **Acoustic emission source location on a spherical or plane surface.** NDT **International.** 223-226. Outubro 1978.

BAR-COHEN, Yoseph. **Ultrasonic Inspection** In: ASM Handbook. Non Destructive Evaluation and Quality control. Vol.17. 9th Edition. ASM International. 1989. ISBN 0-87170-007-7.

BAXTER Matthew, PULLIN Rhys. (2006). **Delta T source location for acoustic emission.** Mechanical Systems and Signal Processing. Cardiff UK. 21 (2007): 1512–1520. Maio 2006.

BOCZAR Tomasz, LORENC Marcin. **Determining the Repeatability of Acoustic Emission Generated by the Hsu-Nielsen Calibration Source.** Molecular and Quantum Acoustics. 2004, Vol. 25, pp 177-192.

CALLEGARI JAQUES, Ricardo. **Avaliação de parâmetros de emissão acústica para monitoramento de risers flexíveis.** 2009 Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais PPGEM. Porto Alegre 2009.

CARPINTERI Alberto; LACIDOGNA Giuseppe. **Acoustic Emission and Critical Phenomena: From Structural Mechanics to Geophysics.** Taylor&Francis Group, London, UK. 2008.

CASTAGNEDE Bernard; SACHSE Wolfrang; KIM Kwang Yul. **Location of pointlike acoustic emission sources in anisotropic plates.** J. Acoust. Soc. Am. Ithaca, New York 86 (3): 1161-1171. Maio 1989.

CHAN Y.T.; HO K.C. **An efficient closed-form localization solution from time difference of arrival measurement.** IEEE. Ontario, Canadá. II 393-396. 1994.

CIAMPA F., MEO M. **Acoustic emission source localization and velocity determination of the fundamental mode Ao using wavelet analysis and a Newton-based optimization technique.** Smart Mater. Struct. Bath, UK. (19) : 1-14. Março 2010.

CRUZ, Adriano Joaquim de Oliveira. **Algoritmos.** Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em <<http://equipe.nce.ufrj.br/adriano/c/apostila/algoritmos>> Acesso em: 01/2013

DAMASCENO SOARES, Sergio. **Correlações entre emissão acústica de defeitos e parâmetros de mecânica da fratura na avaliação da integridade de dutos.** 2008 Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Rio de Janeiro 2008.

DEHGHAN NIRI E., SALAMONE S, **A probabilistic framework for acoustic emission source localization in plate-like structures.** Smart Mater. Struct. Buffalo, USA. 21 (2012): 1-16. Febrero 2012.

DELOSME J.M.; MORF M.; FRIEDLANDER B. **Source location from time difference of arrival.** IEEE. Stanford, California. 1980.

EATON M. J.; PULLIN R.; HOLFORD K. M. **Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping.** Elsevier Ltd. Janeiro 2012.

GROSSE, Christian, OHTSU Masayasu. **Acoustic emission Testing.** Springer 2008.

HELLIER Charles J. **Handbook of Nondestructive Evaluation,** McGRAW-HILL, 2003.

KAPHLE Manindra, TAN Andy. **Identification of acoustic emission wave modes for accurate source location in plate-like.** Struct. Control Health Monit. Brisbane, Australia. DOI: 10.1002/stc.413. Junio 2010.

KAPHLE Manindra. **Source location of acoustic emission waves for structural health monitoring of bridges** 2009.

KINSLER Lawrence E. FREY Austin R.; COPPENS Alan B.; SANDERS James V. **Fundamentals of Acoustics.** 4th Edição. John Wiley&Sons,Inc. ISBN 0-471-84789-5. USA, 2000.

MATLAB User Guide, Matlab R2010b. 2010.

MIX Paul E. **Introduction to Nondestructive Testing**. A Training Guide. Second Edition. Hoboken New Jersey. John Wiley&Sons, Inc. 2005.

MURAVIN Boris. **Acoustic Emission Wave Propagation and Source Location**. Disponível em: <[http:// www.muravin.com](http://www.muravin.com)> Acesso em: 01/2013

PENG F B, JAQUES Ricardo, STROHAECKER Roberto. **Localização planar através da intersecção de hipérbolas com solução por Newton Raphson em placa de aço utilizando sensores de emision acustica**. In: Encontro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica EGLEA 7. 2011. Mendoza, Argentina.

POLLOCK Adrian. **Acoustic Emission Inspection**. In: ASM Handbook. Non Destructive Evaluation and Quality control. Vol.17. 9th Edition. ASM International. 1989. ISBN 0-87170-007-7.

PROSSER William H. **Acoustic Emission**. In: SCHULL Peter J. Nondestructive Evaluation. Theory, Techniques and Applications. Altoona Pennsylvania. Marcel Dekker, Inc. 2001. Cap. 6, 369-446.

SCHOLEY J., WILCOX P. **Two dimensional source location techniques for large composites plates**. In: EWGAE 28, 2008. Cracow UT. 160-165.

SCHOLEY J., WILCOX P. **A generic technique for acoustic emission source location**. J. Acoustic Emission. Bristol, UK. 27 (2009): 291-298. 2009.

SPENCER Stevens. **Closed form analytical solutions of the time difference of arrival source location problem for minimal element monitoring arrays**. J. Acoust. Soc. Am. 127 (5). 2943-2954. 2010.

SPENCER Stevens. **The two dimensional source location problems for time differences of arrival at minimal element monitoring arrays**. Journal Acoust. Soc. Am. 121 (6): 3579–3594. 2007.

TOBIAS A. **Acoustic-emission source location in two dimensions by three sensors**. Non-Destructive Testing, (9): 9-12. 1976.

VALLEN SYSTEME GmbH. **Acoustic Emission Sensors Specification**. November 2011.

ZHANG Zhong-ning, LIU Jie, TIAN Jian, JIN Zhi-hao, LI-Xin; **A New Method for Locating Acoustic Emission Source**. IEEE. Shenyang, China. 532-534. 2010.

ZIOLA Steven; GORMAN Michael. **Source location in thin plates using cross-corelation**. J. Acoust. Soc. Am. Monterey, California 90 (5): 2551-2556. Noviembre 1991.

8. ANEXO

8.1. Exemplo algoritmo método da Matriz

```
clc
clear all
v=458250; % velocidade propagação cm/s
num_of_sensors=4;
%Distancia entre sensores no eixo cartesiano x-y
x1=25;x2=0;x3=75;x4=90; %cm
y1=10;y2=75;y3=80;y4=15; %cm
%%gerando a matriz de tempo segun as posições dos sensores
for x=1:1:100
    for y=1:1:100
        T1(x,y)=(sqrt((x-x1)^2+(y-y1)^2))/v;
        T4(x,y)=(sqrt((x-x2)^2+(y2-y)^2))/v;
        T3(x,y)=(sqrt((x3-x)^2+(y3-y)^2))/v;
        T2(x,y)=(sqrt((x4-x)^2+(y-y4)^2))/v;
    end
end
%Sensor: time difference of arrival TDOA
T12=abs(T1-T2); T13=abs(T1-T3); T14=abs(T1-T4);
T21=abs(T2-T1); T23=abs(T2-T3); T24=abs(T2-T4);
T31=abs(T3-T1); T32=abs(T3-T2); T34=abs(T3-T4);
T41=abs(T4-T1); T42=abs(T4-T2); T43=abs(T4-T3);
%gereando a matriz de tempo do sinal de entrada
s1=input('Ingrese o tempo CH1: ');
s2=input('Ingrese o tempo CH2: ');
s3=input('Ingrese o tempo CH3: ');
s4=input('Ingrese o tempo CH4: ');
for r = 1:1:100
    for s = 1:1:100
        t1(r,s)=s1;
        t2(r,s)=s2;
        t3(r,s)=s3;
        t4(r,s)=s4;
    end
end
%Buscando o sensor com o menor tempo
if t1<=t2&t1<=t3&t1<=t4
    dt21=t2-t1;
    dt31=t3-t1;
    dt41=t4-t1;
    a21=abs(T21-dt21);
    a31=abs(T31-dt31);
    a41=abs(T41-dt41);
    b1=a21+a31+a41;
    surf(b1)
    for i=1:100
        [C1(i),I1]=min(b1(i,:));
        [D1(i),H1]=min(b1(:,i));
        [B1,A1]=min(C1);
        [E1,F1]=min(D1);
    end
end
figure
```

```

    plot(F1,A1,'*','linewidth',1)
else if t2<=t4&t2<=t3&t2<=t1
    dt12=t1-t2;
    dt32=t3-t2;
    dt42=t4-t2;
    a12=abs(T12-dt12);
    a32=abs(T32-dt32);
    a42=abs(T42-dt42);
    b2=a12+a32+a42;
    surf(b2)
    for i=1:100
        [C2(i),I2]=min(b2(i,:));
        [D2(i),H2]=min(b2(:,i));
        [B2,A2]=min(C2);
        [E2,F2]=min(D2);
    end
    figure
    plot(F2,A2,'*','linewidth',1)
else if t3<=t1&t3<=t2&t3<=t4
    dt13=t1-t3;
    dt23=t2-t3;
    dt43=t4-t3;
    a13=abs(T13-dt13);
    a23=abs(T23-dt23);
    a43=abs(T43-dt43);
    b3=a13+a23+a43;
    surf(b3)
    for i=1:100
        [C3(i),I3]=min(b3(i,:));
        [D3(i),H3]=min(b3(:,i));
        [B3,A3]=min(C3);
        [E3,F3]=min(D3);
    end
    figure
    plot(F3,A3,'*','linewidth',1)
else if t4<=t1&t4<=t3&t4<=t2;
    dt14=t1-t4;
    dt24=t2-t4;
    dt34=t3-t4;
    a14=abs(T14-dt14);
    a24=abs(T24-dt24);
    a34=abs(T34-dt34);
    b4=a14+a24+a34;
    surf(b4)
    for i=1:100
        [C4(i),I4]=min(b4(i,:));
        [D4(i),H4]=min(b4(:,i));
        [B4,A4]=min(C4);
        [E4,F4]=min(D4);
    end
    figure
    plot(F4,A4,'*','linewidth',1)
end
end
end
end
hold on
plot(x1,y1,'o','LineWidth',1)
plot(x2,y2,'o','LineWidth',1)

```



```

plot(x3,y3,'o','LineWidth',1)
plot(x4,y4,'o','LineWidth',1)
XLim([0 100])
YLim([0 100])

```

8.2. Exemplo algoritmo método iterativo

%Algoritmo localização fontes planares de EA utilizando 4 sensores.

```

clc
clear all
v=501000; %cm/s
num_of_sensors=4;
pos=[65 66 167 166; %x [cm]
     127 227 227 127]; %y [cm]
%x1=26;x2=26;x3=126;x4=126; %[cm]
%y1=75;y2=175;y3=175;y4=75; %[cm]
ch(1)=input('Ingrese o tempo CH1: ');
ch(2)=input('Ingrese o tempo CH2: ');
ch(3)=input('Ingrese o tempo CH3: ');
ch(4)=input('Ingrese o tempo CH4: ');
%ch = [5.279e-4 5.131e-4 4.583e-4 3.236e-4];
[valor,i]=min(ch);
ch = ch - valor;
pos_ref = pos(:,i);
pos(:,i)=[];
ch(i)=[];

f = @(x) [sqrt((x(1)-pos(1,1))^2+(x(2)-pos(2,1))^2)-sqrt((x(1)-
pos_ref(1))^2+(x(2)-pos_ref(2))^2)-v*ch(1);...
         sqrt((x(1)-pos(1,2))^2+(x(2)-pos(2,2))^2)-sqrt((x(1)-
pos_ref(1))^2+(x(2)-pos_ref(2))^2)-v*ch(2);...
         sqrt((x(1)-pos(1,3))^2+(x(2)-pos(2,3))^2)-sqrt((x(1)-
pos_ref(1))^2+(x(2)-pos_ref(2))^2)-v*ch(3)];

x0 = [50,50]; % Starting guess
% Invoke optimizer
options=optimset('Display','iter','TolFun',1e-
8,'MaxFunEvals',400,'MaxIter',300);
x = lsqnonlin(f,x0); % resolvendo sistema não-linear
plot(x(1),x(2),'*','LineWidth',1)
hold on
plot(pos(1,1),pos(2,1),'o','LineWidth',1)
plot(pos(1,2),pos(2,2),'o','LineWidth',1)
plot(pos(1,3),pos(2,3),'o','LineWidth',1)
plot(pos_ref(1),pos_ref(2),'o','LineWidth',1)
XLim([0 259])
YLim([0 257])

```

8.3. Exemplo algoritmo método Delta T

```
clc
clear all
%Gerando pontos da matriz
x=1:1:200;%[cm]
y=1:1:200;%[cm]
%Coordenada sensores
pos=[26 26 126 126; %x [cm]
     30 125 125 30]; %y [cm]
%x1=10;x2=50;x3=90;x4=50; %[cm]
%y1=50;y2=90;y3=50;y4=10; %[cm]
v=301000;%[cm/s] velocidade propagação sinal
T = zeros (length(x), length(y));
V = zeros (length(x), length(y));
for i_x=1:length(x)
    for i_y=1:length(y)
        T(i_x,i_y,1)=(sqrt((x(i_x)-pos(1,1))^2+(y(i_y)-pos(2,1))^2))/v;
        T(i_x,i_y,2)=(sqrt((x(i_x)-pos(1,2))^2+(pos(2,2)-y(i_y))^2))/v;
        T(i_x,i_y,3)=(sqrt((pos(1,3)-x(i_x))^2+(pos(2,3)-y(i_y))^2))/v;
        T(i_x,i_y,4)=(sqrt((pos(1,4)-x(i_x))^2+(y(i_y)-pos(2,4))^2))/v;
    end
end
end
ch(1)=input('Ingrese o tempo CH1: ');
ch(2)=input('Ingrese o tempo CH2: ');
ch(3)=input('Ingrese o tempo CH3: ');
ch(4)=input('Ingrese o tempo CH4: ');

[valor_menor,i_menor]=min(ch);
ch = ch - valor_menor;
pos_ref = pos(:,i_menor);

%figure;
hold on
for i_par=1:4
    if i_par~=i_menor
        contour(T(:,:,i_par)-T(:,:,i_menor)',ch(i_par))
    end
end
end
%pos(:,i)=[];
%ch(i)=[];
plot(pos(1,1),pos(2,1),'o','LineWidth',1)
plot(pos(1,2),pos(2,2),'o','LineWidth',1)
plot(pos(1,3),pos(2,3),'o','LineWidth',1)
plot(pos(1,4),pos(2,4),'o','LineWidth',1)
xlim([0 150])
ylim([0 190])

clc
clear all

T(:,:,1)=[.0006836 .0008916 .0005800 .0003703 .0008275 .7671914 .1162908
.0009961 .0007327 .1771079 .0000387;...
.0004304 .0008076 .0002411 .2271075 .0003283 .0003506 .4920209 .0004072
.0008336 .0003400 .0008248;...
```

```

.0004640 .0001221 .0005044 .0004343 .4640167 .0006230 .0009499 .3912398
.0005845 .0006696 .3962340;...
.0002919 .0008450 .0007480 .0007787 .0001526 .0003123 .0002599 .0005744
.0002707 .0002498 .2961646;...
.1538574 .0005076 .0005536 .0008683 .0004520 .0003357 .0006914 .0022366
.0009828 .000 .000 ;...
.0003607 .0007498 .0001647 .0000404 .0008370 .0008686 .0004426 .0006490
.0006146 .0009608 .8141655;...
.0005519 .0003415 .0002089 .5249961 .0004209 .0006180 .9060004 .0006586
.7610136 .0003625 .0006588;...
.0004636 .0002154 .0002577 .0004315 .1668932 .0004294 .0007309 .0008248
.0007820 .0005005 .5269947;...
.0000054 .0006112 .0000050 .0000847 .0000590 .7550542 .6289826 .0002104
.1881738 .0009661 .3090054;...
.0003694 .0007204 .8118791 .0003686 .0003885 .0006726 .3367989 .8790750
.0004410 .0006106 .0004314;...
.0000481 .0002007 .0257680 .0006257 .5058166 .0000444 .2178522 .0003313
.0004845 .0006730 .0004182];

```

```

T(:, :, 2)=[.0004346 .0006007 .0003054 .0001335 .0006659 .7669861 .1161049
.0008197 .0005683 .1769682 .5109217;...
.0001832 .0005697 .0000224 .2269047 .0001485 .0001352 .4918737 .0002593
.0007367 .0002608 .0007102;...
.0002952 .0000300 .0003319 .0002740 .4638707 .0004920 .0008292 .3911296
.0004855 .0006061 .3962066;...
.0001654 .0007204 .0006335 .0006731 .0000505 .0002252 .0001764 .0004899
.0002068 .0002018 .2961909;...
.1537984 .0004420 .0004909 .0008136 .0004008 .0002240 .0006444 .0022048
.0009509 .000 .000 ;...
.0003589 .0007452 .0001592 .0000328 .0008438 .0008738 .0005300 .0006480
.0006038 .0009515 .8141492;...
.0006207 .0004065 .0002721 .5250500 .0004735 .0006604 .9060263 .0006848
.7610389 .0003931 .0007174;...
.0006202 .0003418 .0003760 .0005361 .1669866 .0005149 .0008147 .0009876
.0008450 .0005584 .5271937;...
.0002134 .0008139 .0002023 .0002757 .0002442 .7551779 .6290968 .0003942
.1882683 .9191501 .3091023;...
.0006273 .0009706 .8121161 .0005989 .0006090 .0008338 .3370111 .8792055
.0005628 .0008238 .0006491;...
.0003550 .0004934 .0260413 .0008876 .5060709 .0002895 .2180945 .0004928
.0006307 .0008114 .0006595];

```

```

T(:, :, 3)=[.0007585 .0007551 .0004156 .0001771 .0006600 .7669310 .1159983
.0006605 .0003600 .1767098 .5105967;...
.0003469 .0007031 .0001131 .2269450 .0001398 .0001269 .4917685 .0001047
.0005327 .0000126 .0004177;...
.0004281 .0001401 .0004055 .0003043 .4638569 .0004325 .0007229 .3909770
.0002908 .0003775 .3959339;...
.0002734 .0008079 .0006904 .0006927 .0000281 .0001611 .0000696 .0003918
.0000183 .0000065 .2959598;...
.1541694 .0006320 .0005278 .0008129 .0003697 .0002177 .0005354 .0019921
.0006993 .000 .000 ;...
.0004210 .0009201 .0001768 .0001340 .0008909 .0008819 .0004914 .0005636
.0004794 .0007896 .8139069;...
.0008049 .0005643 .0004147 .5250231 .0005375 .0005749 .9059897 .0006747
.7609309 .0002482 .0004720;...
.0006404 .0004845 .0004861 .0006107 .1670288 .0005149 .0007749 .0009121
.0007444 .0004253 .5269279;...

```

```

.0002139 .0007993 .0001670 .0002217 .0001665 .7550743 .6290713 .0003253
.1881425 .9189436 .3088676;...
.0006090 .0009385 .8120672 .0005297 .0005186 .0007217 .3369259 .8791495
.0004787 .0006111 .0004865;...
.0003204 .0004457 .0259774 .0008050 .5061010 .0001650 .2180679 .0003587
.0005521 .0007077 .0005328];

```

```

T(:, :, 4)=[.0008744 .0008435 .0005081 .0002791 .0007733 .7670514 .1161316
.0008036 .0005201 .1768870 .5109052;...
.0005204 .0008838 .0001925 .2270307 .0002355 .0002304 .4918804 .0002275
.0006693 .0001616 .0005734;...
.0004807 .0001993 .0004670 .0003740 .4639299 .0005149 .0008107 .3910733
.0003958 .0004803 .3960469;...
.0003078 .0008454 .0008577 .0007399 .0000783 .0002141 .0001269 .0004029
.0000851 .0000475 .2960047;...
.1542121 .0006672 .0006773 .0008357 .0004990 .0002449 .0005652 .0020195
.0007344 .000 .000 ;...
.0004214 .0009209 .0001774 .0000218 .0007886 .0007841 .0004117 .0004976
.0004198 .0007341 .8139015;...
.0006337 .0004018 .0003594 .5250017 .0003783 .0005462 .0008745 .0004973
.7608203 .0001421 .0004330;...
.0006046 .0002979 .0003078 .0004522 .1668676 .0003637 .0006150 .0007527
.0005922 .0002716 .5268509;...
.0001620 .0007435 .0001067 .0001544 .0000929 .7549939 .6288775 .0001406
.1879790 .9188244 .3087496;...
.0005419 .0008664 .8119893 .0004455 .0004254 .0006172 .3367594 .8789210
.0002386 .0004625 .0002578;...
.0002357 .0003588 .0258840 .0007044 .5058585 .0000437 .2178146 .0001761
.0002794 .0004193 .0002318];

```

```

ch(1)=input('Ingrese o tempo CH1: ');
ch(2)=input('Ingrese o tempo CH2: ');
ch(3)=input('Ingrese o tempo CH3: ');
ch(4)=input('Ingrese o tempo CH4: ');

```

```

[valor_menor,i_menor]=min(ch);
ch = ch - valor_menor;
%pos_ref = pos(i_menor);
X=(0:10)*.1;
Y=(0:10)*.2;
Xi = (0:10)*(1/10);
Yi = (0:20)*(1/20);
figure;
hold on
for i_par=1:4
    if i_par~=i_menor
        contour(X,Y,interp2(T(:, :, i_par)-T(:, :, i_menor),Xi,Yi),ch(i_par))
    end
end
end

```

8.4. Exemplo algoritmo localização método 3 sensores disposição linear

```
clc
clear all
num_of_sensor=3;
v=320000;
Lab=49;
Lac=100;
Xo=166;
Yo=127;
Ta=7.026e-04;
Tb=7.940e-04;
Tc=9.156e-04;
Tab=Tb-Ta;
Tac=Tc-Ta;
Rab=v*Tab;
Rac=v*Tac;
x=Xo-((sqrt((Lac^2-Rac^2)*(Lab^2-Rab^2)*((Lac-Lab)^2-(Rac-Rab)^2)))/(2*(Lab*Rac-Lac*Rab)));
y=Yo-((Rab*(Lac^2-Rac^2)-Rac*(Lab^2-Rab^2))/(2*(Lab*Rac-Lac*Rab)));

%R =(Lab*(Lac^2-Rac^2)-Lac*(Lab^2-Rab^2))/(2*(Lab*Rac-Lac*Rab));
%figure;
plot(x,y,'*', 'LineWidth',1)
hold on
plot(166,127,'o', 'LineWidth',1)
plot(166,176,'o', 'LineWidth',1)
plot(167,227,'o', 'LineWidth',1)
XLim([0 270])
YLim([0 257])
```