

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Campus de Ilha Solteira

Julio Cesar Eduardo de Souza

Técnicas Para Obtenção De *Arrays* Lineares Esparsos Usando
Algoritmo Genético

Ilha Solteira

2018

Julio Cesar Eduardo de Souza

Técnicas Para Obtenção De *Arrays* Lineares Esparsos Usando
Algoritmo Genético

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre na área de Engenharia Elétrica
Área: Automação.

Dr. Ricardo Tokio Higuti
Orientador

Ilha Solteira

2018

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S729t Souza, Julio Cesar Eduardo de.
Técnicas para obtenção de *Arrays* lineares esparsos usando algoritmo genético / Julio Cesar Eduardo de Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
122 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2018

Orientador: Ricardo Tokio Higuti
Inclui bibliografia

1. Algoritmo genético. 2. *Array* esparso. 3. *Dinamic time warping*. 4. PSF. 5. Diagrama de radiação.


Raiane da Silva Santos

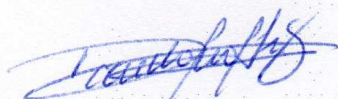
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Técnicas para obtenção de arrays lineares esparsos usando algoritmo genético

AUTOR: JULIO CESAR EDUARDO DE SOUZA

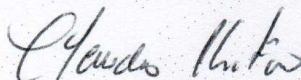
ORIENTADOR: RICARDO TOKIO HIGUTI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:



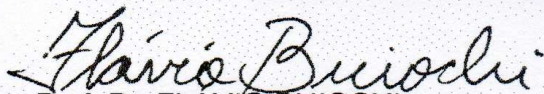
Prof. Dr. RICARDO TOKIO HIGUTI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CLAUDIO KITANO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. FLAVIO BUIOCHI

Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos / Escola Politécnica da USP

Ilha Solteira, 31 de agosto de 2018

Dedico este trabalho a Sônia Souza que com muito carinho e apoio não mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa na minha vida.

Ao meu pai, Paulo Souza (*in memoriam*), que me inspira a buscar por meus objetivos de vida.

AGRADECIMENTO

A minha amada Jéssica, por toda ajuda, paciência e momentos agradáveis na minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória e pelos ensinamentos repassados.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro.

A minha avó Maria Takahashi (*in memoriam*), que me criou com tanto amor.

Ao Prof. Dr. Vander Teixeira Prado, pela sua disposição e humildade em repassar o seu conhecimento.

Aos meus companheiros de laboratório, em específico Marcelo Thiago, Igor Visioli e Suelen Yoza, pela colaboração direta e indireta para que este trabalho fosse construído.

Aos professores que me ajudaram e motivaram a chegar até este estágio da minha vida.

À minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

E a todos os que diretamente ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu obrigado.

RESUMO

O ultrassom pode ser utilizado para gerar imagens aplicadas aos ensaios não destrutivos (END) e diagnóstico médico, em que *arrays* são utilizados para obter imagens com melhor resolução lateral e contraste em relação a um único transdutor. No entanto, os *arrays* precisam ter o centro do seus elementos espaçados por uma distância (*pitch*) menor que $\lambda/2$, em que λ é o comprimento de onda gerado pelo transdutor, para que as imagens geradas por estes não apresente artefatos causados pelos lóbulos de espaçamento. Porém, para evitar circunstâncias como o aumento na complexidade eletrônica e tempo elevado para geração de imagens ultrassônicas, os *arrays* esparsos podem ser utilizados, os quais possuem os elementos espaçados por uma distância maior que $\lambda/2$ e as imagens geradas apresentam artefatos causados por lóbulos de espaçamento. Contudo, quando os *arrays* esparsos são utilizados, existem diversas combinações entre os *itches* dos elementos para produzir imagens com diferentes qualidades, inviabilizando o teste de todas as combinações possíveis. Assim, neste trabalho, foi utilizado o algoritmo de busca genética para encontrar configurações de *arrays* esparsos que gerem imagens com boa qualidade, sendo proposto duas novas funções aptidão para avaliar os *arrays* esparsos. A primeira é baseada no diagrama de radiação, e a segunda, na comparação entre PSFs (*Point Spread Function*). As configurações de *arrays* esparsos encontrados pelo algoritmo genético foram comparadas aos *arrays* esparsos disponibilizados na literatura utilizando o diagrama de radiação, PSF e imagens geradas a partir de dados experimentais disponibilizados pelo CSIC-*Consejo Superior de Investigaciones Científicas* para que se pudesse realizar uma análise da qualidade dos *arrays* encontrados. De modo geral, as imagens geradas pelos *arrays* obtidos pela metodologia desenvolvida neste trabalho apresentaram resolução lateral similar e artefatos com menor intensidade que as imagens geradas pelos *arrays* propostos na literatura e, ao comparar o *array* esperso encontrado pelo algoritmo genético com o *array* com mais elementos cujas distâncias são iguais a $\lambda/2$, o *array* esperso conseguiu gerar as imagens em menor tempo e com boas características. Deste modo, os resultados apontam que a metodologia desenvolvida no presente trabalho conseguiu encontrar configurações de *arrays* esparsos com qualidade adequada para a avaliação de falhas em ensaios não destrutivos e diagnóstico médico.

Palavras-chave: Algoritmo genético. *Array* esperso. *Dynamic time warping*. PSF. Diagrama de radiação.

ABSTRACT

Ultrasound can be used to generate images for nondestructive testing and medical diagnostic, in which arrays are used to generate images with better lateral resolution and contrast in comparison to a single transducer. In order to avoid artifacts in ultrasonic images caused by grating lobes, arrays need to have the center of their elements spaced by a distance (pitch) less than $\lambda/2$, where λ is the wavelength generated by the transducer. However, in order to avoid electronic complexity and high time to create an ultrasonic image, sparse arrays can be used, which their elements have a pitch greater than $\lambda/2$ that generates images with artifacts caused by grating lobes. Although, sparse arrays have their elements with different pitches that produce images with different qualities which it makes impossible to test all combinations. Thus, in this work, the genetic search algorithm was used to find sparse arrays that generate images with good quality. In addition, two new fitness functions were proposed. The first one based on the beam pattern and the second one in the comparison of two PSFs (Point Spread Function). The quality of the sparse arrays found by the genetic algorithm was then compared to the sparse arrays proposed by different authors using the beam pattern, PSF, and images generated from experimental data provided by CSIC (*Consejo Superior de Investigaciones Científicas*). In general, the images generated by the arrays obtained by the methodology developed in this work presented similar lateral resolution and artifacts with less intensity than the images generated by the arrays proposed in the literature and when images generated by the sparse array found by the genetic algorithm were compared with images generated by arrays with more elements whose distance are equal to $\lambda/2$, the sparse arrays were able to generate images in less time with good characteristics. Therefore, the results show that the methodology developed in this work was able to find sparse arrays for the evaluation of failures in nondestructive tests and medical diagnosis.

Keywords: Genetic algorithm. Sparse array. Dinamic time warping. PSF. Beam pattern.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Tipos de configuração de <i>arrays</i> , a - Largura do transdutor, L - comprimento do transdutor e d - <i>pitch</i> . (a) <i>Array</i> Linear. (b) <i>Array</i> anular. (c) <i>Array</i> 2D.	34
Figura 2	– Fonte de pressão acústica excitado harmonicamente.	35
Figura 3	– Duas fontes acústicas pontuais separados por um <i>pitch</i> d excitadas por uma amplitude A_p com diferença de fase δ . (a) Considerando que R_1 e R_2 não estão paralelos entre si. (b) R_1 e R_2 paralelos entre si.	36
Figura 4	– Pressão P exercida por M elementos.	37
Figura 5	– Diagrama de radiação do <i>array</i> excitado continuamente considerando M igual a 2, 5 e 15.	39
Figura 6	– Valores de $w[n]$ para apodização em um <i>array</i> com abertura de $9,5 \lambda$. (a) Apodização retangular. (b) Apodização de Hanning. (c) Apodização de Blackman.	39
Figura 7	– Apodização do <i>array</i> com 20 elementos utilizando a apodização Retangular em azul, Hanning em vermelho e Blackman em preto.	40
Figura 8	– <i>Coarray</i> . (a) Elementos emissores, elementos receptores e o <i>Coarray</i> . (b) Diagrama de radiação do <i>array</i> Emissor. (c) Diagrama de radiação do <i>array</i> Receptor. (d) Diagrama de radiação do <i>coarray</i>	41
Figura 9	– Exemplo dos tipos de <i>arrays</i> esparsos. (a) <i>Array</i> esparso periódico, no qual o <i>pitch</i> entre os seus elementos é sempre a mesma. (b) <i>Array</i> esparso não periódico, em que os <i>itches</i> entre os seus elementos são diferentes.	42
Figura 10	– Diagrama de radiação de um <i>array</i> com 10 elementos ilustrando diferentes <i>itches</i> . (a) <i>Array</i> esparso periódico, cujos elementos possuem o <i>pitch</i> igual a $0,5 \lambda$ (linha azul) e <i>pitch</i> igual a $0,75 \lambda$ (linha vermelha). (b) <i>Array</i> esparso periódico, cujos elementos possuem o <i>pitch</i> igual a 1λ (linha azul) e <i>pitch</i> igual a 2λ (linha vermelha).	43
Figura 11	– Diagrama de radiação, simulado no programa <i>PZFlex</i> , de uma cerâmica PZ26 com altura de 0,5 mm, largura de 7 mm e comprimento de 8 mm, disposta em uma placa de alumínio e excitada na frequência de 360 kHz (PRADO, 2014).	43
Figura 12	– Diagrama de radiação de um <i>array</i> com 20 elementos considerando os elementos ideais (linha contínua) e cerâmicas simuladas (linha pontilhada), sendo apresentado em (a) o diagrama de radiação cujos elementos possuem <i>pitch</i> igual a $\lambda/2$ e (b) <i>pitch</i> igual a λ (PRADO, 2014).	44
Figura 13	– Diagrama de radiação de um <i>array</i> com 20 elementos com <i>pitch</i> igual a (a) $\lambda/2$ e (b) λ . Em linha contínua, o diagrama de radiação do <i>array</i> excitado continuamente e, em linha pontilhada, o diagrama de radiação do <i>array</i> cujos elementos são excitados de forma pulsada (PRADO, 2014).	45

Figura 14 – Análise do <i>array</i> esparso não periódico (a) e o seu diagrama de radiação (b).	45
Figura 15 – Metodologia proposta por Lockwood et al. (1996a). (a) Elementos emissores, elementos Receptores e o <i>Coarray</i> . (b) Feixe de radiação do Emissor. (c) Feixe de radiação do Receptor. (d) Feixe de radiação do <i>coarray</i>	47
Figura 16 – O uso de um transdutor para detecção de anomalias. (a) <i>A-Scan</i> - Amplitude do sinal. (b) Amplitudes recebidas pelo transdutor, na qual a primeira amplitude indica a presença de um objeto refletor e a segunda o final da peça.	48
Figura 17 – O uso de um transdutor para realizar a varredura na peça. (a) <i>B-Scan</i> . (b) Imagem gerada a partir do <i>B-Scan</i> , em que é possível observar em que posição do eixo x o defeito está presente. (c) Representação de como é gerado o <i>C-Scan</i> . (d) Imagem do corte da peça na profundidade onde o defeito está presente.	49
Figura 18 – Atrasos na excitação dos elementos para focalizar o feixe de ultrassom (a) e direcionar o feixe de ultrassom (b).	50
Figura 19 – Técnica SAR, na qual a composição de ondas de rádio são utilizadas para gerar imagens do solo.	51
Figura 20 – Ilustração do funcionamento do algoritmo SAFT utilizado para gerar a imagem ultrassônicas no ponto $I(x, z)$	51
Figura 21 – Ilustração do funcionamento do algoritmo 2RSAFT utilizado para gerar a imagem ultrassônicas no ponto $I(x, z)$	52
Figura 22 – Diferença entre os algoritmos SAFT e 2RSAFT analisando o <i>coarray</i> e Diagrama de radiação. (a) <i>Coarray</i> do SAFT. (b) Feixe de radiação do <i>coarray</i> SAFT. (c) <i>Coarray</i> do 2RSAFT. (d) Diagrama de radiação do <i>coarray</i> 2RSAFT.	53
Figura 23 – Ilustração do funcionamento do algoritmo TFM utilizado para gerar o <i>pixel</i> da imagem no ponto $I(x, z)$. (a) Instante que o elemento 1 trabalha como pulso-eco e todos os demais elementos recebem. (b) Instante que o elemento 2 trabalha como pulso-eco e todos os demais elementos recebem.	54
Figura 24 – <i>Coarray</i> gerado pelo algoritmo TFM, em que a forma triangular idêntica ao do PA resulta no mesmo diagrama de radiação. (a) <i>Coarray</i> formado ao utilizar o algoritmo TFM. (b) O seu diagrama de de radiação.	55
Figura 25 – Processo de criação da matriz de dados utilizada para gerar a PSF. (a) O sinal de ultrassom simulado. (b) O caminho necessário para a onda sair do elemento do <i>array</i> , chegar no defeito e voltar para o elemento. (c) o sinal simulado recebido pelo elemento do <i>array</i>	56

Figura 26 – PSF criada a partir de 32 elementos com faixa dinâmica de [-60 0] calculada utilizando o algoritmo TFM. (a) Imagem gerada utilizando somente os sinais RF. (b) Imagens considerando os sinais RF e em quadratura. PSF apodizada utilizando a janela de Blackman (c) e Hanning (d) considerando a envoltória do sinal.	57
Figura 27 – PSF gerada pelo <i>array</i> esparso periódico. (a) Desenho do <i>array</i> esparso periódico com 16 elementos espaçados por (2λ) . (b) PSF gerada utilizando este elemento. (c) Corte da linha da PSF que foi destacada na imagem da PSF. (d) Soma das linhas da PSF.	58
Figura 28 – PSF do <i>array</i> esparso não periódico. (a) PSF do <i>array</i> esparso não periódico representado em (b). (c) Corte da linha da PSF representada na imagem pela linha vermelha. (d) Somas das linhas da PSF.	59
Figura 29 – Fluxograma do Algoritmo Genético.	60
Figura 30 – Codificação dos indivíduos. (a) Codificação binária. (b) Codificação decimal	61
Figura 31 – Seleção através do torneio, sendo representado a população com 4 indivíduos, o torneio entre eles e os ganhadores que foram selecionados para reprodução	63
Figura 32 – Seleção por roleta, sendo representado a população com 4 indivíduos e os que possuem o menor valor da função aptidão tem o direito da maior parcela da roleta.	64
Figura 33 – Reprodução dos indivíduos que geram dois novos indivíduos, de modo que a união dos indivíduos reprodutores com os seus descendentes originam uma nova população.	64
Figura 34 – Mutação dos indivíduos descendentes.	65
Figura 35 – Demonstração das diferenças entre as duas estratégias para comparar os sinais. (a) Comparação dos sinais utilizando a distância euclidiana. (b) Comparação dos sinais utilizando o algoritmo DTW.	66
Figura 36 – Matriz custo $C(n_s, m_s)$ criada a partir dos dois vetores $X = [2\ 1\ 0\ 2\ 4]$ e $Y = [0\ 2\ 4\ 3\ 2\ 1]$. O resultado do DTW é a somatória dos menores custos.	67
Figura 37 – Codificação do problema de busca estudado neste trabalho, na qual as posições do vetor indicam as posições onde os elementos podem ser dispostos.	68

Figura 38 – Detalhes da primeira função aptidão, onde é possível observar os valores extraídos dos diagrama de radiação. (a) Diagrama de radiação do <i>array</i> completo com 32 elementos espaçados por $\lambda/2$ onde os valores de AA_{max} , ML_{max} e ME_{max} são extraídos para criar os fatores adimensionais. (b) Representação do <i>array</i> completo de 32 elementos. (c) Diagrama de radiação do <i>array</i> esparsa não periódico com 16 elementos, onde os valores de AA , ML e ME são extraídos para compor a função aptidão utilizada no algoritmo genético. (d) Representação do <i>array</i> esparsa não periódico com 16 elementos.	70
Figura 39 – Ilustração das informações extraídas das PSFs para compor a função aptidão. (a) PSF do <i>array</i> esparsa apresentado na Figura 38 (d) onde o corte extraído da imagem é demonstrado com o auxílio da linha tracejada branca. (b) Linha da imagem extraída da PSF do <i>array</i> esparsa. (c) Soma das retas de <i>pixels</i> da PSF do <i>array</i> esparsa. (d) PSF do <i>array</i> completo com 32 elementos onde o corte extraído da imagem é demonstrado com o auxílio da linha tracejada branca. (e) Linha circular da imagem extraída da PSF do <i>array</i> completo. (f) Soma das retas horizontais dos <i>pixels</i> da PSF do <i>array</i> completo.	72
Figura 40 – Detalhes dos defeitos do experimento disponibilizado pelo CSIC sendo as regiões dos defeitos numeradas para auxiliar a sua localização no texto. (a) um bloco de alumínio com 7 pares de furos dispostos na diagonal. (b) <i>phantom</i> modelo 525 da <i>Dansk Fantom Service</i>	76
Figura 41 – Resultados práticos adquiridos utilizando o <i>array</i> completo com 128 elementos no bloco de alumínio. (a) Imagem do bloco de alumínio gerada utilizando o algoritmo TFM, sendo destacada em preto, a linha extraída das amplitudes da imagem apresentada em (b).	76
Figura 42 – Imagem ultrassônica do <i>phantom</i> gerada utilizando o algoritmo TFM, na qual, cada área da imagem foi representada separadamente e os defeitos destacados em branco. (a) Área 1. (b) Área 2. (c) Área 3. (d) Área 4. (e) Área 5. (f) Área 6.	77
Figura 43 – (a) <i>Array</i> esparsa encontrado utilizando a função aptidão baseada no diagrama de radiação utilizando os pesos de 1, 1 e 1 para k_1 , k_2 e k_3 respectivamente. (b) Diagrama de radiação do <i>array</i> esparsa que possui o nível máximo do lóbulo lateral de -11,69 dB, indicado pela linha vermelha, a média dos picos dos lóbulos laterais de -18,05 dB, ilustrado pela linha azul e abertura angular do lóbulo principal de $2,76^\circ$	80

Figura 44 – Análise da PSF através da comparação entre as imagens, linha extraída da imagem e soma das linhas da imagem. (a) PSF do <i>array</i> esparso de 43 elementos encontrado pelo AG utilizando a primeira função aptidão. (b) PSF do <i>array</i> completo com 128 elementos. (c) linha e (d) soma das linhas da imagem extraída das PSF sendo representado pela linha contínua azul o resultado do <i>array</i> esparso e, pela linha pontilhada vermelha, o resultado do <i>array</i> completo.	81
Figura 45 – Experimento prático do bloco de alumínio. (a) Imagem da peça gerada utilizando o <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão. (b) Corte no defeito 1. (c) Corte no defeito 4. (d) Corte no defeito 7, na qual a linha contínua em azul representa a imagem gerada pelo <i>array</i> esparso e a linha vermelha pontilhada a imagem gerada pelo <i>array</i> completo com 128 elementos.	81
Figura 46 – <i>Phantom Dansk</i> com foco na região 3. (a) Imagem do experimento gerada pelo <i>array</i> esparso de 43 elementos encontrado pelo AG utilizando a primeira função aptidão onde as linhas em preto mostram a região onde foi feito os cortes horizontais e verticais. (b) Imagem gerada utilizando o <i>array</i> completo com 128 elementos. (c) Corte horizontal e (d) corte vertical da imagem sendo destacado as regiões onde existem os fios de <i>nylon</i> . A linha contínua azul ilustra o corte gerado pelo <i>array</i> esparso e a linha pontilhada vermelha corresponde ao corte da imagem gerada pelo <i>array</i> completo.	83
Figura 47 – <i>Phantom Dansk</i> com foco na região 6. (a) Imagem do experimento gerada pelo <i>array</i> esparso de 43 elementos encontrado pelo AG utilizando a primeira função aptidão onde as linhas em preto mostram a região onde foi feito os cortes horizontais e verticais. (b) Imagem gerada utilizando o <i>array</i> completo com 128 elementos. (c) Corte horizontal e (d) corte vertical da imagem sendo destacado as regiões onde existem os fios de <i>nylon</i> . A linha contínua azul ilustra o corte gerado pelo <i>array</i> esparso e a linha pontilhada vermelha corresponde ao corte da imagem gerada pelo <i>array</i> completo.	83
Figura 48 – Comparação entre <i>Array</i> esparsos. (a) <i>Array</i> emissor (b) <i>array</i> receptor apresentados por Lockwood et al. (1996a). (c) <i>Array</i> esparso determinado pelo algoritmo genético. Ambos utilizam 16 elementos com uma abertura máxima de 32 elementos.	85
Figura 49 – Diagrama de radiação do <i>coarray</i> utilizando:(a) o <i>coarray</i> do <i>array</i> esparso encontrado pelo AG e (b) o <i>coarray</i> dos <i>arrays</i> esparsos apresentados por Lockwood et al. (1996a).	85

- Figura 50 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão. (b) PSF criada utilizando o *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a). 86
- Figura 51 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a), nas quais as áreas onde os artefatos estão presentes foram ressaltadas. Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 3 (c) e do defeito 4 (d) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a). 87
- Figura 52 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a), sendo utilizados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para ilustrar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a) 88
- Figura 53 – Comparação entre *Array* esparsos. (a) *Array* esparso determinado pelo AG utilizando a primeira função aptidão e (b) o seu diagrama de radiação. (c) *Array* esparso e (d) diagrama de radiação apresentados por Yang, Chen e Shi (2006). Neste exemplo, os pesos k_1 , k_2 e k_3 da função aptidão foram definidos como 1,5, 1,5 e 1 respectivamente. 89

- Figura 54 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo AG utilizando a primeira função aptidão, com pesos 1,5, 1,5 e 1. (b) PSF criada utilizando o *array* proposto por Yang, Chen e Shi (2006). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* proposto por Yang, Chen e Shi (2006). 90
- Figura 55 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo AG a partir da primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006), das quais, as áreas onde os artefatos estão presentes foram destacadas. Além dessas imagens, cortes da imagem na região dos defeitos 4 (c) e 5 (d) são apresentados. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). 91
- Figura 56 – Imagem da região 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo AG a partir da primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006), sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos no eixo horizontal (c) e vertical (d). Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). 92
- Figura 57 – Comparação entre *Array* esparsos. (a) *Array* esparso determinado pelo algoritmo genético e (b) o seu diagrama de radiação. (c) *Array* esparso e (d) diagrama de radiação apresentados por Yang, Chen e Shi (2006). Neste exemplo, ambos *arrays* esparsos possuem 16 elementos em uma abertura máxima de 37 elementos e os pesos k_1 , k_2 e k_3 da função aptidão foram definidos como 0,5, 1 e 2 respectivamente. 93

- Figura 58 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão com pesos 0,5, 1 e 2 para k_1 , k_2 e k_3 . (b) PSF criada utilizando o *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). 94
- Figura 59 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo AG a partir da primeira função aptidão e (b) *array* proposto por Yang, Chen e Shi (2006), das quais, as regiões onde os artefatos estão presentes foram destacadas. Além destas imagens, apresentam-se cortes na região do defeito 4 (c) e do defeito 6 (d). Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). 94
- Figura 60 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo AG a partir a primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). Ilustra-se os cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para avaliar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). 95
- Figura 61 – Comparação entre *arrays* esparsos. (a) *Array* esparso determinado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) o seu diagrama de radiação. (c) *Array* esparso e (d) diagrama de radiação apresentados por Hu et al. (2017). 96
- Figura 62 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo AG a partir a primeira função aptidão. (b) PSF criada utilizando o *array* proposto por Hu et al. (2017). A linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) são incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Hu et al. (2017). 97

Figura 63 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) <i>array</i> esparso proposto por Hu et al. (2017). Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 2 (c) e do defeito 4 (d) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o <i>array</i> esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do <i>array</i> esparso proposto por Hu et al. (2017).	98
Figura 64 – Imagem do segmento 6 do <i>phantom</i> criada por: (a) <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) <i>array</i> esparso proposto por Hu et al. (2017), sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para ilustrar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o <i>array</i> esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do <i>array</i> esparso proposto por Hu et al. (2017).	99
Figura 65 – (a) <i>Array</i> esparso com 43 elementos encontrado utilizando a função aptidão baseada na comparação das PSFs. (b) Diagrama de radiação do <i>array</i>	99
Figura 66 – Análise da PSF através da comparação entre as imagens, linha extraída da imagem e soma das linhas da imagem. (a) PSF do <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) PSF do <i>array</i> completo com 128 elementos. (c) linha e (d) soma das linhas da imagem extraída das PSF onde o <i>array</i> esparso está representado pela linha azul e o <i>array</i> completo pela linha vermelha.	100
Figura 67 – Experimento prático do bloco de alumínio. (a) Imagem da peça gerada a partir do <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. As regiões dos pares de defeitos 1(b), 4(c) e 7(d) foram melhores analisados extraíndo uma linha da imagem do bloco de alumínio gerada pelo <i>array</i> esparso (linha em azul) e pelo <i>array</i> completo com 128 elementos (linha tracejada em vermelho).	101

- Figura 68 – Experimento prático do *phantom* com foco na região 3 onde existem 11 fios trançados de *nylon*. (a) Imagem do experimento gerada utilizando o *array* esparso de 43 elementos encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) Imagem do experimento gerada utilizando o *array* completo com 128 elementos. (c) Corte horizontal e (d) corte vertical da imagem sendo destacado as regiões onde existem os fios de *nylon*. A linha contínua azul ilustra o corte gerado pelo *array* esparso e a linha pontilhada vermelha corresponde ao corte da imagem gerada pelo *array* completo. . . . 102
- Figura 69 – Experimento prático do *phantom* com foco na região 6 onde existem 11 fios trançados de *nylon*. (a) Imagem do experimento gerada utilizando o *array* esparso de 43 elementos encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) Imagem do experimento gerada utilizando o *array* completo com 128 elementos. (c) Corte horizontal e (d) corte vertical da imagem sendo destacado as regiões onde existem os fios de *nylon*. A linha contínua azul ilustra o corte gerado pelo *array* esparso e a linha pontilhada vermelha corresponde ao corte da imagem gerada pelo *array* completo. . . . 102
- Figura 70 – Comparação entre *Array* esparsos. (a) *Array* emissor (b) *array* receptor apresentados por Lockwood et al. (1996a). (c) *Array* esparso determinado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. Ambos resultados utilizam 16 elementos em uma abertura máxima de 32 elementos ($15,5 \lambda$). . . . 103
- Figura 71 – Diagrama de radiação do *coarray* utilizando:(a) o *coarray* do *array* esparso apresentado na Figura 70 (c) e (b) o *coarray* dos *arrays* esparsos apresentados por Lockwood et al. (1996a). 104
- Figura 72 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) PSF criada utilizando o *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a). 105

- Figura 73 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a), nas quais as áreas onde os artefatos estão presentes foram ressaltadas. Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 3 (c) e do defeito 4 (d) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a). 105
- Figura 74 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a), sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d). Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a). 106
- Figura 75 – Comparação entre *Array* esparsos. (a) *Array* esparso determinado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) o seu diagrama de radiação. (c) *Array* esparso e (d) diagrama de radiação apresentados por Yang, Chen e Shi (2006). Neste exemplo, ambos *arrays* esparsos possuem 16 elementos em uma abertura máxima de 37 elementos (18λ). 107
- Figura 76 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) PSF criada utilizando o *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). 108

Figura 77 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) <i>array</i> esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006), nas quais as áreas onde os artefatos estão presentes foram ressaltadas. Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 4 (c) e do defeito 5 (d) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o <i>array</i> esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do <i>array</i> esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006).	108
Figura 78 – Imagem do segmento 6 do <i>phantom</i> criada por: (a) <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) <i>array</i> esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006), sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para ilustrar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o <i>array</i> esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do <i>array</i> esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006).	109
Figura 79 – Comparação entre <i>Array</i> esparsos. (a) <i>Array</i> esparso determinado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) o seu diagrama de radiação. (c) <i>Array</i> esparso e (d) diagrama de radiação apresentados por Hu et al. (2017). Neste exemplo, ambos <i>arrays</i> esparsos possuem 8 elementos em uma abertura máxima de 32 elementos ($15,5 \lambda$).	110
Figura 80 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) PSF criada utilizando o <i>array</i> esparso proposto por Hu et al. (2017). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o <i>array</i> esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do <i>array</i> esparso proposto por Hu et al. (2017).	111

Figura 81 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) <i>array</i> esparso proposto por Hu et al. (2017), nas quais as áreas onde os artefatos estão presentes foram ressaltadas. Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 4 (c) e do defeito 5 (d) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o <i>array</i> esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do <i>array</i> esparso proposto por Hu et al. (2017).	112
Figura 82 – Imagem do segmento 6 do <i>phantom</i> criada por: (a) <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) <i>array</i> esparso proposto por Hu et al. (2017), sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para ilustrar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o <i>array</i> esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do <i>array</i> esparso proposto por Hu et al. (2017).	112
Figura 83 – Configurações de <i>arrays</i> esparsos encontrados pelo AG. (a) Configuração encontrado utilizando a primeira função aptidão. (b) Configuração de <i>array</i> esparso encontrada utilizando a segunda função aptidão.	113
Figura 84 – Comparação entre diagrama de radiação. (a) Diagrama de radiação criado utilizando <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão. (b) Diagrama de radiação criado utilizando <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão.	113
Figura 85 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão. (b) PSF criada utilizando <i>array</i> esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o <i>array</i> esparso encontrado pela primeira metodologia e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do <i>array</i> esparso encontrado pela segunda metodologia	114

Figura 86 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparsa encontrada pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) *array* esparsa encontrada pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 1 (c), defeito 3 (d), defeito 5 (e) e defeito 7 (f) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparsa encontrada utilizando a primeira função aptidão e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada utilizando o *array* esparsa encontrada utilizando a segunda função aptidão. 115

Figura 87 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparsa encontrada utilizando a primeira função aptidão e (b) *array* esparsa encontrada utilizando a segunda função aptidão, sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para ilustrar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparsa encontrada utilizando a primeira função aptidão e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparsa encontrada utilizando a segunda função aptidão. 116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos utilizando diferentes pesos k_n para encontrar um <i>array</i> esparso com 43 elementos com uma abertura máxima de $63,3 \lambda$	79
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2RSAFT	<i>2 Receivers Synthetic Aperture Focusing Technique</i>
AG	Algoritmo Genético
CS	<i>Compressive Sensing</i>
CSIC	Conselho Superior de Investigações Científicas (<i>Consejo Superior de Investigaciones Científicas</i>)
DTW	<i>Dynamic Time Warping</i>
END	Ensaio não destrutivo
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Arrays</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
PA	<i>Phased Array</i>
PSF	<i>Point Spread Function</i>
SA	<i>Synthetic Aperture</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SAFT	<i>Synthetic Aperture Focusing Technique</i>
TFM	<i>Total Focusing Method</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	diferença de fase.
γ	ângulo entre R e o eixo x .
γ_i	ângulo entre R_i e o eixo x .
λ	comprimento de onda gerada pelo transdutor.
ω	frequência angular.
ω_a	relação entre k , d e $\text{sen}(\theta)$.
θ	ângulo complementar a γ .
a	largura do transdutor.
a_e	abertura do <i>array</i> emissor.
a_r	abertura do <i>array</i> receptor.
a_{er}	abertura efetiva do <i>array</i> (<i>coarray</i>).
AA	Abertura angular do lóbulo principal.
AA_{max}	Abertura angular do lóbulo principal do <i>array</i> completo com abertura definida ao início da busca.
A_{er}	matriz de dados capturada ao utilizar a técnica TFM.
\hat{A}_{er}	transformada de Hilbert do sinal A_{er} .
A_p	amplitude da fonte pontual excitada harmonicamente.
A_r	conjunto de dados capturados pelos elementos na técnica SAFT.
c	velocidade de propagação da onda no meio.
$C(,)$	matriz de custos da função DTW.
d	<i>pitch</i> .
$d(,)$	custo atual utilizado na função DTW.
e	coeficiente indicando qual transdutor trabalhou como emissor.
f	frequência na qual o transdutor foi excitado.
FA	função aptidão.

k	número de onda.
L	comprimento do transdutor.
M	número de fontes pontuais (elementos) do <i>array</i> .
ME	média dos picos dos lóbulos laterais.
ME_{max}	média dos picos dos lóbulos laterais do <i>array</i> completo com abertura definida ao início da busca.
ML	nível máximo do lóbulo lateral.
ML_{max}	nível máximo do lóbulo lateral do <i>array</i> completo com abertura definida ao início da busca.
M_s	tamanho do vetor Y utilizado como exemplo para função DTW.
m_s	posição m_s que indica a posição do vetor Y utilizado na função DTW.
M_{sig}	quantidade de sinais utilizados para criar a imagem.
N_s	tamanho do vetor X utilizado como exemplo para função DTW.
$N_{desejado}$	número de elementos que se deseja que o <i>array</i> tenha.
N_{trans}	quantidade de elementos do indivíduo.
N_{soma}	quantidade de colunas existentes na imagem da PSF.
n_s	posição n_s que indica a posição do vetor X utilizado na função DTW.
p	ponto onde foi analisado a pressão exercida pelas fontes pontuais.
$p(R, t)$	pressão no ponto p em relação a distância R e tempo t .
$p(R, t, \theta)$	pressão no ponto p em relação a distância R , tempo t e ângulo θ .
$p_{normalizado}(\theta)$	pressão normalizado no ponto p .
Pen	Penalização da função aptidão.
P_e	diagrama de radiação do <i>array</i> emissor.
P_{er}	diagrama de radiação do <i>coarray</i> .
P_r	diagrama de radiação do <i>array</i> receptor.
R	distância que separa a fonte pontual até o ponto p .
R_i	distância que separa a fonte pontual i até o ponto p .

r	coeficiente indicando qual transdutor trabalhou como receptor.
sim_1	resultado da função DTW comparando as linhas das PSFs.
sim_2	resultado da função DTW comparando a soma das linhas das PSFs.
t	tempo.
t_{rxz}	o tempo necessário para que a onda saia do transdutor r chegue até o ponto analisado.
w	coeficientes da apodização.
w_{er}	coeficientes da apodização para técnica TFM.
w_r	coeficientes da apodização para técnica SAFT.
x_{ga}	variável x_{ga} utilizada no exemplo de função aptidão.
x_r	distância no eixo x do transdutor até a origem.
xl	posições da linha em que serão extraídas as amplitudes da PSF.
y_{ga}	variável y_{ga} utilizada no exemplo de função aptidão.
z_{ga}	variável z_{ga} utilizada no exemplo de função aptidão.
z_r	altura do transdutor.
zl	posições da coluna em que serão extraídas as amplitudes da PSF.
m_s	matriz de custos da função DTW

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO DE <i>ARRAYS</i> ESPARSOS	30
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	32
2	<i>ARRAYS</i> LINEARES	34
2.1	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA PRESSÃO EXERCIDA PELO <i>ARRAY</i> LINEAR	35
2.2	APODIZAÇÃO E <i>COARRAY</i>	38
2.3	<i>ARRAYS</i> ESPARSOS	42
2.4	CONSTRUÇÃO DOS <i>ARRAYS</i> ESPARSOS UTILIZANDO O <i>COARRAY</i>	46
2.5	COMENTÁRIOS	46
3	IMAGENS ULTRASSÔNICAS	48
3.1	PHASED <i>ARRAY</i> (PA)	49
3.2	<i>SYNTHETIC APERTURE</i> (SA)	50
3.3	PSF	55
3.4	COMENTÁRIOS	59
4	O ALGORITMO GENÉTICO E <i>DYNAMIC TIME WARPING</i> (DTW)	60
4.1	CONDIÇÕES INICIAIS	61
4.2	SELEÇÃO, REPRODUÇÃO E MUTAÇÃO	62
4.3	<i>DYNAMIC TIME WARPING</i> (DTW)	65
4.4	COMENTÁRIOS	67
5	TÉCNICAS PARA CONSTRUÇÃO DO <i>ARRAY</i> ESPARSO	68
5.1	PRIMEIRA FUNÇÃO APTIDÃO – DIAGRAMA DE RADIAÇÃO	68
5.2	SEGUNDA TÉCNICA - COMPARAÇÃO ENTRE PSFS	71
5.3	COMENTÁRIOS	74
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
6.1	DADOS EXPERIMENTAIS	75
6.2	PRIMEIRA FUNÇÃO APTIDÃO	78
6.2.1	Comparação Entre Metodologias - Lockwood et al. (1996a)	82
6.2.2	Comparação Entre Metodologias - Yang, Chen e Shi (2006)	88
6.2.3	Comparação Entre Metodologias - Hu et al. (2017)	95
6.3	SEGUNDA FUNÇÃO APTIDÃO	98
6.3.1	Comparação Entre Metodologias - Lockwood et al. (1996a)	103
6.3.2	Comparação Entre Metodologias - Yang, Chen e Shi (2006)	106
6.3.3	Comparação Entre Metodologias - Hu et al. (2017)	109
6.4	COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS FUNÇÕES APTIDÃO	111

7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
7.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	118
	REFERÊNCIAS	119

1 INTRODUÇÃO

Ensaaios não destrutivos (END) são técnicas utilizadas para identificar avarias em objetos e estruturas sem danificá-las, na qual uma das suas vantagens é a não deterioração das peças. Dentre as técnicas existentes, o ultrassom pode ser utilizado para identificar corrosões e defeitos, ao modo que podem ser criadas imagens utilizando o ultrassom capturado em diferentes posições para auxiliar a identificação das anomalias. De maneira análoga, o ultrassom também pode ser utilizado na medicina, em que sua característica não invasiva e não ionizante aumentam a qualidade de vida dos pacientes ao possibilitar o diagnóstico médico por imagens.

O princípio de criação das imagens consiste em posicionar, em diferentes regiões da peça analisada, um transdutor trabalhando em pulso-eco e utilizar o ultrassom capturado para gerar as imagens. Neste tipo de método para gerar as imagens, é necessário a movimentação mecânica do transdutor, o que aumenta o tempo necessário para aquisição dos sinais, além disso, as imagens geradas possuem uma limitação em resolução lateral e contraste. Dessa maneira, pode-se utilizar um *array*, que é um conjunto de elementos piezoelétricos, para reduzir esse deslocamento necessário para aquisição dos dados e aumentar a qualidade das imagens utilizando diferentes combinações de inspeções (FAN et al., 2014).

A qualidade das imagens geradas utilizando o ultrassom também pode ser alterada a partir do espaçamento entre o centro dos elementos do *array*, em que *arrays* cujos elementos estão muito espaçados tendem a gerar imagens com artefatos com maior intensidade e, conseqüentemente, pior contraste (MURINO; TRUCCO; REGAZZONI, 1996). Além disso, a abertura *array*, esta que é definida para os *arrays* lineares como a soma de todas as distâncias que separam os centros dos elementos do *array*, também influencia na qualidade da imagem. Assim, quanto maior for a abertura do *array*, melhor será a resolução lateral da imagem gerada (ORTIZ; CHIU; FOX, 2012).

Outra informação importante sobre a distância que separa os centros dos elementos do *array*, denominada de *pitch*, é a existência de uma regra que, para reduzir a interferência causada por esse espaçamento, é necessário respeitar uma distância menor ou igual a $\lambda/2$ entre os centros dos elementos, na qual λ é o comprimento de onda gerada pelo elemento piezoelétrico (LOCKWOOD; FOSTER, 1995). Assim, os *arrays* que respeitam essa condição são denominados em inglês como *fully populated arrays*, que neste trabalho são traduzidos como *arrays* completos.

Ao utilizar *arrays* completos para adquirir os dados, o único fator relacionado a qualidade da imagem entre os citados é a sua abertura. Assim, para aumentar a resolução lateral da imagem ou aumentar a área coberta pelo *array*, é necessário aumentar o número de elementos do *array*, o que pode inviabilizar a construção do *array*. Seja pelo aumento da complexidade eletrônica ou do tempo de processamento das informações adquiridas.

Uma solução que pode ser adotada para utilizar uma determinada abertura sem o em-

prego de um *array* completo é aumentar o *pitch* entre os seus elementos, onde um *array* que, por exemplo, possui seus elementos com *pitch* igual a λ , necessitará da metade de elementos para atingir a mesma abertura que um *array* completo. Dessa maneira, *arrays* cujos todos os elementos possuem o mesmo valor de *pitch* maior que $\lambda/2$ podem, segundo Lockwood et al. (1996a), serem denominados como *arrays* esparsos periódicos.

Contudo, o uso de *arrays* esparsos periódicos viola a regra de espaçamento de $\lambda/2$ e as imagens geradas por estes *arrays* começam a ser proporcionalmente degradadas à medida que o espaçamento entre os elementos aumentam. Dessa forma, uma das soluções para reduzir a intensidade dos artefatos presentes na imagem e, ao mesmo tempo, utilizar os *arrays* esparsos, é quebrar essa periodicidade na distância que separa os elementos, criando assim os *arrays* esparsos não periódicos (TRUCCO, 1999). No entanto, os *itches* entre os elementos podem assumir diversas configurações dentro do *array*, ao modo que cada configuração de *arrays* esparsos não periódicos gera imagens com intensidade nos artefatos e resolução lateral diferentes.

Assim, o foco deste trabalho é desenvolver uma metodologia que encontre configurações de *arrays* esparsos que gerem imagens com baixa intensidade de artefatos e boa resolução lateral. Para isso, foram estudados diversas estratégias para construção destes *arrays* esparsos.

1.1 TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO DE ARRAYS ESPARSOS

Lockwood et al. (1996a) estudaram a criação dos *arrays* lineares esparsos a partir da análise do desenho do *coarray* gerado pela convolução das posições dos elementos emissores e receptores. Dessa forma, elementos eram estrategicamente retirados dos *arrays* para formar um *coarray* com formato similar ao *coarray* do *array* completo. Assim, diferentes desenhos de *arrays* esparsos periódicos foram apresentados até que os autores chegassem na conclusão que a distribuição de Vernier e apodização senoidal geravam os melhores resultados. A mesma distribuição de Vernier também foi aplicada em *arrays* 2D para que se conseguisse reduzir o número de elementos em 87,38% (LOCKWOOD et al., 1996b).

De modo similar, Austeng e Holm (2002) definiram uma metodologia para criar configurações de *arrays* esparsos em que os elementos emissores e receptores não se sobrepusessem, sendo os elementos dispostos de uma maneira simétrica e semi-randômica. Os autores alegaram que a complexidade na captura dos sinais seria reduzida pois não era mais necessário utilizar canais de transmissão trabalhando para emitir e receber simultaneamente. Além disso, foi relatado que as interferências causadas pelo uso do *array* esparsos foram reduzidas em relação a metodologia proposta por Lockwood et al. (1996a).

Seguindo essa mesma linha de raciocínio para construir os *arrays* esparsos analisando o desenho formado pelo *coarray* utilizando diferentes *arrays* para emitir e receber, Martínez-Graullera et al. (2010) e Akhnik et al. (2002) utilizam a espiral de Fermat para a concepção de *arrays* esparsos 2D. Além dos trabalhos citados, Nikolov e Jensen (2000) e Yen, Steinberg e

Smith (2000) também utilizaram esse tipo de estratégia para construir *arrays* esparsos e, apesar de bons resultados serem obtidos utilizando essa estratégia, para esta dissertação, considerou-se somente o uso de um *array* para emitir e receber o feixe de ultrassom, ao modo que a redução dos artefatos presentes nas imagens é feita utilizando configurações de *arrays* esparsos não periódicos.

Assim, quando se utiliza os *arrays* esparsos não periódicos, os elementos no *array* podem ser dispostos em diferentes configurações, inviabilizando o teste de todas as possibilidades. Deste modo, nesse amplo campo de possibilidades, algoritmos de busca podem ser aplicados para viabilizar o teste de diferentes configurações de *arrays* esparsos para encontrar um que gere imagens com boa resolução lateral e baixa intensidade de artefatos.

Um dos primeiros trabalhos utilizando este tipo de abordagem foi apresentado por Haupt (1994), na qual o algoritmo genético (AG) foi utilizado para selecionar os elementos ativos do *array* linear e 2D. Nesse trabalho, os autores possuíam um *array* completo linear com abertura de $99,5 \lambda$ (200 elementos) e utilizaram o AG para reduzir a quantidade de elementos ativos do *array*. Para realizar isso, o autor utilizou como estratégia a minimização do valor da amplitude máxima do lóbulo lateral do diagrama de radiação do *array*. Assim, em relação ao *array* completo com 200 elementos, houve uma redução de 1,60 dB no nível do maior lóbulo lateral e de 25% no número de elementos ativos. Para o *array* 2D, o *array* otimizado foi construído a partir de uma matriz 20×10 e o autor conseguiu diminuir em 45% o número de elementos e reduzir em 9,24 dB o nível do maior lóbulo lateral em relação ao *array* completo.

O AG também pode ser utilizado na busca de valores de atrasos nos elementos transmissores, de modo que o *array* focalize em uma determinada posição da peça (SHIMIZU, 1994). Além disso, o AG também foi utilizado por Yan e Lu (1997) para apodizar os elementos e calcular atrasos nos elementos do *array*, e, por Yuan et al. (2012) para criar uma busca por *arrays* esparsos e, concomitantemente, procurar por atrasos na excitação para cada elemento do *array*.

Hu et al. (2017) utilizaram o AG para buscar por configurações de *arrays* esparsos em uma abertura de $15,5 (\lambda)$, de modo que, os autores avaliaram a qualidade do *array* esparsos através do nível máximo do lóbulo lateral em conjunto com o tamanho do lóbulo principal do diagrama de radiação do *array*. Além deste trabalho, Ke-song, Zi-shu e Chun-lin (2006) realizaram a busca por configurações de *arrays* esparsos 2D utilizando o AG e avaliaram os *arrays* calculando o diagrama de radiação para determinados ângulos e realizando a soma dos picos dos lóbulos laterais.

Chen et al. (2007) também utilizaram o AG para encontrar *arrays* esparsos, em que a qualidade dos *arrays* é quantificada a partir do nível máximo do lóbulo lateral. Outra aplicação do AG na busca por *arrays* esparsos lineares foi feita por Deperateanu et al. (2017), de forma que a qualidade do *array* é quantificada a partir do cálculo do erro entre o diagrama de radiação do *array* esparsos com o diagrama de radiação do *array* completo.

Com base nos trabalhos apresentados, pôde-se observar que o AG é amplamente utilizado na busca por *arrays* esparsos, de modo que os trabalhos se diferem na maneira em que a qualidade do *array* esparsos em gerar as imagens é quantificada. Assim, pela ampla quantidade de trabalhos existentes utilizando este algoritmo, optou-se neste trabalho utilizar o algoritmo genético para encontrar configurações de *arrays* lineares esparsos não periódicos e foi dada maior atenção nas estratégias para quantificar a qualidade do *array* esparsos em gerar as imagens.

Contudo, pode-se ressaltar que além do AG, outros algoritmos de busca podem ser aplicados para a construção do *array* esparsos. Como, por exemplo, o trabalho apresentado por Trucco (1999), em que o algoritmo *simulated annealing* baseado no comportamento das moléculas foi utilizado para encontrar configurações de *arrays* 2D esparsos. Posteriormente, Trucco (2002) também utilizou o algoritmo de busca *simulated annealing* para determinar as posições e apodização dos elementos de um *array* linear.

Outro exemplo de algoritmo de busca para encontrar configurações de *arrays* esparsos foi apresentado por Khodier e Christodoulou (2005), em que os autores utilizaram o algoritmo de otimização por enxame de partículas (*particle swarm*), que é um algoritmo evolutivo baseado no comportamento social de um grupo de aves que busca por alimento, para realizar a busca por um *array* esparsos com menor lóbulo lateral.

Além das estratégias citadas, existem outros tipos de abordagens não estudada neste trabalho que podem ser utilizadas para gerar as imagens dos *arrays* esparsos reduzindo as interferências do seu uso. A exemplo da técnica *Compressive Sensing* (CS), a qual foi desenvolvida para recuperar sinais esparsos que foram digitalizados através de uma frequência de amostragem menor que a estabelecida pelo critério de Nyquist (BARANIUK, 2007). Por exemplo, Gonzalez-Valdes et al. (2014) utilizam o algoritmo *simulated annealing* para encontrar configurações de *arrays* esparsos e aplicam a técnica CS para construir imagens utilizando ondas de rádio capturadas pelo *array*. Ao final do trabalho, Gonzalez-Valdes et al. (2014) concluem que as duas técnicas trabalhando em conjunto conseguiram diminuir o tempo necessário para gerar as imagens com boa resolução lateral e baixa intensidade de artefatos. Em complemento, Wilcox e Zhang (2018) propõem uma estratégia de gerar as imagens limitando o ângulo que o elemento do *array* opera. Assim, os artefatos presentes na imagem ao utilizar esses tipos de *arrays* são reduzidos de maneira significativa, porém, com uma perda na resolução lateral.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2, comenta-se o funcionamento do *array*, como os seus elementos são dispostos e as interferências causadas caso a distância que separa o centro dos seus elementos seja maior que $\lambda/2$. No capítulo 3, técnicas utilizadas para criar as imagens ultrassônicas a partir dos *arrays* serão discutidas. No capítulo 4, o algoritmo genético (AG) será apresentado. Além da explicação do algoritmo genético, será comentado a função *Dynamic Time Warping* (DTW),

na qual foi utilizada para compor a segunda função aptidão utilizada para encontrar o *array* esperso.

No capítulo 5, as técnicas utilizadas para avaliar o *array* esperso e como estas foram utilizadas no algoritmo genético para realizar a busca por configurações de *array* esparsos serão comentadas. No capítulo 6, as configurações de *arrays* esparsos encontrados pelo algoritmo genético serão apresentados e a suas performances em gerar imagens ultrassônicas avaliadas e discutidas. Por último, no capítulo 7, comenta-se os pontos mais importantes do trabalho.

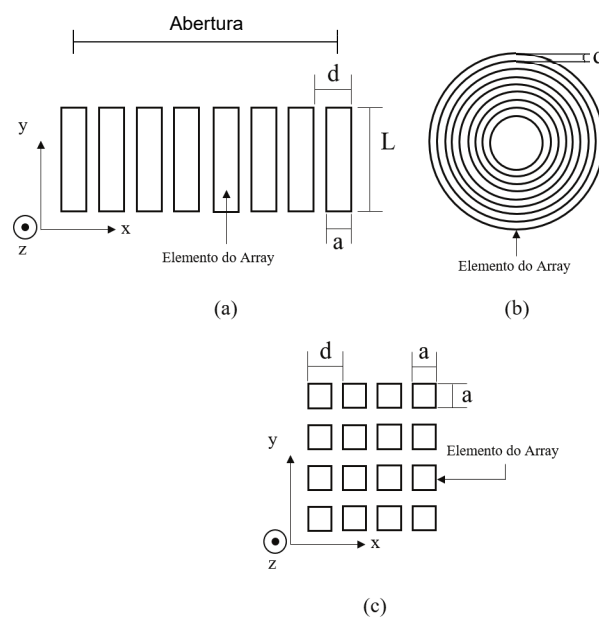
2 ARRAYS LINEARES

Um *array* é um conjunto de elementos piezelétricos que podem ser utilizados para o diagnóstico médico não invasivo e END. Drinkwater e Wilcox (2006) dividiram os *arrays* em três grupos a partir da sua disposição geométrica: lineares, em que os elementos estão alinhados em uma única dimensão (Figura 1 (a)), anulares, nos quais vários elementos piezoelétricos cortados em círculos com diferentes diâmetros são dispostos conforme ilustrado na Figura 1 (b) e os *arrays* 2D, em que os seus elementos são dispostos em uma matriz de duas dimensões (Figura 1 (c)).

Tanto para o *array* linear quando para o anular, as imagens geradas utilizando estes *arrays* são bidimensionais. Com a diferença que a varredura no objeto utilizando os *arrays* lineares é eletrônica e pode ser realizada em diversos ângulos e profundidades, enquanto para os *arrays* anulares, pode-se alterar a profundidade em que o feixe é focalizado, porém, ainda é necessário realizar a varredura mecânica pela peça.

Deste modo, a Figura 1 (a) ilustra o *array* linear com sua abertura (comprimento) e seus elementos de largura a , comprimento L e distância d , denominada de *pitch*, que compõe a distância que separa os elementos mais a sua largura (a). Em seguida, a Figura 1 (b) apresenta o *array* anular com seus elementos circulares com diferentes diâmetros com um *pitch* d . Por último, a Figura 1 (c) ilustra a matriz de elementos 2D utilizada para gerar imagens tridimensionais, de forma que os seus elementos com largura a também possuem um *pitch* representado por d (DRINKWATER; WILCOX, 2006).

Figura 1 – Tipos de configuração de *arrays*, a - Largura do transdutor, L - comprimento do transdutor e d - *pitch*. (a) *Array* Linear. (b) *Array* anular. (c) *Array* 2D.



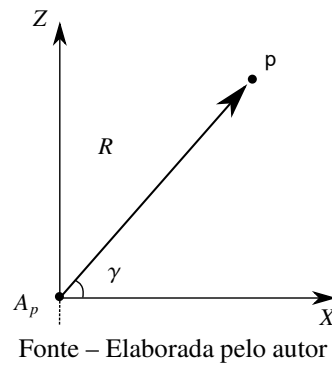
Fonte – Elaborada pelo autor

De forma ideal, um *array* tem infinitos elementos pontuais que, devido limitações físicas, é impossível de ser produzido. Assim, todo *array* possui uma quantidade limitada de elementos não pontuais com um determinado *pitch*, conforme ilustrado na Figura 1. Em consequência dessa limitação estrutural, o número finito de elementos forma uma abertura (comprimento) que está diretamente relacionada a resolução lateral da imagem. Além disso, o aumento do *pitch* para distâncias maiores que $\lambda/2$ transforma o *array* completo em um *array* esparso, em que as consequências do seu uso serão detalhadas ao decorrer do capítulo.

2.1 DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA PRESSÃO EXERCIDA PELO ARRAY LINEAR

A Figura 2 ilustra a pressão no ponto p causada por uma fonte acústica pontual centrada na origem excitada harmonicamente com amplitude A_p , na qual R é a distância que separa a fonte pontual até o ponto p e o ângulo γ é o ângulo entre R e o eixo x .

Figura 2 – Fonte de pressão acústica excitado harmonicamente.



A pressão no ponto p exercida pela fonte pode ser calculada a partir da equação (1) (WOOH; SHI, 1999):

$$p(R, t) = \left(\frac{A_p}{\sqrt{R}} \right) e^{j(\omega t - kR)}, \quad (1)$$

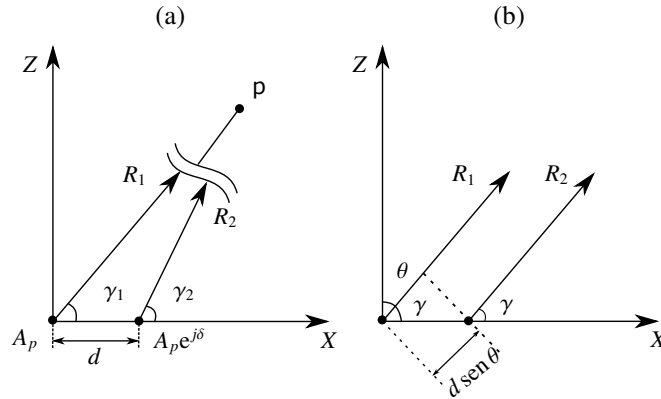
na qual, k corresponde ao número de onda e ω a frequência angular calculada por $2\pi f$, em que f é a frequência que o emissor foi excitado.

Considerando duas fontes acústicas pontuais excitados com amplitude A_p , porém, com uma diferença de fase δ entre si (Figura 3(a)), a pressão exercida por cada transdutor é apresentada em (2):

$$\begin{aligned} p_1(R_1, t) &= \left(\frac{A_p}{\sqrt{R_1}} \right) e^{j(\omega t - kR_1)}, \\ p_2(R_2, t) &= \left(\frac{A_p}{\sqrt{R_2}} \right) e^{j(\omega t - kR_2 + \delta)}, \end{aligned} \quad (2)$$

em que, d é o *pitch*, γ_1 e γ_2 os ângulos de R_1 e R_2 em relação ao eixo x e $e^{j\delta}$ o deslocamento de fase da amplitude irradiada pela segunda fonte.

Figura 3 – Duas fontes acústicas pontuais separados por um *pitch* d excitadas por uma amplitude A_p com diferença de fase δ . (a) Considerando que R_1 e R_2 não estão paralelos entre si. (b) R_1 e R_2 paralelos entre si.



Fonte – Elaborada pelo autor

Conforme apresentado na Figura 3 (a), cada fonte possui um determinado ângulo γ , porém, considerando $d \ll R$. R_1 e R_2 podem ser considerados paralelos (Figura 3(b)), de forma:

$$\gamma_1 \approx \gamma_2 = \gamma, \quad (3)$$

e as seguintes aproximações podem ser feitas para amplitude:

$$R_2 \approx R_1, \quad (4)$$

e para fase:

$$R_2 \approx R_1 - d \cos \gamma = R_1 - d \sin \theta, \quad (5)$$

na qual o ângulo θ ilustrado na Figura 3 (b) corresponde ao complemento de γ .

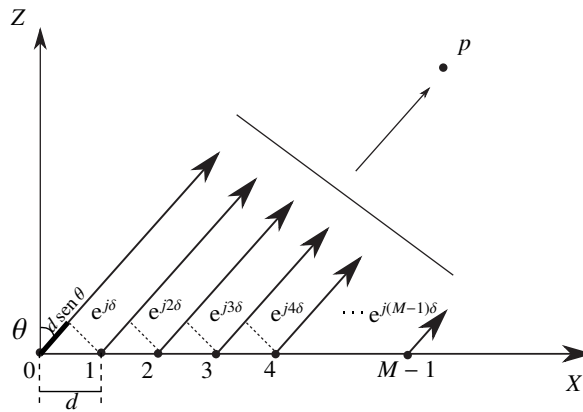
Deste modo, a pressão resultante no ponto P pode ser determinada pela soma das pressões exercida pelos dois pontos, na qual considera-se as aproximações realizadas em (4) e (5), logo:

$$\begin{aligned} p(R, t) &= p_1(R_1, t) + p_2(R_2, t), \\ &= \left(\frac{A_p}{\sqrt{R_1}} \right) e^{j(\omega t - kR_1)} + \left(\frac{A_p}{\sqrt{R_1}} \right) e^{j(\omega t - k(R_1 - d \sin(\theta)) + \delta)}, \\ p(R, t, \theta) &= p_1(R_1, t) \left[1 + e^{j(kd \sin \theta + \delta)} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

na qual a soma das pressões no ponto p foi deixada em função da pressão exercida pela primeira fonte acústica $p_1(R_1, t)$ apresentada em (2).

Assim, de maneira similar, pode-se calcular a pressão exercida por M fontes pontuais separadas por um *pitch* d (Figura 4), na qual todas irradiam uma amplitude A_p e possuem um deslocamento de fase δ entre os seus vizinhos. Desse modo, a pressão exercida pelos M elementos no ponto P é determinada pela equação (7):

Figura 4 – Pressão P exercida por M elementos.



Fonte – Elaborada pelo autor

$$\begin{aligned} p(R, t, \theta) &= p_1(R_1, t) \left[1 + e^{j(kd \sin \theta + \delta)} + e^{j2(kd \sin \theta + \delta)} + e^{j3(kd \sin \theta + \delta)} + \dots + e^{j(M-1)(kd \sin \theta + \delta)} \right], \\ &= p_1(R, t) \sum_{n=0}^{M-1} e^{jn(kd \sin \theta + \delta)} = p_1(R, t) \sum_{n=0}^{M-1} e^{-j\omega_a n}, \quad \omega_a = -kd \sin \theta - \delta. \end{aligned} \quad (7)$$

De forma complementar, considerando que cada elemento é excitado com diferentes amplitudes, a equação (7) que rege a pressão exercida pelo *array* passa a ser escrita em (8):

$$p(R, t, \theta) = p_1(R, t) \sum_{n=0}^{M-1} w[n] e^{-j\omega_a n}, \quad \omega_a = -kd \sin \theta - \delta, \quad (8)$$

sendo $w[n]$ os pesos que representam cada elemento sendo excitado com diferentes amplitudes, também denominada de apodização, em que ao decorrer do capítulo será comentado as consequências do seu uso.

Ao considerar que $\omega_a \rightarrow 0$ e $w[n] = 1$ para $n \in [0, M-1]$, a pressão P possui o seu valor máximo, assim, $P(R, t, \theta) \rightarrow Mp_1(R, t)$. Deste modo, pode-se utilizar esse fator $Mp_1(R, t)$ para normalizar a função da pressão exercida e reescrevê-la como (9):

$$p_{\text{normalizado}}(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w[n] e^{-j\omega_a n}, \quad \omega_a = -kd \sin \theta - \delta, \quad (9)$$

Pode-se observar em (9) que a pressão exercida pelo *array* ($p_{normalizada}$) é a transformada discreta de Fourier de $1/M w[n]$, de forma que esta é denominada como diagrama de radiação do *array* excitado harmonicamente, em que indica como a onda é irradiada pelo *array* (STEINBERG, 1972).

Considerando $w[n] = 1$ para $n \in [0 M - 1]$ e $\delta = 0$, assim ω_a é igual a $-kd \text{sen}(\theta)$. $p_{normalizado}(\theta)$ assume a seguinte característica:

$$\begin{aligned} p_{normalizado}(\theta) &= \frac{1}{M} \left(\frac{1 - e^{-j\omega_a M}}{1 - e^{-j\omega_a}} \right), \\ &= \frac{e^{j[(\frac{M-1}{2})kd \text{sen}(\theta)]} \text{sen}\left(\frac{Mkd \text{sen}(\theta)}{2}\right)}{M \text{sen}\left(\frac{kd \text{sen}(\theta)}{2}\right)}, \end{aligned} \quad (10)$$

em que a magnitude é calculada em (11):

$$|p_{normalizado}(\theta)| = \left| \frac{1 \text{sen}\left(\frac{Mkd \text{sen}(\theta)}{2}\right)}{M \text{sen}\left(\frac{kd \text{sen}(\theta)}{2}\right)} \right|, \quad (11)$$

ao considerar $d = \lambda/2$ e $k = 2\pi/\lambda$, a equação do diagrama de radiação apresentada em (11) assume a seguinte característica:

$$|p_{normalizado}(\theta)| = \left| \frac{1 \text{sen}\left(\frac{M\pi \text{sen}(\theta)}{2}\right)}{M \text{sen}\left(\frac{\pi \text{sen}(\theta)}{2}\right)} \right|, \quad (12)$$

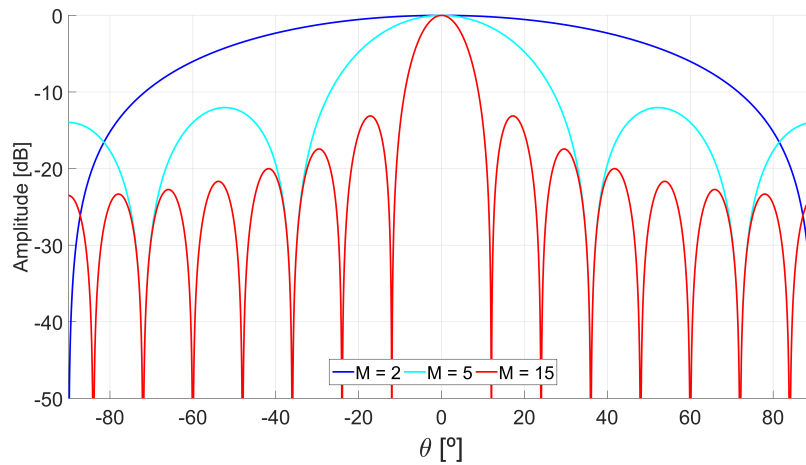
na qual, para $\theta \in [-90^\circ 90^\circ]$ e $M > 1$, o diagrama de radiação ($p_{normalizado}(\theta)$) possui o seu valor máximo em $\theta = 0^\circ$ e, a medida que o número de elementos aumentam para $M > 2$, além do lóbulo principal, surgem os lóbulos secundários (Figura 5). Ressalta-se que, quando $M = 1$, o diagrama de radiação é uniforme para todas as direções.

Para as imagens ultrassônicas geradas utilizando os *arrays* de M elementos, é desejável diagramas de radiação em que os níveis dos lóbulos laterais e abertura angular do lóbulo principal sejam os menores possíveis, uma vez que o primeiro parâmetro está relacionado com a intensidade dos artefatos na imagem e o segundo a sua resolução lateral.

2.2 APODIZAÇÃO E COARRAY

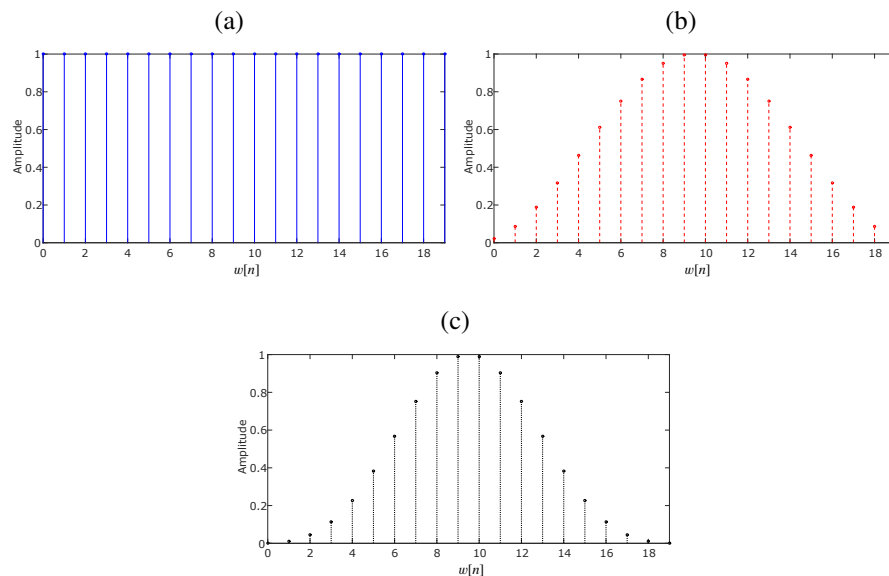
Até o presente momento, foi considerado que os elementos foram excitados com mesma amplitude ($w[n] = 1$), porém, estes valores $w[n]$ podem ser alterados para que se consiga resultados diferentes nas imagens geradas pelos *arrays*, sendo este processo denominado de apodização (ORTIZ; CHIU; FOX, 2012). Deste modo, ilustra-se nas Figuras 6 (a), (b) e (c)

Figura 5 – Diagrama de radiação do *array* excitado continuamente considerando M igual a 2, 5 e 15.



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 6 – Valores de $w[n]$ para apodização em um *array* com abertura de $9,5 \lambda$. (a) Apodização retangular. (b) Apodização de Hanning. (c) Apodização de Blackman.



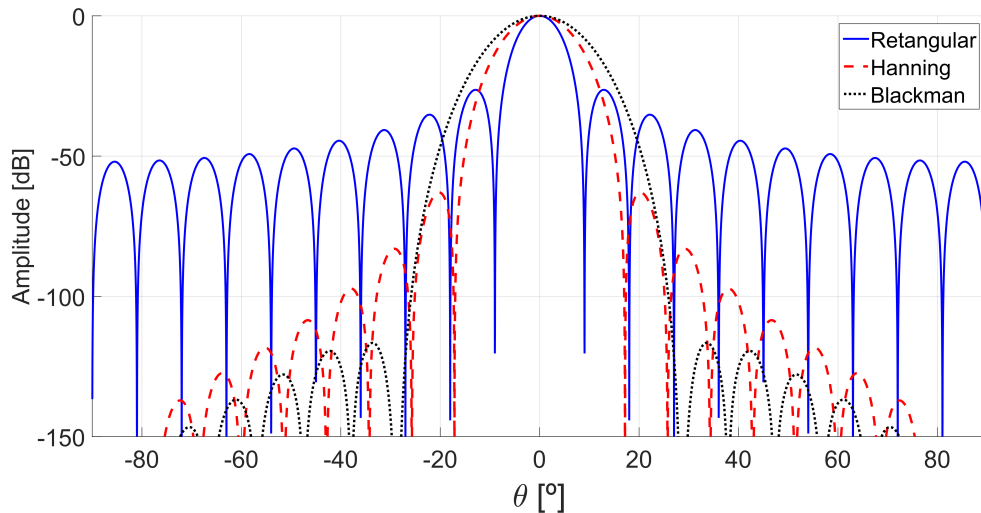
Fonte – Elaborada pelo autor

20 pesos para $w[n]$ correspondentes a apodização Retangular, Hanning e Blackman, que foram utilizados para apodizar um *array* com $M = 20$.

Utilizando os pesos $w[n]$ apresentados para apodizar um *array* com 20 elementos com *pitch* igual a $\lambda/2$, os diagramas de radiação obtidos são apresentados na Figura 7. Pode-se observar que ao utilizar a apodização retangular (azul), o seu diagrama de radiação possui os maiores níveis nos lóbulos laterais, contudo, a menor abertura angular em relação aos outros dois diagramas de radiação, na qual foram utilizados a apodização de Hanning (vermelho) e Blackman (preto).

A apodização é utilizada para alterar as amplitudes em que os elementos dos *arrays* são excitados e também ponderar as amplitudes recebidas pelos elementos. Assim, as imagens geradas utilizando os sinais de ultrassom apresentem diferentes características, conforme serão discutidas no próximo capítulo.

Figura 7 – Apodização do *array* com 20 elementos utilizando a apodização Retangular em azul, Hanning em vermelho e Blackman em preto.



Fonte – Elaborada pelo autor

Outra característica importante a ser considerada ao utilizar os *arrays* é a existência do seu *coarray*, ou, abertura efetiva. Artificio este que relaciona os elementos do *array* emissor com os elementos do *array* receptor. O seu cálculo, definido por Lockwood e Foster (1995), é feito a partir da análise dos diagramas de radiação dos *arrays* emissores ($P_e(\theta)$) e receptores ($P_r(\theta)$), em que a equação que relaciona os dois diagramas é definida por (13):

$$P_{er}(\theta) = P_e(\theta) P_r(\theta), \quad (13)$$

na qual $P_{er}(\theta)$ é o diagrama de radiação que considera os diagramas de radiação do *array* emissor ($P_e(\theta)$) e receptor ($P_r(\theta)$).

Ilustrou-se anteriormente em (9), que o diagrama de radiação é a transformada discreta de Fourier das posições dos elementos do *array*. Assim, considerando que a abertura do *array* emissor é definida por $a_e[n]$ e do receptor definido por $a_r[n]$, a equação (13) pode ser reescrita considerando que $P_{er}(\theta)$ é a transformada de Fourier da convolução entre as aberturas $a_e[n]$ e $a_r[n]$:

$$P_{er}(\theta) = F\{a_e[n] * a_r[n]\}, \quad (14)$$

sendo F , o operador da transformada discreta de Fourier e, $*$, o operador da convolução espacial.

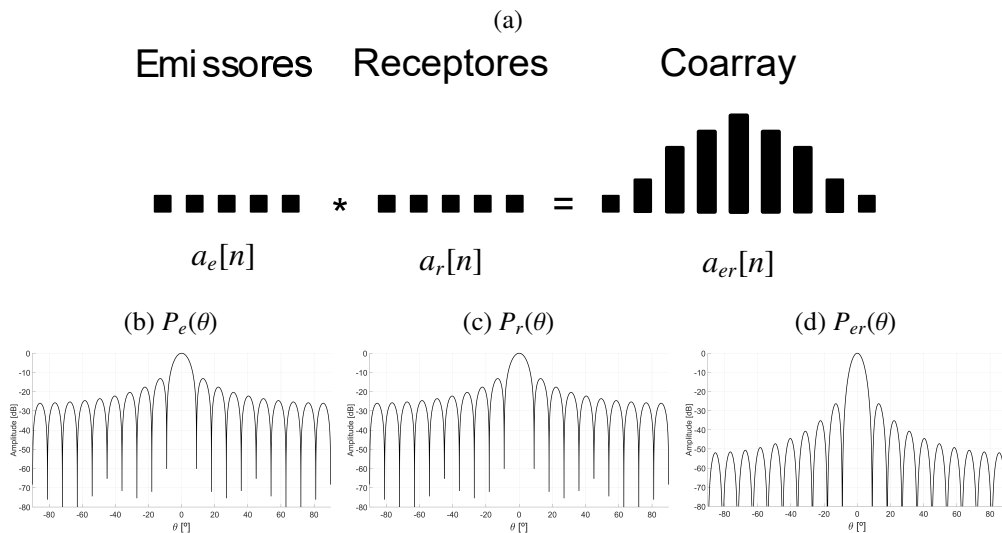
Desse modo, a abertura efetiva do *array*, ou o seu *coarray*, pode ser calculada a partir da convolução espacial das aberturas dos *arrays* emissor ($a_e[n]$) e receptor ($a_r[n]$), como pode ser observado em (15):

$$a_{er}[n] = a_e[n] * a_r[n], \quad (15)$$

na qual, $a_{er}[n]$ ilustra o *coarray*.

Ilustra-se na Figura 8 (a) o cálculo do *coarray* de um *array* com 20 elementos espaçados por $\lambda/2$ com apodização retangular que foi utilizado para emitir e receber o feixe de ultrassom. Pode-se observar que a convolução entre os elementos emissores e receptores geraram um *coarray* com apodização triangular, de forma que o diagrama de radiação do *array* emissor/receptor (Figura 8 (b)) possui os níveis dos lóbulos laterais maiores que os níveis do diagrama de radiação do *coarray* (Figura 8 (c)). Entretanto, como o *array* emissor e receptor é o mesmo neste caso, o diagrama de radiação do *coarray* é o diagrama de radiação do *array* elevado ao quadrado e o contorno dos dois diagramas de radiação é igual.

Figura 8 – *Coarray*. (a) Elementos emissores, elementos receptores e o *Coarray*. (b) Diagrama de radiação do *array* Emissor. (c) Diagrama de radiação do *array* Receptor. (d) Diagrama de radiação do *coarray*.



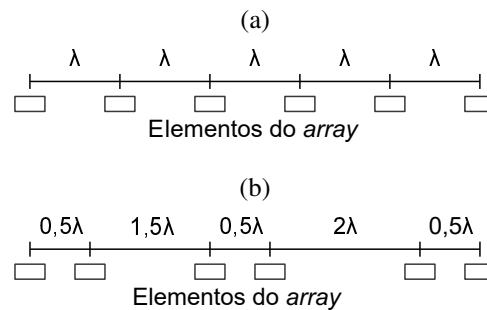
Fonte – Elaborada pelo autor

O uso do *coarray* se torna essencial quando os *arrays* emissores e receptores são diferentes, como é o caso por exemplo do uso de uma apodização para emitir e outra apodização no pós processamento do ultrassom recebido pelo *array*. Além disso, o uso do *coarray* é indispensável quando são criados sistemas com diferentes configurações de *arrays* esparsos emissores e receptores, de modo que cada *array* possui seu diagrama de radiação e a análise do *coarray* integra esses dois. Entretanto, antes de ilustrar um caso do uso do *coarray* para criar *arrays* esparsos, as consequências do seu uso serão comentadas.

2.3 ARRAYS ESPARSOS

Arrays esparsos são *arrays* em que seus elementos possuem um *pitch* maior que $\lambda/2$, podendo ser divididos em dois tipos: os *arrays* esparsos periódicos, nos quais todos os seus elementos possuem um mesmo *pitch* maior que $\lambda/2$ (Figura 9 (a)) e os *arrays* esparsos não periódicos, em que existem diversos *itches* que separam os seus elementos (Figura 9 (b)). Ambos possuem diferentes consequências para geração de imagens, as quais serão detalhadas ao decorrer do texto.

Figura 9 – Exemplo dos tipos de *arrays* esparsos. (a) *Array* esparsa periódica, no qual o *pitch* entre os seus elementos é sempre a mesma. (b) *Array* esparsa não periódica, em que os *itches* entre os seus elementos são diferentes.



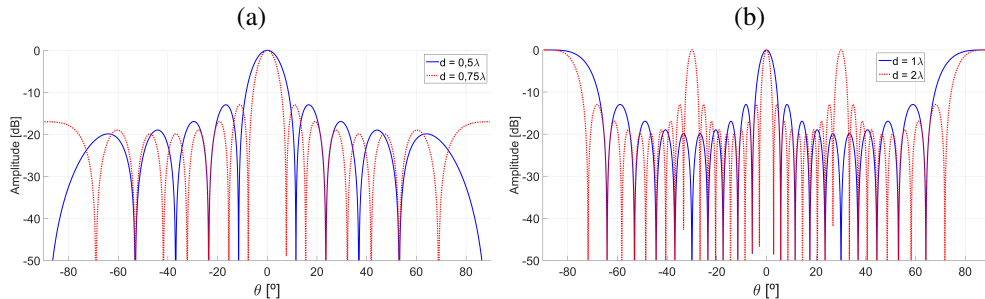
Fonte – Elaborada pelo autor

Para entender as consequências do uso dos *arrays* esparsos, pode-se analisar a equação do diagrama de radiação (11), em que foi feito um estudo do *array* cujo elementos estavam espaçados por $d = 0,5 \lambda$. Deste modo, o diagrama de radiação possuía o seu máximo em $\theta = 0^\circ$ e, em seguida, os lóbulos secundários decaíam conforme se distanciava da máxima amplitude (Figura 10 (a) - linha azul contínua).

Entretanto, esse mesmo estudo pode ser feito para os *arrays* esparsos periódicos, em que os seus elementos possuem um *pitch* d igual a $0,75 \lambda$, λ e 2λ . Para $d = 0,75 \lambda$, o diagrama de radiação do *array* esparsa periódico de 10 elementos é apresentado na Figura 10 (a) com uma linha pontilhada vermelha, em que ao comparar com o diagrama de radiação do *array* com $d = 0,5 \lambda$, pode-se observar o aumento na magnitude dos lóbulos laterais perto de $\pm 90^\circ$.

Para os diagramas de radiação dos *arrays* esparsos espaçados por $d = \lambda$ ou $d = 2 \lambda$ (Figura 10 (b)), pode-se observar a presença dos lóbulos de espaçamento em $\pm 90^\circ$ no diagrama de radiação do *array* esparsa periódico espaçado por λ (linha contínua azul) e a presença dos lóbulos de espaçamento em $\pm 90^\circ$ e $\pm 30^\circ$ no diagrama de radiação do *array* esparsa periódico espaçado por 2λ (linha pontilhada vermelha), de forma que as imagens geradas por estes *array* esparsos periódicos apresentariam uma maior intensidade de artefatos que poderiam comprometer a compreensão da imagem em relação ao *array* completo, em que os seus elementos estão espaçados por $0,5 \lambda$.

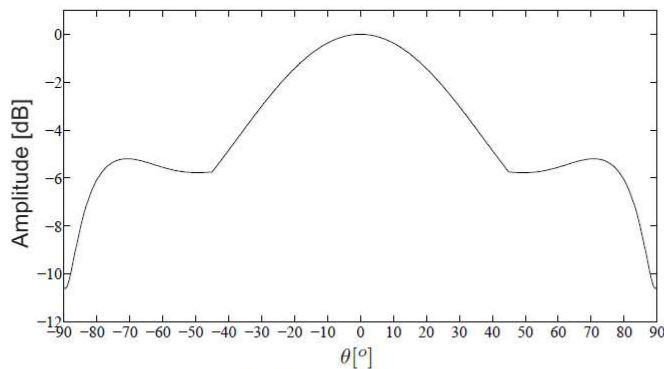
Figura 10 – Diagrama de radiação de um *array* com 10 elementos ilustrando diferentes *itches*. (a) *Array* esparso periódico, cujos elementos possuem o *itch* igual a $0,5\lambda$ (linha azul) e *itch* igual a $0,75\lambda$ (linha vermelha). (b) *Array* esparso periódico, cujos elementos possuem o *itch* igual a 1λ (linha azul) e *itch* igual a 2λ (linha vermelha).



Fonte – Elaborada pelo autor

Contudo, deve-se ressaltar que a interferência dos lóbulos de espaçamento e níveis dos lóbulos laterais na prática são reduzidas por dois fatores (PRADO, 2014). O primeiro, pelo fato que os elementos do *array* utilizados na prática são de dimensões finitas. Assim, o transdutor possui o seu próprio diagrama de radiação, conforme ilustrado na Figura 11 (PRADO, 2014), em que a energia irradiada pela cerâmica PZ26 é maior perto de $\theta = 0^\circ$.

Figura 11 – Diagrama de radiação, simulado no programa *PZFlex*, de uma cerâmica PZ26 com altura de 0,5 mm, largura de 7 mm e comprimento de 8 mm, disposta em uma placa de alumínio e excitada na frequência de 360 kHz (PRADO, 2014).

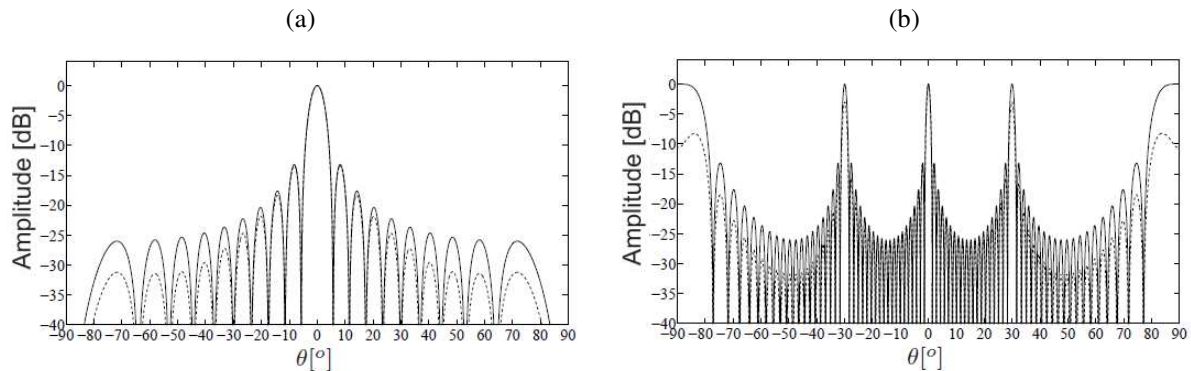


Fonte – Prado (2014)

Desse modo, o cálculo do diagrama de radiação considerando as dimensões dos elementos do *array* é feita multiplicando o diagrama de radiação do *array* considerando os seus elementos pontuais com o diagrama de radiação da cerâmica, conforme pode-se observar na Figura 12 (PRADO, 2014). Para a Figura 12 (a), observa-se um *array* com 20 elementos com *itch* igual a $\lambda/2$ e, na Figura 12 (b), a quantidade de elementos é a mesma, porém, o *itch* é igual a λ . Para ambos os caso, em linha contínua, ilustra-se o diagrama de radiação do *array* cujos elementos são considerados pontuais, e, em linha pontilhada, o diagrama de radiação do

array cujos elementos são considerados não pontuais. Como pode ser observado na imagem, os lóbulos laterais e lóbulos de espaçamento são menores para o diagrama de radiação da linha pontilhada, que leva em consideração a dimensão dos elementos (SCHMITZ; CHAKHLOV; MÜLLER, 2000).

Figura 12 – Diagrama de radiação de um *array* com 20 elementos considerando os elementos ideais (linha contínua) e cerâmicas simuladas (linha pontilhada), sendo apresentado em (a) o diagrama de radiação cujos elementos possuem *pitch* igual a $\lambda/2$ e (b) *pitch* igual a λ (PRADO, 2014).



Fonte – Prado (2014)

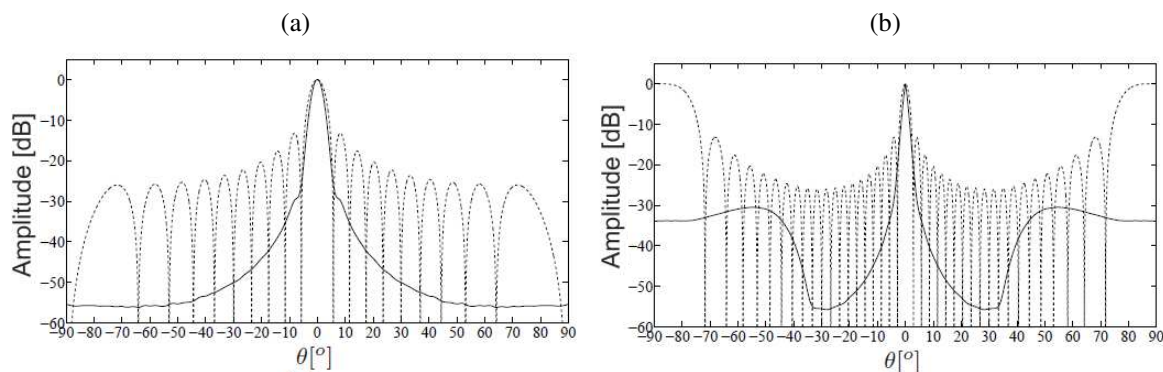
O segundo fator que reduz os artefatos causados pelos lóbulos de espaçamento e lóbulos laterais é o fato dos elementos do *array* serem excitados de forma pulsada (DRINKWATER; WILCOX, 2006). Na Figura 13 (PRADO, 2014), ilustra-se diagramas de radiação para dois tipos de *arrays*, o primeiro (Figura 13 (a)), o *array* com 20 elementos cujo *pitch* é igual a $\lambda/2$, e, o segundo (Figura 13 (b)), o *array* com 20 elementos cujo *pitch* é igual a λ .

Como pode-se observar na imagem, os diagramas dos *array* cujos elementos são excitados continuamente, representado pela linha contínua, apresenta lóbulos laterais e lóbulos de espaçamento com maior amplitude em relação ao diagramas de radiação cujos elementos são excitados de forma pulsada, representada pela linha pontilhada.

Mesmo que as interferências dos lóbulos de espaçamento e níveis dos lóbulos laterais não sejam tão acentuadas na prática, ainda é necessário evita-las. Deste modo, uma alternativa para reduzir a magnitude dos lóbulos de espaçamento consiste em remover a periodicidade dos seus elementos (SCIALERO; TRUCCO, 2015). Assim, a Figura 14 (a) ilustra um *array* esparsos não periódico com 15 elementos em uma abertura de $15,5\lambda$, abertura equivalente a de um *array* esparsos periódico com 16 elementos espaçados por λ . Ao analisar o diagrama de radiação do *array* esparsos não periódico (Figura 14(b)), é possível observar que a magnitude presente em $\pm 90^\circ$ no diagrama de radiação do *array* esparsos periódico (Figura 10 (b)) foi reduzida, entretanto, os níveis dos lóbulos laterais aumentaram.

Logo, ao utilizar os *arrays* esparsos para gerar as imagens ultrassônicas algumas consequências podem ser apontadas a partir da análise do diagrama de radiação. Para o caso do

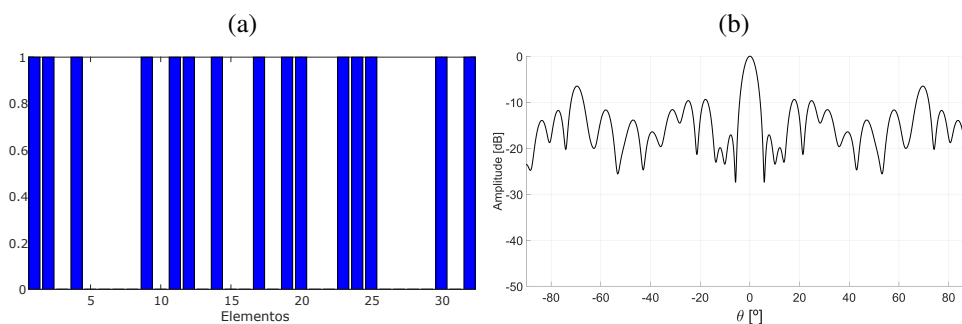
Figura 13 – Diagrama de radiação de um *array* com 20 elementos com *pitch* igual a (a) $\lambda/2$ e (b) λ . Em linha contínua, o diagrama de radiação do *array* excitado continuamente e, em linha pontilhada, o diagrama de radiação do *array* cujos elementos são excitados de forma pulsada (PRADO, 2014).



Fonte – Prado (2014)

array esparsos periódicos, ao analisar o diagrama de radiação observa-se a existência de lóbulos de espaçamento que chegam a mesma magnitude que o lóbulo principal e, para o caso do *array* esparsos não periódico, pode-se observar no diagrama de radiação a redução dos níveis dos lóbulos de espaçamento, porém, aumento nos níveis dos lóbulos secundários.

Figura 14 – Análise do *array* esparsos não periódico (a) e o seu diagrama de radiação (b).



Fonte – Elaborada pelo autor

Assim, tanto o *array* esparsos periódico quanto não periódico possuem desvantagens em relação ao *array* completo, pois possuem os níveis dos lóbulos laterais elevados que são traduzidos ao aumento na intensidade dos artefatos presentes nas imagens ultrassônicas. Entretanto, os *arrays* esparsos são utilizados na formação de imagem pois, em relação ao *array* completo, podem cobrir uma mesma área utilizando menos elementos, dessa forma, pode-se reduzir os custos envolvidos para construir um equipamento e gerar as imagens com uma maior velocidade.

Para este trabalho, considerou-se que os *arrays* completos e esparsos periódicos possuem seus comportamentos bem definidos na literatura, de modo que não existem muitas alternativas para construir estes *arrays*. Para o caso do *array* completo, pode-se aumentar ou

diminuir a abertura do *array* e, para o caso do *array* esparso periódico, pode-se além de aumentar a abertura alterar o espaçamento entre os elementos. Deste modo, pelo fato que o *array* esparso não periódico pode ter diferentes configurações de elementos, foi proposto neste trabalho uma forma de realizar uma busca utilizando o algoritmo genético para encontrar as boas configurações desses *arrays*.

2.4 CONSTRUÇÃO DOS ARRAYS ESPARSOS UTILIZANDO O COARRAY

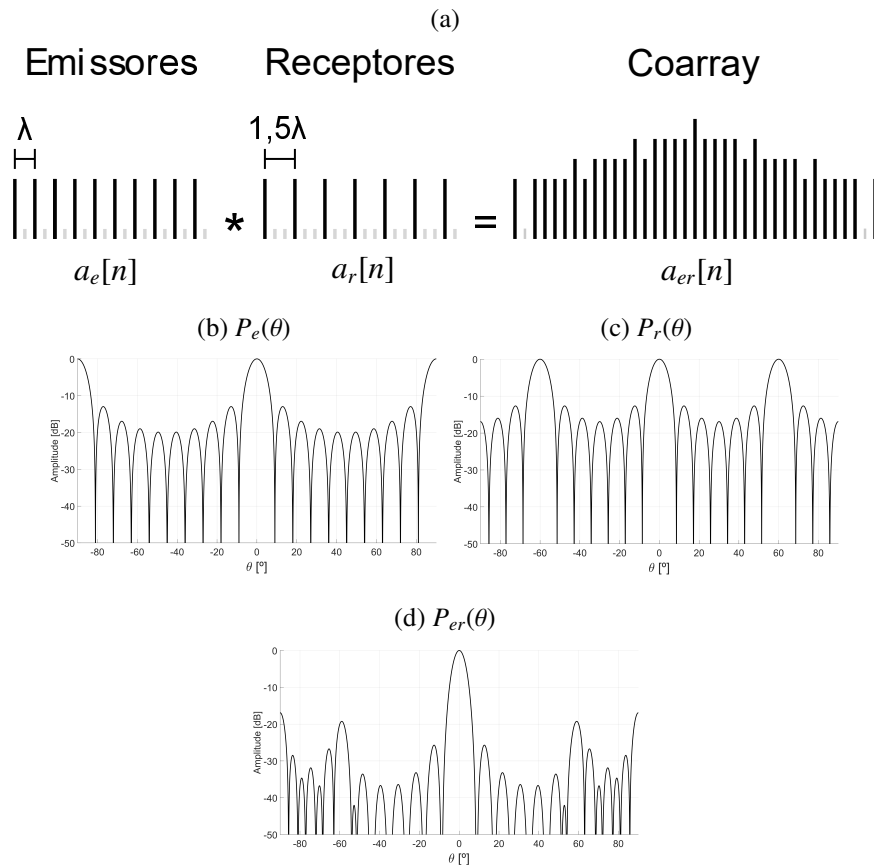
Uma linha de pesquisa estudada para diminuir as consequências do uso dos *arrays* esparsos, que não foi seguida neste trabalho, é utilizar diferentes *arrays* esparsos periódicos para emitir e receber o ultrassom (MARTÍNEZ-GRAULLERA et al., 2010) (MOREAU; DRINKWATER; WILCOX, 2009), ao modo que o *coarray* formado por estes diferentes *arrays* seja parecido ao apresentado anteriormente na Figura 8 (a).

Por exemplo, a Figura 15 (a) ilustra a metodologia apresentada por Lockwood et al. (1996a), em que dois *arrays* esparsos periódicos ($a_e[n]$ e $a_r[n]$) são utilizados para formar um *coarray* ($a_{er}[n]$) que se assemelhasse ao *coarray* do *array* completo apresentado na Figura 8 (a). Assim, ao analisar o diagrama de radiação do *array* emissor (Figura 15 (b)) e o diagrama de radiação do *array* receptor (Figura 15 (c)), pode-se observar que os *arrays* esparsos utilizados para emitir e receber o ultrassom possuem no seu diagrama de radiação lóbulos de espaçamento, contudo, no diagrama de radiação do *coarray* estes lóbulos são reduzidos (Figura 15 (d)).

2.5 COMENTÁRIOS

Neste capítulo, definiu-se que o diagrama de radiação do *array* é a transformada discreta de Fourier de $1/M \omega[n]$, e que a apodização pode ser utilizada nos valores de $\omega[n]$ para alterar o diagrama de radiação. Por conseguinte, o conceito *coarray* foi introduzido como uma ferramenta para analisar os elementos emissores e receptores e, por último, foi estudado as consequências dos *arrays* esparsos para gerar as imagens. Para o próximo capítulo, as técnicas utilizadas para gerar as imagens ultrassônicas serão apresentadas, com foco na técnica *Synthetic Aperture* (SA).

Figura 15 – Metodologia proposta por Lockwood et al. (1996a). (a) Elementos emissores, elementos Receptores e o *Coarray*. (b) Feixe de radiação do Emissor. (c) Feixe de radiação do Receptor. (d) Feixe de radiação do *coarray*.

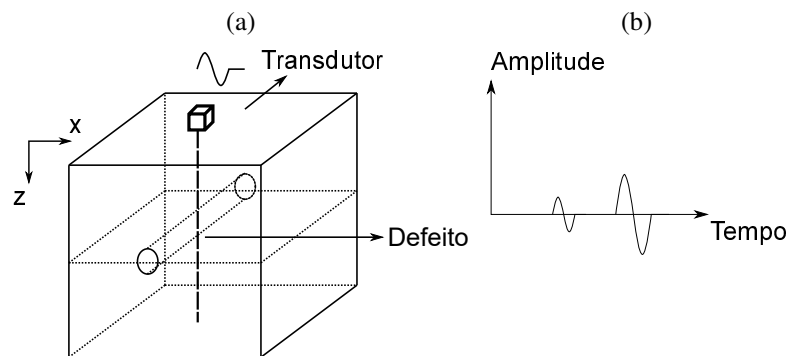


Fonte – Elaborada pelo autor

3 IMAGENS ULTRASSÔNICAS

As imagens ultrassônicas são comumente utilizadas no ensaio não-destrutivo (END) e diagnóstico médico em virtude da sua não invasividade e radiação não ionizante, de tal modo que o seu princípio de funcionamento é baseado na reflexão do ultrassom no meio. Para casos simples, um único elemento piezoelétrico pode ser utilizado para detectar as anomalias no objeto analisado (Figura 16 (a)), de forma que o transdutor fixado na peça emite o ultrassom e tem parte do seu sinal refletido ao encontrar o defeito, conforme ilustrado na Figura 16 (b), na qual a primeira amplitude indica o ultrassom refletido pelo defeito e a segunda o final da peça. Neste caso, esta técnica denominada como *A-scan* pôde ser utilizada para indicar a presença de um ponto refletor na peça que possui um furo transversal. Além de ser utilizada para indicar a presença de defeitos no meio, o *A-scan* também pode ser utilizado para medir o comprimento da peça a fim de detectar possíveis corrosões.

Figura 16 – O uso de um transdutor para detecção de anomalias. (a) *A-Scan* - Amplitude do sinal. (b) Amplitudes recebidas pelo transdutor, na qual a primeira amplitude indica a presença de um objeto refletor e a segunda o final da peça.

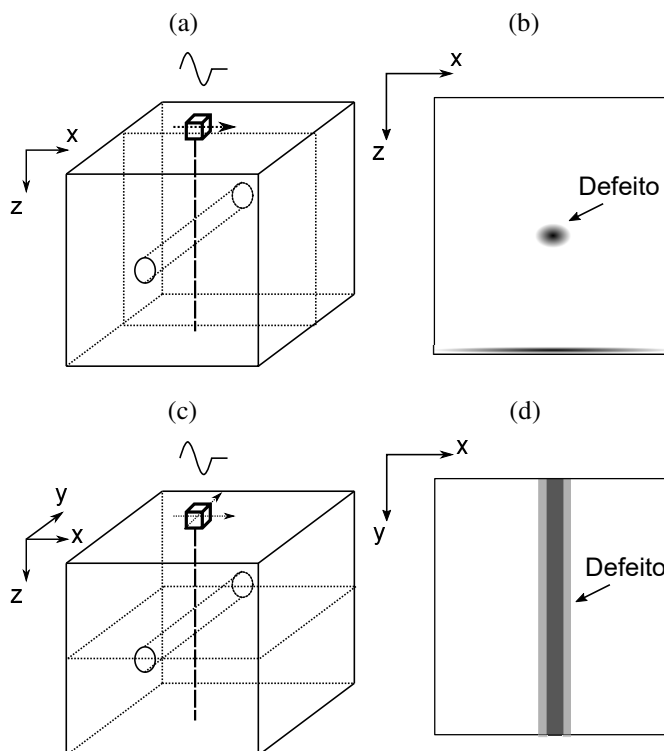


Fonte – Elaborada pelo autor

De forma complementar, a imagem utilizando a técnica *B-scan* pode ser gerada movendo o transdutor em um eixo da peça (Figura 17 (a)) e adquirindo vários *A-scans* ao decorrer do processo, de modo que a composição das ondas de ultrassom capturadas em diferentes pontos possibilitam criar uma imagem do defeito (Figura 17 (b)) (SHUNG; SMITH; TSUI, 1992). Além da varredura em uma dimensão da peça, o mesmo transdutor pode ser movimentado em ambos os eixos para adquirir vários *A-scans* e formar a imagem *C-scan* (Figura 17 (c)), de forma que a imagem gerada em uma determinada profundidade (eixo *z*) corresponde a um corte transversal da peça, conforme ilustrado na Figura 17 (d), em que foi gerado uma imagem na altura onde se encontra o defeito e pôde ser observado toda a sua extensão.

Um único transdutor pode ser utilizado para gerar imagens ultrassônicas, conforme apresentado a técnica *B-scan* e *C-scan*, entretanto, para realizar as diversas aquisições das ondas de ultrassom é necessário mover mecanicamente o transdutor ponto a ponto, o que pode ser trabalhoso e susceptível a erros humanos. Além disso, como o transdutor trabalha em pulso eco,

Figura 17 – O uso de um transdutor para realizar a varredura na peça. (a) B-Scan. (b) Imagem gerada a partir do B-Scan, em que é possível observar em que posição do eixo x o defeito está presente. (c) Representação de como é gerado o C-Scan. (d) Imagem do corte da peça na profundidade onde o defeito está presente.



Fonte – Elaborada pelo autor

não é possível focalizar o feixe de ultrassom em um ponto da peça ou utilizar combinações de elementos emitindo e recebendo para aumentar a quantidade de dados e utilizá-los para criar imagens com melhor resolução e contraste.

Dessa forma, o uso de *arrays* possibilita a varredura eletrônica da peça, bem como a manipulação do feixe de ultrassom e maior aquisição de dados que, posteriormente, possam ser utilizados para gerar imagens com melhor qualidade em relação as geradas utilizando um único transdutor. Ao decorrer do capítulo serão comentados duas formas de operação dos *arrays*: o *phased array* (PA), em que múltiplos elementos trabalham em modo de emissão ou recepção paralelamente, e o *synthetic aperture* (SA), na qual a emissão e recepção do ultrassom pelo transdutor no *array* é multiplexada.

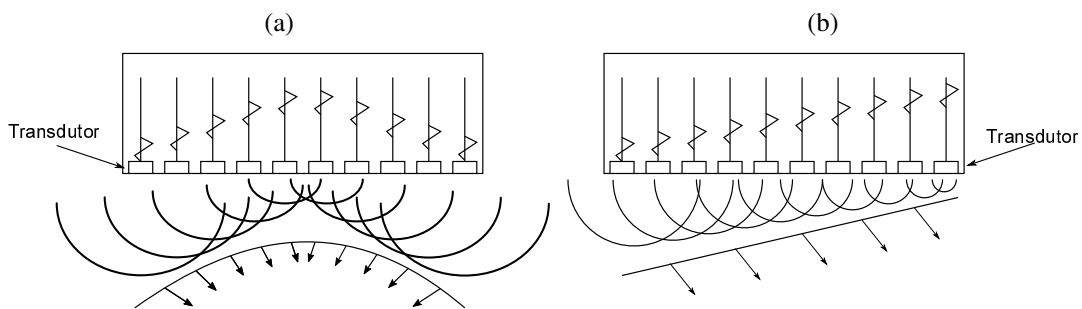
3.1 PHASED ARRAY (PA)

Phased array é um modo de operação do *array* em que os elementos trabalham emitindo e recebendo de forma paralela, de modo que pode-se aplicar atrasos na excitação dos elementos para que se consiga direcionar e focalizar o feixe de ultrassom (WOOH; SHI, 1999). A Figura 18 ilustra o funcionamento do PA, na qual é possível focalizar o ultrassom em um

determinado ponto da peça analisada (Figura 18(a)) e direcionar o feixe de ultrassom (Figura 18(b)). Em comparação com o uso de um único transdutor, o PA possibilita, além de direcionar e focalizar o feixe de ultrassom em diversas regiões da peça, aumentando a resolução e contraste da imagem gerada, realizar a varredura na peça de forma eletrônica, de modo que o tempo necessário para mover o transdutor pela peça é reduzido.

Entretanto, existe uma elevada complexidade eletrônica ao utilizar o PA, ao modo que é necessário criar um sistema que tenha canais de comunicação dedicados para cada transdutor e que se consiga calcular e aplicar os atrasos nos disparos dos pulsos elétricos para direcionar e focalizar o feixe de ultrassom. De forma alternativa, pode-se diminuir a complexidade eletrônica utilizando a técnica *Synthetic Aperture*, cuja quantidade de canais de comunicação é reduzida e não é necessário realizar atrasos nos disparos dos pulsos.

Figura 18 – Atrasos na excitação dos elementos para focalizar o feixe de ultrassom (a) e direcionar o feixe de ultrassom (b).



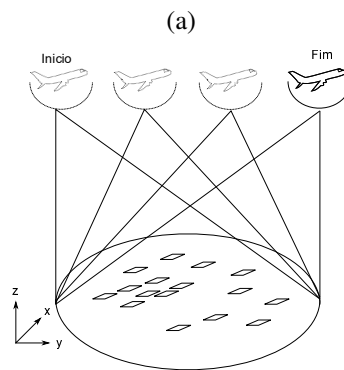
Fonte – Elaborada pelo autor

3.2 SYNTHETIC APERTURE (SA)

A técnica *Synthetic Aperture* utilizada para excitar os elementos do *array* foi criada baseada na técnica SAR (*Synthetic Aperture Radar*), em que a partir de uma plataforma sobrevoando uma área, vários pulsos de ondas de rádio são emitidas e recebidas em diferentes posições. A Figura 19 ilustra o funcionamento do SAR, na qual pode-se observar que o avião em um determinado instante emite uma onda de rádio e captura a sua reflexão no instante posterior, de forma que a imagem do terreno é gerada pós processando as informações capturadas (JAKOWATZ et al., 2012).

Diferente da técnica PA, em que os elementos são acionados simultaneamente com atrasos para focalizar e direcionar o feixe de ultrassom, a técnica SA trabalha multiplexando os elementos que são excitados em instantes diferentes. Dessa forma, a técnica SA se assemelha a técnica SAR pelo conceito de um elemento piezoelétrico ser excitado e outro elemento trabalha como receptor. Assim, da mesma forma que o SAR necessita o pós processamento para gerar as imagens, as imagens ultrassônicas utilizando a técnica SA também necessitam de

Figura 19 – Técnica SAR, na qual a composição de ondas de rádio são utilizadas para gerar imagens do solo.

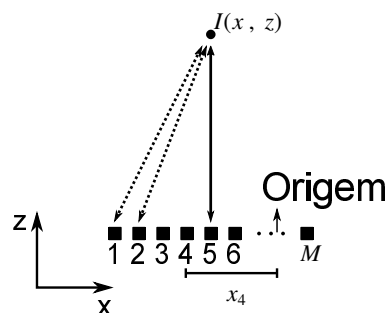


Fonte – Elaborada pelo autor

um pós processamento. Existem diversos algoritmos para gerar as imagens utilizando os sinais de ultrassom adquiridos utilizando a técnica SA, na qual neste trabalho serão apresentados os algoritmos SAFT (*Synthetic Aperture Focusing Technique*), 2RSAFT (*2 Receivers Synthetic Aperture Focusing Technique*) e TFM (*Total Focusing Method*).

Para o algoritmo SAFT, os elementos do *array* trabalham em pulso-eco de forma similar a técnica apresentada na Figura 17 (a), com a diferença que os elementos não são movimentados na peça. A Figura 20 ilustra o funcionamento do algoritmo SAFT, em que cada elemento do *array* trabalha em pulso eco acionados em diferentes momentos, de forma que um conjunto de dados A_r com M sinais de ultrassom é armazenado e precisa ser pós processado.

Figura 20 – Ilustração do funcionamento do algoritmo SAFT utilizado para gerar a imagem ultrassônicas no ponto $I(x, z)$.



Fonte – Elaborada pelo autor

Assim, o cálculo da imagem ultrassônica utilizando o algoritmo SAFT é realizado utilizando a equação (16), em que basicamente para cada *pixel* ($I(x, z)$) é calculado o tempo de propagação que o ultrassom leva para sair do emissor, chegar ao *pixel* e voltar para o receptor (t_{rxz}), e, realizado a somatória das amplitudes recebidas pelos elementos neste tempo:

$$I(x, z) = \sum_{r=1}^M w_r A_r(t_{rxz}), \quad (16)$$

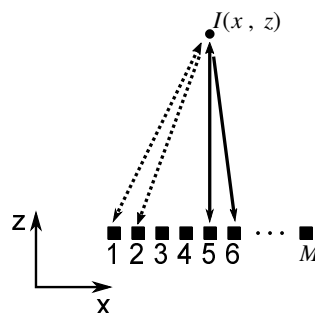
na qual, w_r são os coeficientes da apodização, A_r a amplitude recebida pelo elemento do *array* trabalhando em pulso-eco e t_{rxz} o tempo necessário para que a onda saia do elemento r chegue até o ponto analisado $I(x, z)$ e volte para o seu ponto de origem. Desta forma, o cálculo de t_{rxz} é realizado da seguinte maneira:

$$t_{rxz} = 2 \frac{\sqrt{(x_r - x)^2 + (z_r - z)^2}}{c}, \quad (17)$$

em que c é a velocidade de propagação da onda no meio, z_r a altura do elemento do *array* r (eixo z) em relação a origem, na qual é normalmente estabelecida no centro do *array*, de forma que z_r seja igual a zero, e, x_r a posição do centro do elemento do *array* r até a origem ilustrada na Figura 20 como distância x_4 .

Alternativamente, pode-se integrar mais elementos trabalhando em conjunto para modificar o algoritmo SAFT, como é o exemplo do algoritmo 2RSAFT (MARTÍN et al., 2010), em que se utiliza o elemento do *array* trabalhando em pulso-eco e o seu adjacente como receptor. Em outras palavras, são utilizados um elemento para emitir a onda de ultrassom e dois para receberem as informações, como pode ser observado na Figura 21. Para este caso representado na imagem, está ilustrado que em determinado momento o elemento 1 trabalhou como pulso-eco e o elemento 2 como receptor, posteriormente, o elemento 5 trabalha em pulso-eco e o elemento 6 também recebe a onda de ultrassom.

Figura 21 – Ilustração do funcionamento do algoritmo 2RSAFT utilizado para gerar a imagem ultrassônicas no ponto $I(x, z)$.



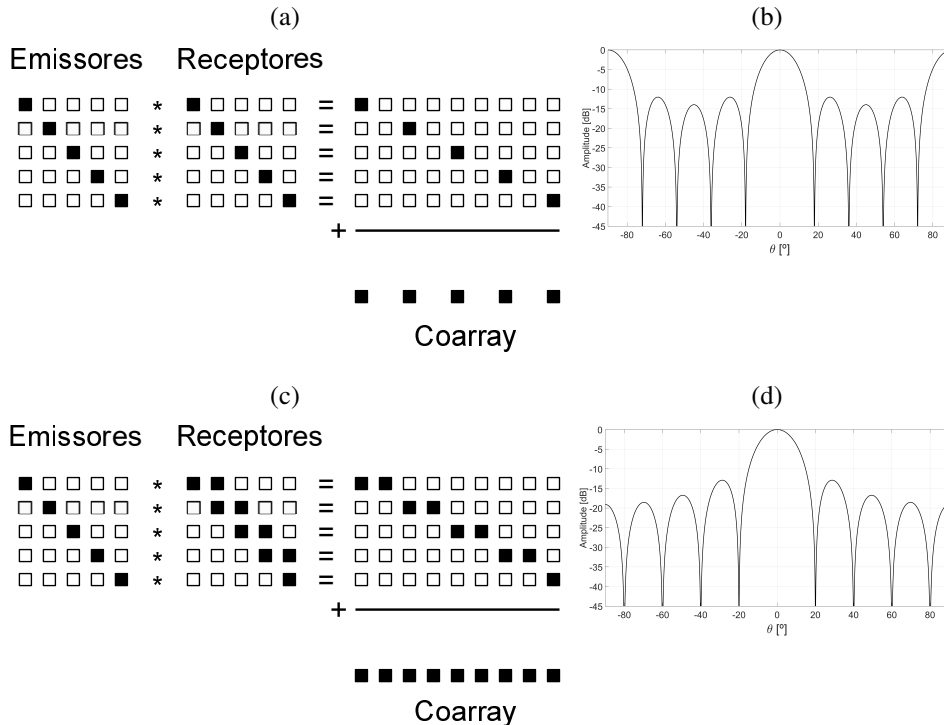
Fonte – Elaborada pelo autor

Apesar do algoritmo 2RSAFT utilizar mais operações matemáticas que o algoritmo SAFT para gerar as imagens ultrassônicas, de forma que é necessário utilizar $2M - 1$ operações para o algoritmo 2RSAFT e M operações para o algoritmo SAFT, a sua vantagem em relação a imagem gerada pelo algoritmo SAFT pode ser esclarecida ao analisarmos o *coarray* formado

por cada técnica. Deste modo, considerando que foi utilizado um *array* completo, o *coarray* formado quando utilizarmos o algoritmo SAFT é esparsa periódica, na qual os seus elementos estão espaçados por λ , conforme pode ser observado na Figura 22 (a). Dessa forma, a restrição que os elementos devem ser espaçados por $\lambda/2$ é extrapolada e os lóbulos de espaçamento surgem no diagrama de radiação do *coarray* criado pelo algoritmo SAFT (Figura 22 (b)). Assim, apesar dos *arrays* utilizados para capturar as informações da imagem estarem respeitando esta distância mínima para que não exista lóbulos de espaçamento, o seu *coarray* esparsa periódica apresenta estes lóbulos.

A solução mais simples para contornar este problema é utilizar o algoritmo 2RSAFT, na qual, pelo fato de utilizar dois elementos receptores, geram um *coarray* com todos os seus elementos espaçados por $\lambda/2$, conforme pode ser observado na Figura 22 (c). Conseqüentemente, os lóbulos de espaçamento presentes em $\pm 90^\circ$ no diagrama de radiação do algoritmo SAFT (Figura 22 (b)) não existem no diagrama de radiação do *coarray* do algoritmo 2RSAFT (Figura 22 (d)). Dessa maneira, o aumento nas operações matemáticas ao utilizarmos o algoritmo 2RSAFT é compensada pela não existência dos lóbulos de espaçamento.

Figura 22 – Diferença entre os algoritmos SAFT e 2RSAFT analisando o *coarray* e Diagrama de radiação. (a) *Coarray* do SAFT. (b) Feixe de radiação do *coarray* SAFT. (c) *Coarray* do 2RSAFT. (d) Diagrama de radiação do *coarray* 2RSAFT.



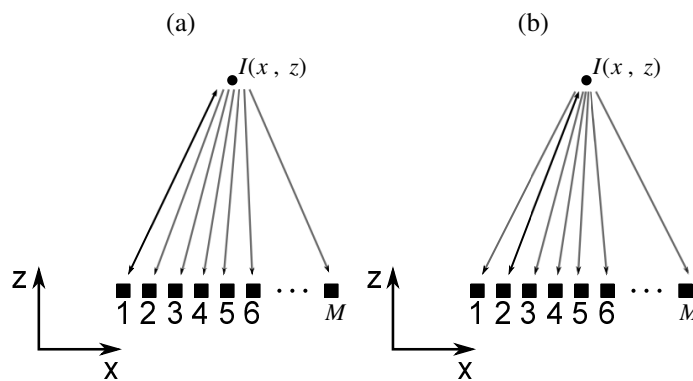
Fonte – Elaborada pelo autor

O último algoritmo apresentado, e também utilizado para gerar as imagens apresentadas neste trabalho, é o algoritmo TFM. Este foi desenvolvido para utilizar todas combinações de elementos emitindo e recebendo para gerar as imagens ultrassônicas, de modo que é conside-

rado como referência para gerar as melhores imagens e é até denominado como *gold standard* (YEN; STEINBERG; SMITH, 2000).

Na Figura 23, o funcionamento do algoritmo TFM é ilustrado e duas situações são apresentadas, a primeira, o momento que elemento 1 emite e todos os M elementos recebem (Figura 23 (a)) e segunda em que o elemento 2 emite e todos os M recebem (Figura 23 (b)). Dessa forma, o algoritmo TFM realizar essa operação para todos as combinações de elementos emitindo e recebendo ao modo que uma matriz de tamanho $M \times M$ é adquirida.

Figura 23 – Ilustração do funcionamento do algoritmo TFM utilizado para gerar o *pixel* da imagem no ponto $I(x, z)$. (a) Instante que o elemento 1 trabalha como pulso-eco e todos os demais elementos recebem. (b) Instante que o elemento 2 trabalha como pulso-eco e todos os demais elementos recebem.



Fonte – Elaborada pelo autor

Após a aquisição da matriz $M \times M$, o cálculo dos *pixels* ($I(x, z)$) é realizado a partir da equação (18) (VELICHKO; WILCOX, 2005):

$$I(x, z) = \frac{1}{M^2} \sum_{e=1}^M \sum_{r=1}^M w_{er} A_{er}(t_{er}(x, z)), \quad (18)$$

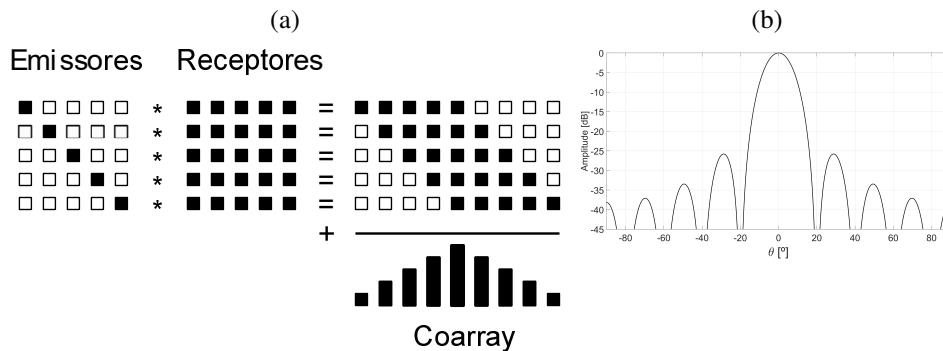
sendo w_{er} os coeficientes da apodização utilizado para manipular o diagrama de radiação, M o número de elementos, A_{er} a amplitude capturada pelo elemento r em que o elemento e emitiu, e $t_{er}(x, z)$ o tempo necessário para onda gerada pelo elemento do *array* percorra o meio, chegue até o ponto $I(x, z)$ e retorne ao elemento receptor. Assim, o cálculo de $t_{er}(x, z)$ é realizado utilizando a equação (19):

$$t_{er}(x, z) = \frac{\sqrt{(x - x_e)^2 + (z - z_e)^2} + \sqrt{(x - x_r)^2 + (z - z_r)^2}}{c}, \quad (19)$$

Apesar do algoritmo TFM ter um custo computacional elevado em relação aos outros algoritmos de geração de imagens, de modo que é necessário M^2 operações para gerar um *pixel* da imagem, o seu *coarray* apresentado na Figura 24 é o mesmo que o do PA em que os elementos trabalham

em paralelo. Entretanto, a maior desvantagem ao utilizar o SA em relação ao PA é a baixa relação sinal ruído, o que resulta em imagens com baixo contraste e baixa penetração da onda de ultrassom (NIKOLOV; BEHAR, 2005).

Figura 24 – *Coarray* gerado pelo algoritmo TFM, em que a forma triangular idêntica ao do PA resulta no mesmo diagrama de radiação. (a) *Coarray* formado ao utilizar o algoritmo TFM. (b) O seu diagrama de de radiação.



Fonte – Elaborada pelo autor

Dentre todos os algoritmos apresentados para construção de imagens, o algoritmo TFM possui o melhor desempenho entre os algoritmos apresentados, conforme pode ser concluído a partir da comparação do seu *coarray*, que possui abertura angular do lóbulo principal e níveis dos lóbulos laterais menores com os *coarrays* do algoritmo SAFT e 2RSAFT. Contudo, o algoritmo TFM necessita de um maior processamento de dados em relação aos outros algoritmos.

Até o presente momento, a análise dos *arrays* apresentados foi feita utilizando o diagrama de radiação do *array* excitado harmonicamente, de modo que se tem uma aproximação do comportamento do *array*. Assim, para se ter uma ideia mais real do comportamento do *array* para gerar as imagens ultrassônicas pode-se utilizar a PSF (*Point Spread Function*), em que um defeito é simulado na peça.

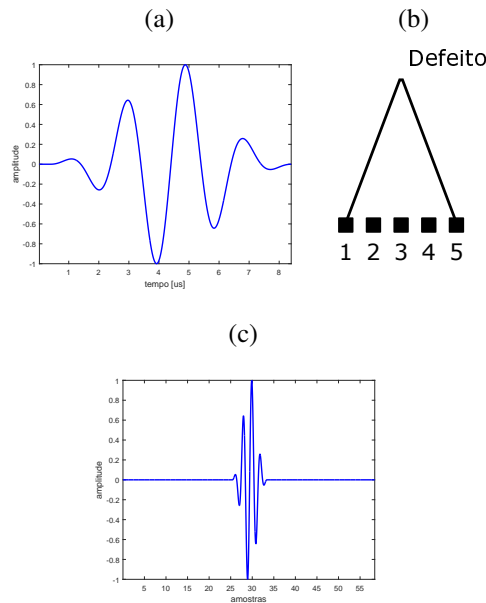
3.3 PSF

A PSF é uma alternativa para analisar a resposta do *array* em gerar a imagem de um defeito em um ponto específico no plano, de forma que uma maneira de construí-la é criando uma matriz de dados recebidos pelo *array* e aplicá-los nos algoritmos de geração de imagens (DRINKWATER; WILCOX, 2006). Uma das vantagens da PSF em relação a análise do diagrama de radiação é a possibilidade de avaliar a resolução lateral e a intensidade dos artefatos na imagem (MARTÍN et al., 2010).

Para formar a matriz de dados que será aplicada aos algoritmos é necessário primeiro simular a onda de ultrassom gerada por um transdutor (Figura 25 (a)), de maneira que esta pode ser simulada utilizando ciclos de senóides com envoltória Gaussiana e que neste trabalho

foram utilizados 4 ciclos de senóides com frequência de 5 MHz. Em seguida, é necessário calcular o tempo para onda sair do elemento emissor do *array*, chegar ao defeito e retornar ao elemento receptor. Na Figura 25 (b) ilustra-se o caminho que a onda percorre saindo do elemento 1, refletindo no defeito e chegando no elemento 5. A partir deste cálculo de tempo, é possível posicionar a onda de ultrassom simulada no instante em que a reflexão no defeito ocorreu, conforme ilustrado na Figura 25 (c). Desta maneira, realiza-se este procedimento para todas as combinações de elementos emitindo e recebendo para criar uma matriz de dados que simula uma aquisição feita pelo *array*, ao modo que o próximo passo para criar a PSF consiste em utilizar um algoritmo para gerar as imagens da PSF utilizando os dados simulados.

Figura 25 – Processo de criação da matriz de dados utilizada para gerar a PSF. (a) O sinal de ultrassom simulado. (b) O caminho necessário para a onda sair do elemento do *array*, chegar no defeito e voltar para o elemento. (c) o sinal simulado recebido pelo elemento do *array*.



Fonte – Elaborada pelo autor

Para os cálculos das imagens apresentadas neste trabalho, será utilizado uma modificação do algoritmo TFM (equação 18), de modo que esta é apresentada em (20), na qual foi adicionado a sinal de quadratura \hat{A}_{er} , calculado a partir da transformada de Hilbert de A_{er} (PRADO et al., 2014). Como resultado final, a imagem gerada por esta equação é apresentada como a envoltória da imagem e não o seu sinal RF:

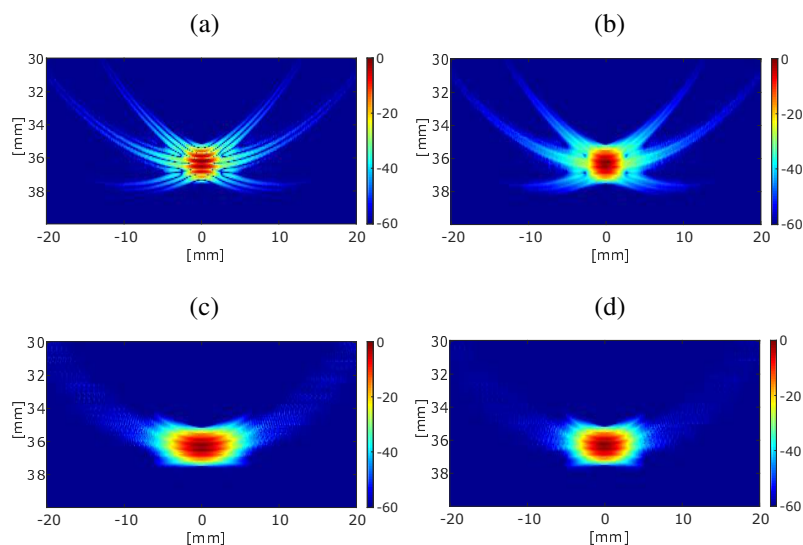
$$I(x, z)_{envoltoria} = \frac{1}{M^2} \left\{ \left[\sum_{e=1}^M \sum_{r=1}^M w_{er} A_{er}(t_{er}(x, z)) \right]^2 + \left[\sum_{e=1}^M \sum_{r=1}^M w_{er} \hat{A}_{er}(t_{er}(x, z)) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (20)$$

A Figura 26 (a) ilustra a PSF gerada através do algoritmo TFM sem considerar o sinal em quadratura, em que é possível observar as amplitudes RF. Por conseguinte, o sinal de quadratura

é considerado para gerar a PSF, de modo que é possível observar que foi gerada a imagem do defeito com a sua envoltória (Figura 26 (b)). Para ambas imagens apresentadas na Figura 26, foi considerado um *array* completo com 32 elementos, PSF posicionada no ponto $x = 0$ e $z = 35$, apodização retangular e a faixa dinâmica, calculada através da relação $[20.\log(1/M_{sig}^2),0]$, na qual M_{sig} é a quantidade de sinais utilizado, foi aproximada para $[-60\ 0]$ dB.

Adicionalmente, a apodização apresentada com o auxílio do diagrama de radiação do *array* tem o seu comportamento estudado utilizando a PSF, em que as janelas de Blackman (Figura 26 (c)) e Hanning (Figura 26 (d)) são aplicadas aos valores de w_{er} para gerar as imagens. Assim, o comportamento observado no diagrama de radiação, na qual ao apodizar o *array* os níveis dos lóbulos laterais diminuíram, porém a abertura angular do lóbulo principal aumentou, se traduziu em PSFs que a intensidade do sinal ao redor do defeito diminuiu, porém, a resolução lateral piorou.

Figura 26 – PSF criada a partir de 32 elementos com faixa dinâmica de $[-60\ 0]$ calculada utilizando o algoritmo TFM. (a) Imagem gerada utilizando somente os sinais RF. (b) Imagens considerando os sinais RF e em quadratura. PSF apodizada utilizando a janela de Blackman (c) e Hanning (d) considerando a envoltória do sinal.



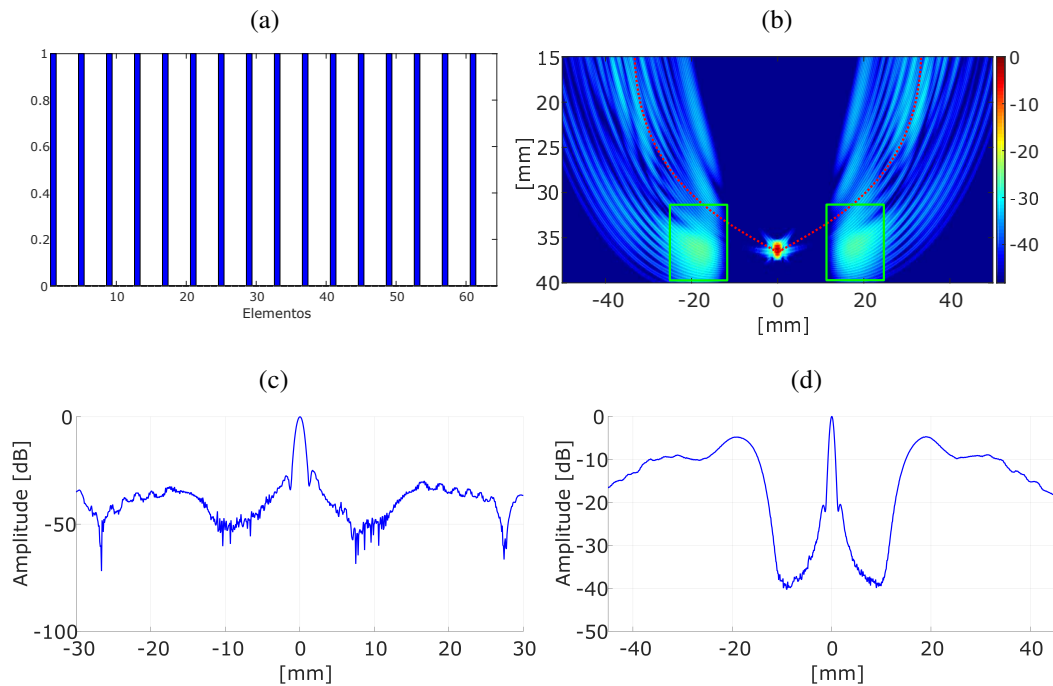
Fonte – Elaborada pelo autor

As interferências dos lóbulos de espaçamento ao utilizarmos *arrays* esparsos periódicos também podem ser analisadas ao gerarmos a sua PSF, na qual o *array* esparsa periódico com 16 elementos espaçados por 2λ (Figura 27 (a)) foi utilizado para gerar a PSF apresentada na Figura 27 (b). Ao analisar a imagem gerada, foi indicado uma região onde os artefatos causados pelos lóbulos de espaçamento estão concentrados com maior intensidade, ao modo que as imagens geradas por este *array* vão apresentar artefatos com alta intensidade perto dos defeito, o que pode causar a má interpretação das imagens.

Para auxiliar a visualização da resolução lateral e intensidade dos artefatos, uma linha que está destacada na Figura 27 (a) foi retirada da imagem e apresentada Figura 27 (c) e a

soma das linhas da imagem foi ilustrada na Figura 27 (d), na qual a linha possibilita visualizar a resolução lateral e uma parcela dos seus artefatos, e, a soma das linhas, a alta intensidade dos artefatos.

Figura 27 – PSF gerada pelo *array* esparso periódico. (a) Desenho do *array* esparso periódico com 16 elementos espaçados por (2λ) . (b) PSF gerada utilizando este elemento. (c) Corte da linha da PSF que foi destacada na imagem da PSF. (d) Soma das linhas da PSF.



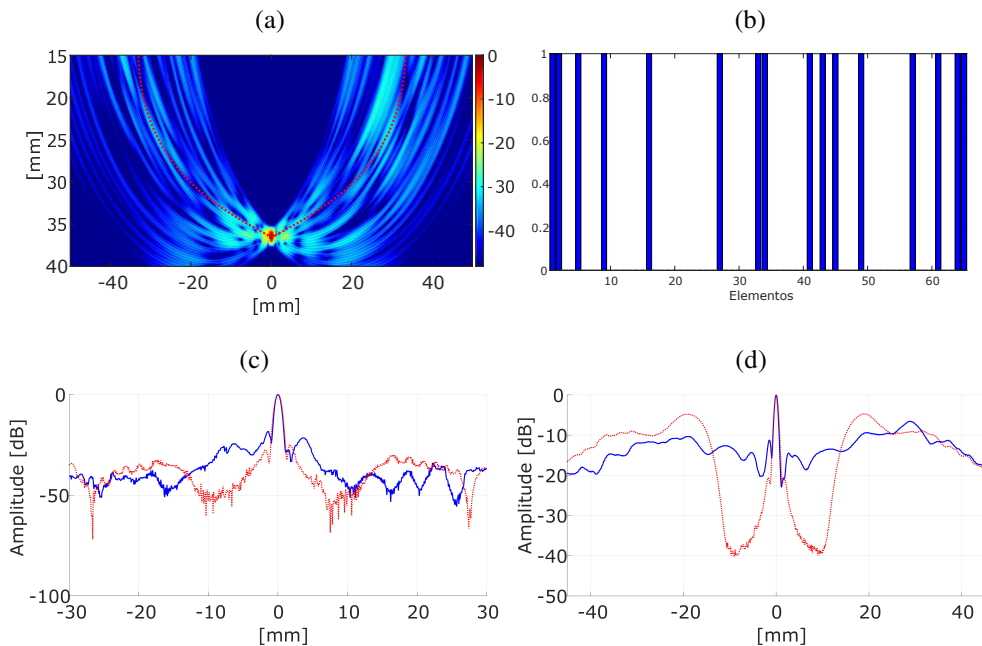
Fonte – Elaborada pelo autor

Os *arrays* esparsos não periódicos podem ser utilizados para evitar que esta região com alta intensidade exista, sendo empregado o *array* esparso não periódico apresentado na Figura 28 (a) para gerar a PSF ilustrada na Figura 28 (b). Ao compararmos as PSFs, pode-se observar que a PSF gerada pelo *array* esparso não periódico não apresenta uma região onde os artefatos estão concentrados com maior intensidade e sim artefatos com menor intensidade espalhados pela imagem.

O corte (Figura 28 (c)) e soma (Figura 28 (d)) das linhas da PSF também foram extraídas da imagem que, para facilitar a comparação com a PSF do *array* esparso periódico, foram sobrepostas. A linha azul contínua indica a PSF gerada pelo *array* esparso não periódico e a linha vermelha pontilhada a PSF gerada pelo *array* esparso periódico. Ao analisar a linha da PSF, pode-se observar que a resolução lateral foi similar nas duas PSF, cuja semelhança pode ser explicada pelo fato que ambos os *arrays* possuem mesma abertura. Quando analisado a soma das linhas da PSF, observa-se que a intensidade do artefato se manteve em -20 dB para o *array* esparso não periódico e, para o *array* esparso periódico, essa intensidade varia de -40 dB até -10 dB.

Assim sendo, as imagens geradas pelo *array* esparsos não periódico apresentam mais artefatos com menor intensidade espalhados pelas imagens, o que é considerado como vantajoso em relação ao *array* esparsos periódico pois as imagens geradas possuem menos chance de gerar artefatos com alta intensidade que podem ser interpretados como defeitos. Dessa forma, o propósito desse trabalho é encontrar configurações de *arrays* esparsos não periódicos que gerem imagens com boa resolução lateral e artefatos com baixa intensidade.

Figura 28 – PSF do *array* esparsos não periódico. (a) PSF do *array* esparsos não periódico representado em (b). (c) Corte da linha da PSF representada na imagem pela linha vermelha. (d) Somas das linhas da PSF.



Fonte – Elaborada pelo autor

3.4 COMENTÁRIOS

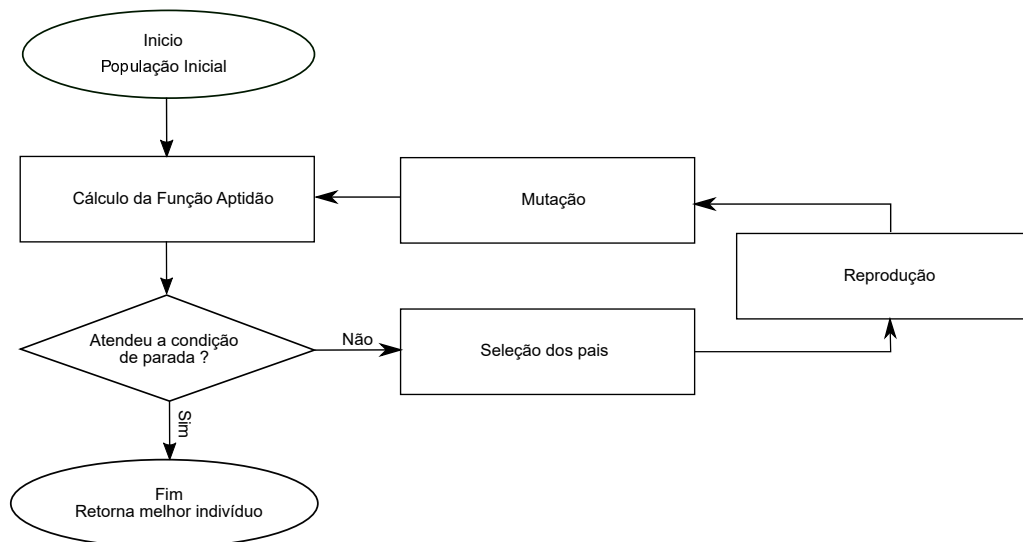
Neste capítulo foram abordadas as formas utilizadas para excitar os elementos do *array* para gerar as imagens ultrassônicas, de modo que o foco foi apresentar os algoritmos utilizados para processar a matriz de dados adquiridas pela técnica SA. Dentre os algoritmos apresentados, o algoritmo TFM requer o maior processamento de dados, porém, ao analisarmos os *coarrays* dos algoritmos, pôde-se observar que o algoritmo TFM possui o melhor diagrama de radiação dentre os diagramas dos algoritmos apresentados. Dessa forma, o algoritmo TFM foi então utilizado para criar as PSFs e apresentar a apodização, bem como, as consequências de utilizar os *arrays* esparsos para gerar as imagens. Por último, foi comentado que é necessário encontrar configurações de *arrays* esparsos não periódicos que gerassem imagens com boa resolução e baixa intensidade de artefatos, ao modo que neste trabalho será utilizado o algoritmo genético para encontrar estas configurações.

4 O ALGORITMO GENÉTICO E *DYNAMIC TIME WARPING* (DTW)

Na teoria da seleção natural apresentada por Darwin, o indivíduo de uma espécie com variações favoráveis ao meio possui uma maior chance de subsistência do que os menos adaptados, assim, as características que favorecem a sobrevivência dos antecessores começam a reincidir com maior frequência nos descendentes, enquanto aqueles indivíduos que não possuem essas características tendem a desaparecer. A posteriori, Holland (1975) se baseou na teoria evolutiva de Darwin para criar o algoritmo genético (AG), um algoritmo de busca utilizado para encontrar soluções em problemas que possuem uma grande quantidade de alternativas a serem analisadas.

O fluxograma apresentado na Figura 29 ilustra o princípio de funcionamento de um algoritmo genético, de modo que o estágio inicial do algoritmo é a definição das condições iniciais e criação de uma população inicial. Em seguida, os indivíduos da população atual são avaliados e verifica se alguma condição de parada foi atendida; caso seja, o algoritmo termina e o resultado da busca é o melhor indivíduo encontrado; caso contrário, a população atual passa por uma seleção de indivíduos para reprodução. Nessa etapa, a seleção considera que os indivíduos melhores avaliados possuem uma maior chance de reprodução, porém, aqueles que não possuem boas qualidades não são totalmente descartados.

Figura 29 – Fluxograma do Algoritmo Genético.



Fonte – Elaborada pelo autor

A reprodução se dá início após a seleção dos indivíduos da população atual. Dessa forma, as boas características presentes nos indivíduos pais tendem a reincidir nos indivíduos filhos, de modo que a nova população composta pelos indivíduos pais e filhos possuem melhores características que a população anterior. Em seguida, após o estágio da reprodução, o estágio de mutação nos indivíduos filhos pode acontecer, em que as características dos filhos são alteradas para diversificar a busca. Por último, a nova população agora denominada como população

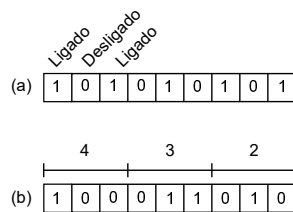
atual é novamente avaliada e, caso ocorra, uma nova seleção de indivíduos para reprodução será realizada. Assim, o AG realiza a sua busca através da criação de novas populações a partir da recombinação das antigas, de maneira que essas novas populações possuam melhores indivíduos. Ao decorrer do capítulo, as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 29 serão descritas com maior detalhe.

4.1 CONDIÇÕES INICIAIS

Ao início de qualquer busca utilizando um AG é necessário definir uma maneira de codificar o problema em que o algoritmo será aplicado, de forma que relacione o problema em que se deseja aplicar a busca com o indivíduo do AG. A Figura 30 ilustra duas formas de codificar um problema para busca, na qual a primeira é a codificação binária, em que cada posição do indivíduo indica o estado de ligado ou desligado (Figura 30 (a)) e a segunda é a codificação decimal, em que uma quantidade de bits representa um valor decimal (Figura 30 (b)).

Neste trabalho, o problema de busca por configurações de *arrays* esparsos não periódicos foi representado através da codificação binária (Figura 30 (a)), na qual considera que os elementos do *array* correspondem as posições do vetor e que a distância que os separa é $\lambda/2$. Dessa forma, o valor 1 indica o uso do elemento naquela posição correspondente no *array* e o 0 a sua inatividade. Por exemplo, pode-se utilizar o indivíduo ilustrado na Figura 30 (a) para codificar *array* esparsos periódico com 5 elementos com *pitch* igual a λ .

Figura 30 – Codificação dos indivíduos. (a) Codificação binária. (b) Codificação decimal



Fonte – Elaborada pelo autor

Após definir a codificação do problema, é necessário estabelecer uma função aptidão (*FA*) que avalie os indivíduos da população para que o AG consiga classificar os indivíduos entre melhores e piores para que assim ocorra a seleção destes.

Considerando um problema na qual deseja-se realizar uma busca para encontrar os valores de x_{ga} , y_{ga} e z_{ga} para que (21) possua o menor valor:

$$f(x_{ga}, y_{ga}, z_{ga}) = x_{ga} + y_{ga}^3 - 5z_{ga}^2, \quad (21)$$

o primeiro passo para aplicar o AG neste problema consiste em definir como será feita a codificação dos indivíduos, ao modo que x_{ga} , y_{ga} e z_{ga} são valores decimais. A codificação deste

problema pode ser feita utilizando o modo apresentado na Figura 30 (b), de modo que x_{ga} corresponde a conversão binária decimal dos 3 bits mais significativos do vetor, y_{ga} a conversão dos 3 bits intermediários e z_{ga} a conversão dos 3 bits menos significativos do vetor.

Em seguida, define-se que a função aptidão para este problema é a própria equação (21), deste modo, considerando que o primeiro indivíduo da população (Figura 30 (b)) possui os valores de $x_{ga} = 4$, $y_{ga} = 3$ e $z_{ga} = 2$, o resultado da função aptidão é 11. Em complemento, considerando outro indivíduo com os valores de $x_{ga} = 1$, $y_{ga} = 3$ e $z_{ga} = 1$ o resultado obtido ao aplicá-lo na função aptidão é 23. Logo, o indivíduo apresentado na Figura 30 (b) possui o menor valor e por isso pode ser considerado melhor que o segundo indivíduo.

Neste exemplo, a função aptidão foi definida como a própria equação (21) pois existia uma relação entre as variáveis x_{ga} , y_{ga} e z_{ga} , entretanto, em diversos problemas de busca é necessário que o programador crie uma forma de avaliar os indivíduos. Para o problema de busca por um *array* esparsos, diversos autores propõem diferentes funções aptidão para avaliar os indivíduos (CHEN; HE; HAN, 2006; CHEN et al., 2007; HAUPT, 1994; YAN; LU, 1997), de maneira que considera-se que as principais contribuições deste trabalho são duas novas funções aptidão, a primeira baseada no diagrama de radiação do *array* e a segunda baseada na sua PSF.

Após definir a função aptidão, é necessário criar a população inicial em que será realizada a primeira iteração da busca, ao modo que para realizar isso leva-se em consideração a quantidade de indivíduos que a população vai possuir e como estes indivíduos serão criados, de forma aleatória ou estudada. Para forma aleatória não existe muito o que ser realizado; cria-se os indivíduos preenchendo de forma aleatória as posições do seu vetor. Para forma estudada, os indivíduos são criados a partir de uma análise prévia do problema, como por exemplo o problema para encontrar o mínimo da equação (21), em que se existisse um conhecimento prévio da região de valores na qual o mínimo está localizado, poderia ser criada uma população inicial com indivíduos com estes valores.

Além de definir a população inicial, é fundamental definir as condições de paradas da busca, na qual são critérios definidos pelo programador para que ocorra o término da busca. As estratégias mais comuns são: verificar se o melhor indivíduo foi encontrado, se o tempo de busca foi atingido ou se nenhum melhor indivíduo foi encontrado após determinadas iterações. Adicionalmente, é necessário definir outras características, tais como: seleção, reprodução e mutação, entretanto, estes tópicos serão apresentados separadamente devido a sua importância no AG.

4.2 SELEÇÃO, REPRODUÇÃO E MUTAÇÃO

A seleção dos indivíduos para reprodução é realizada após a função aptidão ser utilizada para classificar os melhores e piores indivíduos da população, ao modo que esta seleção não pode ser feita considerando somente os melhores indivíduos da população pois resultaria

na rápida convergência em um ótimo local e, em consequência, o algoritmo deixaria de explorar outras regiões de busca (CARTER, 2003). Desse modo, é necessário definir um modo de seleção de indivíduos na qual todos possuam chances de reproduzirem, porém, sempre respeitando o conceito que os melhores indivíduos possuem uma maior chance de reprodução.

O método do torneio e roleta são exemplos de metodologias utilizadas para seleção dos indivíduos para reprodução, de forma que para o método do torneio, o reprodutor é determinado a partir da disputa entre dois indivíduos selecionados aleatoriamente, na qual ganha aquele que possuir o melhor resultado da função aptidão (*FA*). A Figura 31 ilustra uma população com os seus respectivos valores de aptidão (*FA*). Neste caso, foram selecionados para disputa o primeiro e terceiro indivíduo, em que o terceiro foi escolhido para reprodução pois possui entre os dois o menor valor da função aptidão. Em seguida, o próximo reprodutor é selecionado através da disputa entre o segundo e o primeiro indivíduo, na qual foi selecionado o segundo indivíduo.

Figura 31 – Seleção através do torneio, sendo representado a população com 4 indivíduos, o torneio entre eles e os ganhadores que foram selecionados para reprodução .

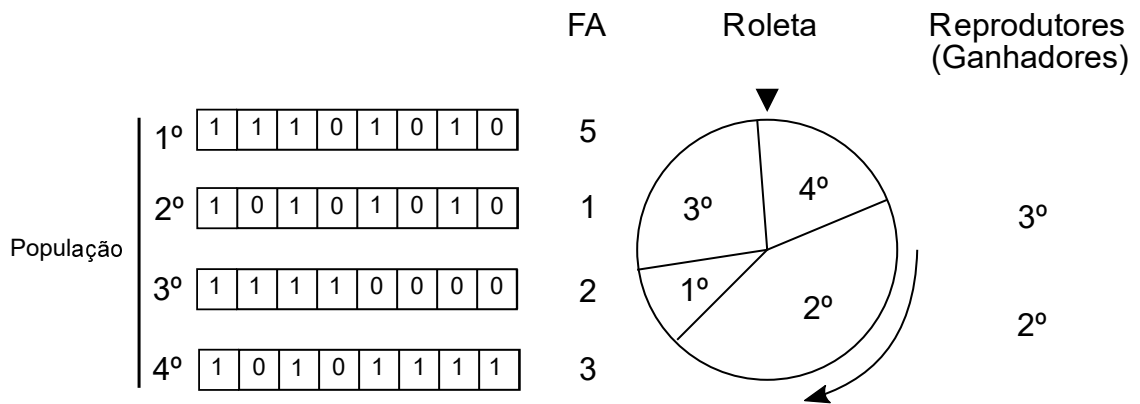
	FA	Torneio	Reprodutores (Ganhadores)
1º	5		
2º	1	1º x 3º	3º
3º	2	2º x 1º	2º
4º	3		

Fonte – Elaborada pelo autor

Para o método da roleta, a seleção é feita simulando uma roleta onde os indivíduos com melhores resultados possuem uma maior porção na roleta. Em seguida, escolhe uma posição aleatória dessa roleta e o indivíduo selecionado vai para reprodução (LIPOWSKI; LIPOWSKA, 2012). Logo, os indivíduos com melhores resultados da função aptidão possuem maior probabilidade de reprodução pois ocupam uma maior área na roleta, porém, os piores indivíduos ainda possuem a chance de reproduzir. A Figura 32 ilustra o funcionamento da seleção por roleta, no caso, o segundo indivíduo apresenta a melhor função aptidão, portanto, possui uma maior parcela na roleta, assim, após a seleção dos indivíduos a reprodução entre eles é realizada.

Na etapa da reprodução, os indivíduos selecionados são recombinados para originar novos indivíduos e juntos formarem uma nova população, de modo que esta etapa é realizada dividindo o indivíduo em um ou mais segmentos e os combinando com o outro indivíduo reprodutor. Um exemplo da reprodução é apresentado na Figura 33, na qual os indivíduos selecionados para reprodução foram divididos ao meio e recombinados para gerar dois novos indivíduos.

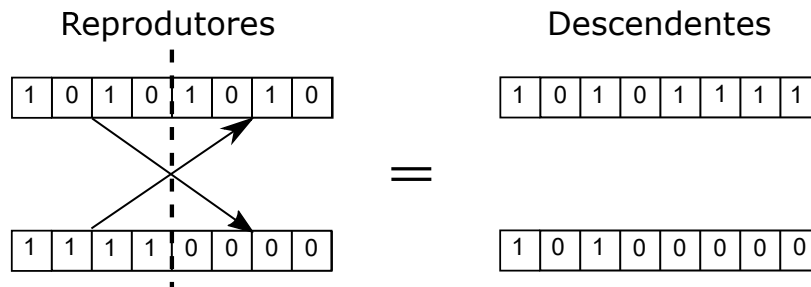
Figura 32 – Seleção por roleta, sendo representado a população com 4 indivíduos e os que possuem o menor valor da função aptidão tem o direito da maior parcela da roleta.



Fonte – Elaborada pelo autor

Logo, a união dos indivíduos selecionados para reprodução com os indivíduos originados dela forma uma nova população que passará pelo operador de mutação.

Figura 33 – Reprodução dos indivíduos que geram dois novos indivíduos, de modo que a união dos indivíduos reprodutores com os seus descendentes originam uma nova população.

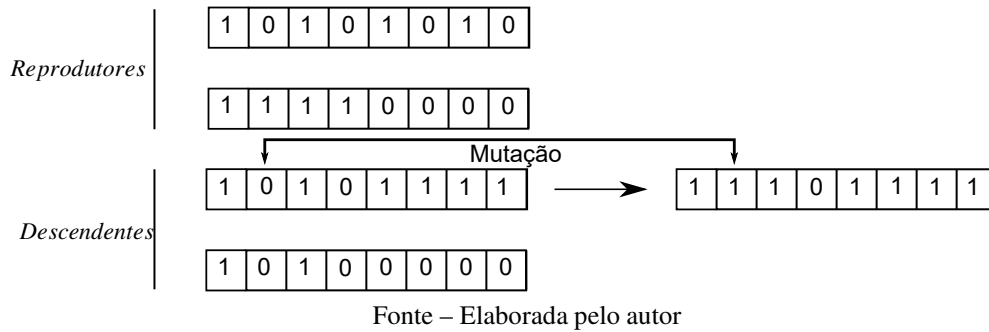


Fonte – Elaborada pelo autor

Na etapa da mutação, os indivíduos gerados pelos reprodutores possuem uma probabilidade que um dos seus bits seja alterado, dessa maneira, a troca aleatória de um bit no novo indivíduo possibilita que a busca se diversifique e não fique presa em um ótimo local (CARTER, 2003). A Figura 34 ilustra o funcionamento da mutação na nova população gerada na Figura 33, em que é possível observar que um bit dos indivíduos descendentes foi alterado do estado 0 para 1, dessa forma, o operador mutação ajuda a diversificar a busca realizada pelo AG.

O algoritmo genético tem como princípio realizar a busca por um bom resultado através da geração de novas populações, na qual a função aptidão é utilizada para avaliar os indivíduos da busca. Neste trabalho, foram criadas duas funções aptidão para busca por *arrays* esparsos, a primeira baseada em amplitudes e distâncias extraídas do diagrama de radiação e a segunda

Figura 34 – Mutação dos indivíduos descendentes.



baseada na comparação entre PSFs, na qual esta comparação é feita utilizando a função (DTW) *Dynamic Time Warping*.

4.3 DYNAMIC TIME WARPING (DTW)

Inicialmente projetada para comparar as semelhanças entre dois sinais de áudio, na qual os sons gravados poderiam possuir amplitudes similares porém com pausas e atrasos, o algoritmo *Dynamic Time Warping* (DTW) passou a ser aplicados em outros problemas, como por exemplo a identificação de ataques epiléticos, comparando os sinais gerados pela Magnetoencefalografia (KHALID et al., 2017).

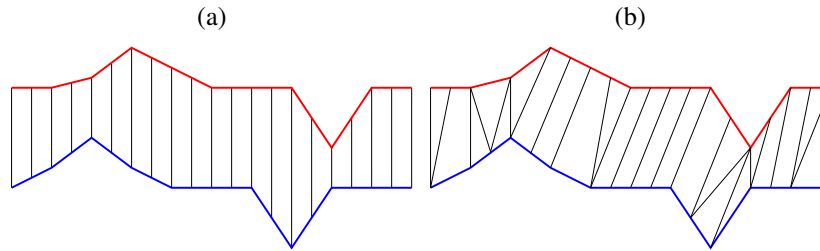
O seu funcionamento, baseado na análise de todas as amplitudes dos dois sinais para criar uma matriz de custos, é considerada vantajosa em relação ao uso da distância euclidiana pois leva em consideração todas as amplitudes dos sinais (RABINER; ROSENBERG; LEVINSON, 1978). Assim exemplificado na Figura 35 (a), em que a distância Euclidiana é utilizada para calcular a similitude entre estes dois sinais, pode-se observar que a correlação entre os vetores é baixa mesmo eles estando somente atrasados entre si. Para o algoritmo DTW, como pode ser visto na Figura 35 (b), a similitude dos sinais é calculada analisando as suas diferentes amplitudes, ao modo que as amplitudes dos sinais foram relacionadas (MÜLLER, 2007). Ao decorrer do capítulo, a função DTW será apresentada detalhadamente.

Considerando duas sequências $X_{n_s} := (x_1, x_2, \dots, x_{N_s})$ e $Y_{m_s} := (y_1, y_2, \dots, y_{M_s})$, a sua comparação é feita criando uma matriz de custos $C(n_s, m_s)$ de tamanho $N_s \times M_s$, na qual a soma dos menores custos seja a similitude dos sinais. Para realizar este cálculo, os elementos da matriz custo $C(n_s, m_s)$ são relacionados ao custo atual $d(n_s, m_s)$ com os custos passados da matriz $(C(n_s, m_s - 1), C(n_s - 1, m_s)$ e $C(n_s - 1, m_s - 1))$, de forma que o fator $d(n, m)$ é calculado utilizando a equação (22) (MOREL et al., 2018):

$$d(n_s, m_s) = (x_{n_s} - y_{m_s})^2, \quad (22)$$

Tendo em vista que os valores de $d(n_s, m_s)$ relacionam somente as amostras atuais,

Figura 35 – Demonstração das diferenças entre as duas estratégias para comparar os sinais. (a) Comparação dos sinais utilizando a distância euclidiana. (b) Comparação dos sinais utilizando o algoritmo DTW.



Fonte – Elaborada pelo autor

para relacionar as outras amplitudes passadas dos sinais é necessário incluir os custos passados $C(n_s, m_s - 1)$, $C(n_s - 1, m_s)$ e $C(n_s - 1, m_s - 1)$ para calcular $C(n_s, m_s)$, ao modo que caso estes elementos anteriores não existam, o que é o caso das primeiras iterações, o valor assumido para os custos é zero. Desse modo, o cálculo da matriz $C(n, m)$ pode ser feito utilizando a equação (23):

$$C(n_s, m_s) = d(n_s, m_s) + \min[C(n_s, m_s - 1) C(n_s - 1, m_s) C(n_s - 1, m_s - 1)], \quad (23)$$

para $n_s = 1, 2 \dots N_s$ e $m_s = 1, 2 \dots M_s$,

Considerando dois vetores definidos por $X = [X_1 X_2 X_3 X_4 X_5] = [2 1 0 2 4]$ e $Y = [Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 Y_5] = [0 2 4 3 2 1]$, a primeira posição da matriz de custos ($C(1, 1)$) é encontrada calculando o valor de $d(1, 1) = (X_1 - Y_1)^2 = (2 - 0)^2 = 4$ e analisando os valores passados para matriz de custo. Como neste primeiro caso não existem valores de $C(n_s, m_s)$ anteriores a este, o resultado do custo $C(1, 1)$ é o próprio valor de $d(1, 1)$. Seguindo para o cálculo de $C(1, 2)$, o valor de $d(1, 2)$ é determinado como $(X_1 - Y_2)^2 = (2 - 2)^2 = 0$. Como só existe um valor anterior a $C(1, 2)$, que neste caso é $C(n_s, m_s - 1) = C(1, 1) = 4$, o custo de $C(1, 2)$ é igual a $d(1, 2) + C(1, 1) = 0 + 4 = 4$. Deste modo, o cálculo da matriz de custos $C(n_s, m_s)$ é realizando recursivamente através da análise do valor mínimo dos custos passados somado a diferença dos elementos X e Y atuais elevado ao quadrado. Assim, ao realizar o cálculo para todos os elementos da matriz de custo (Figura 36), o resultado do algoritmo DTW é a somatória do caminho dos menores custos entre $C(N_s, M_s)$ e $C(1, 1)$, que neste caso é 67.

Neste trabalho, a função DTW é utilizada para compor a segunda função aptidão utilizada na busca por configurações de *arrays* esparsos, de modo que foi utilizada para comparar a PSF gerada pelo *array* esparsos (indivíduo) com a PSF gerada pelo *array* completo, o qual é considerado o melhor *array* disponível para gerar a PSF. Sendo assim, foi idealizada uma busca por um *array* esparsos que consiga gerar uma PSF similar a PSF gerada pelo *array* completo.

Figura 36 – Matriz custo $C(n_s, m_s)$ criada a partir dos dois vetores $X = [2 \ 1 \ 0 \ 2 \ 4]$ e $Y = [0 \ 2 \ 4 \ 3 \ 2 \ 1]$. O resultado do DTW é a somatória dos menores custos.

X_5	4	25	9	5	6	10	19	→ $C(5,6) = C(Ns,Ms)$
X_4	2	9	5	9	10	10	11	
X_3	0	5	9	21	21	16	10	
X_2	1	5	5	13	12	10	9	
X_1	2	4	4	8	9	9	10	
$C(1,1)$	0	2	4	3	2	2	1	
	Y_1	Y_2	Y_2	Y_4	Y_5	Y_6		

Fonte – Elaborada pelo autor

4.4 COMENTÁRIOS

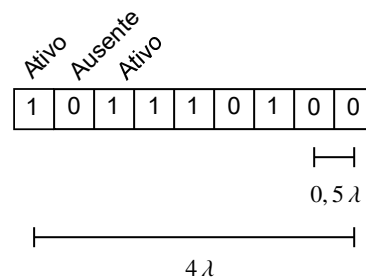
O AG realiza a sua busca pelo melhor resultado através da criação de novas populações, de modo que cada população possui uma quantidade de indivíduos que são avaliados através de uma função de aptidão definida pelo programador. Para o problema de busca estudado neste trabalho, duas funções de aptidão serão criadas e apresentadas no capítulo 5, em que a primeira função é baseada em valores extraídos do diagrama de radiação e a segunda é baseada na comparação entre PSFs utilizando a função DTW.

5 TÉCNICAS PARA CONSTRUÇÃO DO ARRAY ESPARSO

O algoritmo genético (AG) foi utilizado para realizar a busca por configurações de *arrays* esparsos não periódicos que gerassem imagens ultrassônicas com boa resolução lateral e intensidade dos artefatos reduzidas, ao modo que as maiores contribuições neste trabalho são duas novas funções aptidão, a primeira baseada no diagrama de radiação do *array* excitado harmonicamente e a segunda baseada na PSF.

Ilustra-se na Figura 37 como a codificação binária foi utilizada para o problema de busca estudado neste trabalho. Para cada posição do vetor um transdutor é codificado, na qual 0 ou 1 indicam a ausência ou presença do transdutor naquela posição, bem como foi considerado que entre as posições do vetor existe um *pitch* de $\lambda/2$. Dessa forma, pode-se observar que o indivíduo com 9 posições apresentado na Figura 37 corresponde a um *array* esparso com 5 elementos e que, no máximo o, *array* poderia ter 9 elementos ativos (abertura de 4λ).

Figura 37 – Codificação do problema de busca estudado neste trabalho, na qual as posições do vetor indicam as posições onde os elementos podem ser dispostos.



Fonte – Elaborada pelo autor

Além da codificação do problema, outros parâmetros da busca foram definidos a partir de testes preliminares, de modo que a seleção dos indivíduos foi feita utilizando o método do torneio. A população inicial de tamanho 40 foi gerada de forma aleatória, a probabilidade de mutação foi definida em 5 % e a recombinação foi realizada utilizando o método de recombinação vetorial (*scattered*), em que são selecionados mais de um ponto para recombinação. Ao decorrer do capítulo, simulações serão realizadas e as técnicas serão detalhadas, bem como o seu princípio de funcionamento.

5.1 PRIMEIRA FUNÇÃO APTIDÃO – DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

A função aptidão para o AG é utilizada como forma de mensurar a qualidade dos indivíduos para que se possa realizar a seleção, desta maneira, para utilizar o diagrama de radiação como função aptidão é necessário quantificar as informações contida neste. Para esse processo, foi idealizado uma função aptidão (*FA*) utilizando três valores extraídos do diagrama de radiação do *array* linear (equação (11)): a abertura angular do lóbulo principal (*AA*), média dos

picos dos lóbulos laterais (ME) e nível máximo do lóbulo lateral (ML). Ao modo que se baseou no trabalho proposto por Hu et al. (2017), em que os autores utilizaram os valores de ML e AA para construir a função aptidão ilustrada em (24):

$$FA = k_1 ML + k_2 AA, \quad (24)$$

Entretanto, testes iniciais mostraram que utilizar somente o valor máximo do lóbulo lateral (ML) e abertura angular do lóbulo principal (AA) não avaliavam o diagrama de forma correta, de forma que os *arrays* esparsos encontrados possuíam nos seus lóbulos laterais vários picos. Assim, na função aptidão desenvolvida neste trabalho foi incluído a média dos picos dos lóbulos laterais (ME).

Além dessa diferença entre funções aptidão apresentada por Hu et al. (2017) e a apresentada neste trabalho (equação 25), detectou uma inconsistência nas unidades de medida dos fatores da soma, na qual (AA) é medida em ângulo e (ME) e (ML) são amplitudes. A alternativa encontrada para contornar esse problema foi definir, no início da busca, a abertura máxima que o *array* esparsos poderia assumir e extrair os valores de: média dos picos dos lóbulos laterais (ME_{max}), nível máximo do lóbulo lateral (ML_{max}) e abertura angular do lóbulo principal (AA_{max}) para um *array* completo com abertura definida no início da busca, cujos elementos estão espaçados por $\lambda/2$. Esses valores extraídos são então utilizados para criar fatores adimensionais através das divisões entre os parâmetros, conforme pode ser observado em (25). Dessa forma, a soma entre fatores com diferentes unidades de medida pôde ser realizada.

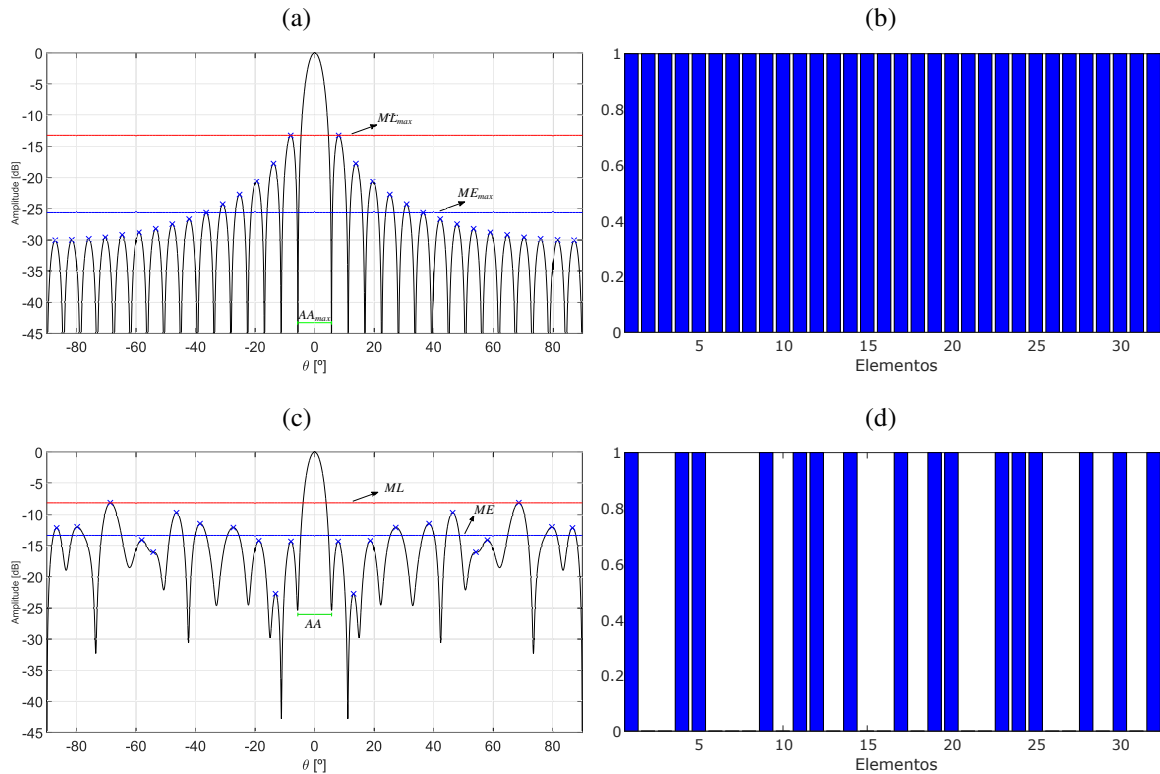
Além da criação de parâmetros adimensionais utilizando os valores extraídos do *array* completo com a abertura máxima definida no início da busca (ME_{max}, ML_{max} e AA_{max}), a ideia de ponderar os fatores da soma utilizando os pesos k_1 , k_2 e k_3 foi mantida na função aptidão utilizada neste trabalho (25), de modo que, pode-se atribuir pesos maiores para k_1 e k_2 , para que o foco da busca do AG seja mais em minimizar os lóbulos laterais, ou, pode-se atribuir peso maior para k_3 , para que o foco da busca seja um *array* esparsos com menor lóbulo lateral:

$$FA = k_1 \frac{ME_{max}}{ME} + k_2 \frac{ML_{max}}{ML} + k_3 \frac{AA}{AA_{max}} + Pen, \quad (25)$$

A Figura 38 apresenta as informações extraídas do diagrama de radiação e que são utilizadas para compor a função aptidão. Na Figura 38 (a), tem-se o diagrama de radiação do *array* completo com 32 elementos espaçados por $\lambda/2$ (Figura 38 (b)), na qual foram extraídos as informações de ME_{max} , ML_{max} e AA_{max} utilizadas para criar os fatores adimensionais. Na Figura 38 (c), tem-se o diagrama de radiação do *array* esparsos (Figura 38 (d)) cujo os valores de ME , ML e AA são extraídos.

Por último, foi adicionado à função aptidão (30) um fator denominado de Pen que corresponde a penalização da função aptidão, caso a quantidade de elementos do indivíduo (N_{trans})

Figura 38 – Detalhes da primeira função aptidão, onde é possível observar os valores extraídos dos diagrama de radiação. (a) Diagrama de radiação do *array* completo com 32 elementos espaçados por $\lambda/2$ onde os valores de AA_{max} , ML_{max} e ME_{max} são extraídos para criar os fatores adimensionais. (b) Representação do *array* completo de 32 elementos. (c) Diagrama de radiação do *array* esparso não periódico com 16 elementos, onde os valores de AA , ML e ME são extraídos para compor a função aptidão utilizada no algoritmo genético. (d) Representação do *array* esparso não periódico com 16 elementos.



Fonte – Elaborada pelo autor

analisado exceda a quantidade de elementos que se deseja que o *array* possua no final da busca ($N_{desejado}$). Assim, a penalização é feita adicionando à função aptidão o valor excedente de elementos do indivíduo (*array* esparso) multiplicado por 10, ao modo que este valor foi escolhido baseado em testes em que se constatou ser adequado para penalizar a função aptidão. Dessa forma, o algoritmo genético que possui a intenção de encontrar um *array* esparso com a menor função aptidão tende a interpretar o indivíduo que foi penalizado como um mal reprodutor que possui poucas chances de reprodução e, ao decorrer das iterações, deixam de existir. Logo, ao final da busca, o *array* esparso encontrado pelo AG possuíra uma quantidade de elementos definida ao início da busca:

$$Pen = \begin{cases} 10(N_{trans} - N_{desejado}), & \text{se } N_{trans} > N_{desejado}; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (26)$$

Em síntese, a primeira função aptidão apresentada nesse trabalho utiliza as informações da abertura angular do lóbulo principal (AA), nível máximo dos lóbulos laterais (ML) e média dos picos dos lóbulos laterais (ME) extraídas do diagrama de radiação, ao modo que, para existir uma consistência na soma desses três parâmetros, ao início de cada busca, deve-se definir a abertura máxima que o *array* pode assumir e extrair as informações de: abertura angular do lóbulo principal (AA_{max}), nível máximo do lóbulo lateral (ML_{max}) e média dos picos dos lóbulos laterais (ME_{max}) para o *array* completo cuja abertura foi definida. Além de criar fatores adimensionais utilizando os valores extraídos do *array* completo, pesos k_1 , k_2 e k_3 foram adicionados para possibilitar a escolha das características das imagens que o *array* gera. Por último, foi adicionado um fator Pen que tem como objetivo penalizar a função aptidão caso a quantidade de elementos no indivíduo ultrapasse a quantidade definida ao início da busca.

5.2 SEGUNDA TÉCNICA - COMPARAÇÃO ENTRE PSFS

Além do uso do diagrama de radiação do *array* como função aptidão, outra técnica baseada no uso de PSFs (*Point Spread Function*), foi desenvolvida neste trabalho com o fim de avaliar os indivíduos da população, ao modo que o uso da PSF para compor a função aptidão foi adotada, pois além de conseguir demonstrar a intensidade dos artefatos presentes na imagem, a PSF possibilita visualizar a resolução lateral das imagens geradas pelo *array*. Desta forma, foi considerado que a PSF consegue demonstrar com melhor precisão o comportamento do *array* do que o diagrama de radiação utilizado neste trabalho.

A segunda função aptidão foi criada baseada na comparação entre duas PSFs: a primeira, a PSF gerada por um *array* completo e, a segunda, a PSF gerada utilizando os indivíduos da população (*arrays* esparsos). Dessa maneira, pressupôs que a comparação entre a PSF gerada por um *array* completo, em que se sabe ser o melhor disponível, com a PSF gerada pelos indivíduos, resultaria em um bom critério de avaliação para que o AG realizasse a busca por um *array* esparsos que gerasse uma PSF com características similares a PSF com mais elementos.

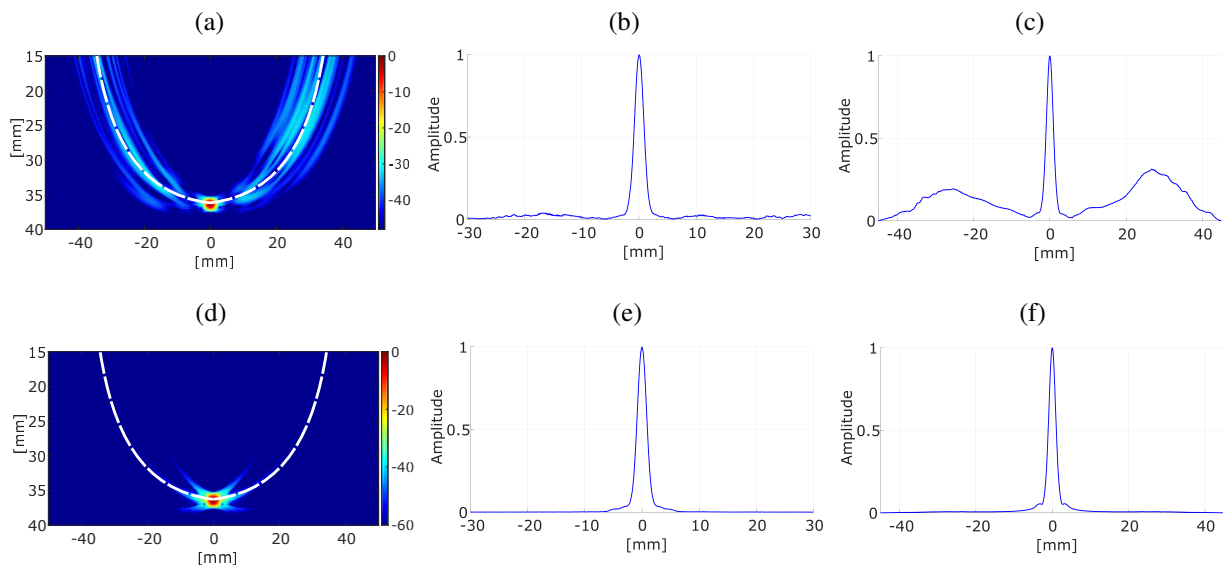
A partir desta hipótese, o maior desafio encontrado neste trabalho foi conseguir quantificar em um único valor a similitude entre as duas PSF, de modo que, dentre os testes realizados, considerou-se que a melhor estratégia era extrair da PSF dois vetores de amplitudes: o primeiro, uma linha circular da imagem, e o segundo, a soma das linhas horizontais da imagem. A Figura 39 ilustra as informações extraídas da PSF, em que foi utilizado o *array* esparsos apresentado na Figura 38 (d) para gerar a imagem da PSF (Figura 39 (a)).

Ilustrado na PSF da Figura 39 (a), pode-se observar uma linha circular branca, que atravessa o ponto refletor defeito, onde foram retiradas as amplitudes para formar o primeiro vetor de amplitude, conforme pode ser observado na Figura 39 (b). Para extrair esta linha da imagem, os *pixels* retirados da PSF foram definidos manualmente. Para o segundo vetor, utilizado para comparar as PSFs, as amplitudes foram retiradas a partir da soma das retas horizontais dos

pixels da imagem, que para o caso da PSF criada utilizando o *array* esparso, é apresentada na Figura 39 (c).

De modo complementar, a partir da PSF gerada pelo *array* completo com 32 elementos (Figura 39 (d)) foram extraídos outros dois vetores, na qual a Figura 39 (e) ilustra a linha extraída da PSF e a Figura 39 (f) apresenta a soma das linhas (retas) da imagem. Assim, de uma PSF foram extraídos dois vetores que precisam ser comparados com os respectivos vetores da outra PSF, ao modo que o algoritmo DTW foi escolhido para essa tarefa pois este compara dois sinais e retorna um único valor indicando a similitude.

Figura 39 – Ilustração das informações extraídas das PSFs para compor a função aptidão. (a) PSF do *array* esparso apresentado na Figura 38 (d) onde o corte extraído da imagem é demonstrado com o auxílio da linha tracejada branca. (b) Linha da imagem extraída da PSF do *array* esparso. (c) Soma das retas de *pixels* da PSF do *array* esparso. (d) PSF do *array* completo com 32 elementos onde o corte extraído da imagem é demonstrado com o auxílio da linha tracejada branca. (e) Linha circular da imagem extraída da PSF do *array* completo. (f) Soma das retas horizontais dos *pixels* da PSF do *array* completo.



Fonte – Elaborada pelo autor

Logo, a função aptidão (FA) apresentada em (27) utiliza os resultados da função DTW para avaliar os indivíduos da população:

$$FA = 3sim_1 + sim_2 + Pen, \quad (27)$$

na qual, Pen corresponde a penalização apresentada na equação (26), sim_1 o resultado da função DTW comparando uma linha da PSF gerada utilizando o *array* completo com uma linha da PSF gerada a partir do *array* esparso e sim_2 o resultado da função DTW na qual as linhas das PSFs foram somadas.

Em (28), ilustra-se como sim_1 e sim_2 foram calculados:

$$\begin{aligned}
 sim_1 &= DTW(linha_{array\ esparsa}, linha_{array\ completo}), \\
 linha &= PSF(xl, zl), \\
 sim_2 &= DTW(soma_{array\ esparsa}, soma_{array\ completo}), \\
 soma(k) &= \sum_{n_{soma}=1}^{N_{soma}} PSF(n_{soma}, k),
 \end{aligned} \tag{28}$$

para a linha de amplitudes extraída da PSF ($linha$), pode-se observar que na equação apresentada em (28), os valores extraídos da PSF nas posições xl e zl são definidos manualmente. Para a soma das linhas da PSF ($soma$), a equação que rege esta operação possui uma somatória com N_{soma} operações, correspondente a quantidade de linhas (retas horizontais) que a PSF possui. Além disso, é necessário realizar esta operação para cada coluna da minha imagem, sendo as colunas da PSF representada pelo índice k .

Observa-se em (27), a existência de valores que multiplicam cada fator da função aptidão, definido como 3 para sim_1 e 1 para sim_2 . Deve-se ressaltar que estes valores foram definidos a partir de testes preliminares. Quando foi utilizado somente a soma das linhas da PSF, notou-se que o AG se concentrava em encontrar um *array* cujas imagens geradas tivessem as intensidades dos artefatos reduzidas, ao ponto que os *arrays* encontrados eram muitas das vezes *arrays* completos com menor abertura. Assim, perdia-se em resolução lateral, porém, ganhava-se em redução nas intensidades dos artefatos.

Quando foi utilizado somente os valores da linha extraída da imagem, notou-se que o AG realizava a busca por configurações de *arrays* esparsos que gerassem imagens com boa resolução lateral, mas com altas intensidades nos artefatos. Deste modo, optou-se por utilizar as duas informações para compor a função aptidão, a linha da imagem (sim_1), para contribuir na busca por um *array* esparsos com boa resolução lateral, e, a soma das linhas (sim_2), para avaliar a intensidade dos artefatos.

Contudo, a medida que testes foram realizados, notou-se que o AG encontravam *arrays* com baixas intensidades dos artefatos, mas com resolução lateral limitada. Dessa forma, após analisar os valores calculados da função DTW, dado como exemplo a Figura 39 em que sim_1 é 7,18 e a sim_2 é 12,79, notou-se a necessidade de ponderar os valores de sim_1 e sim_2 para que o AG realizasse a busca por um *array* esparsos cujas imagens geradas tivessem artefatos com baixa intensidade e boa resolução lateral. Dessa forma, diversos pesos foram atribuídos aos fatores sim_1 e sim_2 , sendo determinados os pesos 3 e 1 para sim_1 e sim_2 .

Neste trabalho, as PSFs geradas para serem comparadas foram criadas a partir de um sinal de ultrassom simulado com 4 ciclos de senoide com envoltória gaussiana, frequência de 5 MHz e velocidade de propagação de 6320 m/s. Além desses parâmetros, o ponto refletor da PSF foi posicionado em $x = 0\text{ mm}$ e $z = 35\text{ mm}$.

Após definir as características do ultrassom simulado e a posição do ponto refletor, foi necessário definir o tamanho da imagem gerada. Inicialmente, as imagens geradas da PSF eram pequenas e concentradas na posição do defeito. Entretanto, após alguns testes, notou-se a existência de artefatos longe do ponto refletor e que estes eram ignorados na busca. Deste modo, para considerar a maior quantidade de artefatos presentes na PSF, definiu-se que o tamanho da PSF cujo ponto refletor está localizado em $x = 0 \text{ mm}$ e $z = 35 \text{ mm}$ seria de x entre -50 mm e 50 mm , e, z entre 15 mm e 40 mm .

A segunda função aptidão apresentada neste trabalho tem como princípio comparar duas PSFs com o propósito de avaliar a qualidade do *array* esparso em criar uma PSF similar à PSF gerada a partir do *array* completo, ao modo que essa estratégia foi adotada pois a PSF ilustra a intensidade dos artefatos e resolução lateral. A partir deste princípio, foram extraídas da PSF uma linha e soma das linhas para serem comparadas com a respectiva linha e a soma das linhas da outra PSF gerada pelo *array* completo. A função DTW então foi utilizada para realizar esta comparação e a função aptidão foi criada a partir da soma dos resultados das comparações.

5.3 COMENTÁRIOS

Duas novas funções aptidão são propostas neste trabalho. A primeira baseada no diagrama de radiação do *array*, em que se minimiza a abertura angular do lóbulo principal, média dos lóbulos laterais e nível máximo do lóbulo lateral. Além disso, é necessário definir a abertura máxima que o *array* esparso pode assumir e extrair estas três informações do diagrama de radiação para o *array* completo com esta abertura, para criar os fatores adimensionais e definir a quantidade de elementos que o *array* esparso deverá ter. Para a segunda técnica apresentada neste trabalho, a comparação entre PSFs é feita para avaliar a eficiência que o *array* esparso consegue reproduzir a PSF do *array* completo. Ao início da busca utilizando esta técnica, é necessário definir abertura do *array* completo, gerar a sua PSF e definir a quantidade máxima de elementos que o *array* esparso deverá possuir.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O algoritmo genético (AG) foi utilizado para realizar a busca por *arrays* esparsos, na qual o foco do trabalho é apresentar duas funções aptidões. A primeira baseada no diagrama de radiação e a segunda baseada na PSF do *array*. Inicialmente, cada função aptidão foi utilizada separadamente para encontrar *arrays* esparsos com 43 elementos em uma abertura máxima de 128 elementos com *pitch* igual a $\lambda/2$ ($63,5 \lambda$), de forma que este valor foi definido para se igualar a quantidade de elementos em um *array* esperso periódico com os elementos com um *pitch* igual a $1,5 \lambda$. O que corresponde a redução em 66,40 % da quantidade de elementos no *array* e redução de 88,71 % na quantidade de operações matemáticas para gerar as imagens utilizando o algoritmo TFM.

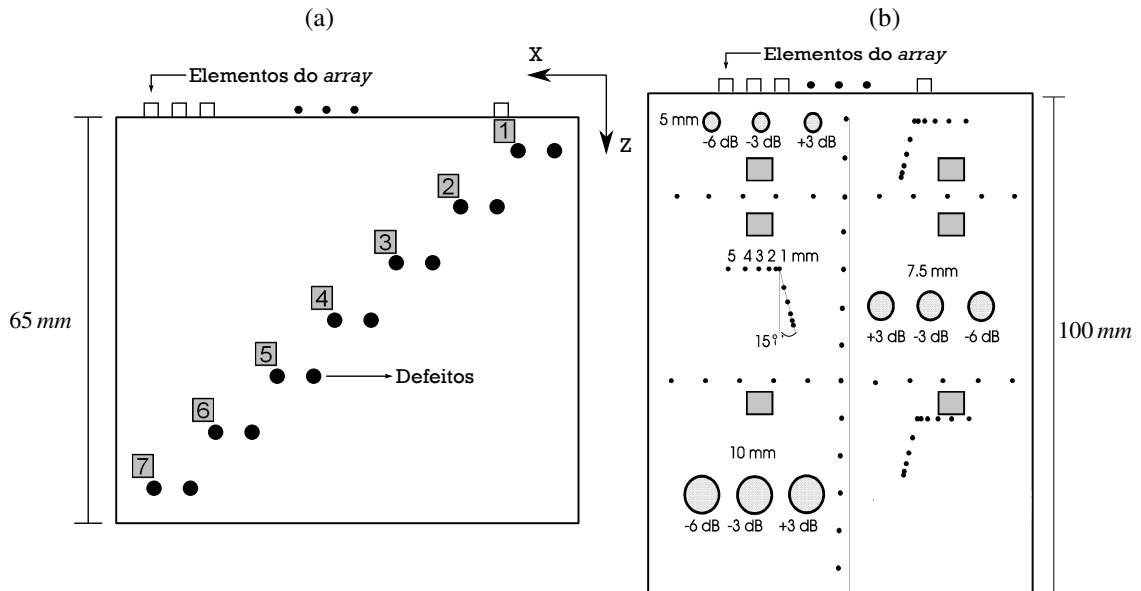
O desempenho dos *arrays* esparsos encontrados foram então averiguados utilizando o seu diagrama de radiação, PSF localizada em $x = 0 \text{ mm}$ e $z = 35 \text{ mm}$ e dois experimentos disponibilizados pelo *Consejo Superior de Investigaciones Científicas* (CSIC). Após analisar os *arrays* esparsos com 43 elementos, diferentes *arrays* esparsos foram encontrados com o intuito de compará-los com outros *arrays* esparsos apresentados em diferentes trabalhos.

6.1 DADOS EXPERIMENTAIS

Em ambos os experimentos realizados pelo CSIC, um *array* completo com 128 elementos com *pitch* igual a $\lambda/2$, excitados por um pulso criado a partir de 4 ciclos de senoide com envoltória gaussiana na frequência de 5 MHz e amostrados na frequência de 40 MHz, foi disposto na superfície da peça e, utilizando a técnica SA (*Synthetic Aperture*), a matriz de dados experimentais foi adquirida. Para o primeiro experimento (Figura 40 (a)), o *array* foi posicionado em um bloco de alumínio com 7 pares de furos dispostos na diagonal do bloco, onde cada par de defeitos foi numerado para facilitar a sua indicação. Para o segundo experimento, a parte do *phantom* que foi gerada as imagens ultrassônicas é ilustrada na Figura 40 (b), no qual o *array* completo foi posicionado na superfície de um *phantom* modelo 525 da *Dansk Fantom Service*, que consiste em áreas (2, 3, 6) onde existem 11 fios de *nylon* trançados que possuem um alto contraste, e áreas (1, 4, 5), com 3 fios de baixo contraste.

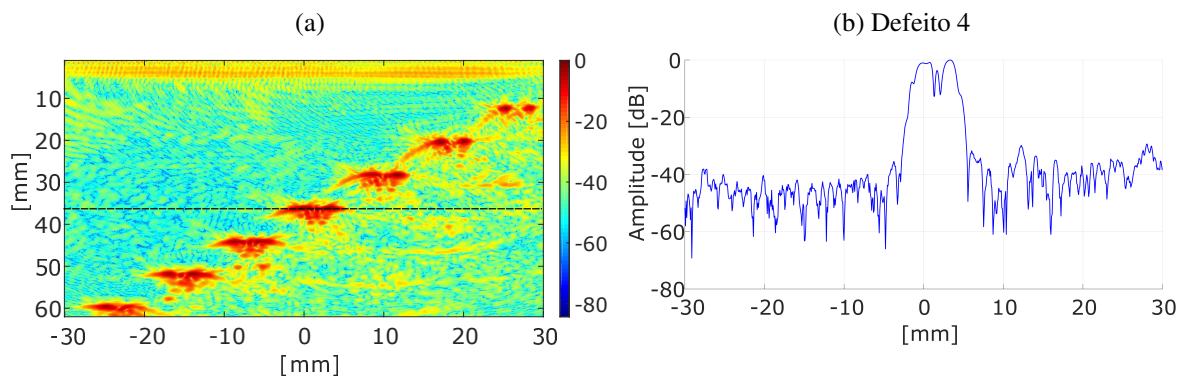
Para o bloco de alumínio, os sinais de ultrassom adquiridos pelo *array* com 128 elementos foram filtrados utilizando um filtro FIR (*Finite Impulse Response*) passa banda, com um *design* baseado na janela de Hamming de ordem 52 e frequências de corte $0,15 \pi$ e $0,6 \pi$ e a imagem gerada utilizando o algoritmo TFM (Figura 41 (a)). Nesta imagem, os 7 defeitos presentes no bloco de alumínio são identificados com um alto contraste, de modo que para auxiliar a visualização da resolução lateral, um corte da imagem do bloco de alumínio no defeito 4 representada pela linha em preto é ilustrada na Figura 41 (b). Analisando o corte feito na região do defeito 4, pode-se observar que os pares de furos foram identificados e que a intensidade do sinal fora da região do defeito se manteve estável na faixa de -50 dB.

Figura 40 – Detalhes dos defeitos do experimento disponibilizado pelo CSIC sendo as regiões dos defeitos numeradas para auxiliar a sua localização no texto. (a) um bloco de alumínio com 7 pares de furos dispostos na diagonal. (b) *phantom* modelo 525 da *Dansk Fantom Service*.



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 41 – Resultados práticos adquiridos utilizando o *array* completo com 128 elementos no bloco de alumínio. (a) Imagem do bloco de alumínio gerada utilizando o algoritmo TFM, sendo destacada em preto, a linha extraída das amplitudes da imagem apresentada em (b).



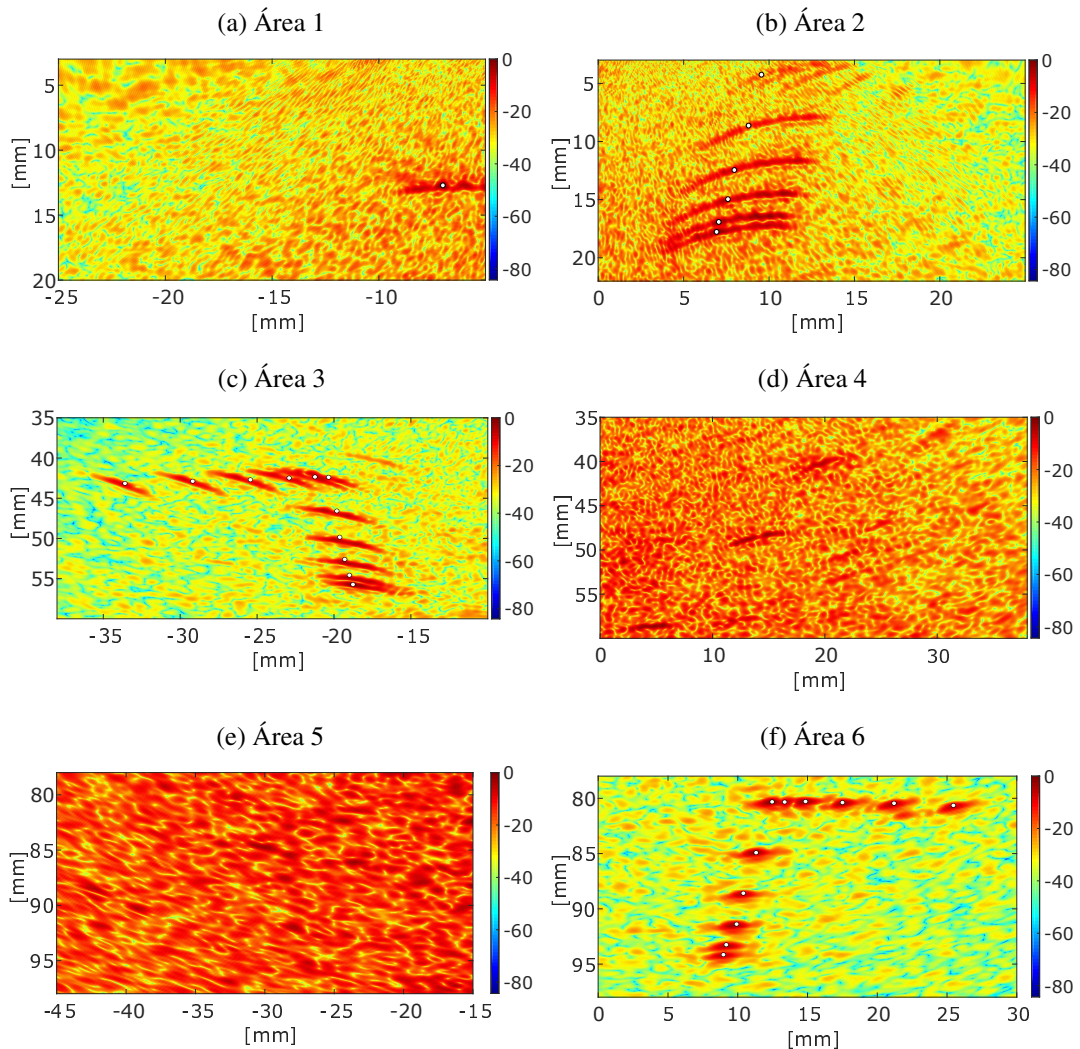
Fonte – Elaborada pelo autor

Para o *phantom*, as imagens geradas utilizando o *array* completo com 128 elementos foram separadas em 6 áreas e apresentadas sequencialmente nas Figuras 42 (a) - (e). Dentre as imagens apresentadas, as Figuras 42 (b), (c) e (f) relacionadas as áreas 2, 3 e 6 do *phantom* obtiveram os melhores resultados, nas quais foi possível identificar parcialmente os 11 fios de *nylon* destacados utilizando um círculo branco na imagem. Porém, devido a abertura do *array* utilizado no experimento ser pequena (entre $x = -14 \text{ mm}$ a 14 mm), os fios de *nylon* na região 2

do *phantom* não foram bem identificados. Assim, somente as imagens nas regiões 3 e 6 foram utilizadas neste trabalho.

Além dos 11 fios de *nylon*, os três fios construídos para ter baixo contraste dispostos nas regiões 1, 4 e 5 do *phantom* não conseguiram ser identificados neste experimento, de forma que na Figura 42 (a) foi identificado um fio de *nylon*, destacado com um círculo branco, utilizado para separar as regiões do *phantom*. Muito dessa não identificação dos fios pode ser atribuída a baixa relação sinal ruído correspondente ao uso da técnica *Synthetic Aperture* para excitar os elementos do *array*.

Figura 42 – Imagem ultrassônica do *phantom* gerada utilizando o algoritmo TFM, na qual, cada área da imagem foi representada separadamente e os defeitos destacados em branco.
(a) Área 1. (b) Área 2. (c) Área 3. (d) Área 4. (e) Área 5. (f) Área 6.



Fonte – Elaborada pelo autor

6.2 PRIMEIRA FUNÇÃO APTIDÃO

A primeira função aptidão foi inicialmente utilizada para reduzir a quantidade de elementos em um *array* completo com 128 elementos com *pitch* igual a $\lambda/2$, em que diferentes casos de pesos k_1 , k_2 e k_3 foram utilizados para ponderar os fatores da função aptidão apresentada em (25). Os valores de ME_{max} (média dos picos dos lóbulos laterais), ML_{max} (nível máximo dos lóbulos laterais e AA_{max} (abertura angular do lóbulo principal) utilizados para criar fatores adimensionais na função aptidão foram retirados do *array* com 128 elementos e possuem os valores de -36,67 dB, -13,26 dB e $2,9^\circ$ respectivamente. Além desses parâmetros, foi definido que a penalização ocorreria caso o indivíduo possuísse uma quantidade maior que 43 elementos, o que corresponde a utilizar um *array* esparso periódico na qual seus elementos possuem um *pitch* igual a $1,5 \lambda$. Após definir os valores iniciais do algoritmo genético, a função aptidão assumiu a seguinte característica:

$$FA = k_1 \frac{-36,67}{ME} + k_2 \frac{-13,26}{ML} + k_3 \frac{AA}{2,9} + Pen, \quad (29)$$

sendo a penalização definida por (26) como:

$$Pen = \begin{cases} 10(N_{trans} - 43), & \text{se } N_{trans} > 43; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (30)$$

A tabela 1 apresenta os valores de ME (média dos picos dos lóbulos laterais), ML (nível máximo dos lóbulos laterais e AA (abertura angular principal) encontrado para diferentes combinações de pesos k_n . Pode-se observar que quanto maior forem os pesos para cada fator, maior será o foco do algoritmo genético em minimizá-lo. Dessa maneira, os pesos são atribuídos a partir da necessidade que se deseja que *array* esparso possua.

Quando o foco é minimizar as intensidades dos artefatos presentes na imagem, característica diretamente relacionada aos níveis dos lóbulos laterais, pode-se utilizar pesos maiores para k_1 e k_2 . Caso se deseje encontrar um *array* esparso na qual o foco é gerar imagens com boa resolução, parâmetro diretamente relacionado a abertura angular do lóbulo principal, aumenta-se o peso k_3 .

O primeiro resultado encontrado pelo AG utilizando os pesos 1, 0 e 0 apresentado na tabela 1 tem como foco encontrar o *array* com menor média dos picos dos lóbulos laterais, que para este caso, foi o *array* completo com 43 elementos. Isto indica que o *array* que possui a menor média dos lóbulos laterais são os que possuem seus elementos com *pitch* igual a $\lambda/2$ e, para encontrar os *arrays* esparsos, é preciso utilizar outras informações do diagrama de radiação. Por conseguinte, a mesma estratégia pôde ser adotada para a segunda e terceira configurações de pesos, na qual, a segunda configuração (0, 1, 0) minimiza somente o nível

Tabela 1 – Resultados obtidos utilizando diferentes pesos k_n para encontrar um *array* esperso com 43 elementos com uma abertura máxima de $63,3 \lambda$.

Pesos ($k_1; k_2; k_3$)	<i>ME</i> (dB)	<i>ML</i> (dB)	<i>AA</i> ($^\circ$)
(1;0;0)	-27,76	-13,24	8,40
(0;1;0)	-21,41	-16,06	8,28
(0;0;1)	-16,80	-8,36	2,20
(1;1;1)	-18,05	-11,69	2,76
(4;2;0,5)	-21,69	-14,38	6,40
(2;4;0,5)	-18,72	-14,69	5,60
(0,5;2;4)	-16,90	-12,65	2,24
(2;0,5;4)	-18,14	-11,67	3,20
(Array Completo)	-36,67	-13,26	2,90

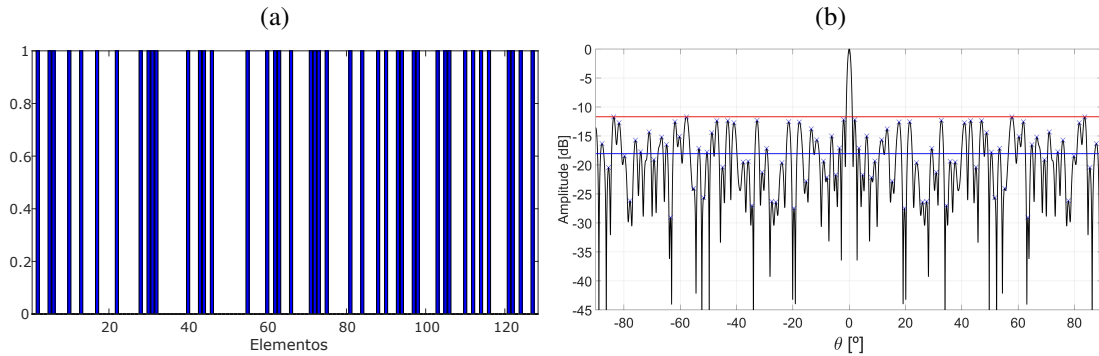
máximo do lóbulo lateral, cujo valor é o menor encontrado entre os apresentados na tabela, e, a terceira configuração de pesos (0, 0, 1), minimiza somente a abertura angular do lóbulo lateral. Neste terceiro caso, a abertura angular do lóbulo lateral foi o menor encontrado dentre os *arrays* espersos, porém, o lóbulos laterais se mantiveram altos. Por isso, faz-se necessário a combinação dos pesos para criar um *array* esperso com lóbulo principal e níveis dos lóbulos laterais reduzidos. Assim, considerando pesos iguais para os fatores k_n , o quarto resultado da tabela 1 ilustra o equilíbrio da minimização dos três parâmetros extraídos do AG e, conforme os pesos são alterados, pode-se observar que quanto maior for o peso relacionado ao fator que o multiplica, maior será o foco do algoritmo genético em minimizá-lo.

Analisando com maior atenção o *array* esperso encontrado pelo AG, na qual foram definidos os pesos $k_1 = 1$, $k_2 = 1$ e $k_3 = 1$, após 97 iterações, o *array* esperso encontrado (Figura 43 (a)) tem o seu diagrama de radiação ilustrado na Figura 43 (b), na qual, foram encontrados os valores de: média dos picos dos lóbulos laterais de -18,05 dB, nível máximo dos lóbulos laterais de -11,69 dB e abertura angular do lóbulo principal de $2,76^\circ$. Quando comparado com o *array* completo de 128 elementos, o *array* esperso encontrado pelo algoritmo genético possui níveis máximos e abertura angular do lóbulo principal similares ao do *array* completo, entretanto, a média dos picos dos lóbulos laterais são maiores devido ao aumento do *pitch* entre os elementos. Deste modo, estes valores encontrados indicam que o *array* esperso gerará imagens com resolução similar ao do *array* completo, porém, possuirá uma maior intensidade de artefatos.

A PSF do *array* esperso, apresentada na Figura 44 (a), ilustra essas características do *array* esperso citadas anteriormente. Comparando com a PSF do *array* completo de 128 elementos (Figura 44 (b)), o ponto refletor posicionado em $x = 0 \text{ mm}$ e $z = 35 \text{ mm}$ possui a resolução lateral similar nas duas imagens, porém, a PSF criada utilizando o *array* esperso apresenta uma energia dissipada maior ao redor do defeito.

Essa afirmação também pode ser observada extraindo uma linha das imagens, que foi destacada na Figura 44 (a), passando pelas PSFs (Figura 44 (c)). Nesse corte, pode-se observar

Figura 43 – (a) *Array* esparsa encontrada utilizando a função aptidão baseada no diagrama de radiação utilizando os pesos de 1, 1 e 1 para k_1 , k_2 e k_3 respectivamente. (b) Diagrama de radiação do *array* esparsa que possui o nível máximo do lóbulo lateral de -11,69 dB, indicado pela linha vermelha, a média dos picos dos lóbulos laterais de -18,05 dB, ilustrado pela linha azul e abertura angular do lóbulo principal de $2,76^\circ$.



Fonte – Elaborada pelo autor

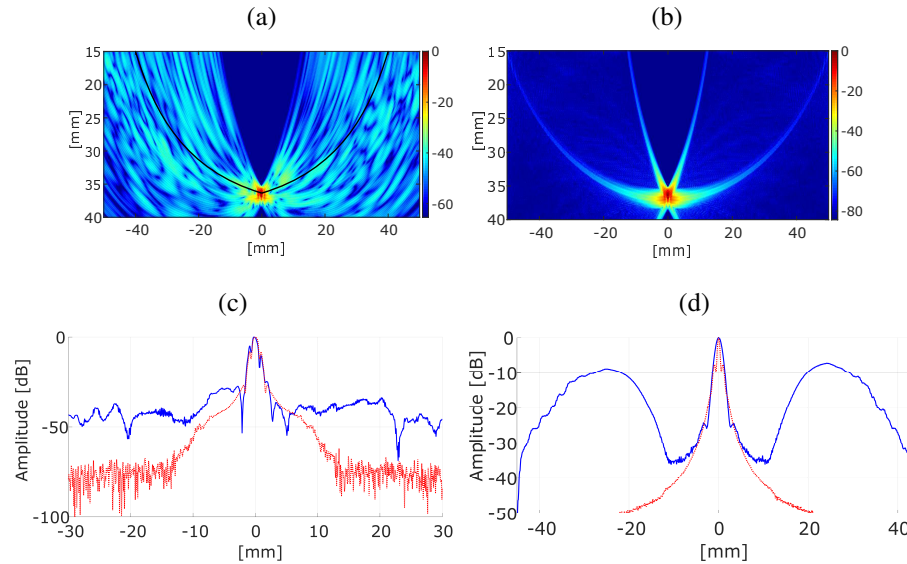
que ambas as linhas possuem uma resolução lateral similar, porém, as amplitudes onde o defeito não está presente é maior para o *array* esparsa (linha azul contínua). Tal comportamento que também pode ser observado quando analisada a soma das linhas das PSFs, apresentadas na Figura 44 (d), em que, a linha contínua azul, resultado da soma das linhas da PSF gerada pelo *array* esparsa, possui amplitudes maiores que a linha pontilhada vermelha, gerada a partir da soma das linhas da PSF do *array* completo.

O alto nível de artefatos existente onde o defeito não está presente é um comportamento esperado quando se utiliza o *array* esparsa, porém, o uso do algoritmo genético possibilitou encontrar um *array* que mantivesse uma boa resolução lateral e reduzisse o nível desses artefatos, na medida do possível.

Utilizando o *array* esparsa para gerar a imagem do bloco de alumínio (Figura 45 (a)), pode-se observar que os 7 defeitos presentes no bloco foram identificados, porém, o contraste da imagem piorou em relação a imagem gerada utilizando o *array* completo de 128 elementos (Figura 41 (a)). Ao modo que é possível observar essa redução no contraste analisando as linhas da imagem nos defeitos 1 (Figura 45 (b)), 4 (Figura 45 (c)) e 7 (Figura 45 (e)), na qual a linha da imagem gerada pelo *array* esparsa (contínua azul) identifica os defeitos de forma similar a linha gerada (pontilhada vermelha) pelo *array* completo de 128 elementos, porém, a variação entre as amplitudes onde não existe os defeitos é maior para a imagem gerada pelo *array* esparsa.

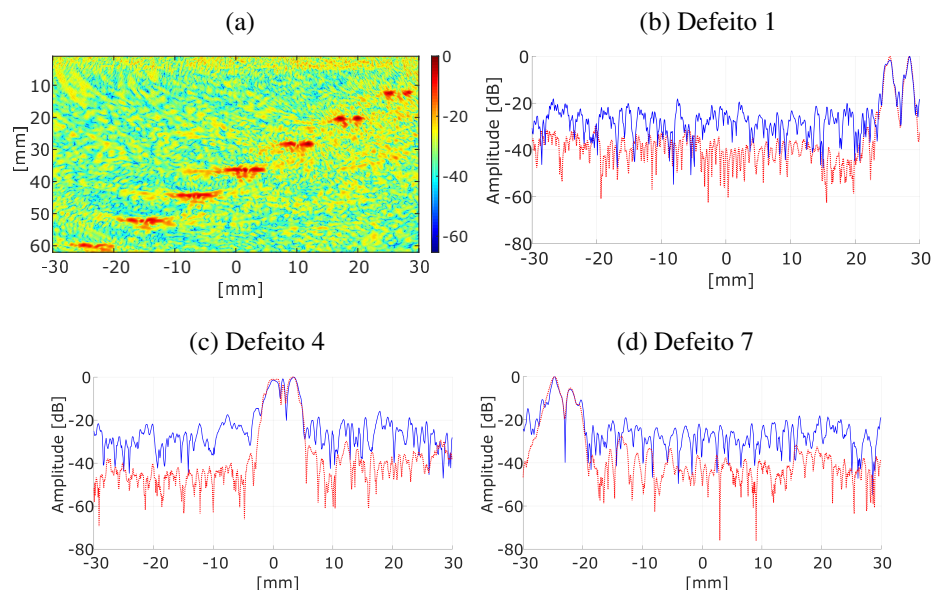
Para o *phantom Dansk* modelo 525, as imagens dos 11 fios de *nylon* geradas pelo *array* esparsa nas regiões 3 (Figura 46 (a)) e 6 (Figura 47 (a)) apresentaram similaridades as imagens geradas pelo *array* completo com 128 elementos nas regiões 3 (Figura 46 (b)) e 6 (Figura 47 (b)). As linhas destacadas em preto nas imagens geradas utilizando o *array* esparsa correspondem as linhas (cortes) no eixo vertical e horizontal extraídas e utilizadas para analisar a

Figura 44 – Análise da PSF através da comparação entre as imagens, linha extraída da imagem e soma das linhas da imagem. (a) PSF do *array* esparsos de 43 elementos encontrado pelo AG utilizando a primeira função aptidão. (b) PSF do *array* completo com 128 elementos. (c) linha e (d) soma das linhas da imagem extraída das PSF sendo representado pela linha contínua azul o resultado do *array* esparsos e, pela linha pontilhada vermelha, o resultado do *array* completo.



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 45 – Experimento prático do bloco de alumínio. (a) Imagem da peça gerada utilizando o *array* esparsos encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão. (b) Corte no defeito 1. (c) Corte no defeito 4. (d) Corte no defeito 7, na qual a linha contínua em azul representa a imagem gerada pelo *array* esparsos e a linha vermelha pontilhada a imagem gerada pelo *array* completo com 128 elementos.



Fonte – Elaborada pelo autor

resolução lateral e artefato das imagens. Para simplificar a maneira como os cortes ao decorrer do texto são referenciados, estes são denominados somente como cortes verticais e horizontais da imagem.

Para o *phantom Dansk* modelo 525, as imagens dos 11 fios de *nylon* geradas pelo *array* esparsos nas regiões 3 (Figura 46 (a)) e 6 (Figura 47 (a)) apresentaram similaridades as imagens geradas pelo *array* completo com 128 elementos nas regiões 3 (Figura 46 (b)) e 6 (Figura 47 (b)). As linhas destacadas em preto nas imagens geradas utilizando o *array* esparsos correspondem as linhas (cortes) no eixo vertical e horizontal extraídas e utilizadas para analisar a resolução lateral e artefato das imagens. Para simplificar a maneira como os cortes ao decorrer do texto são referenciados, estes são denominados somente como cortes verticais e horizontais da imagem.

Analisando os cortes verticais e horizontais dos fios de *nylon* para a região 3 do *phantom*, é possível visualizar que os defeitos dispostos horizontalmente (Figura 46 (c)) possuem uma baixa amplitude em ambas imagens geradas pelos *arrays* completo e esparsos, consequência da posição onde se encontra o *array* ($z = 0$ e $x = [-13 \text{ a } 13]$ mm). Entretanto, comparando as amplitudes das linhas, na qual, a linha contínua azul ilustra a imagem gerada pelo *array* esparsos e a linha pontilhada vermelha, a imagem gerada pelo *array* completo com 128 elementos, as amplitudes dos defeitos são similares com uma ligeira vantagem para o *array* completo que gerou os defeitos horizontais da região 3 do *phantom* com uma amplitude maior (Figura 46 (c)). Tratando-se dos defeitos na vertical da imagem, os cortes da imagem (Figura 46 (d)) mostram que o *array* esparsos (linha contínua azul) gerou uma imagem onde os defeitos possuem uma maior amplitude que a imagem gerada pelo *array* completo.

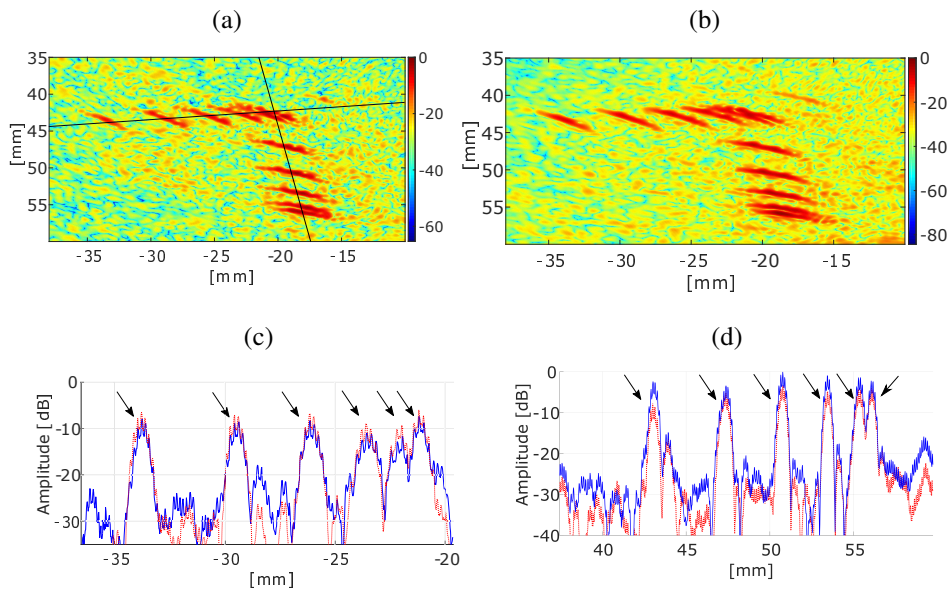
Analisando os cortes dos defeitos na região 6 do *phantom*, os cortes dos defeitos na horizontal (Figura 47 (c)) e na vertical (Figura 47 (d)) das imagens geradas pelos *arrays* possuem grandes similaridades, de modo que a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada pelo *array* esparsos e a linha pontilhada vermelha ilustra o corte da imagem gerada pelo *array* completo com 128 elementos.

O uso do diagrama de radiação levando em consideração o nível máximo do lóbulo lateral, média dos picos dos lóbulos laterais e abertura angular do lóbulo principal para construção da função aptidão se apresentou eficaz na busca por uma configuração de *array* esparsos com 43 elementos em uma abertura máxima de 128 elementos com *pitch* igual a $\lambda/2$. Desta maneira as imagens dos experimentos disponibilizados pelo CSIC foram detectadas de forma similar ao *array* completo com 128 elementos, porém, com uma quantidade reduzida de elementos.

6.2.1 Comparação Entre Metodologias - Lockwood et al. (1996a)

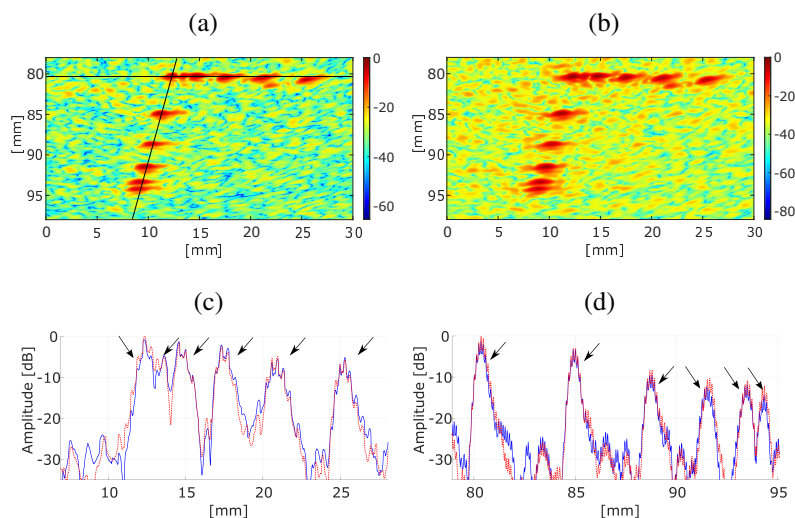
Comparando a metodologia apresentada neste trabalho com outros trabalhos em que os autores disponibilizam seus *arrays* esparsos, Lockwood et al. (1996a) consideram diferentes

Figura 46 – *Phantom Dansk* com foco na região 3. (a) Imagem do experimento gerada pelo *array* esparso de 43 elementos encontrado pelo AG utilizando a primeira função aptidão onde as linhas em preto mostram a região onde foi feito os cortes horizontais e verticais. (b) Imagem gerada utilizando o *array* completo com 128 elementos. (c) Corte horizontal e (d) corte vertical da imagem sendo destacado as regiões onde existem os fios de *nylon*. A linha contínua azul ilustra o corte gerado pelo *array* esparso e a linha pontilhada vermelha corresponde ao corte da imagem gerada pelo *array* completo.



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 47 – *Phantom Dansk* com foco na região 6. (a) Imagem do experimento gerada pelo *array* esparso de 43 elementos encontrado pelo AG utilizando a primeira função aptidão onde as linhas em preto mostram a região onde foi feito os cortes horizontais e verticais. (b) Imagem gerada utilizando o *array* completo com 128 elementos. (c) Corte horizontal e (d) corte vertical da imagem sendo destacado as regiões onde existem os fios de *nylon*. A linha contínua azul ilustra o corte gerado pelo *array* esparso e a linha pontilhada vermelha corresponde ao corte da imagem gerada pelo *array* completo.



Fonte – Elaborada pelo autor

arrays esparsos emissores e receptores dispostos utilizando a escala de Vernier para criar um *coarray* similar ao *coarray* do *array* completo. Desse modo, considerando uma abertura máxima de $15,5 \lambda$ (32 elementos espaçados por $\lambda/2$), os *arrays* esparsos criados utilizando a metodologia proposta por Lockwood et al. (1996a) são apresentados na Figura 48, na qual o *array* emissor possui 8 elementos (Figura 48 (a)) e o *array* receptor (Figura 48(b)) possui 11 elementos, totalizando a quantidade de 16 elementos (3 se sobrepõem).

Para este caso, os valores de ME_{max} (média dos picos dos lóbulos laterais), ML_{max} (nível máximo dos lóbulos laterais) e AA_{max} (abertura angular do lóbulo principal) utilizados na função aptidão para encontrar o *array* esparsos foram extraídos do diagrama de radiação do *array* completo com abertura máxima definida ao início da busca, que neste caso, consiste em um *array* completo com 32 elementos. Além desses parâmetros, a penalização da função aptidão foi aplicada caso a quantidade de elementos no indivíduo fosse maior que 16 e os pesos k_1 , k_2 e k_3 foram definidos em 1, 1 e 1 respectivamente. Portanto, a função aptidão desenvolvida para encontrar o *array* esparsos com as características de 16 elementos em uma abertura máxima de $15,5 \lambda$ assumiu a seguinte característica:

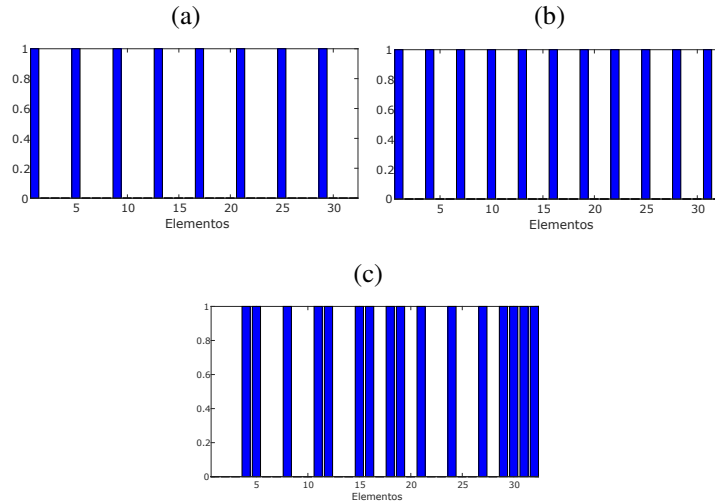
$$FA = 1 \frac{-26,51}{ME} + 1 \frac{-13,24}{ML} + 1 \frac{AA}{10,02} + Pen, \quad (31)$$

Após definir a função aptidão, a busca pelo *array* esparsos utilizando o algoritmo genético foi realizada e depois de 130 iterações o *array* esparsos encontrado é apresentado na Figura 48 (c) e o diagrama de radiação do seu *coarray* é ilustrado na Figura 49 (a). Nesta última, o *array* esparsos possui os valores de média dos picos dos lóbulos laterais de -31,01 dB, nível máximo do lóbulo lateral de -19,01 dB e abertura angular do lóbulo principal de $10,94^\circ$.

Em contrapartida, o diagrama de radiação do *coarray* formado pelos *arrays* esparsos propostos por Lockwood et al. (1996a), ilustrado na Figura 49 (b), possuem os valores de média dos picos dos lóbulos laterais de -33,62 dB, nível máximo do lóbulo lateral de -16,85 dB e abertura angular do lóbulo principal de $10,90^\circ$. Em ambos diagramas de radiação, os valores extraídos para função aptidão são similares, porém, os níveis dos lóbulos laterais perto do lóbulo principal são maiores para o *array* esparsos definido neste trabalho quando comparado com o diagrama de radiação dos *arrays* propostos por Lockwood et al. (1996a). Entretanto, analisando o diagrama de radiação para ângulos maiores que 40° , o *array* esparsos definido pelo algoritmo genético possui menores amplitudes.

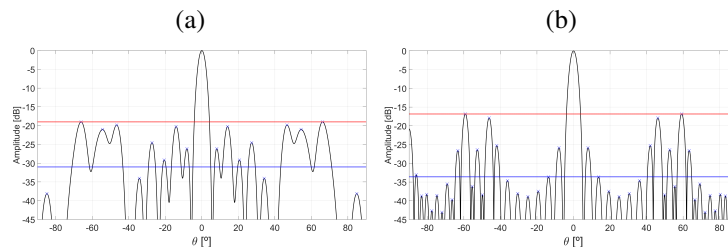
Esta diferença entre os diagramas de radiação também pode ser observada comparando as PSFs geradas pelos *arrays* estudados. Comparando a PSF gerada pelo *array* esparsos definido pelo algoritmo genético (Figura 50 (a)) com a PSF construída utilizando os *arrays* esparsos propostos pelos autores (Figura 50 (b)), observa-se que a PSF gerada pelo *array* esparsos encontrado pelo algoritmo genético possui uma maior intensidade perto do ponto refletor e, conforme se

Figura 48 – Comparação entre *Array* esparsos. (a) *Array* emissor (b) *array* receptor apresentados por Lockwood et al. (1996a). (c) *Array* esparsos determinado pelo algoritmo genético. Ambos utilizam 16 elementos com uma abertura máxima de 32 elementos.



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 49 – Diagrama de radiação do *coarray* utilizando:(a) o *coarray* do *array* esparsos encontrado pelo AG e (b) o *coarray* dos *arrays* esparsos apresentados por Lockwood et al. (1996a).



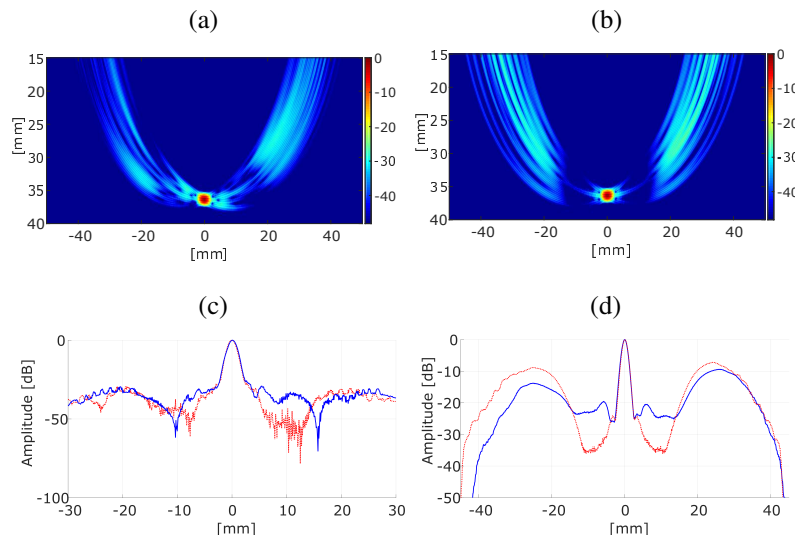
Fonte – Elaborada pelo autor

distancia do ponto, a PSF gerada pelos *arrays* propostos por Lockwood et al. (1996a) apresenta uma maior intensidade.

Analisando a linha da imagem extraída da PSF (Figura 50 (c)) e a soma das linhas da PSF (Figura 50 (d)), de forma que a linha azul contínua correspondente a PSF gerada pelo *array* esparsos encontrado neste trabalho e a linha vermelha pontilhada a PSF gerada pelos *arrays* esparsos propostos por Lockwood et al. (1996a), pode-se observar que ambas PSFs apresentam uma resolução lateral similar e que perto do defeito a energia é maior para PSF apresentada na Figura 50 (a), porém, a intensidade do sinal diminui conforme essa distância aumenta.

Para o experimento do bloco de alumínio disponibilizado pelo CSIC, os *arrays* esparsos foram utilizados para gerar as imagens e, tanto para a imagem gerada utilizando o *array* esparsos (Figura 51 (a)) encontrado pelo algoritmo genético, quanto para a imagem gerada utilizando

Figura 50 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão. (b) PSF criada utilizando o *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a).



Fonte – Elaborada pelo autor

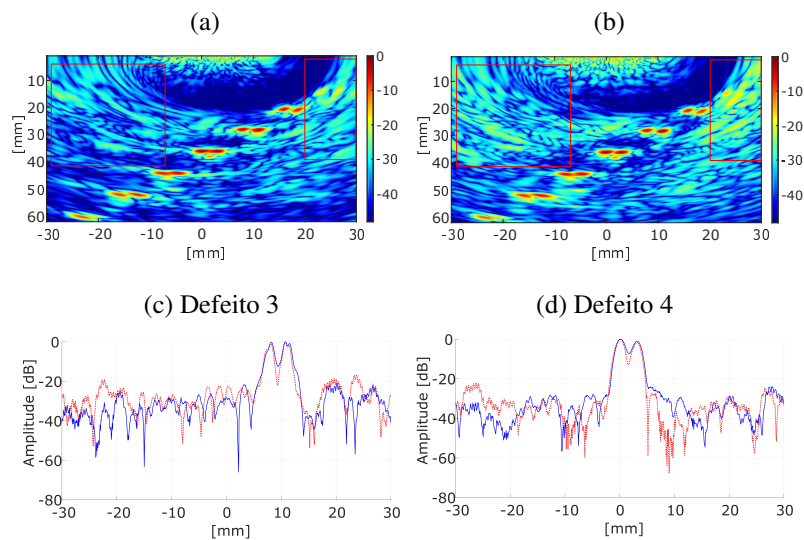
os *arrays* esparsos apresentados por Lockwood et al. (1996a) (Figura 51 (b)), 5 dos 7 defeitos foram detectados adequadamente. Os defeitos 1 e 7 não conseguiram ser bem detectados devido a abertura do *array*, pelo fato do defeito 1 estar disposto em um ângulo em relação ao centro do *array* maior que o ângulo do defeito 7, a sua detecção é mais difícil.

Regiões nas imagens do bloco de alumínio foram destacadas para indicar a redução nas intensidades dos artefatos nas imagens geradas pelo *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético (Figura 51 (a)). Este comportamento pode ser explicado pelo fato do nível máximo dos lóbulos laterais do *array* esparso encontrado neste trabalho ser menor que o nível máximo dos *arrays* apresentados por Lockwood et al. (1996a). Entretanto, o lóbulo principal dos *arrays* propostos pelos autores é ligeiramente menor que o do *array* encontrado neste trabalho, por isso os *arrays* encontrados pelo AG possui uma pequena piora na resolução lateral, ao modo que em determinadas ocasiões esta diferença pôde ser observada.

Esta piora na resolução pode ser visualizada analisando as amplitudes de uma linha da imagem na região do defeito 3 (Figura 51 (b)) e 4 (Figura 51 (d)), na qual o corte da imagem gerada pelo *array* esparso foi representado em azul contínuo e o corte extraído da imagem gerada pelos *arrays* esparsos propostos por Lockwood et al. (1996a) em vermelho pontilhado. Na região do defeito 3, pode-se observar que o *array* esparso encontrado pelo AG apresentou resolução lateral similar aos *arrays* propostos por Lockwood et al. (1996a), entretanto, o nível

do sinal longe do defeito se manteve menor. Para o corte na região 4, o *array* esparso encontrado pelo AG apresentou uma piora na resolução lateral em relação aos *arrays* apresentados por Lockwood et al. (1996a).

Figura 51 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a), nas quais as áreas onde os artefatos estão presentes foram ressaltadas. Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 3 (c) e do defeito 4 (d) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a).



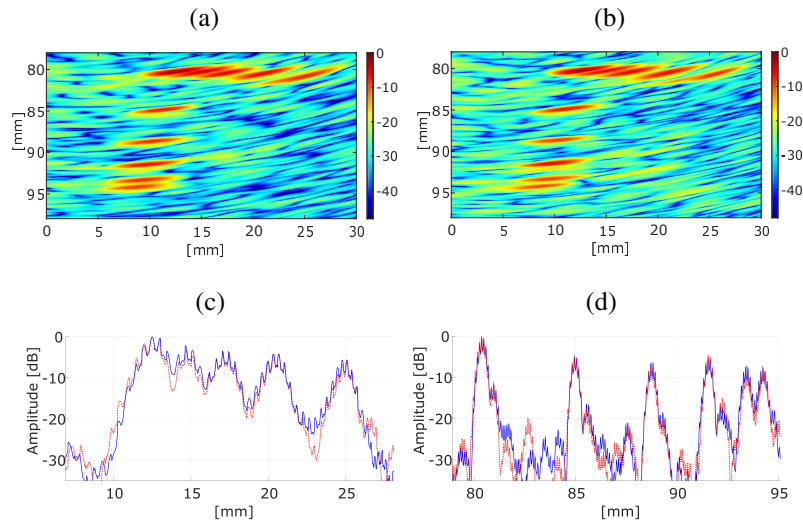
Fonte – Elaborada pelo autor

O *array* esparso encontrado utilizando a metodologia baseada no diagrama de radiação, quando comparado com os *arrays* esparsos propostos por Lockwood et al. (1996a), geraram uma imagem com uma ligeira piora na resolução lateral, porém, ocorreu uma redução na quantidade de artefatos na imagem do experimento do bloco de alumínio. Esse comportamento também pode ser visualizado analisando a região 6 do *phantom*.

A imagem do *phantom* na região 6 gerada pelo *array* encontrado neste trabalho (Figura 52 (a)) possui uma menor quantidade de artefatos, porém, pior resolução que a imagem gerada utilizando os *arrays* esparsos propostos por Lockwood et al. (1996a) (Figura 52 (b)), visto que, a segunda imagem possui mais regiões em amarelo (maiores amplitudes).

Analisando os cortes verticais (Figura 52 (c)) e horizontais (Figura 52 (d)) das imagens, os *arrays* esparsos apresentados por Lockwood et al. (1996a), representados pela linha pontilhada vermelha, possuem uma resolução lateral melhor, com uma maior amplitude onde os defeitos não estão presentes.

Figura 52 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a), sendo utilizados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para ilustrar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a)



Fonte – Elaborada pelo autor

Pode-se concluir que o *array* esparso encontrado pelo AG possui uma ligeira piora na resolução lateral quando comparado com os *arrays* apresentados por Lockwood et al. (1996a), entretanto, a intensidade de artefatos na imagem é menor para os *arrays* esparsos apresentados neste trabalho. Contudo, a metodologia possibilita alterar os pesos k_n que multiplicam os fatores da função aptidão para mudar a característica do *array* esparso, e, o uso dos valores 1, 1 e 1 para os pesos se demonstrou balanceada para escolha de um *array* que possua uma boa resolução lateral e poucos artefatos.

6.2.2 Comparação Entre Metodologias - Yang, Chen e Shi (2006)

Yang, Chen e Shi (2006) propõem utilizar a técnica de redundância mínima para escolher 10 elementos no *array* com 37 possíveis posições e, em seguida, utilizam o algoritmo genético minimizando o nível máximo dos lóbulos laterais para definir a posição de 6 elementos nas 27 posições restantes. Dessa forma, foi configurado o AG para que realizasse uma busca por um *array* esparso com 16 elementos em uma abertura máxima de 18λ a fim de possibilitar a comparação entre os dois métodos.

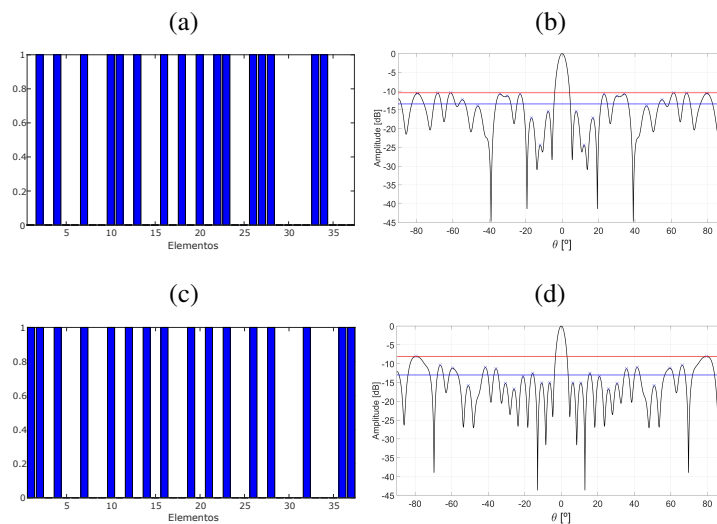
Para o primeiro *array* esparso encontrado, os valores iniciais de ME_{max} , ML_{max} e AA_{max} são extraídos do diagrama de radiação do *array* completo com a abertura máxima definida no

início da busca, que neste exemplo, é o *array* completo com 37 elementos. Além disso, os pesos k_n da função aptidão foram definidos como 1,5, 1,5 e 1. Assim, a função aptidão apresentada em (25) assume a seguinte característica:

$$FA = 1,5 \frac{-26,51}{ME} + 1,5 \frac{-13,24}{ML} + 1 \frac{AA}{9,07} + Pen, \quad (32)$$

A função aptidão apresentada na equação (32) foi então utilizada no algoritmo genético e, após 55 iterações, o *array* esparso encontrado (Figura 53 (a)) possui o diagrama de radiação apresentado na Figura 53 (b), revelando os seguintes valores: abertura angular do lóbulo principal de $11,06^\circ$, média dos picos dos lóbulos laterais de -13,45 dB e nível máximo dos lóbulos laterais de -10,46 dB. Em contrapartida, o *array* esparso encontrado por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 53 (c)) possui o diagrama de radiação apresentado em (Figura 53 (d)), em que a abertura angular do lóbulo principal ($9,26^\circ$) e média dos picos dos lóbulos laterais (-13,01 dB) são menores em relação ao *array* encontrado neste trabalho, porém, tem nível máximo dos lóbulos laterais maior (-8,07 dB).

Figura 53 – Comparação entre *Array* esparsos. (a) *Array* esparso determinado pelo AG utilizando a primeira função aptidão e (b) o seu diagrama de radiação. (c) *Array* esparso e (d) diagrama de radiação apresentados por Yang, Chen e Shi (2006). Neste exemplo, os pesos k_1 , k_2 e k_3 da função aptidão foram definidos como 1,5, 1,5 e 1 respectivamente.

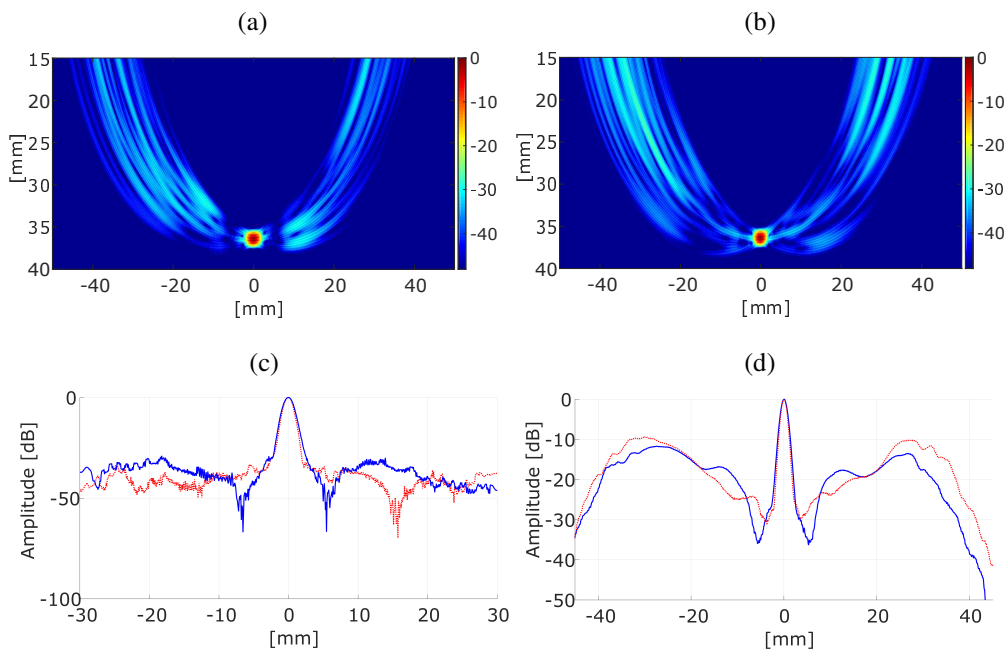


Fonte – Elaborada pelo autor

A PSF gerada utilizando o *array* esparso apresentado neste trabalho (Figura 54 (a)), quando comparada com a PSF gerada utilizando o *array* esparsos apresentado por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 54 (b)), possui artefatos com menor intensidade longe do ponto refletor, porém, próximo ao defeito, a intensidade do sinal é maior. Em complemento, pode-se analisar a linha extraída da PSF (Figura 54 (c)), em que é possível observar que a PSF gerada pelo *array*

esparso encontrado neste trabalho (linha contínua azul) possui uma pior resolução. Entretanto, quando analisado a soma das linhas da PSF (Figura 54 (d)), sendo que a PSF gerada pelo *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006) é representada pela linha pontilhada vermelha, observa-se que a intensidade dos artefatos foram maiores longe do defeito para PSF criada a partir do *array* proposto por Yang, Chen e Shi (2006).

Figura 54 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo AG utilizando a primeira função aptidão, com pesos 1,5, 1,5 e 1. (b) PSF criada utilizando o *array* proposto por Yang, Chen e Shi (2006). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* proposto por Yang, Chen e Shi (2006).



Fonte – Elaborada pelo autor

Essas diferenças entre *arrays* esparsos apontadas na PSF também podem ser observadas quando geradas as imagens dos experimentos disponibilizados pelo CSIC. A imagem do bloco de alumínio gerada pelo *array* esparso (Figura 55 (a)) apresenta artefatos com menor intensidade em relação a imagem do bloco de alumínio gerada pelo *array* esparso apresentado por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 55 (b)), principalmente nas áreas destacadas nas imagens. As diferenças das resoluções laterais também podem ser observadas quando analisado uma linha das amplitudes das imagens no defeito 4 (Figura 55 (c)) e defeito 5 (Figura 55 (d)), na qual, a linha que representa a imagem gerada pelo *array* esparso apresentado por Yang, Chen e Shi (2006) (vermelha pontilhada) consegue identificar melhor o par de defeitos.

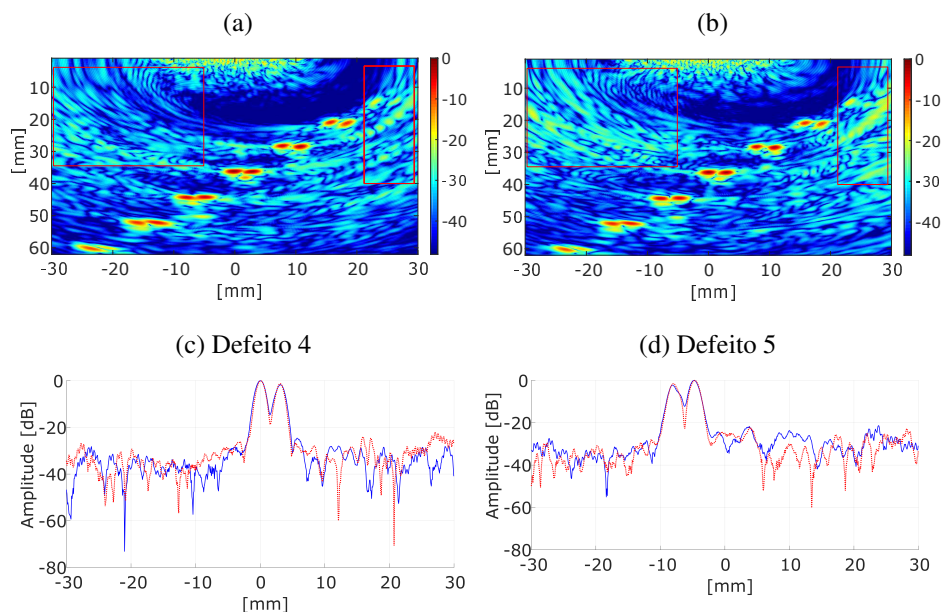
Para a imagem do *phantom* na região 6, a intensidade dos artefatos também diminuíram na imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pelo AG (Figura 56 (a)) em relação

a imagem gerada pelo *array* esparso apresentado por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 56 (b)), entretanto, os fios de *nylon* estão melhores representados na Figura 56 (b). Os cortes horizontal (Figura 56 (c)) e vertical (Figura 56 (d)) dos defeitos mostram que ambos os *arrays* conseguiram identificar os defeitos, porém, existe uma pequena vantagem na resolução lateral para a imagem gerada pelo *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006) (linha vermelha pontilhada).

O *array* encontrado pelo algoritmo genético, quando comparado com o *array* apresentado por Yang, Chen e Shi (2006), geram imagens com intensidades de artefatos reduzidas, porém, com piores resoluções laterais. Como os valores utilizados nos pesos k_n foram atribuídos para encontrar um *array* com essas características, julga-se que o *array* esparso encontrado apresentou resultados satisfatórios.

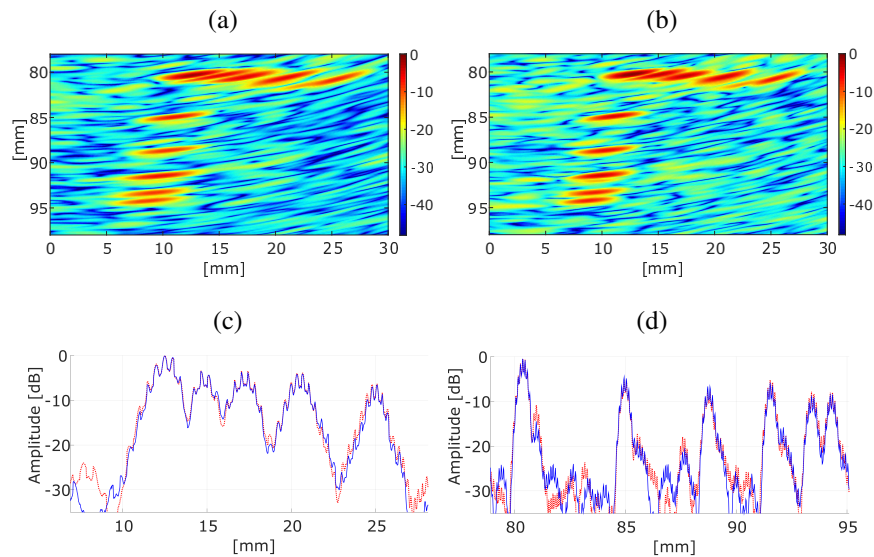
Alterando os pesos k_n , de modo que seja enfatizado a redução da abertura angular do lóbulo principal em detrimento da redução nos níveis dos lóbulos laterais, os pesos de k_n foram alterados para 0,5, 1 e 2. Deste modo, a equação (32) utilizada como função aptidão para busca por um *array* esparso com 16 elementos em uma abertura de 18λ tem seus pesos trocados e a nova função aptidão é apresentada em (33):

Figura 55 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo AG a partir da primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006), das quais, as áreas onde os artefatos estão presentes foram destacadas. Além dessas imagens, cortes da imagem na região dos defeitos 4 (c) e 5 (d) são apresentados. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006).



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 56 – Imagem da região 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo AG a partir da primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006), sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos no eixo horizontal (c) e vertical (d). Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006).



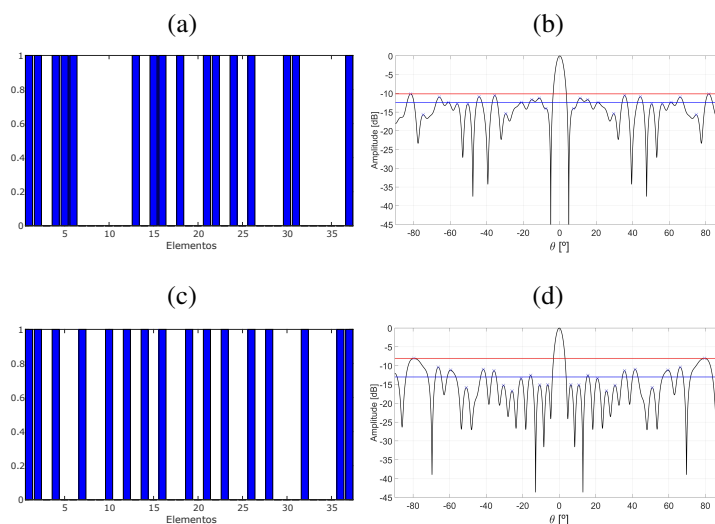
Fonte – Elaborada pelo autor

$$FA = 0,5 \frac{-26,51}{ME} + 1 \frac{-13,24}{ML} + 2 \frac{AA}{9,07} + Pen, \quad (33)$$

Utilizando esta nova função aptidão para determinar a configuração dos elementos no *array* esparso, após 137 iterações, o diagrama de radiação do *array* esparso encontrado (Figura 57 (a)) é apresentado na Figura 57 (b). Para este *array*, os valores encontrados foram: abertura angular do lóbulo principal de $9,12^\circ$, média dos picos dos lóbulos laterais de $-12,42$ dB e máximo lóbulo lateral de $-10,15$ dB. Comparando com o *array* esparso apresentado por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 57 (c)), em que o seu diagrama de radiação é ilustrado na Figura 57 (d), o único atributo onde o *array* apresentado por Yang, Chen e Shi (2006) se sobressai é a média dos picos dos lóbulos laterais.

Analisando as PSFs geradas utilizando os *arrays* esparsos, a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado neste trabalho (Figura 58 (a)) possui resolução similar a PSF gerada utilizando o *array* esparso disponibilizado por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 58 (b)), com a diferença que o *array* esparso encontrado pelo AG apresenta artefatos com menor intensidade nas áreas longe do refletor, no entanto, perto do refletor existe uma área com alta intensidade. Ao analisar a linha (Figura 58 (c)) e soma das linhas (Figura 58 (d)) das PSFs, é possível verificar que o defeito foi detectado de forma similar em ambos os casos, sendo que na soma

Figura 57 – Comparação entre *Array* esparsos. (a) *Array* esparso determinado pelo algoritmo genético e (b) o seu diagrama de radiação. (c) *Array* esparso e (d) diagrama de radiação apresentados por Yang, Chen e Shi (2006). Neste exemplo, ambos *arrays* esparsos possuem 16 elementos em uma abertura máxima de 37 elementos e os pesos k_1 , k_2 e k_3 da função aptidão foram definidos como 0,5, 1 e 2 respectivamente.



Fonte – Elaborada pelo autor

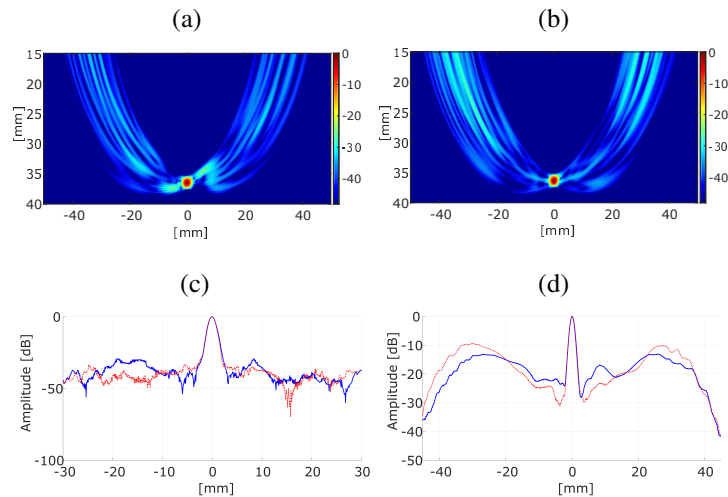
das linhas, a PSF gerada pelo *array* esparso encontrado pelo AG, representada pela linha azul contínua, possui uma magnitude maior perto do defeito em relação a soma das linhas da PSF gerada pelo *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006).

Utilizando os *arrays* esparsos para gerar as imagens dos experimentos disponibilizados pelo CSIC, a imagem do bloco de alumínio criada pelo *array* esparso encontrado neste trabalho (Figura 59 (a)) apresenta uma intensidade menor de artefatos em comparação a imagem do bloco de alumínio gerada utilizando o *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 59 (b)), principalmente na região destacada nas imagens.

Além da intensidade dos artefatos, a resolução lateral foi avaliada através do corte da imagem na região dos furos 4 (Figura 59 (c)) e 6 (Figura 59 (d)). De modo que pode-se concluir que a imagem gerada pelo *array* esparso encontrado neste trabalho, representada pela linha contínua azul, possui resolução lateral similar a imagem gerada pelo *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006), representado pela linha pontilhada vermelha.

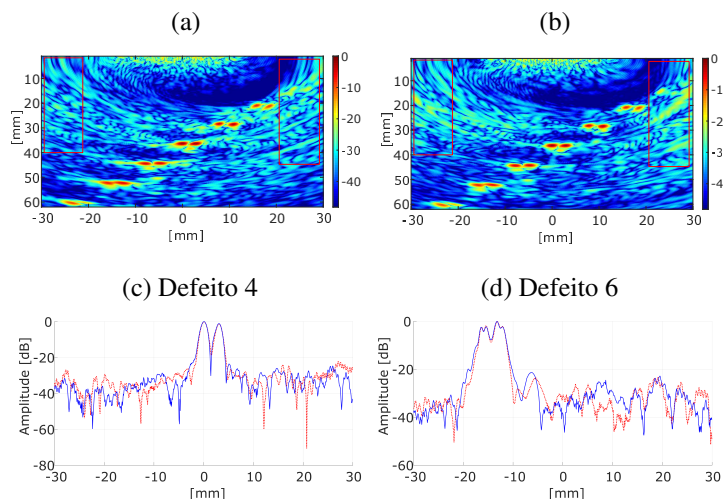
Para a região 6 do *phantom*, a imagem criada utilizando o *array* esparso encontrado pelo AG (Figura 60 (a)) possui artefatos com menores intensidade quando comparado com a imagem gerada a partir do *array* esparso apresentado por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 60 (b)). Além disso, o corte horizontal (Figura 60 (c)) e corte vertical (Figura 60 (d)) das imagens geradas pelos *arrays* mostram que os *arrays* geraram as imagens com resolução lateral similar.

Figura 58 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão com pesos 0,5, 1 e 2 para k_1 , k_2 e k_3 . (b) PSF criada utilizando o *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006).



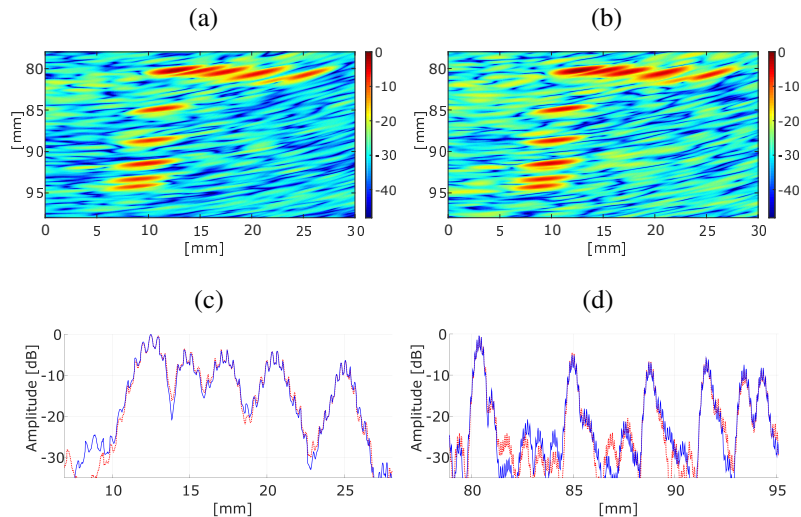
Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 59 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo AG a partir da primeira função aptidão e (b) *array* proposto por Yang, Chen e Shi (2006), das quais, as regiões onde os artefatos estão presentes foram destacadas. Além destas imagens, apresentam-se cortes na região do defeito 4 (c) e do defeito 6 (d). Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006).



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 60 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo AG a partir a primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). Ilustra-se os cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para avaliar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006).



Fonte – Elaborada pelo autor

Os *arrays* esparsos encontrados pelo AG conseguiram gerar imagens de forma similar ao *array* apresentado por Yang, Chen e Shi (2006), ao modo que o uso dos pesos k_n possibilitaram encontrar os *arrays* esparsos com diferentes características.

6.2.3 Comparação Entre Metodologias - Hu et al. (2017)

O último resultado apresentado utilizando a primeira função aptidão foi encontrado através da busca por um *array* esparso com 8 elementos em uma abertura máxima de 32 elementos ($15,5 \lambda$). Assim, a configuração de *array* esparso encontrado pelo AG possui a mesma quantidade de elementos e abertura que o *array* esparso apresentado por Hu et al. (2017).

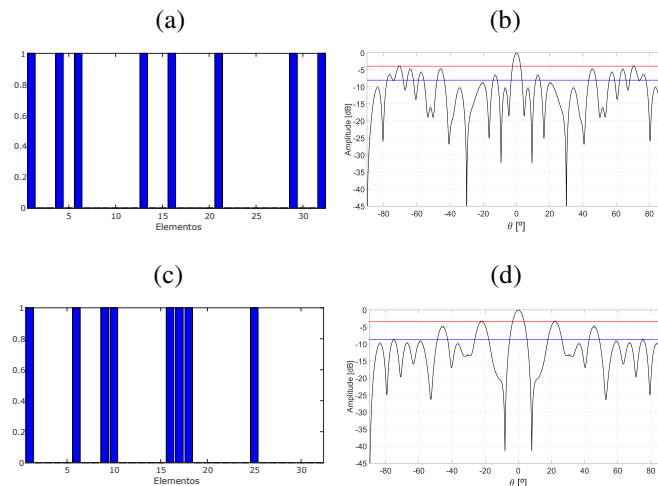
Nesse trabalho apresentado por Hu et al. (2017), os autores utilizaram o AG e definiram a função aptidão (FA) como a soma da abertura angular do lóbulo principal (AA) com o nível máximo dos lóbulos laterais (ML), conforme pode ser observado em (24). Além destes parâmetros extraídos do diagrama de radiação, os autores adotaram a estratégia de ponderar os termos da função aptidão utilizando os pesos k_n , sendo utilizado os pesos 1 e 1.

Para realizar a busca pelo *array* esparso com 8 elementos em uma abertura de 32 elementos, a função aptidão utilizada é descrita em (31), sendo somente alterado a quantidade de elementos para penalização, que para este caso foi reduzida de 16 para 8 elementos.

Após 85 iterações, o *array* esparsos encontrado pelo AG (Figura 61 (a)) têm o seu diagrama de radiação apresentado na Figura 61 (b), em que foram encontrados os valores de: abertura angular do lóbulo principal de $9,14^\circ$, média dos picos dos lóbulos laterais de $-8,02$ dB e nível máximo do lóbulo lateral de $-3,90$ dB.

Em contrapartida, o resultado obtido por Hu et al. (2017) é apresentado na Figura 61 (c), com os valores obtidos do diagrama de radiação (Figura 61 (d)) de: abertura angular do lóbulo principal de $13,74^\circ$, média dos picos dos lóbulos laterais de $-8,63$ dB e nível máximo do lóbulo lateral de $-3,34$ dB. Comparando ambos os diagramas, pode-se observar que o lóbulo principal e nível máximo do lóbulo lateral são menores para o diagrama correspondentes ao do *array* encontrado neste trabalho (Figura 61 (b)).

Figura 61 – Comparação entre *arrays* esparsos. (a) *Array* esparsos determinado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) o seu diagrama de radiação. (c) *Array* esparsos e (d) diagrama de radiação apresentados por Hu et al. (2017).

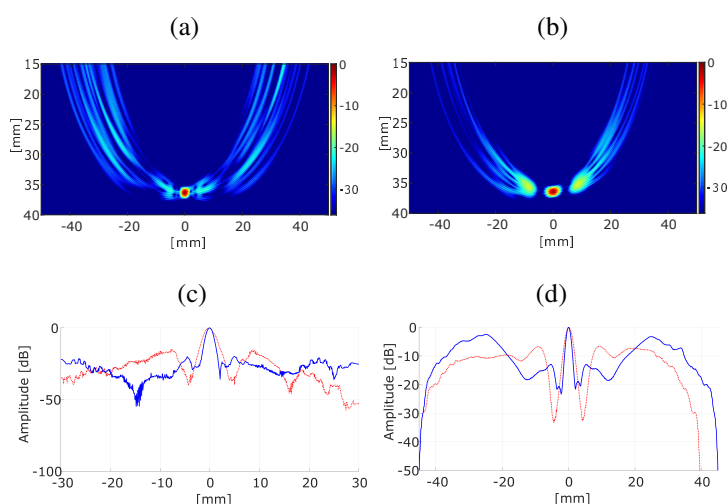


Fonte – Elaborada pelo autor

Quando examinadas as PSFs geradas pelos *arrays* esparsos, pode-se observar que a PSF gerada com o *array* encontrado pelo AG (Figura 62 (a)) possui melhor resolução lateral e menor intensidade dos artefatos distribuídos pela imagem. Entretanto, a PSF gerada utilizando o *array* proposto por Hu et al. (2017) (Figura 62 (b)) apresenta uma região com baixa amplitude ao redor do ponto refletor, seguido por artefatos com alta intensidade, o que ajudará na identificação dos espaços entre os defeitos, porém, essa região com alta intensidade indica que as imagens geradas por este *array* vão possuir regiões com artefatos com altas intensidades nas imagens.

A linha (Figura 62 (c)) e a soma das linhas (Figura 62 (d)) da PSF também podem ser utilizadas para ilustrar essas diferenças entre as duas PSFs. Para a PSF gerada pelo *array* esparsos encontrado pelo AG (linha azul contínua), observa-se que a resolução lateral é melhor e que os artefatos de alta intensidade estão longe do ponto refletor, porém, logo após identificar o defeito, a PSF gerada pelo *array* proposto por Hu et al. (2017) (linha vermelha pontilhada) possui uma menor amplitude ao lado do defeito.

Figura 62 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo AG a partir a primeira função aptidão. (b) PSF criada utilizando o *array* proposto por Hu et al. (2017). A linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) são incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Hu et al. (2017).



Fonte – Elaborada pelo autor

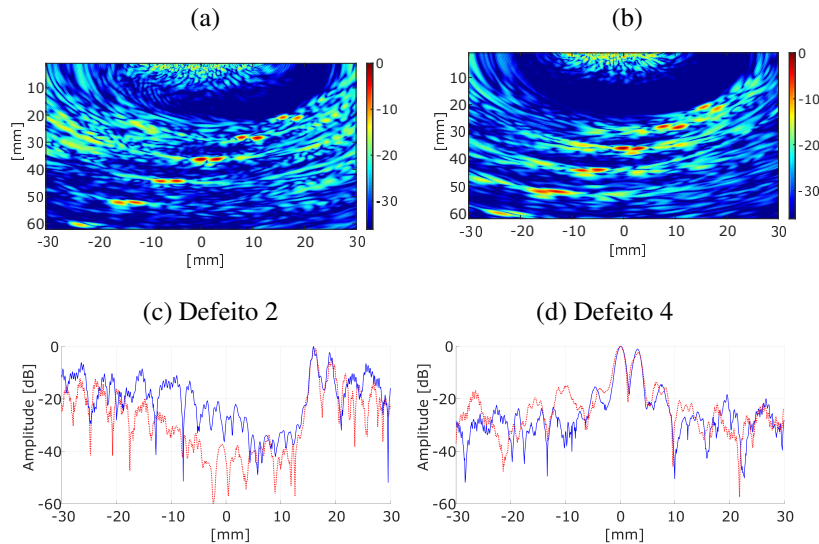
Essas características entre as PSFs de cada *array* esparso podem ser observadas ao analisarmos o experimento do bloco de alumínio, de forma que para o *array* esparso encontrado utilizando o algoritmo genético, a imagem gerada (Figura 63 (a)) apresenta maiores intensidades de artefatos longe os pares de defeitos. Em contrapartida, a imagem gerada utilizando o *array* esparso apresentado por Hu et al. (2017) (Figura 63 (b)) possui artefatos com altas intensidades próximos aos defeitos, conforme observado na PSF gerada por esse *array*. Além disso, cortes nos furos 2 (Figura 63 (c)) e 4 (Figura 63 (d)) possibilitam visualizar que na região interna dos pares de furos os defeitos foram detectados com amplitudes similares para os dois *arrays*.

Para a região 6 do *phantom*, o *array* esparso encontrado pelo AG gerou a imagem apresentada na Figura 64 (a) e, quando comparado com a imagem gerada utilizando os *arrays* esparsos apresentados por Hu et al. (2017) (Figura 64 (b)), pode-se observar que o *array* esparso encontrado neste trabalho gerou a imagem na qual os defeitos estão melhores evidenciados.

Ao analisar as amplitudes dos defeitos na horizontal (Figura 64 (c)) e vertical (Figura 64 (d)), não é possível identificar que a imagem gerada pelo *array* encontrado neste trabalho (linha contínua azul) possui um melhor contraste em relação a imagem gerada pelo *array* esparso proposto por Hu et al. (2017), dado pelo fato da maneira em que a informação foi extraída, em forma de linha e não considerando o desenho por completo.

Tanto o *array* encontrado pelo AG quanto o *array* apresentado por Hu et al. (2017)

Figura 63 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Hu et al. (2017). Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 2 (c) e do defeito 4 (d) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Hu et al. (2017).



Fonte – Elaborada pelo autor

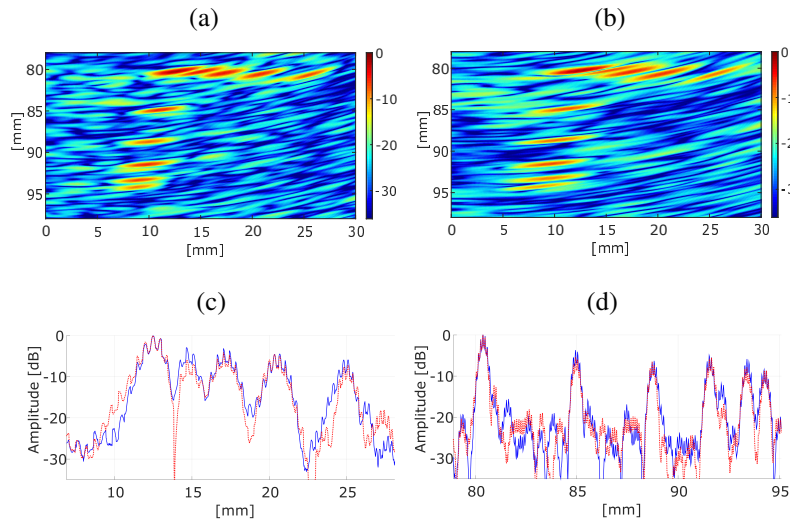
conseguiram gerar as imagens na qual os defeitos foram identificados. Verifica-se que o *array* esparso encontrado gerou as imagens com algumas vantagens, como por exemplo o melhor contraste na imagem do *phantom* e a ausência do artefato de alta intensidade ao lado do defeito na PSF gerada pelo *array* esparso apresentado por Hu et al. (2017) (Figura 62 (b)).

Após avaliar os *arrays* esparsos encontrados pelo AG comparando-os as imagens geradas pelos os *arrays* propostos na metodologia, pode-se concluir que as informações extraídas do diagrama de radiação conseguiram avaliar a performance dos indivíduos (*arrays* esparsos) da população e que foram obtidos boas configurações de *arrays* esparsos não periódicos.

6.3 SEGUNDA FUNÇÃO APTIDÃO

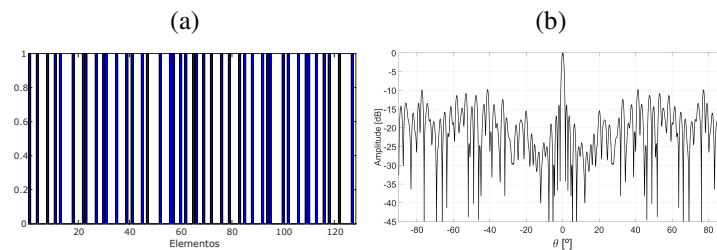
A segunda função aptidão criada para avaliar os indivíduos (*array* esparsos) da população do algoritmo genético foi desenvolvida a partir da comparação entre duas PSFs, sendo a primeira, a PSF gerada utilizando um *array* completo com abertura definida no início da busca e, a segunda, a PSF gerada utilizando o indivíduo da população. Deste modo, o resultado encontrado na busca por um *array* esparso com 43 elementos em uma abertura máxima de 128 elementos ($63,5 \lambda$) é apresentado na Figura 65 (a) e o seu diagrama de radiação na Figura 65 (b).

Figura 64 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Hu et al. (2017), sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para ilustrar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Hu et al. (2017).



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 65 – (a) *Array* esparso com 43 elementos encontrado utilizando a função aptidão baseada na comparação das PSFs. (b) Diagrama de radiação do *array*.



Fonte – Elaborada pelo autor

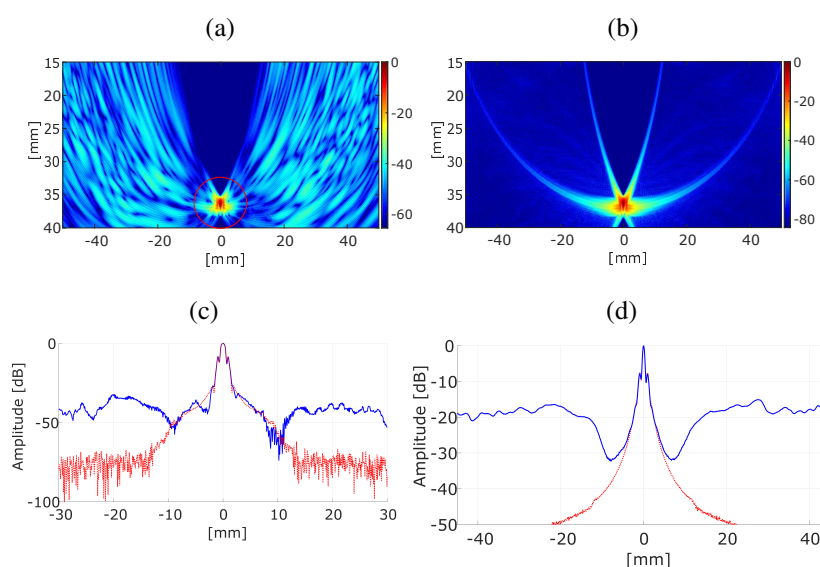
Após 125 iterações, o *array* esparso encontrado pelo AG é apresentado na Figura 65 (a). Ao analisar o diagrama de radiação criada utilizando a configuração de *array* esparso encontrado (Figura 65 (b)), observa-se que os menores níveis dos lóbulos laterais estão próximos ao lóbulo principal, o que indica que as imagens geradas pelo *array* esparso vão apresentar uma baixa intensidade ao redor do defeito. Além disso, a abertura angular do lóbulo principal ($2,94^\circ$) é similar a abertura angular do *array* completo ($2,90^\circ$). Logo, essa semelhança indicam que as imagens geradas pelo *array* esparso vão possuir resolução lateral similar as imagens geradas pelo *array* completo.

Ao compararmos as PSFs geradas pelo *array* esparso encontrado pelo AG (Figura 66

(a)) com a PSF gerada utilizando o *array* completo com 128 elementos (Figura 66 (b)), pode-se observar que na região próxima ao ponto refletor as imagens são similares. Além disso, na PSF gerada pelo *array* esparsa encontrado pelo AG (Figura 66 (a)) existe uma região ao lado do defeito, destacada na figura, onde existe uma área com baixa amplitude separando o ponto refletor e os artefatos presentes na imagem.

Quando extraído as informações da linha da imagem (Figura 66 (c)) e soma das linhas da imagem (Figura 66 (d)), pode-se observar que na região próxima ao defeito, a PSF do *array* esparsa (linha azul contínua) se assemelha com a PSF do *array* completo, porém, nas regiões longe do defeito, existe a diferença entre amplitudes. Isto é esperado quando se utiliza o *array* esparsa, de forma que esta alta intensidade pode ser reduzida mas não evitada.

Figura 66 – Análise da PSF através da comparação entre as imagens, linha extraída da imagem e soma das linhas da imagem. (a) PSF do *array* esparsa encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) PSF do *array* completo com 128 elementos. (c) linha e (d) soma das linhas da imagem extraída das PSF onde o *array* esparsa está representado pela linha azul e o *array* completo pela linha vermelha.

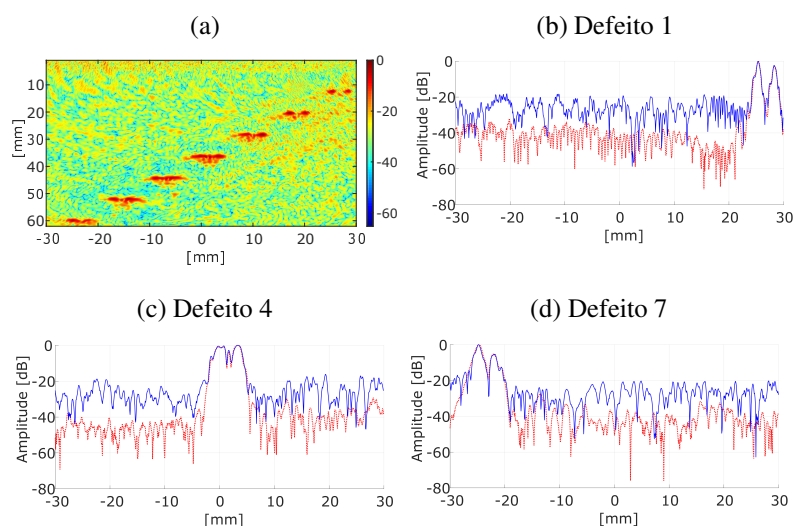


Fonte – Elaborada pelo autor

Analisando o experimento do bloco de alumínio, em que a Figura 67 (a) ilustra a imagem gerada utilizando o *array* esparsa encontrado pelo AG. Observou-se que foram detectados os 7 defeitos do bloco de alumínio, ao modo que ao analisar as amplitudes da imagem realizando os cortes nos defeitos 1 (Figura 67 (b)), 4 (Figura 67 (c)) e 7 (Figura 67 (d)), pode-se observar que perto dos defeitos as amplitudes geradas pelo *array* esparsa (linha contínua azul) foram similares as amplitudes do *array* completo, cuja imagem foi apresentada na Figura 41 (a). Entretanto, as amplitudes da imagem gerada pelo *array* esparsa se mantiveram altas nas regiões onde não há presença dos defeitos.

O mesmo comportamento pôde ser observado analisando a imagem do *phantom Dansk*

Figura 67 – Experimento prático do bloco de alumínio. (a) Imagem da peça gerada a partir do *array* esparsa encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. As regiões dos pares de defeitos 1(b), 4(c) e 7(d) foram melhores analisados extraindo uma linha da imagem do bloco de alumínio gerada pelo *array* esparsa (linha em azul) e pelo *array* completo com 128 elementos (linha tracejada em vermelho).



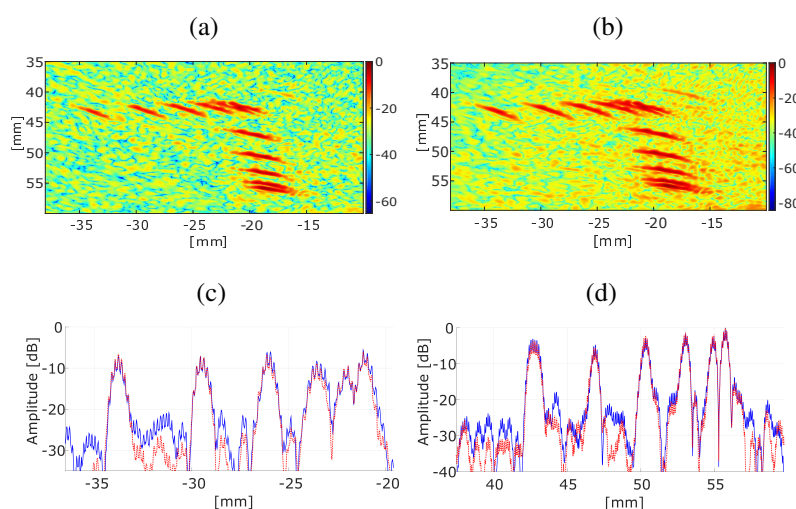
Fonte – Elaborada pelo autor

modelo 525, na qual foi utilizado o *array* esparsa encontrado pelo AG para gerar as imagens nas regiões 3 (Figura 68 (a)) e 6 (Figura 69 (a)), em que os 11 fios de *nylon* foram identificados de forma similar aos fios de *nylon* da imagem gerada pelo *array* completo com 128 elementos, sendo estes apresentados na Figura 68 (b) para região 3 e na Figura 69 (b) para região 6.

Ao realizar os cortes horizontais (Figura 68 (c)) e verticais da imagem gerada na região 3 (Figura 68 (d)), observa-se que o *array* esparsa encontrado pelo AG gerou a imagem com amplitudes parecidas (linha azul contínua) as amplitudes da imagem gerada pelo *array* completo (linha vermelha pontilhada), com uma pequena diferença nas regiões onde os fios de *nylon* estão ausentes, ao modo que o mesmo comportamento pode ser observado nos cortes das imagens da região 6 na horizontal (Figura 69 (c)) e na vertical (Figura 69 (d)).

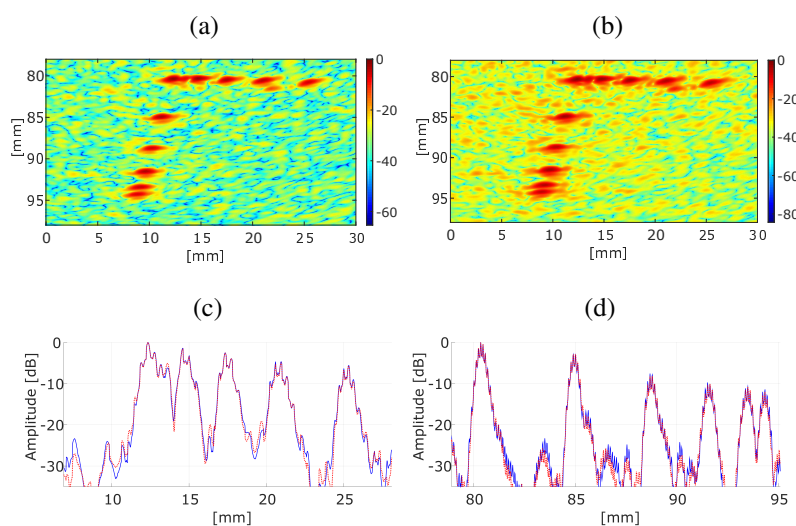
Assim, as imagens dos experimentos disponibilizados pelo CSIC, geradas pelo *array* esparsa com 43 elementos, identificaram os defeitos de forma similar as imagens geradas pelo *array* completo de 128 elementos, com a diferença das maiores amplitudes onde os defeitos não estão presentes. Entretanto, o tempo de processamento para gerar as imagens utilizando o *array* esparsa é bem menor e, em aplicações que necessitam a geração das imagens em tempo real, esse tipo de deterioração na qualidade da imagem pode ser desconsiderada e o *array* esparsa utilizado.

Figura 68 – Experimento prático do *phantom* com foco na região 3 onde existem 11 fios trançados de *nylon*. (a) Imagem do experimento gerada utilizando o *array* esparso de 43 elementos encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) Imagem do experimento gerada utilizando o *array* completo com 128 elementos. (c) Corte horizontal e (d) corte vertical da imagem sendo destacado as regiões onde existem os fios de *nylon*. A linha contínua azul ilustra o corte gerado pelo *array* esparso e a linha pontilhada vermelha corresponde ao corte da imagem gerada pelo *array* completo.



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 69 – Experimento prático do *phantom* com foco na região 6 onde existem 11 fios trançados de *nylon*. (a) Imagem do experimento gerada utilizando o *array* esparso de 43 elementos encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) Imagem do experimento gerada utilizando o *array* completo com 128 elementos. (c) Corte horizontal e (d) corte vertical da imagem sendo destacado as regiões onde existem os fios de *nylon*. A linha contínua azul ilustra o corte gerado pelo *array* esparso e a linha pontilhada vermelha corresponde ao corte da imagem gerada pelo *array* completo.



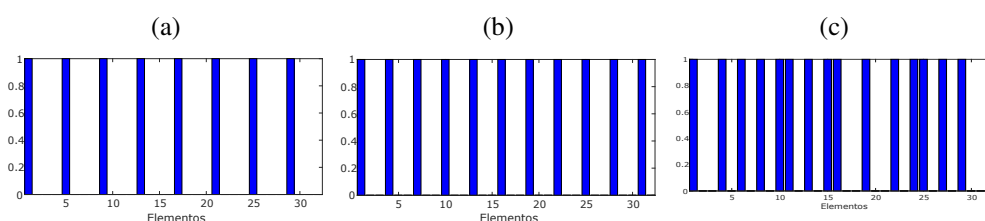
Fonte – Elaborada pelo autor

6.3.1 Comparação Entre Metodologias - Lockwood et al. (1996a)

A segunda função aptidão também foi utilizada no algoritmo genético para criar um *array* esparsos com 16 elementos em uma abertura máxima de 32 elementos ($15,5 \lambda$). Neste caso, a abertura e quantidade de elementos foram definidas para que coincida com os valores dos *arrays* esparsos apresentados por Lockwood et al. (1996a), na qual os autores utilizam um *array* para emitir (Figura 70 (a)) e outro para receber (Figura 70 (b)).

Para este caso, a função aptidão foi desenvolvida a partir da comparação entre a PSF criada pelo *array* completo com 32 elementos com a PSF gerada pelo *array* esparsos (indivíduo). Após 63 iterações, o algoritmo genético encontrou o *array* esparsos apresentado na Figura 70 (c), com o respectivo diagrama de radiação do *coarray* apresentado na Figura 71 (a).

Figura 70 – Comparação entre *Array* esparsos. (a) *Array* emissor (b) *array* receptor apresentados por Lockwood et al. (1996a). (c) *Array* esparsos determinado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. Ambos resultados utilizam 16 elementos em uma abertura máxima de 32 elementos ($15,5 \lambda$).

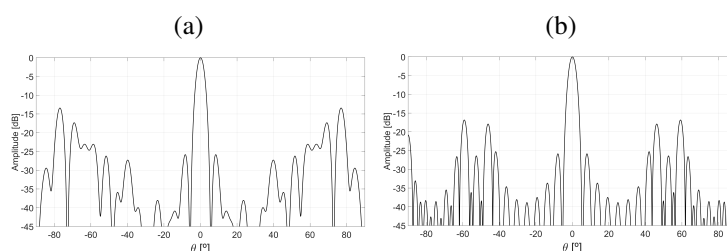


Fonte – Elaborada pelo autor

Ao analisar o diagrama de radiação do *coarray* do *array* esparsos encontrado pelo AG observa-se uma característica similar ao diagrama de radiação do *array* esparsos de 43 elementos apresentado anteriormente (Figura 65 (b)), na qual os menores lóbulos laterais do diagrama de radiação estão próximos ao lóbulo principal. A mesma observação pode ser realizada ao comparar o diagrama de radiação do *coarray* encontrado pelo AG com o *coarray* formado pelos *arrays* propostos pelos autores (Figura 70 (b)). Deste modo, pode-se constatar que os artefatos com maior intensidade nas imagens estarão longe do defeito.

Pode ser observado na PSF gerada pelo *array* esparsos encontrado pelo AG (Figura 72 (a)) que ao redor do defeito existe uma região (indicada na imagem) com baixa amplitude e que separa o ponto refletor e os artefatos com maior intensidade, ao modo que na análise feita do diagrama de radiação já indicava que as imagens possuiriam esse comportamento. Ao analisar a PSF gerada pelos *arrays* propostos por Lockwood et al. (1996a) (Figura 72 (b)), observa-se que essa região também está presente, porém, a intensidade dos artefatos estão maiores e mais concentrados em uma única região. Esta afirmação pode ser reforçada ao comparar a linha retirada da imagem (Figura 72 (c)) e a soma das linhas da imagem (Figura 72 (d)), em que as PSFs possuem resolução lateral similar, porém a PSF gerada pelos *arrays* esparsos propostos

Figura 71 – Diagrama de radiação do *coarray* utilizando:(a) o *coarray* do *array* esparso apresentado na Figura 70 (c) e (b) o *coarray* dos *arrays* esparsos apresentados por Lockwood et al. (1996a).



Fonte – Elaborada pelo autor

por Lockwood et al. (1996a), representada pela linha pontilhada vermelha, possui artefatos com maior intensidade.

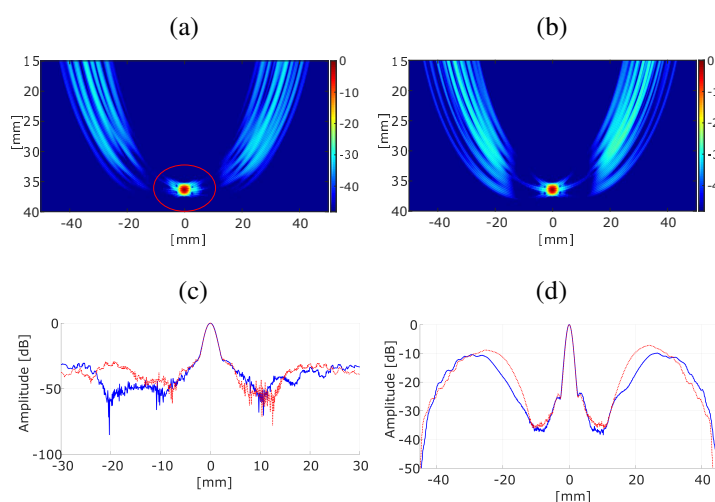
Essa característica apontada na PSF também pode ser notada ao analisarmos as imagens geradas do bloco de alumínio, na qual a Figura 73 (a) ilustra a imagem gerada pelo *array* esparso encontrado pelo AG, e a Figura 73 (b) apresenta a imagem do bloco gerada pelos *arrays* esparsos apresentados por Lockwood et al. (1996a). Nota-se que foi destacado na imagem as regiões longe do defeito onde a intensidade dos artefatos foram maiores para a imagem gerada pelos *arrays* propostos por Lockwood et al. (1996a).

Ao analisar o corte da imagem nos defeitos 3 (Figura 73 (c)) e 4 (Figura 73 (d)), sendo representado com a linha azul contínua o corte da imagem gerada pelo *array* esparso encontrado neste trabalho e com a linha vermelha pontilhada a imagem gerada pelos *arrays* propostos pelos autores, observa-se que a resolução lateral foi similar nas duas imagens.

O mesmo comportamento ocorre nas imagens geradas da região 6 do *phantom*, em que a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado neste trabalho (Figura 74 (a)) possui artefatos com menor intensidade quando comparado com a imagem gerada pelos *arrays* esparsos apresentados por Lockwood et al. (1996a) (Figura 74 (b)). E ao analisarmos os cortes horizontais e verticais dos fios de *nylon*, na qual a linha contínua azul indica a imagem gerada pelo *array* esparso encontrado neste trabalho e a linha pontilhada vermelha a imagem gerada pelos *arrays* esparso apresentado pelos autores, observa-se que ambas as amplitudes dos defeitos são similares em ambos os cortes.

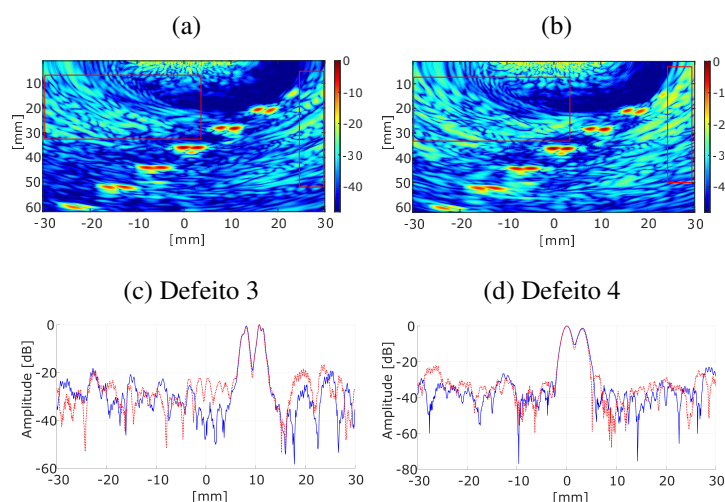
O *array* esparso encontrado, quando comparado com os *arrays* esparsos propostos por Lockwood et al. (1996a), geraram imagens com resolução lateral similar, contudo, com redução nas intensidades dos artefatos. Dessa forma, a função aptidão baseada na comparação das PSFs utilizando a função DTW conseguiu avaliar os indivíduos do algoritmo genético para realizar a busca por um *array* esparso com 16 elementos em uma abertura máxima de 32 elementos.

Figura 72 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) PSF criada utilizando o *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a).



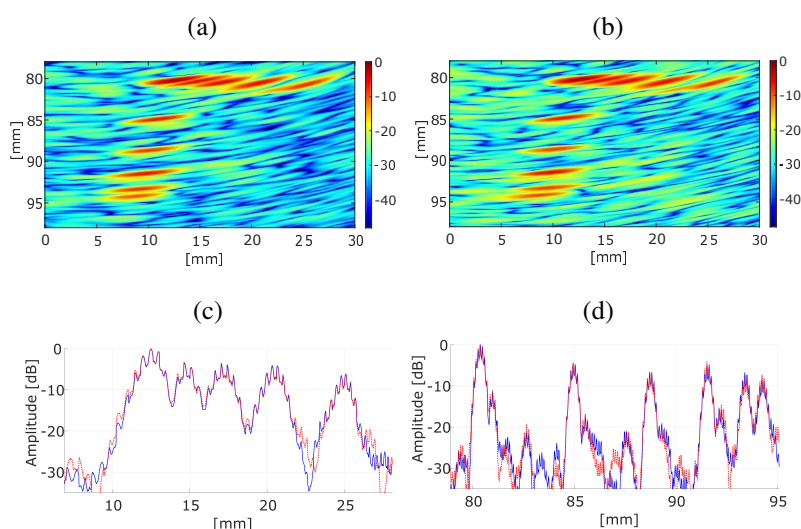
Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 73 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a), nas quais as áreas onde os artefatos estão presentes foram ressaltadas. Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 3 (c) e do defeito 4 (d) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a).



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 74 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a), sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d). Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Lockwood et al. (1996a).



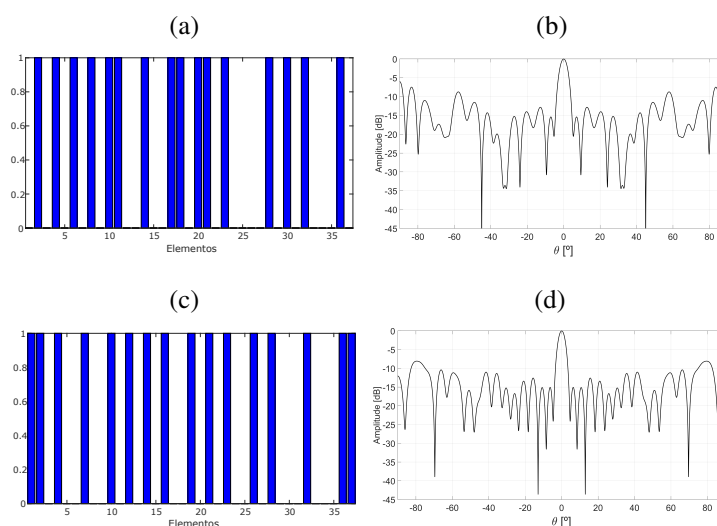
Fonte – Elaborada pelo autor

6.3.2 Comparação Entre Metodologias - Yang, Chen e Shi (2006)

Alterou-se os valores da função aptidão para realizar uma busca por um *array* esparso com 16 elementos em uma abertura máxima de 37 elementos, e assim, utilizá-lo para comparar com o *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). Após 65 iterações, o *array* esparso encontrado pelo AG (Figura 75 (a)) possui o seu diagrama apresentado na Figura 75 (b). Quando comparado com o diagrama de radiação do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 75 (c)) ilustrado na Figura 75 (d), pode-se observar que a abertura angular do lóbulo principal ($9,26^\circ$) do diagrama de radiação do *array* apresentado pelos autores é menor que o abertura angular do lóbulo principal ($9,50^\circ$) do diagrama criado pelo *array* encontrado pelo algoritmo genético, o que ocasionará em imagens com pior resolução lateral. Além disso, observa-se que no diagrama de radiação do *array* esparso encontrado pelo AG os menores lóbulos laterais estão próximos ao lóbulo principal, do mesmo modo que os diagramas de radiação dos outros resultados obtidos utilizando a segunda função aptidão.

Ao utilizar o *array* esparso encontrado para gerar a PSF (Figura 76 (a)), observa-se na imagem a mesma característica notada nas outras PSFs apresentadas; A existência de uma região com baixa amplitude entre o defeito e os artefatos com maior intensidade. De forma complementar, a PSF gerada pelo *array* proposto por Yang, Chen e Shi (2006) é apresentada na

Figura 75 – Comparação entre *Array* esparsos. (a) *Array* esparso determinado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) o seu diagrama de radiação. (c) *Array* esparso e (d) diagrama de radiação apresentados por Yang, Chen e Shi (2006). Neste exemplo, ambos *arrays* esparsos possuem 16 elementos em uma abertura máxima de 37 elementos (18λ).



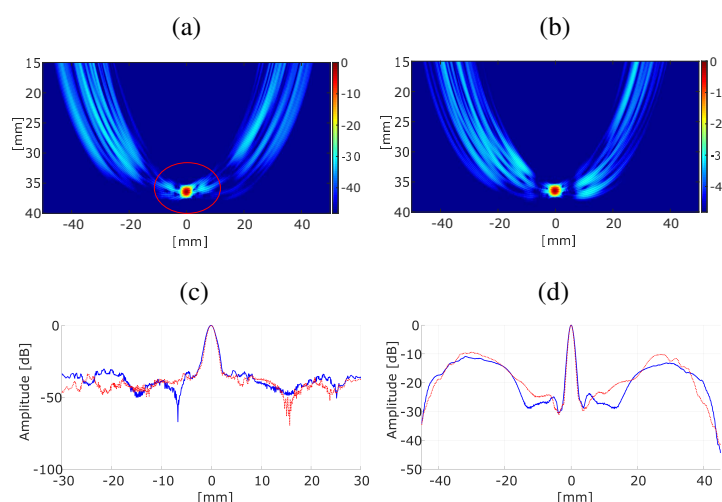
Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 76 (b), e, ao analisar a linha da PSF (Figura 76 (c)) e a soma das linhas da PSF (Figura 76 (d)), pode-se observar que a PSF da Figura 76 (a), representada pela linha contínua azul, possui resolução lateral ligeiramente pior, porém, a intensidade dos artefatos é menor. Dessa forma, o *array* encontrado neste trabalho gerará imagens com resolução lateral um pouco pior as imagens geradas utilizando os *arrays* esparsos propostos por Yang, Chen e Shi (2006), mas com artefatos com menor intensidade.

Esse comportamento pode ser observado ao gerar as imagens dos experimentos disponibilizados pelo CSIC. De modo que a imagem do bloco de alumínio gerada pelo *array* esparso (Figura 77 (a)) apresenta artefatos com menor intensidade em relação a imagem do bloco de alumínio gerada pelo *array* esparso apresentado por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 77 (b)). A característica citada sobre as resoluções laterais também pode ser observada quando analisado os cortes feitos no defeito 3 (Figura 77 (c)) e defeito 4 (Figura 77 (d)), nos quais, ambas imagens identificam o defeito quase que com resolução lateral similar, porém existe uma ligeira vantagem para a imagem gerada utilizando o *array* esparso apresentado pelos autores (vermelha pontilhada).

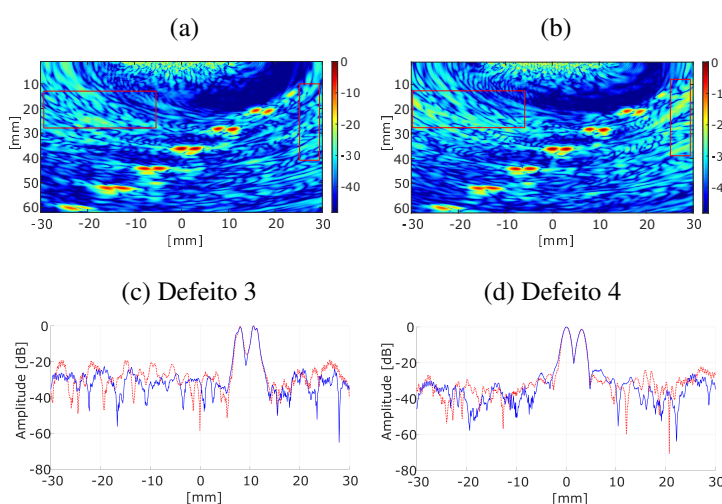
Analisando a imagem do *phantom* na região 6, as intensidades dos artefatos são menores na imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético (Figura 78 (a)) em relação a imagem gerada pelo *array* esparso apresentado por Yang, Chen e Shi (2006) (Figura 78 (b)). O corte horizontal (Figura 78 (c)) e vertical (Figura 78 (d)) dos defeitos mostram que ambos os *arrays* conseguiram identificar os defeitos de forma similar, sendo representado

Figura 76 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) PSF criada utilizando o *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006).



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 77 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006), nas quais as áreas onde os artefatos estão presentes foram ressaltadas. Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 4 (c) e do defeito 5 (d) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Yang, Chen e Shi (2006).

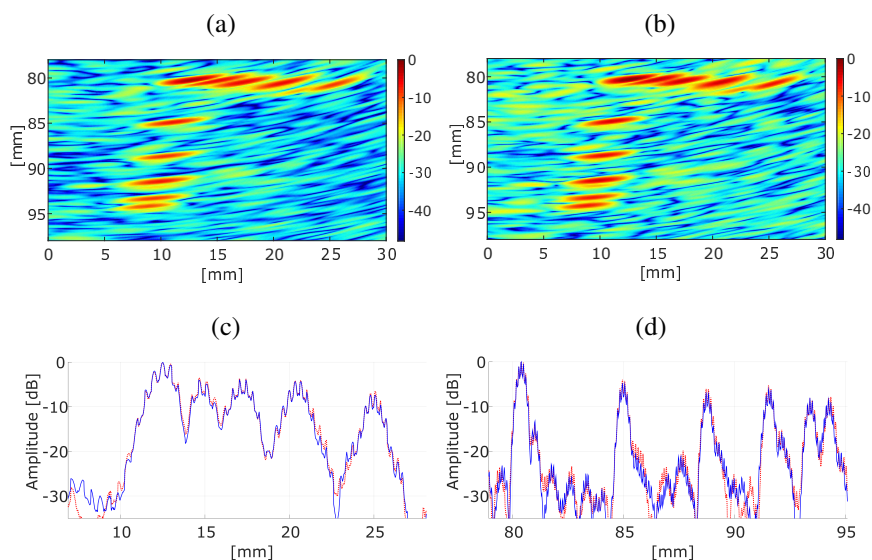


Fonte – Elaborada pelo autor

pela linha contínua azul a imagem gerada pelo *array* esparsa encontrado neste trabalho e a linha vermelha pontilhada a imagem gerada pelo *array* esparsa apresentado por Yang, Chen e Shi (2006).

O resultado obtido pelo AG utilizando a segunda metodologia conseguiu gerar imagens com resolução lateral similar as imagens geradas utilizando os *arrays* propostos por Yang, Chen e Shi (2006), porém, com artefatos com menor intensidade.

Figura 78 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparsa encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) *array* esparsa proposto por Yang, Chen e Shi (2006), sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para ilustrar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparsa encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparsa proposto por Yang, Chen e Shi (2006).



Fonte – Elaborada pelo autor

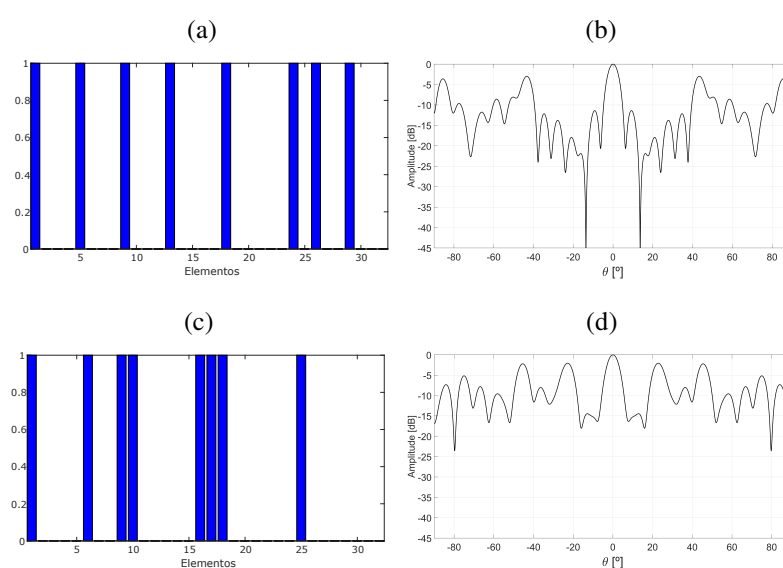
6.3.3 Comparação Entre Metodologias - Hu et al. (2017)

Utilizou-se a segunda função aptidão para criar um *array* esparsa com 8 elementos em uma abertura máxima de 32 elementos ($15,5 \lambda$), de forma que o resultado obtido se igualasse ao resultado apresentado por Hu et al. (2017). Após 91 iterações, o *array* encontrado pelo AG (Figura 79 (a)) tem o seu diagrama de radiação apresentado na Figura 79 (b), em que é possível observar que os menores níveis dos lóbulos laterais estão perto do lóbulo principal.

O *array* apresentado por Hu et al. (2017) é ilustrado na Figura 79 (c), na qual o seu diagrama de radiação é apresentado na Figura 79 (d). Comparando ambos os diagramas de radiação, observa-se que no diagrama de radiação do *array* esparsa encontrado pelo AG os

níveis dos lóbulos laterais são menores em grande parte do diagrama, e que a abertura angular do lóbulo principal do *array* esparsos encontrado neste trabalho ($10,28^\circ$) é menor que a abertura angular do diagrama de radiação do *array* esparsos apresentado por Hu et al. (2017) ($13,74^\circ$). Além dessas diferenças, o nível de energia do lóbulo secundário próximo ao lóbulo principal é alto para o diagrama de radiação do *array* proposto por Hu et al. (2017), o que resultará em artefatos com alta intensidade perto dos defeitos

Figura 79 – Comparação entre *Array* esparsos. (a) *Array* esparsos determinado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) o seu diagrama de radiação. (c) *Array* esparsos e (d) diagrama de radiação apresentados por Hu et al. (2017). Neste exemplo, ambos *arrays* esparsos possuem 8 elementos em uma abertura máxima de 32λ .



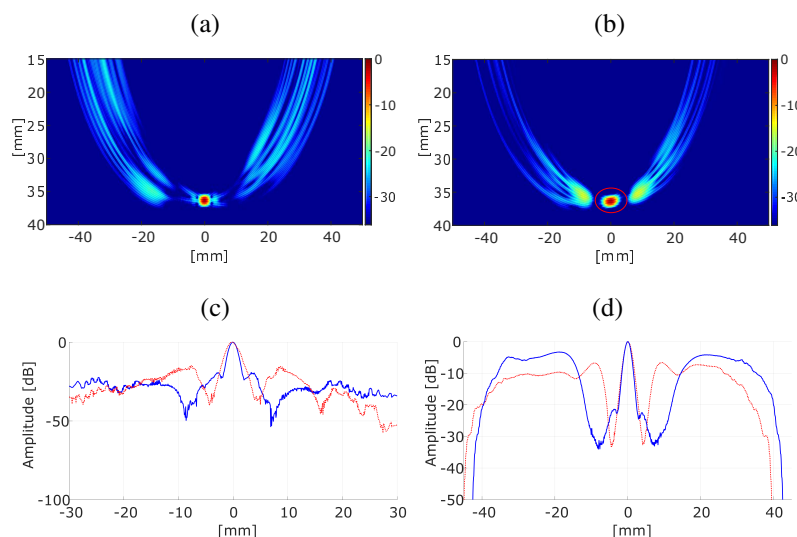
Fonte – Elaborada pelo autor

Analisando a PSF gerada utilizando os *arrays* esparsos, pode-se observar que a imagem gerada pelo *array* apresentado neste trabalho (Figura 80 (a)) possui uma melhor resolução lateral e artefatos com menores amplitudes que a PSF gerada utilizando o *array* esparsos apresentado pelos autores (Figura 80 (b)). Em específico, enfatizam-se os artefatos em amarelo ao lado do defeito na PSF apresentado na Figura 80 (b).

Quando analisada a linha extraída da PSF (Figura 80 (c)), nota-se que a PSF gerada pelo *array* esparsos encontrado neste trabalho (linha contínua azul) apresenta uma melhor resolução lateral que a PSF gerada pelo *array* esparsos proposto por Hu et al. (2017) (linha vermelha pontilhada). Entretanto, ao analisar a soma das linhas pode-se observar que o *array* esparsos encontrado pelo AG possui uma alta intensidade de artefatos longe das imagem.

Para o experimento do bloco de alumínio, a imagem gerada pelo *array* esparsos encontrado neste trabalho (Figura 81 (a)) apresenta uma maior intensidade nos artefatos longe dos defeitos, em contrapartida, o *array* esparsos apresentados pelos autores (Figura 81 (b)) possui

Figura 80 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. (b) PSF criada utilizando o *array* esparso proposto por Hu et al. (2017). Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esparso proposto por Hu et al. (2017).



Fonte – Elaborada pelo autor

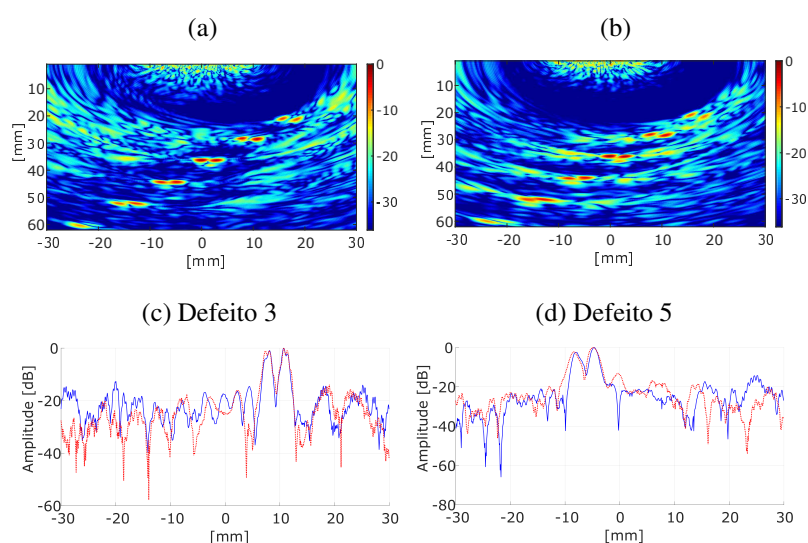
altos níveis de artefatos próximos dos defeitos, o que se interpreta como sendo uma desvantagem pois podem causar a má interpretação da imagem. Quando analisados os cortes da imagem nos defeitos 3 (Figura 81 (c)) e 5 (Figura 81 (d)), pode-se observar que ambos os *arrays* conseguiram identificar os defeitos, porém, o *array* encontrado neste trabalho apresentou um corte na imagem em que os defeitos foram ligeiramente melhor identificados (linha azul contínua).

Para o experimento do *phantom*, a imagem gerada pelo *array* esparso encontrado neste trabalho (Figura 82 (a)) apresentou um melhor contraste em relação a imagem gerada pelo *array* esparso apresentados pelos autores (Figura 82 (b)). Quando analisado o corte horizontal (Figura 82 (c)) e vertical (Figura 82 (d)) das imagens, a linha da imagem gerada pelo *array* apresentado pelos autores (vermelha pontilhada) identificou melhor o espaço entre os fios, porém, as amplitudes do sinal ficaram menores que a linha da imagem gerada pelo *array* esparso encontrado neste trabalho (azul contínuo).

6.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS FUNÇÕES APTIDÃO

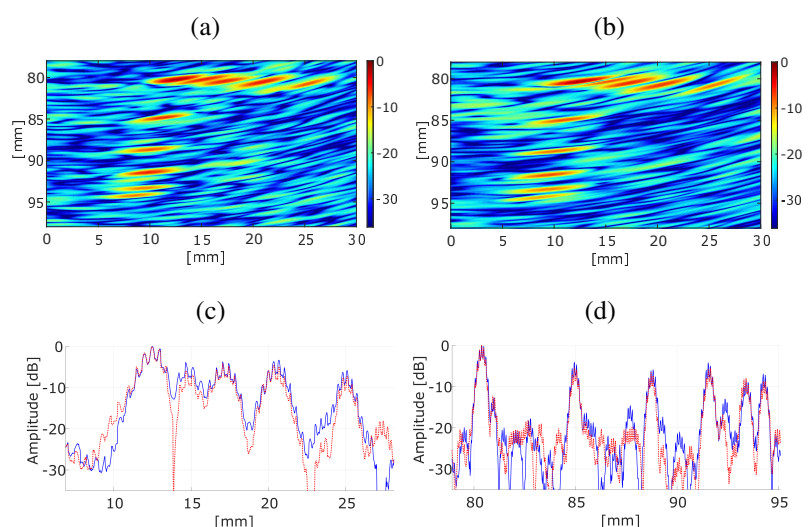
Dois funções aptidão foram propostas neste trabalho para avaliar os indivíduos da população do algoritmo genético e, conseqüentemente, encontrar configurações de *arrays* esparsos que gerassem boas imagens ultrassônicas. Ao comparar os *arrays* encontrados com os *arrays*

Figura 81 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Hu et al. (2017), nas quais as áreas onde os artefatos estão presentes foram ressaltadas. Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 4 (c) e do defeito 5 (d) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Hu et al. (2017).



Fonte – Elaborada pelo autor

Figura 82 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão e (b) *array* esparso proposto por Hu et al. (2017), sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para ilustrar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado pela metodologia proposta neste trabalho e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso proposto por Hu et al. (2017).

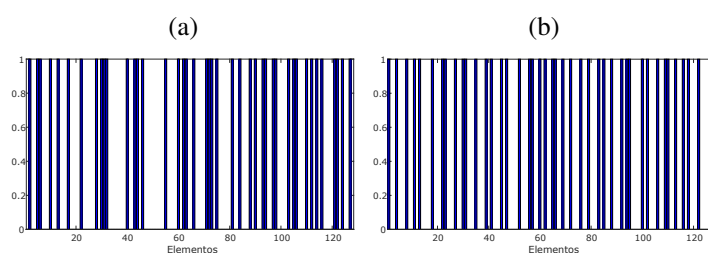


Fonte – Elaborada pelo autor

propostos por outros autores foi possível observar que os *arrays* apresentados neste trabalho geram imagens similares, em alguns casos, com menor intensidade nos artefatos. Entretanto, pode-se utilizar os dois *arrays* esparsos de 43 elementos encontrados utilizando cada função aptidão para comparar as metodologias.

A Figura 83 ilustra as duas configurações de *arrays* esparsos encontrados pelo AG, sendo Figura 84 (a) o *array* esparsos encontrado utilizando a primeira função aptidão, e a Figura 84 (b) o *array* esparsos encontrado utilizando a segunda função aptidão.

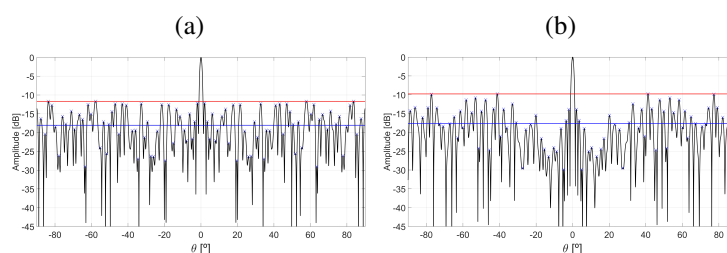
Figura 83 – Configurações de *arrays* esparsos encontrados pelo AG. (a) Configuração encontrado utilizando a primeira função aptidão. (b) Configuração de *array* esparsos encontrada utilizando a segunda função aptidão.



Fonte – Elaborada pelo autor

A Figura 84 (a) ilustra o diagrama de radiação gerado utilizando o *array* esparsos encontrado a partir da primeira função aptidão, de forma que a abertura angular do lóbulo principal (*AA*) é $2,76^\circ$, a média dos picos dos lóbulos laterais (*ME*) é $-18,05$ dB e o máximo do lóbulo lateral (*ML*) é $-11,69$ dB. Em contrapartida, a Figura 84 (b) apresenta o diagrama de radiação gerado a partir do *array* esparsos encontrado utilizando a segunda função aptidão, na qual foi obtido os valores de abertura angular do lóbulo principal (*AA*) de $2,94^\circ$, média dos picos dos lóbulos laterais (*ME*) de $-17,65$ dB e máximo do lóbulo lateral (*ML*) de $-9,77$ dB.

Figura 84 – Comparação entre diagrama de radiação. (a) Diagrama de radiação criado utilizando *array* esparsos encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão. (b) Diagrama de radiação criado utilizando *array* esparsos encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão.



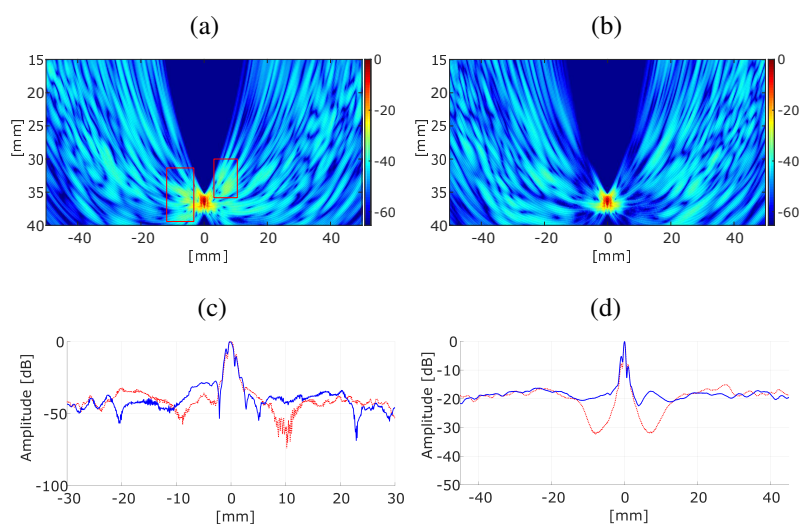
Fonte – Elaborada pelo autor

A Figura 85 ilustra as PSFs geradas pelos *arrays* esparsos com 43 elementos, de forma que foram apresentados, na Figura 85 (a), a PSF gerada pelo *array* esparsos encontrado utili-

zando a primeira função aptidão, e, na Figura 85 (b), a PSF gerada utilizando o *array* esperso encontrado ao utilizar a segunda função aptidão. Ao analisar as duas PSFs, pode ser observado que a primeira PSF possui alguns artefatos com alta intensidade perto do ponto refletor, conforme destacado na Figura 85 (a). Além disso, a segunda PSF apresenta uma região com baixas amplitudes entre o defeito e os artefatos com alta intensidade, conforme comentado anteriormente.

Ao analisar uma linha extraída da PSF (Figura 85 (c)) e a soma das linhas da PSF (Figura 85 (d)), algumas observações podem ser feitas. Ao analisar a linha extraída da Figura 85 (c), observa-se que as PSF possuem resolução lateral similar, entretanto, a PSF gerada utilizando o *array* esperso encontrado pela primeira metodologia, representada pela linha azul contínua, possui maiores amplitudes onde o defeito não está presente. Ao analisar a soma das linhas da PSF (Figura 85 (d)), observa-se que a PSF gerada pela segunda metodologia, representada pela linha vermelha pontilhada, identifica o defeito da mesma maneira que a primeira PSF, porém, possui menores amplitudes onde o defeito não está presente.

Figura 85 – Comparação entre PSFs. (a) PSF criada utilizando *array* esperso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão. (b) PSF criada utilizando *array* esperso encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão. Em complemento, a linha retirada da PSF (c) e soma das linhas da PSF (d) foram incluídas para avaliar a resolução e quantidade de artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa a PSF gerada utilizando o *array* esperso encontrado pela primeira metodologia e a linha pontilhada vermelha representa a PSF gerada a partir do *array* esperso encontrado pela segunda metodologia

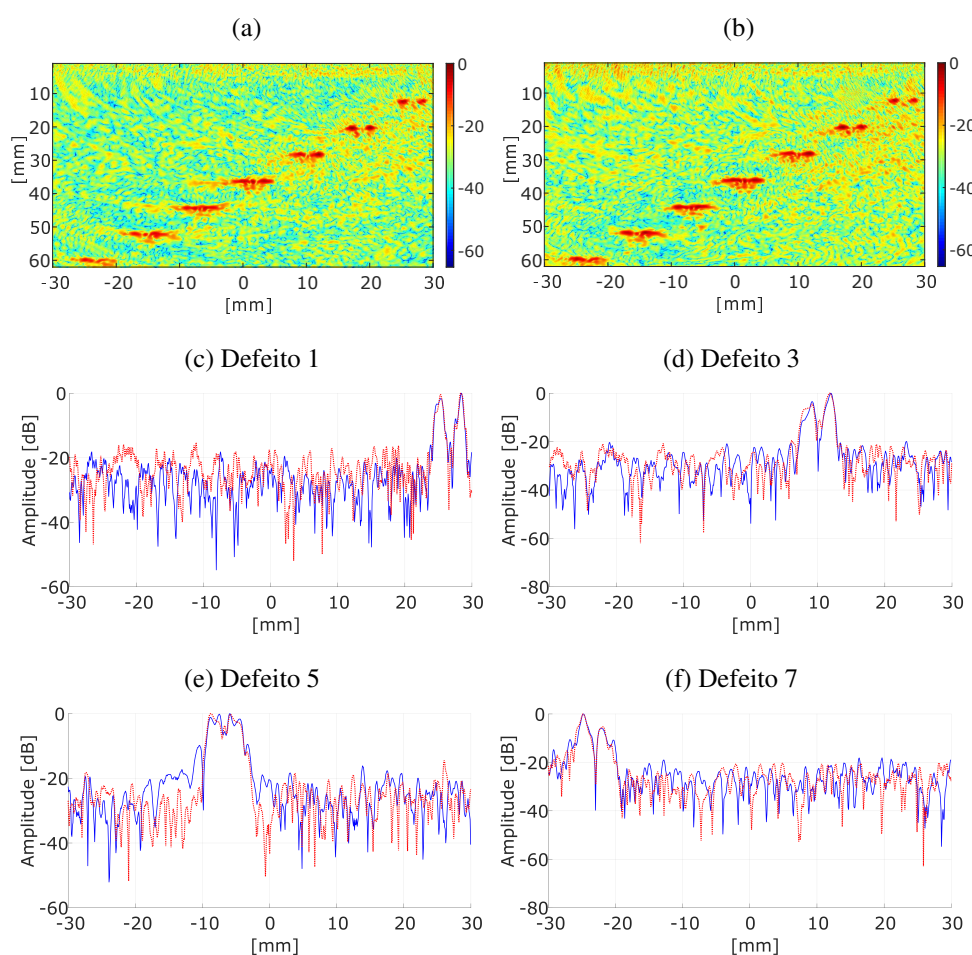


Fonte – Elaborada pelo autor

A mesma estratégia de comparar os *arrays* pode ser adotada ao gerar as imagens do bloco de alumínio, de maneira que a Figura 86 (a) ilustra a imagem gerada utilizando o *array* esperso encontrado utilizando a primeira metodologia, e a Figura 86 (b) apresenta a imagem

gerada utilizando o *array* esparsa encontrado a partir da segunda metodologia. Ao compará-las, pode ser observado que na Figura 86 (b) algumas regiões possuem uma intensidade maior nos artefatos do que na Figura 86 (a). Entretanto, ao analisar os cortes nos defeitos 1, 3, 5 e 7 (Figuras 86 (c - f)) foi observado que os defeitos foram identificados de forma similar e a intensidade do sinal fora da região do defeito se manteve na média em -30 dB.

Figura 86 – Imagem do bloco de alumínio criada por: (a) *array* esparsa encontrado pelo algoritmo genético utilizando a primeira função aptidão e (b) *array* esparsa encontrado pelo algoritmo genético utilizando a segunda função aptidão Além dessas imagens, cortes da imagem na região do defeito 1 (c), defeito 3 (d), defeito 5 (e) e defeito 7 (f) são apresentados para ilustrar a resolução lateral e artefatos presentes na imagem. Em ambos os cortes, a linha contínua azul representa a imagem gerada utilizando o *array* esparsa encontrado utilizando a primeira função aptidão e a linha pontilhada vermelha representa a imagem gerada utilizando o *array* esparsa encontrado utilizando a segunda função aptidão.



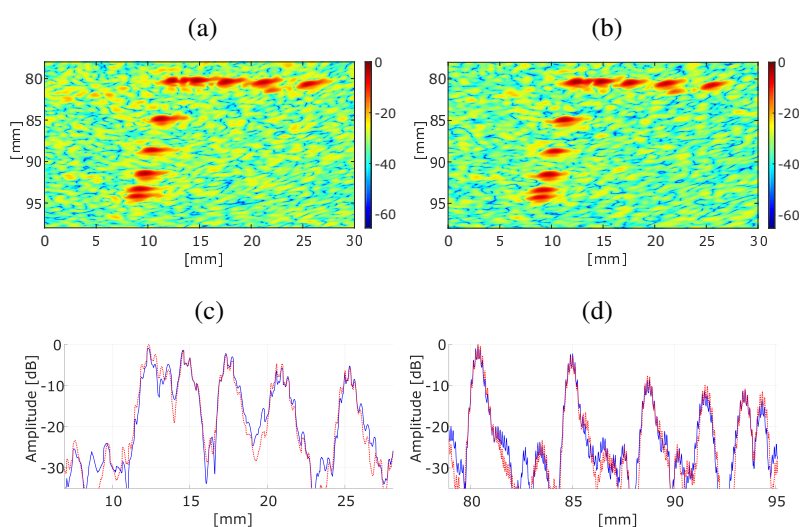
Fonte – Elaborada pelo autor

Ao gerar a imagem da região 6 do *phantom*, sendo representado na Figura 87 (a) a imagem gerada pelo *array* esparsa com 43 elementos encontrado utilizando a primeira metodologia, e, na Figura 87 (b) a imagem gerada pelo *array* esparsa encontrado utilizando a segunda

função aptidão, pode-se observar que as imagens geradas são similares, de forma que existe um leve aumento na intensidade dos artefatos na imagem gerada utilizando o *array* de 43 elementos encontrado utilizando a primeira função aptidão (Figura 87 (a)).

Examinando os cortes horizontal (Figura 87 (c)) e vertical (Figura 87 (d)) da imagem, pode ser verificado que os *arrays* geraram as imagens de forma similar, na qual o corte da Figura 87 (a) foi ilustrado pela linha azul contínua e o corte da Figura 87 (b) foi representada pela linha vermelha pontilhada.

Figura 87 – Imagem do segmento 6 do *phantom* criada por: (a) *array* esparso encontrado utilizando a primeira função aptidão e (b) *array* esparso encontrado utilizando a segunda função aptidão, sendo apresentados cortes da imagem nos defeitos dispostos horizontalmente (c) e verticalmente (d) para ilustrar a resolução lateral e artefatos na imagem. Em ambas as imagens, a linha contínua azul representa o corte da imagem gerada utilizando o *array* esparso encontrado utilizando a primeira função aptidão e a linha pontilhada vermelha representa o corte da imagem gerada a partir do *array* esparso encontrado utilizando a segunda função aptidão.



Fonte – Elaborada pelo autor

Dessa forma, cada função aptidão indica que os seus respectivos *arrays* encontrados são melhores. Como ambos os *arrays* conseguiram gerar as imagens dos experimento de forma similar, conforme apresentado nas Figuras 86 e 87, julga-se que ambas as funções aptidão conseguiram encontrar configurações de *arrays* que gerassem boas imagens.

Entretanto, existem algumas diferenças nas buscas realizadas utilizando cada função aptidão que merecem ser destacas, como por exemplo o tempo necessário para realizar a busca utilizando cada função aptidão. Como o diagrama de radiação demora menos tempo para ser gerado do que a PSF utilizada neste trabalho, a busca utilizando a primeira função aptidão leva horas para ser concluída e a busca utilizando a segunda função aptidão leva em torno de dois dias. Em contrapartida, os *array* esparsos encontrados pela segunda função aptidão apresentaram um mesmo comportamento, em que perto do defeito existe uma região com baixa

intensidade que ajuda a diminuir a intensidade dos artefatos próximos ao defeito. Pode-se atribuir esse comportamento pelo fato do resultado da comparação das linhas da PSF estar sendo multiplicada por 3 na segunda função aptidão apresentada em (27).

Assim, a partir das buscas feitas para encontrar os *arrays* esparsos apresentados neste trabalho, observou-se que os resultados encontrados utilizando a segunda função aptidão foram mais confiáveis pois apresentam este comportamento redundante. Além disso, acredita-se que os pesos k_n que multiplicam a primeira função aptidão apresentada em (25), ao mesmo tempo que possibilitam criar uma dinâmica para característica do *array* encontrado, abrem diversas combinações que podem confundir a reprodução da metodologia.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de uma metodologia de busca por configurações de *arrays* esparsos foi abordado neste trabalho, visando a obtenção de imagens com boa resolução lateral e artefatos com menor intensidade. Para tanto, empregou-se o AG como ferramenta de busca, onde se propôs o uso de duas novas funções aptidão.

Tanto para primeira função aptidão, baseada no trabalho apresentado por Hu et al. (2017), a qual foi criada a partir do diagrama de radiação, quanto para segunda função aptidão, baseada na comparação entre PSFs, as imagens geradas pelos *arrays* encontrados possuem boas características. Quando foram comparadas com as imagens obtidas utilizando os *arrays* esparsos propostos na literatura, pôde-se observar que as imagens geradas pelos *arrays* encontrados neste trabalho apresentavam resolução lateral similar e uma redução na intensidade dos artefatos.

Contudo, existem algumas características nas funções aptidão que podem ser interpretadas como desvantagem. Para primeira apresentada, os pesos k_n presentes na função aptidão ao mesmo tempo que possibilitam criar uma dinâmica na característica do *array* esparsos que o algoritmo genético deve encontrar, abrem margens para erros para recriar a metodologia, enquanto que, para segunda função aptidão, alguns parâmetros definidos precisam ser investigados com maior detalhe como, por exemplo, o tamanho em que a PSF será gerada e os fatores que multiplicam os termos sim_1 e sim_2 .

Diante do exposto, a metodologia desenvolvida neste trabalho composta pelo AG e duas novas funções aptidão conseguiram encontrar configurações de *arrays* esparsos lineares que possuíssem boa resolução lateral e intensidade de artefatos reduzida.

7.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Algumas sugestões podem ser aplicadas para trabalhos futuros:

1. Encontrar outras formas de avaliar o diagrama de radiação.
2. Considerar outras estratégias para comparar as duas PSFs.
3. Utilizar outros algoritmos para realizar a busca.
4. Aplicar as metodologias propostas em *arrays* 2D.

REFERÊNCIAS

- AKHNAK, M.; MARTINEZ, O.; ULLATE, L. G.; MONTERO DE ESPINOSA, F. 64 Elements two-dimensional piezoelectric array for 3D imaging. *Ultrasonics*, Surrey, v. 40, n. 1-8, p. 139–143, 2002.
- AL-HAJRI, M. T.; ABIDO, M. A. Assessment of genetic algorithm selection, crossover and mutation techniques in reactive power optimization. In: *EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 50., 2009, Trondheim. *Anais...* Trondheim: IEEE, 2009. p. 1005–1011.
- AUSTENG, A.; HOLM, S. Sparse 2-D arrays for 3-D phased array imaging - Design methods. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, New York, v. 49, n. 8, p. 1073–1086, 2002.
- BARANIUK, R. Compressive sensing [lecture notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*, Arlington, v. 24, n. July, p. 118–121, 2007.
- CARTER, J. N. *Introduction to genetic algorithms*. Surrey: Elsevier B.V., 2003. 1–17 p.
- CHEN, K.; HE, Z.; HAN, C. A modified real GA for the sparse linear array synthesis with multiple constraints. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, New York, v. 54, n. 7, p. 2169–2173, 2006.
- CHEN, K.; YUN, X.; HE, Z.; HAN, C. Synthesis of sparse planar arrays using modified real genetic algorithm. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, New York, v. 55, n. 4, p. 1067–1073, 2007.
- DEPARATEANU, D.; ENACHE, F.; ENACHE, A.; POPESCU, F.; NICOLAESCU, I. Sparse array antenna optimization using genetic algorithms. In: *ELECTRONICS, COMPUTERS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE*, 8., 2017, Ploiesti. *Anais...* Ploiesti: IEEE, 2017. p. 1–4.
- DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review. *NDT and E International*, Londres, v. 39, n. 7, p. 525–541, 2006.
- FAN, C.; CALEAP, M.; PAN, M.; DRINKWATER, B. W. A comparison between ultrasonic array beamforming and super resolution imaging algorithms for non-destructive evaluation. *Ultrasonics*, Surrey, v. 54, n. 7, p. 1842–1850, 2014.
- GONZALEZ-VALDES, B.; ALLAN, G.; RODRIGUEZ-VAQUEIRO, Y.; ÁLVAREZ, Y.; MANTZAVINOS, S.; NICKERSON, M.; BERKOWITZ, B.; MARTÍNEZ-LORENZO, J.; LAS-HERAS, F.; RAPPAPORT, C. Sparse array optimization using simulated annealing and compressed sensing for near-field millimeter wave imaging. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, New York, v. 62, n. 4, p. 1716–1722, 2014.
- HAUPT, R. L. Thinned arrays using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, New York, v. 42, n. 7, p. 993–999, 1994.
- HOLLAND, J. *Adaptation in natural and artificial systems*. Cambridge: MIT Press, 1975.
- HU, H.; DU, J.; XU, N.; JEONG, H.; WANG, X. Ultrasonic sparse-TFM imaging for a two-layer medium using genetic algorithm optimization and effective aperture correction. *NDT and E International*, London, v. 90, p. 24–32, 2017.

- JAKOWATZ, C. V. J.; WAHL, D. E.; EICHEL, P. H.; GHIGLIA, D. C.; THOMPSON, P. A. *Spotlight-mode synthetic aperture radar: a signal processing approach: a signal processing approach*. New York,: Springer, 2012.
- KE-SONG, C.; ZI-SHU, H.; CHUN-LIN, H. Optimization of sparse plane arrays using an improved genetic algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, CIRCUITS AND SYSTEMS, 4., 2006, Guilin. *Anais...* Guilin: IEEE, 2006. p. 2781–2785.
- KHALID, M. I.; ALOTAIBY, T. N.; ALDOSARI, S. A.; ALSHEBEILI, S. A.; ALHAMEED, M. H.; POGHOSYAN, V. Epileptic MEG spikes detection using amplitude thresholding and dynamic time warping. *IEEE Access*, Madison, v. 5, p. 11658–11667, 2017.
- KHODIER, M. M.; CHRISTODOULOU, C. G. Linear array geometry synthesis with minimum sidelobe level and null control using particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, New York, v. 53, n. 8, p. 2674–2679, 2005.
- LIPOWSKI, A.; LIPOWSKA, D. Roulette-wheel selection via stochastic acceptance. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Surrey, v. 391, n. 6, p. 2193–2196, 2012.
- LOCKWOOD, G.; LI, P. C.; O'DONNELL, M.; FOSTER, F. Optimizing the radiation pattern of sparse periodic linear arrays. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, New York, v. 43, n. 1, p. 7–14, 1996a.
- LOCKWOOD, G.; LI, P. C.; O'DONNELL, M.; FOSTER, F. Optimizing the radiation pattern of sparse periodic two dimensional arrays. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, New York, v. 43, n. 1, p. 7–14, 1996b.
- LOCKWOOD, G. R.; FOSTER, F. S. Design of sparse array imaging systems. In: ULTRASONICS SYMPOSIUM, 2., 1995, Seattle. *Anais...* Seattle: IEEE, 1995. p. 1237–1243.
- MARTÍN, C. J.; MARTÍNEZ, O.; OCTAVIO, A.; MONTERO, F.; ULLATE, L. G. 2D SAFT technique to reduce grating lobes in volumetric imaging. *Physics Procedia*, Santiago, v. 3, n. 1, p. 381–388, 2010.
- MARTÍNEZ-GRAULLERA, O.; MARTÍN, C. J.; GODOY, G.; ULLATE, L. G. 2D array design based on Fermat spiral for ultrasound imaging. *Ultrasonics*, Surrey, v. 50, n. 2, p. 280–289, 2010.
- MOREAU, L.; DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D. Ultrasonic imaging algorithms with limited transmission cycles for rapid nondestructive evaluation. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, New York, v. 56, n. 9, p. 1932–1944, 2009.
- MOREL, M.; ACHARD, C.; KULPA, R.; DUBUISSON, S. Time-series averaging using constrained dynamic time warping with tolerance. *Pattern Recognition*, New York, v. 74, p. 77–89, 2018.
- MÜLLER, M. *Information retrieval for music and motion*. Berlin: Springer, 2007. 313 p.
- MURINO, V.; TRUCCO, A.; REGAZZONI, C. S. Synthesis of unequally spaced arrays by simulated annealing. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Piscataway, v. 44, n. 1, p. 119–123, 1996.

- NIKOLOV, M.; BEHAR, V. Analysis and optimization of synthetic aperture ultrasound imaging using the effective aperture approach. *International Journal "Information Theories & Applications"*, Bulgaria, v. 12, n. 3, p. 257–265, 2005.
- NIKOLOV, S. I.; JENSEN, J. A. Application of different spatial sampling patterns for sparse array transducer design. *Ultrasonics*, Surrey, v. 37, n. 10, p. 667–671, 2000.
- ORTIZ, S. H. C.; CHIU, T.; FOX, M. D. Ultrasound image enhancement: A review. *Biomedical Signal Processing and Control*, Oxford, v. 7, n. 5, p. 419–428, 2012.
- PRADO, V.; HIGUTI, R.; KITANO, C.; MARTINEZ-GRAULLERA, O. Instantaneous phase threshold for reflector detection in ultrasonic images. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, New York, v. 61, n. 7, p. 1204–1215, 2014.
- PRADO, V. T. *Ultrasonic non-destructive testing of plate-like structures using piezoelectric array transducers*. Tese — Universidade Estadual Paulista Câmpus Ilha Solteira (UNESP-FEIS). Ilha Solteira, p. 124. 2014.
- RABINER, L.; ROSENBERG, A.; LEVINSON, S. Considerations in dynamic time warping algorithms for discrete word recognition. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, New York, v. 26, n. 6, p. 575–582, 1978.
- SCHMITZ, V.; CHAKHLOV, S.; MÜLLER, W. Experiences with synthetic aperture focusing technique in the field. *Ultrasonics*, Surrey, v. 38, n. 1, p. 731–738, 2000.
- SCIALLERO, C.; TRUCCO, A. Design of a sparse planar array for optimized 3D medical ultrasound imaging. In: EUROPEAN SIGNAL PROCESSING CONFERENCE, 23., 2015, Nice. *Anais...* Nice: IEEE, 2015. p. 1341–1345.
- SHIMIZU, M. Determining the excitation coefficients of an array using genetic algorithms. In: PROCEEDINGS OF IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND URSI NATIONAL RADIO SCIENCE MEETING. 3., 1994, Seattle. *Anais...* Seattle: IEEE, 1994. p. 530–533.
- SHUNG, K.; SMITH, M. B.; TSUI, B. W. *Principles of medical imaging*. New York: Academic Press, 1992. 289 p.
- STEINBERG, B. D. The peak sidelobe of the phased array having randomly located elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 20, n. 2, p. 129–136, 1972.
- TRUCCO, A. Thinning and weighting of large planar arrays by simulated annealing. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, New York, v. 46, n. 2, p. 347–355, 1999.
- TRUCCO, A. Weighting and thinning wide-band arrays by simulated annealing. *Ultrasonics*, Surrey, v. 40, p. 485–489, 2002.
- VELICHKO, A.; WILCOX, P. D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for guided wave pipe inspection. *NDT & E International*, London, v. 38, n. 8, p. 137–144, 2005.
- WILCOX, P. D.; ZHANG, J. Quantification of the effect of array element pitch on imaging performance. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 65, n. 4, p. 600–616, 2018. ISSN 08853010.

WOOH, S.-C.; SHI, Y. Optimum beam steering of linear phased arrays. *Wave Motion*, Manchester, v. 29, p. 245–265, 1999.

YAN, K. K.; LU, Y. Sidelobe reduction in array-pattern synthesis using genetic algorithm. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, New York, v. 45, n. 7, p. 1117–1122, 1997.

YANG, P.; CHEN, B.; SHI, K.-R. A novel method to design sparse linear arrays for ultrasonic phased array. *Ultrasonics*, Surrey, v. 44, p. 717–721, 2006.

YEN, J.; STEINBERG, J.; SMITH, S. Sparse 2-D array design for real time rectilinear volumetric imaging. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, New York, v. 47, n. 1, p. 93–110, 2000.

YUAN, J.; ZHOU, H.; GUO, C.; DING, J.; Chinese Institute of, E. Efficient optimization of shaped-beam sparse linear antenna arrays using genetic algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROWAVE AND MILLIMETER WAVE TECHNOLOGY, 1., 2012, Shenzhen. *Anais...* Shenzhen: IEEE, 2012. p. 322–325.