



Juan Dario Timarán Jimenez

**Métodos baseados em Técnicas de Inteligência
Computacional para Localização de Projéteis de Armas de
Fogo inseridos no Corpo Humano, por meio de Medições
Magnéticas de Alta Sensibilidade**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Eduardo Costa da Silva

Rio de Janeiro

Maio 2017



Juan Dario Timarán Jimenez

Métodos baseados em Técnicas de Inteligência Computacional para Localização de Projéteis de Armas de Fogo inseridos no Corpo Humano, por meio de Medições Magnéticas de Alta Sensibilidade

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Eduardo Costa da Silva

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

Prof^a. Karla Tereza Figueiredo Leite

UERJ

Prof. José Franco Machado do Amaral

UERJ

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de maio de 2017.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Juan Dario Timarán Jimenez

Graduou-se em Engenharia Eletrônica pela Universidade de Nariño - Colômbia 2012.

Ficha Catalográfica

Timarán Jimenez, Juan Dario

Métodos baseados em técnicas de inteligência computacional para localização de projéteis de armas de fogo inseridos no corpo humano, por meio de medições magnéticas de alta sensibilidade / Juan Dario Timarán Jimenez ; orientador: Eduardo Costa da Silva. – 2017.

168 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Campo magnético. 3. Correntes parasitas. 4. Projéteis de armas de fogo. 5. Localização. 6. Rede neural. 7. Algoritmo Genético. I. Silva, Eduardo Costa da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

A Deus, por guiar meu caminho e meu destino, a meus pais por seu apoio e encorajamento para continuar e ir em frente, a minha namorada pelo suporte e motivação, a meus irmãos e sobrinhos por me apoiar e motivar para seguir adiante e a minha família e amigos que estiveram ao meu lado dando força o tempo todo.

Agradecimentos

Ao meu orientador Dr. Eduardo Costa da Silva, pela aceitação, confiança, ensinamentos, dedicação, auxílio, paciência, aportes, revisões e contribuições substanciais ao trabalho. Obrigado pela amizade e apoio incondicional o tempo todo.

Aos professores Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa e Dr^a. Elisabeth Costa Monteiro que orientaram iniciações científicas, trabalhos de conclusão de curso de graduação e mestrados, que inspiraram esta dissertação. Suas contribuições foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da Comissão Examinadora por suas contribuições a este trabalho.

Aos Professores da PUC-Rio, em especial aqueles de Engenharia Elétrica, Engenharia de Controle e Automação e Metrologia, por compartilharem seus conhecimentos e contribuírem para minha formação.

À CAPES e à PUC-Rio, por acreditarem na pesquisa científica como instrumento de desenvolvimento social e evolução humana e pelos auxílios financeiros concedidos.

A todas as pessoas que contribuíram de alguma maneira para tornar este trabalho possível. Muito obrigado por tudo!

Resumo

Timarán Jimenez, Juan Dario; Costa da Silva, Eduardo (Orientador). **Métodos baseados em técnicas de inteligência computacional para localização de projéteis de armas de fogo inseridos no corpo humano, por meio de medições magnéticas de alta sensibilidade.** Rio de Janeiro, 2017. 168 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos casos clínicos mais frequentes na sociedade moderna envolve a localização e extração de projéteis de armas de fogo, que normalmente são feitos de chumbo, um material não ferromagnético. O desenvolvimento de uma técnica que possibilite a localização precisa destes auxiliará o procedimento de remoção cirúrgica, tendo vasta relevância e impactando diretamente no aumento da taxa de sobrevivência de pessoas feridas. Dessa forma, esta dissertação apresenta e discute duas novas abordagens baseadas em técnicas de inteligência computacional, objetivando a localização de projéteis de armas de fogo inseridos no corpo humano, a partir do processamento da informação contida em mapas de campo magnético. Em ambas as abordagens analisadas modela-se o projétil como uma esfera de raio a , localizado em um espaço de busca contido em um plano xy , o qual está situado a uma distância h do sensor no eixo z . As técnicas de localização requerem a geração de um campo magnético primário alternado por meio de um solenoide, o qual incide sobre o espaço de busca. Caso exista um projétil de arma de fogo nesta região, serão induzidas correntes parasitas no projétil, as quais, por sua vez, produzirão um campo magnético secundário, que pode ser medido por um sensor de alta sensibilidade localizado na extremidade do solenoide. Na primeira abordagem analisada, as posições x e y do projétil são determinadas por um algoritmo de janelamento que considera valores máximos e médios pertencentes aos mapas de campo magnético secundário. A determinação da distância h entre a esfera e o sensor foi obtida por meio de uma rede neural, e o raio da esfera a é estimado por um algoritmo genético. Na segunda abordagem, as quatro variáveis de interesse (x , y , h e a) são inferidas diretamente por um algoritmo genético. Os resultados obtidos são avaliados e comparados.

Palavras-chave

Campo Magnético; Correntes Parasitas; Projéteis de Armas de Fogo; Localização; Rede Neural; Algoritmo Genético.

Abstract

Timarán Jimenez, Juan Dario; Costa da Silva, Eduardo (Advisor). **Methods based on computational intelligence techniques for localization of firearms projectiles inserted into the human body, by high sensitivity magnetic measurements.** Rio de Janeiro, 2017. 168 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In modern society, one of the most frequent clinical cases involves location and extraction of firearms projectiles, usually made of lead, a non-ferromagnetic material. The development of a technique that allows the precise location of these projectiles will aid their surgical removal, which has a great relevance because it contributes directly to the increase of the survival rate of wounded patients. Thus, this dissertation presents and discusses two new approaches based on computational intelligence techniques, aiming at locating firearm projectiles inserted into the human body, by processing the information contained in magnetic field maps. On both approaches, the projectile is modeled by a sphere with radius a , located on a search space contained in a xy plane that is situated at a distance h from the sensor, along the z axis. The proposed location techniques require the generation of a primary alternating magnetic field by means of a solenoid, which aims at inducing eddy currents in a firearm projectile contained in the search space. In turn, these currents will produce a secondary magnetic field, which can be measured by a high-sensitivity sensor located at the bottom of the solenoid. In the first developed technique, the x and y positions of the projectile were estimated by a windowing algorithm that takes into account maximum and mean values contained on the secondary magnetic field maps. In turn, the distance h between the sphere and the sensor is inferred by a neural network, and the radius of the sphere a is estimated by a genetic algorithm. In the second technique, the four variables of interest (x , y , h and a) are inferred directly by a genetic algorithm. The results obtained are evaluated and compared.

Keywords

Magnetic field; Eddy current; Firearm projectiles; Location; Neural Network; Genetic Algorithm.

Sumário

1	Introdução	21
1.1.	Relevância e motivação	21
1.2.	Detecção de Corpos estranhos no corpo humano	22
1.2.1.	Localização de agulhas de aço	22
1.2.2.	Localização de projéteis de arma de fogo	26
1.3.	Correntes Parasitas	30
1.3.1.	Fundamentação Matemática	31
1.3.2.	Efeitos do Gradiômetro	35
1.4.	Magnetômetros de alta sensibilidade	35
1.4.1.	Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)	36
1.4.2.	Magnetorresistência Gigante	38
1.4.3.	Magnetoimpedância Gigante	39
1.5.	Estrutura da Dissertação	41
2	Redes Neurais e Algoritmos Genéticos	43
2.1.	Redes Neurais	43
2.1.1.	Funções de Ativação	44
2.1.2.	Arquitetura de Rede	46
2.1.3.	Tipos de Aprendizado	48
2.1.4.	Redes Multilayer Perceptron	49
2.1.4.1.	Treinamento	50
2.2.	Algoritmos Genéticos	51
2.2.1.	Representações das Soluções	52
2.2.2.	Decodificação do Cromossoma	53
2.2.3.	Avaliação	53
2.2.4.	Seleção	54
2.2.5.	Reprodução	56
2.2.6.	Operadores Genéticos	57
2.2.7.	Parâmetros da Evolução	60

3 Metodologia	63
3.1. Modelagem dos Campos Magnéticos: Primário e Secundário	65
3.1.1. Modelagem do Campo Magnético Primário	65
3.1.1.1. Fundamentos matemáticos para o Campo Magnético Primário	65
3.1.1.2. Considerações sobre os parâmetros do solenoide e o espaço de busca	67
3.1.1.3. Simulações dos mapas de campo magnético primário desconsiderando o ruído magnético	68
3.1.1.4. Simulações dos mapas de campo magnético primário considerando o ruído magnético	69
3.1.2. Modelagem do Campo Magnético Secundário	71
3.1.2.1. Fundamentos matemáticos para o Campo Magnético Secundário	72
3.1.2.2. Aplicação do efeito gradiométrico	77
3.1.2.3. Considerações de parâmetros para campo magnético secundário	79
3.1.2.4. Simulações dos mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário desconsiderando o ruído magnético	79
3.1.2.5. Simulações dos mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário considerando o ruído magnético	81
3.2. Técnica 1	83
3.2.1. Módulo de determinação da posição (x_b , y_b)	84
3.2.2. Módulo de determinação da profundidade (h)	89
3.2.2.1. Adaptação do princípio matemático adotado em [3] para estimativa de h	89
3.2.2.2. Descrição da rede neural desenvolvida	92
3.2.2.3. Criação da base de dados simulada	98
3.2.2.4. Condicionamento das entradas e parâmetros de treinamento	99
3.2.2.5. Seleção da Rede Neural ótima	103
3.2.3. Módulo de determinação do raio (a)	104

3.2.3.1. Abordagem da solução com GA	105
3.2.3.2. Função de avaliação	105
3.2.3.3. Definição dos parâmetros do AG implementado	106
3.3. Técnica 2	108
3.3.1. Função de avaliação	109
3.3.2. Definição dos parâmetros do AG implementado	110
 4 Resultados	 112
4.1. Avaliação do Desempenho da Técnica 1	112
4.1.1. Avaliação do Módulo de Determinação da Posição	113
4.1.1.1. Análise de casos <i>sem ruído magnético</i> ($e_r = 0\%$)	113
4.1.1.2. Análise de casos com ruído magnético ($e_r = 5\%$)	116
4.1.1.3. Análise aprofundada	118
4.1.2. Avaliação do Módulo de determinação da profundidade	123
4.1.3. Avaliação do Módulo de Determinação do Raio	132
4.2. Avaliação do Desempenho da Técnica 2	136
4.3. Comparação das Técnicas	148
 5 Conclusões e Trabalhos Futuros	 157
 Referências bibliográficas	 163

Lista de Figuras

- Figura 1 - Diagramas simplificados mostrando a profundidade h e ângulo α da agulha em relação à pele. Também são apresentadas as curvas correspondentes da componente z da densidade do fluxo magnético em função de deslocamentos ao longo do eixo x , para dois casos: (a) $\alpha = 0^\circ$ e (b) $\alpha = 30^\circ$ [1]. 24
- Figura 2 - Raio-X do sexto paciente, indicando a localização da agulha de aço, obtida por meio do procedimento utilizando mapeamento magnético com sensores SQUID. O marcador está acima de um fragmento de agulha de aço muito pequeno que, anteriormente à medição do campo magnético, foi considerado um artefato pelos raio-X [1]. 25
- Figura 3 - Simulação da densidade do fluxo magnético normalizado, gerado por uma agulha de 4,5 cm com $\alpha = 40^\circ$ e $h = 12$ cm, explicitando os parâmetros de largura W e w , assim como o deslocamento Δ e a distância D entre os picos [2]. 26
- Figura 4 - Diagrama simplificado de duas configurações experimentais baseadas no emprego de magnetômetros SQUID: (a) usando um solenoide para geração do campo primário e (b) usando uma bobina de Helmholtz [3]. 28
- Figura 5 – Avaliação computacional da densidade de fluxo magnético normalizada e da dependência linear entre a profundidade h e o parâmetro w . Em (a), apresenta-se a componente B_z da densidade de fluxo magnético secundário normalizada, medida ao longo do eixo x , para profundidades de 5, 10 e 15 cm. Em (b), mostra-se a dependência linear entre a profundidade h , medida entre o sensor e o centro do corpo estranho, e o parâmetro w [3]. 29
- Figura 6 – Avaliação computacional da diferença de fase entre campo primário e secundário e da influência da frequência de excitação do campo primário, sobre o raio mínimo detectável. Em (a), a diferença de fase entre a densidade de fluxo magnético secundário e primário em função do raio do corpo estranho esférico, para frequências de 50, 100, 200, 500 e 1000 Hz. Em (b), mostra-se o raio mínimo detectável em função da profundidade h , para três valores da frequência de excitação (50, 100 Hz e 1 kHz) [3]. 30

Figura 7 - Sistema de coordenadas esférico empregado na formulação teórica do problema. Uma esfera com um pequeno raio a está localizada na origem. Um Campo magnético alternado uniforme é aplicado verticalmente, com magnitude B_0 . O campo magnético secundário gerado pelas correntes parasitas é medido na posição (x, y, z) [3].	32
Figura 8 - Modelo de um neurônio artificial [40].	43
Figura 9 - Funções de ativação típicas: (a) função linear, (b) função degrau, (c) função sigmoide e (d) tangente hiperbólica [42].	46
Figura 10 - Rede MLP <i>feedforward</i> totalmente conectada com uma camada oculta e uma camada de saída [40].	47
Figura 11 - Rede recorrente com neurônios ocultos [40].	48
Figura 12 - Rede MLP com uma camada oculta [41].	50
Figura 13 - Fluxograma típico de um algoritmo evolucionário [45].	52
Figura 14 – Representação da seleção por roleta para 5 indivíduos.	54
Figura 15 – Representação do cruzamento de um ponto [57].	58
Figura 16 – Representação do cruzamento de dois pontos [57].	58
Figura 17 – Representação do cruzamento uniforme [57].	58
Figura 18 – Representação da operação genética de mutação.	59
Figura 19 – Arranjo de medição proposto neste trabalho. O solenoide gera uma densidade de fluxo magnético primário B_0 (linha tracejada em azul) alternada que incide sobre o corpo esférico estranho, induzindo correntes parasitas (I_{eddy}) também alternadas (linha pontilhada em vermelho). Por sua vez, tais correntes produzem uma densidade de fluxo magnético secundário B_z (Linha traço-ponto em verde). Dessa forma, o resultado da leitura gradiométrica (diferencial) pelos elementos sensores S1 e S2 é composto principalmente pela densidade de fluxo magnético secundário [19].	64
Figura 20 – Ilustração da aplicação da Lei de Biot-Savart.	66
Figura 21 – Ilustração do solenoide utilizado para geração do campo magnético primário.	68
Figura 22 – Mapas das componentes B_{0x} , B_{0y} e B_{0z} da densidade de fluxo magnético primário gerado pelo solenoide, localizado na origem do plano xy , para h igual a: (a) 0,006 m, (b) 0,05 m e (c) 0,15 m.	69

- Figura 23 – Mapas das componentes B_x , B_y e B_z da densidade de fluxo magnético primário gerada pelo solenoide, localizado na origem do plano xy , a uma distância h igual a: (a) 0,006 m, (b) 0,05 m e (c) 0,15 m. Considerando-se a presença de ruído aleatório ($e_r = 5\%$). 71
- Figura 24 – Representações gráficas de rotações em torno dos eixos cartesianos: (a) x , (b) y e (c) z . 74
- Figura 25 – Aplicação da matriz de rotação $R_{y\theta} = 270^\circ$, para cálculo de $B_{zxx,y,z}$, exclusivamente em função de B_{oxr} . (a) Sistema original e (b) Sistema Rotacionado. 75
- Figura 26 – Aplicação da matriz de rotação $R_{x\theta} = 90^\circ$, para cálculo de $B_{zyx,y,z}$, exclusivamente em função de B_{oyr} . (a) Sistema original e (b) Sistema Rotacionado. 76
- Figura 27 – Simulações do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para três alturas h distintas: (a) 0,006 m, (b) 0,05 m e (c) 0,15 m. O problema foi configurado de acordo com os parâmetros explicitados na seção 3.1.2.3. 80
- Figura 28 – Simulações do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, na presença de ruído magnético aleatório, para três alturas h distintas: (a) 0,006 m, (b) 0,05 m e (c) 0,15 m. O problema foi configurado de acordo com os parâmetros explicitados na seção 3.1.2.3, arbitrando-se $e_r = 5\%$. 82
- Figura 29 – Fluxograma de processamento de sinal para a Técnica 1. 84
- Figura 30 – Representação ilustrativa do processo de varredura com uma máscara 5×5 , realizado a fim de identificar em qual posição da máscara obtém-se o maior valor médio dos valores de gradiente de fluxo magnético, contidos em seu interior. 85
- Figura 31 – Representação ilustrativa do segundo passo do processo de varredura, realizado com uma máscara 4×4 dentro da submatriz M_1 , a fim de identificar em qual posição da máscara obtém-se o maior valor médio dos valores de gradiente de fluxo magnético, contidos em seu interior. 86
- Figura 32 – Representação ilustrativa do terceiro passo do processo de varredura, realizado com uma máscara 3×3 dentro da submatriz M_2 , a fim de

identificar em qual posição da máscara obtém-se o maior valor médio dos valores de gradiente de fluxo magnético, contidos em seu interior. 87

Figura 33 – Representação ilustrativa do quarto passo do processo de varredura, realizado com uma máscara 2x2, a fim de identificar em qual posição da máscara obtém-se o maior valor médio dos valores de gradiente de fluxo magnético, contidos em seu interior. 88

Figura 34 – Representação ilustrativa do quinto passo do processo de varredura, realizado com uma máscara 1x1, a fim de identificar em qual posição da máscara obtém-se o maior valor médio dos valores de gradiente de fluxo magnético, contidos em seu interior. Esta posição é considerada a posição do centro da esfera que se deseja localizar. 88

Figura 35 – Utilizando-se o método descrito em [4], apresenta-se: a.) Curvas normalizadas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para profundidades h iguais a: 5 cm, 10 cm e 15 cm. b.) Relação entre h e w . 90

Figura 36 – Comparação das estimativas das curvas normalizadas do gradiente de campo magnético secundário, obtidas de acordo com o equacionamento proposto em [3] (curvas pretas) e com o proposto no presente trabalho (curvas vermelhas). 91

Figura 37 – Determinação do parâmetro Área sob a curva (A), utilizado como um dos padrões de entrada da rede neural desenvolvida. 93

Figura 38 – Influência do ruído magnético ($\epsilon_r = 5\%$) na estimativa da área sob a curva de ΔB_z normalizado em função de x , para três profundidades h diferentes: 0,01 m, 0,05 m e 0,1 m. Os pontos em vermelho indicam os valores discretos efetivamente simulados e os polinômios de ajuste são representados pelas linhas sólidas em preto. 93

Figura 39 – Métrica alternativa para minimização da influência do ruído magnético ($\epsilon_r = 5\%$) na estimativa da área sob a curva de ΔB_z normalizado em função de x , para três profundidades h diferentes: 0,01 m, 0,05 m e 0,1 m. Os pontos em vermelho indicam os valores discretos efetivamente simulados e os polinômios de ajuste são representados pelas linhas sólidas em preto. 94

Figura 40 – Mapas de ΔB_z normalizado: (a) matriz de medição completa e (b) submatriz utilizada para extrair a média e o desvio padrão. 95

Figura 41 – Exemplos de mapeamento magnético, em (a) apresenta-se o resultado de um mapeamento inicial e em (b) apresenta-se um segundo mapeamento, realizado a fim de tornar o ponto (x_b, y_b) o centro do espaço de busca.	96
Figura 42 – Diagrama de blocos da rede neural 1 (RN1).	97
Figura 43 – Diagrama de blocos da rede neural 2 (RN2).	97
Figura 44 – Diagrama de blocos da rede neural 3 (RN3).	97
Figura 45 – Diagrama de blocos da rede neural 4 (RN4).	97
Figura 46 – RMSE médio das quatro redes neurais propostas, configuradas com a quantidade ótima de neurônios em suas camadas escondidas.	103
Figura 47 – Configuração da rede neural RN4 selecionada.	103
Figura 48 – Dependência da diferença de fase entre a densidade de fluxo magnético primário e secundário em função do raio a da esfera, para frequências de excitação entre 50 Hz e 1 kHz [3].	104
Figura 49 – Fluxograma de processamento de sinal para a Técnica 2.	108
Figura 50 – Mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, sem ruído, contendo a indicação da posição de referência da esfera (+) e da posição estimada pelo Módulo de Determinação da Posição (x).	115
Figura 51 – Mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, com ruído, contendo a indicação da posição de referência da esfera (+) e da posição estimada pelo Módulo de Determinação da Posição (x).	117
Figura 52 – Distribuição de frequências do erro E_{xb} , considerando os resultados dos 6860 testes efetuados.	120
Figura 53 – Distribuição de frequências do erro E_{yb} , considerando os resultados dos 6860 testes efetuados.	120
Figura 54 – $ E_{xb} _{\text{mean}}$ em função da profundidade h . Foram avaliados quatro diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.	122
Figura 55 – $ E_{yb} _{\text{mean}}$ em função da profundidade h . Foram avaliados quatro diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.	123
Figura 56 – Relação entre a saída da rede neural RN4 e seus respectivos valores alvo, para o subconjunto Teste-a1, formado por dados associados a um raio $a = 0,001$ m.	125

Figura 57 – Relação entre a saída da rede neural RN4 e seus respectivos valores alvo, para o subconjunto Teste-a2, formado por dados associados a um raio $a = 0,002$ m.	125
Figura 58 – Relação entre a saída da rede neural RN4 e seus respectivos valores alvo, para o subconjunto Teste-a3, formado por dados associados a um raio $a = 0,003$ m.	126
Figura 59 – Relação entre a saída da rede neural RN4 e seus respectivos valores alvo, para o subconjunto Teste-a4, formado por dados associados a um raio $a = 0,004$ m.	126
Figura 60 – Relação entre a saída da rede neural RN4 e seus respectivos valores alvo, para o subconjunto Teste-a1, formado por dados associados a um raio $a = 0,005$ m.	127
Figura 61 – Distribuição de frequências do erro E_h , considerando os resultados dos 2899 testes efetuados.	129
Figura 62 – Dependência de $ E_h _{\text{mean}}$ com a profundidade h .	132
Figura 63 – Distribuição em frequência do erro para o valor do raio a , nos 6860 experimentos.	134
Figura 64 – $ E_a _{\text{mean}}$ em função da profundidade h . Foram avaliados quatro diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.	136
Figura 65 – Mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para o caso 1 da Tabela 21: (a) Mapa de Referência e (b) Mapa Estimado pela Técnica 2. O símbolo + indica a posição da esfera.	138
Figura 66 – Mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para o caso 2 da Tabela 21: (a) Mapa de Referência e (b) Mapa Estimado pela Técnica 2. O símbolo + indica a posição da esfera.	139
Figura 67 – Mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para o caso 3 da Tabela 21: (a) Mapa de Referência e (b) Mapa Estimado pela Técnica 2. O símbolo + indica a posição da esfera.	139
Figura 68 – Distribuição de frequências do erro E_{xb} , considerando os resultados dos 405 testes efetuados.	142
Figura 69 – Distribuição de frequências do erro E_{yb} , considerando os resultados dos 405 testes efetuados.	143

Figura 70 – Distribuição de frequências do erro E_h , considerando os resultados dos 405 testes efetuados.	143
Figura 71 – Distribuição de frequências do erro E_a , considerando os resultados dos 405 testes efetuados.	144
Figura 72 – $ E_{xb} _{\text{mean}}$ em função da profundidade h , para avaliação da Técnica 2. Foram avaliados três diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.	146
Figura 73 – $ E_{yb} _{\text{mean}}$ em função da profundidade h , para avaliação da Técnica 2. Foram avaliados três diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.	147
Figura 74 – $ E_h _{\text{mean}}$ em função da profundidade h , para avaliação da Técnica 2. Foram avaliados três diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.	147
Figura 75 – $ E_a _{\text{mean}}$ em função da profundidade h , para avaliação da Técnica 2. Foram avaliados três diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.	147
Figura 76 – Limites inferior e superior da distribuição de frequências do erro E_{xb} , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão, obtidos por meio da Técnica 1 e da Técnica 2.	150
Figura 77 – Limites inferior e superior da distribuição de frequências do erro E_{yb} , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão, obtidos por meio da Técnica 1 e da Técnica 2.	150
Figura 78 – Limites inferior e superior da distribuição de frequências do erro E_h , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão, obtidos por meio da Técnica 1 e da Técnica 2.	152
Figura 79 – Limites inferior e superior da distribuição de frequências do erro E_a , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão, obtidos por meio da Técnica 1 e da Técnica 2.	154

Lista de Tabelas

Tabela 1. Exemplos de parâmetros característicos do Método de Seleção de Restante.	56
Tabela 2. Parâmetros utilizados para simulação dos mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário.	99
Tabela 3. Características da base de dados criada.	99
Tabela 4. Faixa de valores dos parâmetros desnormalizados e normalizados.	100
Tabela 5. Quantidade de padrões pertencentes aos subconjuntos de treinamento, validação e teste.	101
Tabela 6. Topologias com melhor resposta e seus respectivos RMSE e MAPE, para as quatro redes neurais avaliadas.	102
Tabela 7. Comparação dos valores de referência com os valores estimados pelo módulo de determinação da posição, para matrizes sem ruído.	114
Tabela 8. Comparação dos valores de referência com os valores estimados pelo módulo de determinação da posição, para matrizes com ruído.	116
Tabela 9. Parâmetros utilizados para geração das matrizes utilizadas para avaliação do módulo de determinação da posição.	118
Tabela 10. Análise do erro de posição (x_b , y_b), por meio da distribuição de frequências.	119
Tabela 11. Parâmetros extraídos das distribuições de frequência de E_{xb} e E_{yb} .	121
Tabela 12. Médias dos valores absolutos de E_{xb} e E_{yb} , para 28 combinações específicas de profundidade h e intensidade de ruído magnético e_r .	122
Tabela 13. Características dos 5 subconjuntos gerados a partir dos 2899 padrões de teste.	124
Tabela 14. Análise do erro entre a profundidade simulada (alvo) e a profundidade dada pela saída da rede neural.	128
Tabela 15. Parâmetros extraídos da distribuição de frequências de E_h .	130
Tabela 16. $ E_h _{\text{mean}}$ e $ \max(\Delta B_z) _{\text{mean}}$ em função da profundidade h .	130
Tabela 17. Análise do erro na estimativa do raio a , por meio da distribuição de frequências.	133

Tabela 18. Parâmetros extraídos da distribuição de frequências de E_a .	135
Tabela 19. Médias dos valores absolutos de E_a , para 28 combinações específicas de profundidade h e intensidade de ruído magnético e_r .	135
Tabela 20. Parâmetros utilizados para geração das matrizes utilizadas para avaliação da Técnica 2.	137
Tabela 21. Comparação dos valores de referência das variáveis de interesse com seus respectivos valores estimados pela Técnica 2.	138
Tabela 22. Análise dos erros E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , obtidos para a Técnica 2, por meio de suas distribuições de frequências.	141
Tabela 23. Parâmetros extraídos das distribuições de frequências dos erros E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , obtidos para a Técnica 2.	144
Tabela 24. Médias dos valores absolutos de E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , para 9 combinações específicas de profundidade h e intensidade de ruído magnético e_r .	146
Tabela 25. Limites inferior e superior da distribuição de frequências dos erros E_{xb} e E_{yb} , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão.	149
Tabela 26. Limites inferior e superior da distribuição de frequências dos erros E_h , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão.	152
Tabela 27. Limites inferior e superior da distribuição de frequências dos erros E_a , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão.	153
Tabela 28. Parâmetros associados aos tempos de processamento demandados pela Técnica 1 e pela Técnica 2.	155

Lista de Quadros

Quadro 1. Comparação de parâmetros associados ao desempenho da Técnica 1 e da Técnica 2.

161

1 Introdução

1.1. Relevância e motivação

Nos dias atuais, são frequentes os relatos de penetração acidental de corpos estranhos no corpo humano, como por exemplo agulhas de costura. Em geral, esses objetos podem causar desconforto ou estarem localizados perto de órgãos vitais, implicando em riscos de perfuração e, conseqüentemente, muitas vezes, necessitando serem removidos [1–3]. A localização precisa destes objetos geralmente não é uma tarefa simples. Atualmente, as únicas técnicas amplamente disponíveis para localização destes objetos são: radiografia, tomografia computadorizada e procedimentos de radioscopia. Entretanto, estes métodos são muitas vezes ineficazes, levando a procedimentos cirúrgicos que duram por várias horas e geralmente terminam sem sucesso, especialmente ao se lidar com a localização de objetos pequenos [1]. Além disso, é importante destacar que tanto os pacientes quanto a equipe médica são expostos a riscos, já que estas técnicas de imageamento utilizam radiação ionizante [4].

Tendo em vista os aspectos destacados, vêm sendo realizados estudos no Laboratório de Biometrologia (LaBioMet) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), a fim de aprimorar a exatidão e reduzir os aspectos nocivos de procedimentos de localização de corpos estranhos magnéticos. Os trabalhos realizados indicaram que o uso de mapas de campos magnéticos pode aprimorar significativamente o desempenho das técnicas de localização de corpos estranhos magnéticos, permitindo a redução do tempo gasto para remoção de agulhas metálicas magnetizadas, de aproximadamente 6 horas, para cerca de 10 minutos [1]. Além disso, as técnicas de detecção destes corpos estranhos por meio de medições efetuadas com transdutores magnéticos de alta sensibilidade são não invasivas e inócuas, proporcionando simplicidade de operação e diminuindo os riscos tanto para a equipe médico-hospitalar quanto para os pacientes.

A técnica originalmente desenvolvida no LaBioMet era baseada no emprego de magnetômetros SQUID. Apesar destes serem os magnetômetros mais sensíveis atualmente existentes, apresentando níveis de ruído extremamente baixos, ressalta-se que sua operação requer temperaturas criogênicas. Normalmente, sistemas de medição baseados em SQUIDs apresentam alto custo e não são portáteis, limitando a difusão da técnica no ambiente médico-hospitalar [1–3,5].

Por sua vez, a detecção de fragmentos de projéteis de armas de fogo inseridos no corpo humano representa um desafio ainda maior, devido aos mesmos serem geralmente compostos de chumbo, um material diamagnético ($\mu_r \approx 1,0$). Entretanto, é possível aproveitar o fato do chumbo ser um bom condutor elétrico ($\sigma \approx 4,55 \times 10^6 \text{ S / m}$), de modo a se induzir um campo magnético secundário associado às correntes parasitas induzidas no material, em função da aplicação de um campo magnético primário senoidal [3,6]. O campo magnético secundário pode ser medido por sensores magnéticos de alta sensibilidade e, na sequência, os dados provenientes destas medições podem ser processados a fim de se determinar a localização do projétil. Com os níveis crescentes de violência nas grandes cidades, o desenvolvimento de uma técnica que possibilite a localização precisa destes projéteis auxiliará o procedimento de remoção cirúrgica, tendo vasta relevância e impactando diretamente no aumento da taxa de sobrevivência de pessoas feridas.

Esta dissertação objetiva desenvolver técnicas de processamento computacional capazes de estimar a posição (x_b, y_b) , a profundidade h e o raio a de fragmentos de projéteis de arma de fogo, inseridos no corpo humano. Tais parâmetros são inferidos a partir de informações extraídas de mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário.

1.2.

Detecção de Corpos estranhos no corpo humano

1.2.1.

Localização de agulhas de aço

No ano 2000, foi publicado um artigo descrevendo uma nova técnica para localização de agulhas de aço inseridas no corpo humano [1], por meio de medições magnéticas efetuadas com magnetômetros SQUID (*Superconducting Quantum*

Interference Devices). A técnica descrita aprimorou e adaptou um procedimento de localização descrito por um trabalho publicado em 1988 [7].

Agulhas de aço são compostas por materiais ferromagnéticos, podendo apresentar magnetismo residual ou serem magnetizadas antes do procedimento de localização, a fim de gerarem um campo magnético não alternado.

Na técnica proposta em [1], o paciente é deitado em uma cama móvel horizontal, disposta sob um gradiômetro SQUID, com o eixo de detecção perpendicular à cama. A posição da cama é variada no plano x - y , em uma dada região de interesse. Para cada nova posição da cama, mede-se a densidade de fluxo magnético associada. Na sequência, os dados das medições são processados por um *software* capaz de construir um mapa magnético com os resultados das medições e determinar os pontos com a maior e a menor densidade de fluxo magnético. O programa também calcula o centro geométrico entre estes pontos de interesse, o qual é denominado centro magnético. Os pontos determinados pelo *software* são marcados na pele do paciente, de modo a serem utilizados como referência no procedimento de remoção cirúrgica.

O algoritmo de localização proposto por [1] também é capaz de determinar a profundidade h e o ângulo α da agulha em relação à pele, indicados na Figura 1. O procedimento adotado para determinação destes parâmetros baseia-se no cálculo da distância D entre pontos de máximo (M) e mínimo (m) determinados pelo *software*, da razão R entre seus respectivos valores absolutos e do deslocamento Δ entre o centro da agulha e o centro magnético. Os parâmetros de interesse são inferidos por meio da comparação dos resultados de um dado mapeamento magnético a um banco de dados contendo mapas magnéticos associados a diversas combinações de D , R e Δ . O banco de dados foi construído por meio de curvas obtidas a partir de modelos teóricos e dados *in vitro*, nos quais a profundidade h , o ângulo α e o deslocamento Δ são conhecidos. Destaca-se que o comprimento da agulha também pode ser estimado, avaliando os filmes de raios-X que originalmente são usados pelos médicos para diagnosticar a presença delas e, para o caso de agulhas de costura, existe um conjunto de comprimentos padrão fabricados pela indústria, tornando possível identificar o tipo de agulha apresentada no paciente, o qual é utilizado a fim de garantir uma maior exatidão nos cálculos efetuados pelo algoritmo. A Figura 1 apresenta curvas típicas da componente z da densidade de fluxo magnético, isto

é, da componente perpendicular ao plano de medição, em função de deslocamentos ao longo do eixo x , admitindo que a agulha esteja disposta ao longo do eixo x .

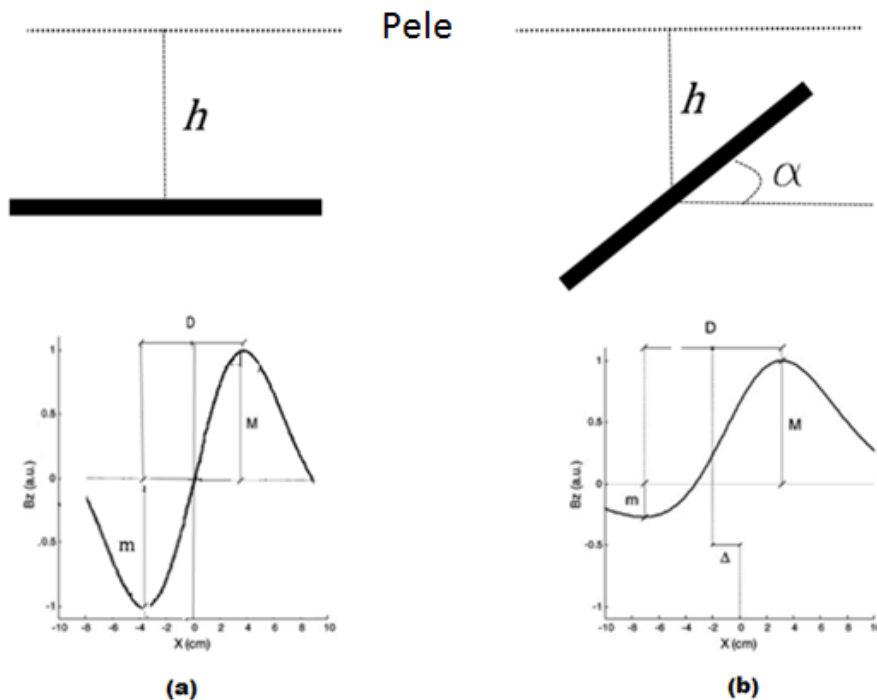


Figura 1 - Diagramas simplificados mostrando a profundidade h e ângulo α da agulha em relação à pele. Também são apresentadas as curvas correspondentes da componente z da densidade do fluxo magnético em função de deslocamentos ao longo do eixo x , para dois casos: (a) $\alpha = 0^\circ$ e (b) $\alpha = 30^\circ$ [1].

Esta técnica de localização propiciou a remoção cirúrgica com sucesso de agulhas hipodérmicas e de costura inseridas em seis pacientes. Utilizando informações retornadas por esta técnica, os procedimentos cirúrgicos duraram entre 10 a 30 minutos, o que representa uma redução de pelo menos seis vezes em relação ao tempo dispendido em procedimentos de remoção baseados em técnicas cirúrgicas tradicionais [1]. Ressalta-se ainda que esta técnica diminui o alto risco de insucesso na extração de corpos estranhos e aumenta a exatidão na localização do objeto. Adicionalmente, é importante destacar que a técnica de localização apresentada em [1] é inócua e não invasiva, reduzindo a exposição à radiação, tanto para pacientes quanto para a equipe médico-hospitalar. Nos estudos clínicos, também foram realizadas fotografias de raios-X da região, apenas para confirmar os resultados da técnica proposta. A Figura 2 apresenta a imagem de raios-X do sexto paciente, mostrando um fragmento de agulha muito pequeno, que só foi localizado por meio do mapeamento magnético.



Figura 2 - Raio-X do sexto paciente, indicando a localização da agulha de aço, obtida por meio do procedimento utilizando mapeamento magnético com sensores SQUID. O marcador está acima de um fragmento de agulha de aço muito pequeno que, anteriormente à medição do campo magnético, foi considerado um artefato pelos raio-X [1].

Embora a aplicação cirúrgica da técnica proposta tenha propiciado o sucesso dos procedimentos de remoção de agulhas nos seis casos clínicos avaliados, verificou-se que a exatidão da estimativa do ângulo α foi comprometida em virtude da existência de uma variação aleatória no nível CC presente na saída do sistema de medição, baseado em gradiômetros SQUID. Dessa forma, em 2001, foi proposta uma variação na técnica de localização anteriormente desenvolvida, a fim de minimizar a influência destas variações aleatórias na estimação dos parâmetros de interesse [2]. Neste novo método, inicialmente, obtêm-se as densidades de fluxo magnético normalizadas, após a subtração do valor médio detectado. Em seguida, conforme indicado na Figura 3, definem-se os parâmetros W e w , calculados respectivamente na vizinhança dos picos positivo e negativo. W corresponde à largura, ao longo do eixo da agulha, da região na qual as densidades de fluxo normalizado são superiores a 0,9. Por sua vez, w está associado à largura da região na qual as densidades de fluxo normalizado são inferiores a -0,9. Na sequência, a partir destes valores, define-se a razão $R_W = W / w$, a qual está intimamente relacionada com o ângulo α . Por exemplo, uma razão unitária é teoricamente encontrada para uma inclinação de 0° , onde a curva é simétrica ao longo do eixo da agulha. Os estudos apresentados em [2] permitem concluir que a utilização do

método baseado nestes parâmetros de largura, ao invés da utilização direta dos valores de densidade de fluxo magnético, torna a estimativa de α menos dependente das variações aleatórias do nível CC presente na saída do SQUID. Os resultados obtidos indicaram que esta alteração no método propiciou uma redução de mais de 50% no erro associado à estimação do ângulo de inclinação.

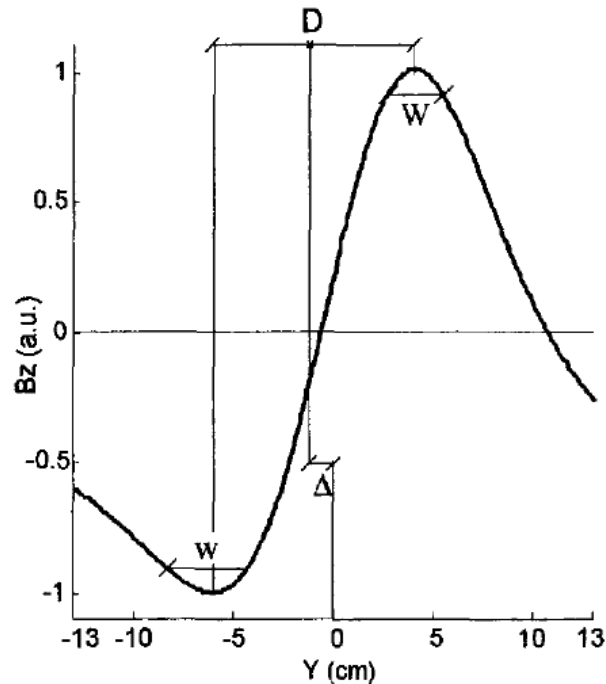


Figura 3 - Simulação da densidade do fluxo magnético normalizado, gerado por uma agulha de 4,5 cm com $\alpha = 40^\circ$ e $h = 12$ cm, explicitando os parâmetros de largura W e w , assim como o deslocamento Δ e a distância D entre os picos [2].

1.2.2. Localização de projéteis de arma de fogo

No ano de 2004 foi publicado o estudo teórico [3] propondo adaptações na técnica de localização da agulha de aço, objetivando a detecção de projéteis de armas de fogo inseridos no corpo humano.

O principal problema associado à localização de fragmentos de projéteis de armas de fogo é que os mesmos são tipicamente compostos por chumbo, um material diamagnético, que não apresenta um campo magnético remanente. A fim de superar este inconveniente, em [3], os autores propuseram a aplicação de um campo magnético primário alternado, de modo a se induzir correntes parasitas (*eddy currents*) no projétil, visto que o chumbo é um bom condutor elétrico [8]. Por sua

vez, estas correntes parasitas geram um campo magnético secundário, que pode ser detectado por magnetômetros de alta sensibilidade. No modelo teórico lá discutido [3], assume-se por simplicidade que o corpo estranho não magnético seja esférico, o que gera um impacto mínimo sobre as estimativas dos níveis de campo magnético secundário gerados, que dependem principalmente das características do material e da área total da superfície do corpo. Os modelos matemáticos das densidades de fluxo magnético secundário, gerado em função das correntes parasitas, serão discutidos na seção 1.3 desta dissertação.

Este mesmo princípio é utilizado em detectores de minas [9]. No entanto, estes dispositivos geralmente comprometem a resolução espacial, a fim de obter uma maior sensibilidade. Porém, na localização de projéteis inseridos no corpo humano não é possível fazer esta troca, pois são necessários sistemas que apresentem tanto alta sensibilidade quanto alta resolução espacial. Os projéteis são geralmente pequenos e fragmentados após o impacto, gerando densidades de fluxo magnético secundários tipicamente inferiores a poucos nanoteslas, a distâncias da ordem de alguns centímetros entre sensor e corpo estranho. Dessa forma, é imperativo que se utilizem magnetômetros de alta sensibilidade, como *fluxgates*, magnetorresistência gigante, magnetoimpedância gigante e SQUIDs [10–18].

O estudo teórico feito em [3] focou na utilização de um SQUID LTS, resfriado com hélio líquido, visto que SQUIDs são os mais sensíveis transdutores de campo magnético em tensão elétrica, dentre todas as famílias de magnetômetros existentes.

Por sua vez, foram avaliadas duas possíveis configurações de fontes para geração do campo magnético primário: um solenoide e uma bobina de Helmholtz. A bobina mantém um campo mais uniforme na região de interesse, mas ocupa um espaço significativamente maior e deve ser mantida em uma posição fixa em relação ao paciente. Por outro lado, o solenoide é consideravelmente mais compacto, aumentando a portabilidade do sistema, apesar de comprometer a uniformidade do campo incidente sobre a região de interesse. Como os resultados matemáticos obtidos em [3] indicaram capacidades de detecção semelhantes com as duas configurações, optou-se pelo solenoide em virtude de considerações práticas, tais como dimensões menores e peso.

A técnica proposta baseia-se no mapeamento do campo magnético secundário gerado por uma esfera metálica, disposta em um plano horizontal localizado a uma

profundidade h em relação ao sensor. Este mapa de campo magnético apresenta simetria cilíndrica em torno do eixo de rotação do corpo estranho. Um diagrama simplificado das configurações experimentais propostas para geração do campo primário é apresentado na Figura 4.

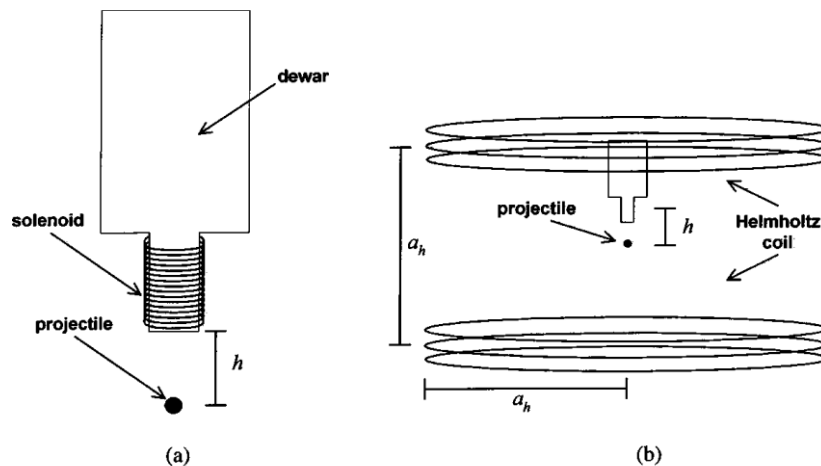


Figura 4 - Diagrama simplificado de duas configurações experimentais baseadas no emprego de magnetômetros SQUID: (a) usando um solenoide para geração do campo primário e (b) usando uma bobina de Helmholtz [3].

Conforme indicado na Figura 5(a), a fim de minimizar os efeitos do ruído, após determinar a intensidade máxima da densidade de fluxo magnético, o algoritmo infere a região, na vizinhança deste ponto, onde as densidades de fluxo são sempre superiores a 90% do valor máximo. Na sequência, utilizam-se os pontos contidos nesta região de forma a se calcular a posição do pico, por meio de uma média das posições, ponderadas por seus respectivos valores de densidade de fluxo magnético. A posição resultante deste cálculo é denominada *centro magnético*, que indica a posição horizontal do centro do corpo estranho. Por sua vez, para corpos estranhos esféricos, definiu-se como parâmetro de *largura* w a distância entre o limite inferior e superior do conjunto de dados contendo as posições onde a densidade de fluxo magnético normalizada é superior a 90% do valor de pico. Em [3], foi demonstrado que há uma dependência linear entre a profundidade h , medida entre o sensor e o centro do corpo estranho, e o parâmetro w , conforme indicado na Figura 5(b). Portanto, uma vez que o *centro magnético* e a *largura* são calculados, a profundidade pode ser estimada com sucesso.

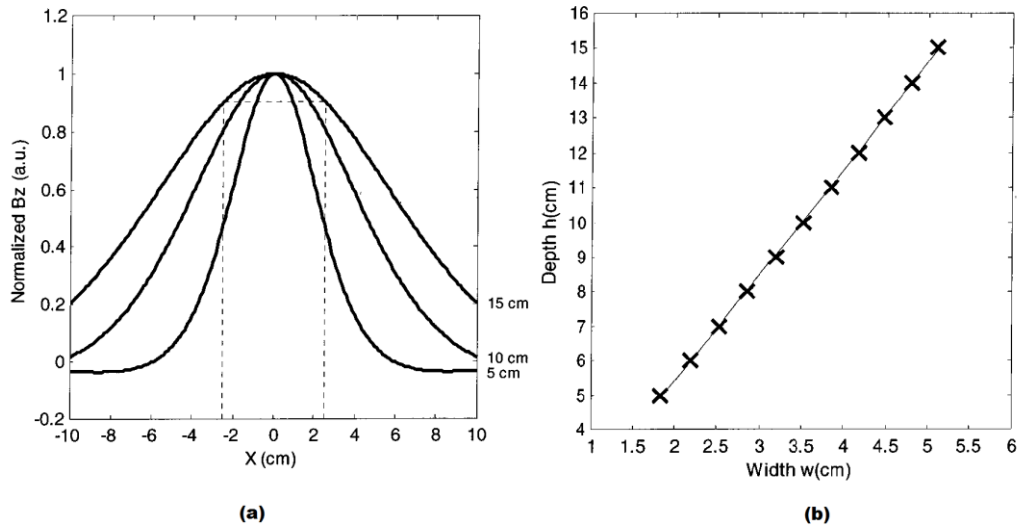


Figura 5 – Avaliação computacional da densidade de fluxo magnético normalizada e da dependência linear entre a profundidade h e o parâmetro w . Em (a), apresenta-se a componente B_z da densidade de fluxo magnético secundário normalizada, medida ao longo do eixo x , para profundidades de 5, 10 e 15 cm. Em (b), mostra-se a dependência linear entre a profundidade h , medida entre o sensor e o centro do corpo estranho, e o parâmetro w [3].

Adicionalmente, os estudos conduzidos por [3] sugerem que se utilize a diferença de fase entre as densidades de fluxo magnético primário e secundário para identificar determina o raio do corpo estranho. No entanto, conforme indicado na Figura 6(a), destaca-se que a relação entre esses parâmetros é fortemente dependente da frequência dos campos magnéticos. Percebe-se que em baixas frequências a fase varia muito pouco (menos de 5%), para esferas com raios no intervalo de 1 mm a 15 mm. Por sua vez, a dependência é mais significativa em frequências mais altas, sendo perceptível que o raio pode ser melhor estimado em frequências superiores a 500 Hz, para as quais a variação de fase pode chegar a 40%. Por outro lado, é importante destacar que a frequência selecionada não pode ultrapassar o limite superior da banda do sensor magnético empregado nas medições – em SQUIDS este limite é tipicamente da ordem de poucos kHz.

Considerando que se utiliza nas medições um sensor magnético com resolução de 10 pT, os estudos computacionais apresentados em [3] indicaram ser possível empregar a técnica proposta na localização de projéteis com raios da ordem de 3 mm a profundidades de até 10 cm. A Figura 6 (b) permite que se avalie a influência da frequência de excitação, definida para o campo primário, sobre o raio

mínimo detectável em diferentes profundidades h . Conforme esperado, verifica-se que o aumento da frequência propicia a redução do raio mínimo detectável.

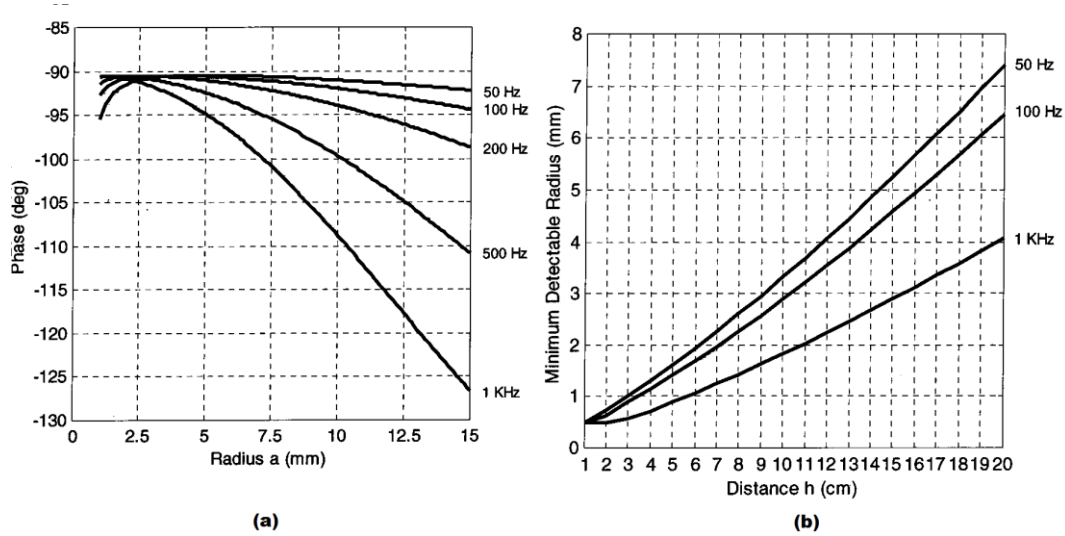


Figura 6 – Avaliação computacional da diferença de fase entre campo primário e secundário e da influência da frequência de excitação do campo primário, sobre o raio mínimo detectável. Em (a), a diferença de fase entre a densidade de fluxo magnético secundário e primário em função do raio do corpo estranho esférico, para frequências de 50, 100, 200, 500 e 1000 Hz. Em (b), mostra-se o raio mínimo detectável em função da profundidade h , para três valores da frequência de excitação (50, 100 Hz e 1 kHz) [3].

1.3. Correntes Parasitas

As correntes parasitas, também denominadas *eddy currents*, são loops de corrente induzidos em condutores submetidos a campos magnéticos que variam no tempo. Seu surgimento é uma consequência direta da existência de um campo elétrico espacialmente variável, induzido pela densidade de fluxo magnético, conforme indicado pela eq. (1), conhecida como equação de Maxwell-Faraday, onde \mathbf{E} é o campo elétrico e \mathbf{B} é a densidade de fluxo magnético [8].

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (1)$$

Diversas aplicações fazem uso de correntes parasitas, como por exemplo, técnicas de ensaios não destrutivos para detecção de rachaduras e falhas em metais, as quais são inclusive empregadas no controle de qualidade em muitos setores [9]. Um aspecto frequentemente indesejável, decorrente do surgimento de correntes parasitas, é que a passagem de correntes por materiais gera aquecimento devido ao

efeito Joule, o qual é responsável por perdas de energia em dispositivos, tais como motores e transformadores elétricos, comprometendo sua eficiência.

Detectores de metal em geral utilizam-se da indução de correntes parasitas em metais para fins de localização. Por sua vez, a técnica de localização proposta nesta dissertação é de certa forma análoga à empregada em detectores de metal genéricos, uma vez que objetiva-se detectar corpos estranhos metálicos, não-magnéticos, inseridos no corpo humano, por meio do processamento das informações contidas em mapas magnéticos associados a medições do campo magnético secundário, gerado pela indução de correntes parasitas. Neste intuito, deve-se ajustar cuidadosamente as características do sistema, tendo em vista a definição dos parâmetros do campo magnético primário (amplitude e frequência), capazes de permitir a adequada medição dos mapas de campo magnético secundário, por meio do magnetômetro selecionado.

1.3.1. Fundamentação Matemática

A formulação teórica do campo magnético secundário gerado por *eddy currents* em objetos condutores foi proposta em [6,9]. Nestes trabalhos, por simplicidade, supõe-se que há um campo magnético alternado com amplitude uniforme na região do objeto a ser localizado. Adicionalmente, supõe-se também que o objeto em questão é uma esfera maciça de raio a , conforme explicitado na Figura 7. Admite-se que os fragmentos de projéteis de armas de fogo podem ser satisfatoriamente modelados por esferas, tendo em vista que, tipicamente, a distância entre o corpo e o elemento sensor é significativamente superior ao raio da esfera. A formulação proposta é inicialmente definida em coordenadas esféricas (r , θ , ϕ) e posteriormente convertida para coordenadas cartesianas (x , y , z) [3].

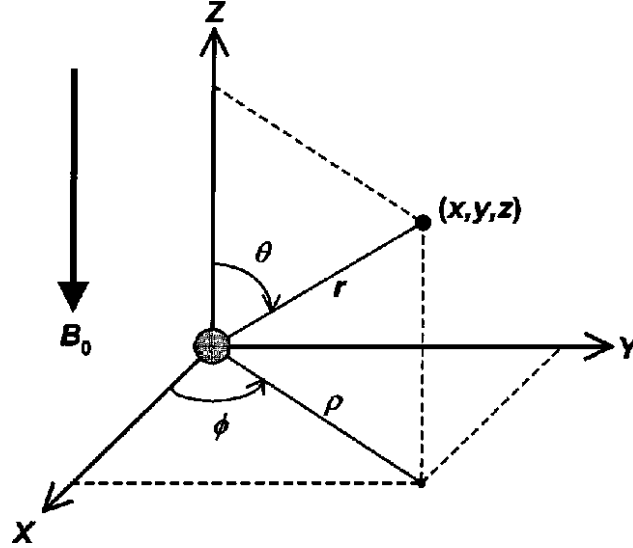


Figura 7 - Sistema de coordenadas esférico empregado na formulação teórica do problema. Uma esfera com um pequeno raio a está localizada na origem. Um Campo magnético alternado uniforme é aplicado verticalmente, com magnitude B_0 . O campo magnético secundário gerado pelas correntes parasitas é medido na posição (x, y, z) [3].

Admite-se que o plano de medição é paralelo ao plano xy , onde a esfera de raio a está inserida. Por sua vez, considera-se que r é a distância entre a esfera e o ponto de medição. A densidade de fluxo magnético primário de excitação B_0 é paralela ao eixo z , ou seja, é ortogonal ao plano $\rho - \phi$. Dessa forma, tem-se que o vetor potencial magnético A_i , induzido pelas correntes parasitas no corpo esférico, só terá componente na direção ϕ , a qual pode ser calculada por

$$A_{i\phi}(r, \theta, \phi) = B_0 \frac{4}{3} \pi a^3 \left[\frac{3}{8\pi} \frac{(2\mu_r + 1) - (2\mu_r + v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}}{(\mu_r - 1) - (\mu_r - v^2 - 1) \frac{\tanh v}{v}} \right] \times \left(\frac{\sin \theta}{r^2} \right). \quad (2)$$

Na eq. (2), B_0 é expresso em teslas, e o fator v é definido por

$$v = (1 + j) \frac{a}{\delta}, \quad (3)$$

onde δ indica a profundidade de penetração das *eddy currents* no objeto condutor (*skin depth*), dada por

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{f_0 \pi \mu_r \mu_0 \sigma}}, \quad (4)$$

onde f_0 é a frequência do campo magnético primário, σ é a condutividade elétrica do material e μ_r é sua permeabilidade magnética relativa. Em particular, no caso do chumbo, têm-se os seguintes valores médios

$$\sigma = 4.55 \times 10^6 \frac{S}{m}, \quad (5)$$

$$\mu_r = (1 - 1.7 \times 10^{-6}) \quad e \quad (6)$$

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \text{ Tm/A}. \quad (7)$$

Por sua vez, tem-se que a densidade de fluxo magnético secundária é dada pelo rotacional do vetor potencial magnético, isto é,

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}. \quad (8)$$

Consequentemente, em coordenadas esféricas, tem-se que

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_i(r, \theta, \phi) &= \nabla \times \mathbf{A}_i(r, \theta, \phi) \\ &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (A_{i\phi} \sin \theta) - \frac{\partial A_{i\theta}}{\partial \phi} \right] \hat{\mathbf{r}} \\ &\quad + \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial A_{ir}}{\partial \phi} - \frac{\partial (r A_{i\phi})}{\partial r} \right] \hat{\boldsymbol{\theta}} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial (r A_{i\theta})}{\partial r} - \frac{\partial A_{ir}}{\partial \theta} \right] \hat{\boldsymbol{\phi}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Na sequência, considerando que o vetor potencial magnético só tem componente na direção ϕ , pode-se reescrever a eq. (9) como

$$\mathbf{B}_i(r, \theta, \phi) = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (A_{i\phi} \sin \theta) \right] \hat{\mathbf{r}} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial (r A_{i\phi})}{\partial r} \right] \hat{\boldsymbol{\theta}} + 0 \hat{\boldsymbol{\phi}}. \quad (10)$$

Na sequência, substituindo o termo $A_{i\phi}$, presente na eq. (10), por sua definição apresentada na eq. (2), tem-se que

$$B_{ir}(r, \theta, \phi) = B_o a^3 \left[\frac{(2\mu_r + 1) - (2\mu_r + v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}}{(\mu_r - 1) - (\mu_r - v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}} \right] \left(\frac{\cos \theta}{r^3} \right), \quad (11)$$

$$B_{i\theta}(r, \theta, \phi) = \frac{B_o}{2} a^3 \left[\frac{(2\mu_r + 1) - (2\mu_r + v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}}{(\mu_r - 1) - (\mu_r - v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}} \right] \left(\frac{\sin \theta}{r^3} \right) \quad e \quad (12)$$

$$B_{i\phi}(r, \theta, \phi) = 0. \quad (13)$$

Com base nas definições apresentadas, em coordenadas esféricas, para a densidade de fluxo magnético secundário, eqs. (11)-(13), é possível definir a componente z da densidade de fluxo magnético B_{iz} , por meio de

$$B_{iz}(r, \theta, \phi) = B_{ir}(r, \theta, \phi) \cos \theta - B_{i\theta}(r, \theta, \phi) \sin \theta. \quad (14)$$

Ressalta-se que a componente B_{iz} é de particular importância, pois assume-se que as medições dos mapas magnéticos serão feitas por magnetômetros SQUIDS (*Superconducting Quantum Interference Devices*), cujas bobinas sensoras são tipicamente sensíveis a esta componente. Por sua vez, substituindo as definições apresentadas nas eqs. (11)-(13) na eq. (14), obtém-se

$$B_{iz}(r, \theta, \phi) = \frac{B_o}{2} a^3 \left[\frac{(2\mu_r + 1) - (2\mu_r + v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}}{(\mu_r - 1) - (\mu_r - v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}} \right] \left(\frac{1}{r^3} \right) (3 \cos^2 \theta - 1). \quad (15)$$

As coordenadas esféricas podem ser relacionadas às cartesianas, utilizando-se

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2} \\ \cos \theta = \frac{h}{r} = \frac{h}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}, \end{cases} \quad (16)$$

onde h é a distância, ao longo do eixo z , entre a esfera e o plano de medição, também denominada profundidade.

Substituindo a eq. (16) na eq. (15), tem-se:

$$B_{iz}(x, y, h) = \frac{B_o}{2} a^3 \left[\frac{(2\mu_r + 1) - (2\mu_r + v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}}{(\mu_r - 1) - (\mu_r - v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}} \right] \left(\frac{2h^2 - x^2 - y^2}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} \right). \quad (17)$$

Esta densidade de fluxo magnético possui simetria cilíndrica, com valor de pico B_{imax} em $x = y = 0$. Este parâmetro é muito útil para, por exemplo, escolher as características do magnetômetro em função dos níveis de campo secundário. Consequentemente, fazendo-se $x = y = 0$, tem-se que B_{imax} pode ser definido como

$$B_{imax}(h, a, f_o) = B_o a^3 \left[\frac{(2\mu_r + 1) - (2\mu_r + v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}}{(\mu_r - 1) - (\mu_r - v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}} \right] \left(\frac{1}{h^3} \right). \quad (18)$$

Tendo em vista a eq. (18), define-se o parâmetro $V(a, f_o)$, denominado fator de multiplicação complexo, que depende apenas das propriedades do material, tamanho da esfera e frequência de excitação. Tem-se que $V(a, f_o)$ é dado por

$$V(a, f_o) = a^3 \left[\frac{(2\mu_r + 1) - (2\mu_r + v^2(a, f_o) + 1) \frac{\tanh v(a, f_o)}{v(a, f_o)}}{(\mu_r - 1) - (\mu_r - v^2(a, f_o) + 1) \frac{\tanh v(a, f_o)}{v(a, f_o)}} \right]. \quad (19)$$

Consequentemente, substituindo a eq. (19) na eq. (18), é possível obter uma representação compacta para B_{imax} , dada por

$$B_{imax}(h, a, f_o) = \left(\frac{B_o}{h^3} \right) V(a, f_o). \quad (20)$$

Ressalta-se que $V(a, f_o)$ é um número complexo, pois, conforme indicado na eq. (3), o termo v é complexo. Consequentemente, tendo em vista a eq. (20), tem-se que B_{imax} também será um valor complexo, que pode ser expresso em termos

de seu módulo e sua fase. Dessa forma, a densidade de fluxo magnético secundário B_{imax} normalizada em relação à amplitude da densidade de fluxo magnético primário B_0 é dada por [3,19]

$$\frac{B_{smax}(h, a, f_o)}{B_o} = \frac{|V(a, f_o)|e^{j\varphi(a, f_o)}}{h^3}, \quad (21)$$

onde φ indica a diferença de fase entre a densidade de fluxo magnético primário e secundário.

1.3.2. Efeitos do Gradiômetro

Convencionalmente, os elementos sensores dos sistemas de medição utilizados são dispostos em configurações gradiométricas, as quais possibilitam melhorias significativas na relação sinal-ruído. Gradiômetros de primeira ordem realizam uma leitura diferencial entre dois sensores de comportamento idêntico, um próximo à fonte de interesse, e outro a uma distância suficiente para que este não seja significativamente sensibilizado pelo campo magnético da fonte. Dessa forma, o sinal resultante é o sinal de interesse, livre do ruído, suposto comum a ambos os sensores. Utilizando-se a eq. (17) e admitindo que a distância de afastamento entre os elementos sensores do gradiômetro é l_s , é possível expressar a densidade de fluxo magnético secundário detectado por um gradiômetro de primeira ordem por meio da eq. (22), considerando que o ruído/interferência ambiental tenha sido totalmente anulado [3,19].

$$B_{izg}(x, y, h) = \frac{B_o}{2} V(a, f_o) \left(\frac{2h^2 - x^2 - y^2}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} - \frac{2(h + l_s)^2 - x^2 - y^2}{(x^2 + y^2 + (h + l_s)^2)^{5/2}} \right). \quad (22)$$

Consequentemente, pode-se definir o valor pico de B_{izg} como

$$B_{izgmax}(h, a, f_o) = B_o V(a, f_o) \left(\frac{1}{h^3} - \frac{1}{(h + l_s)^3} \right). \quad (23)$$

1.4. Magnetômetros de alta sensibilidade

Os primeiros sensores magnéticos foram descobertos há muitos séculos atrás, sendo a bússola o mais antigo deles [10]. No entanto, no século XIX houve um acentuado avanço nos desenvolvimentos em magnetismo e medições magnéticas, os quais continuam a progredir até os dias atuais, tendo em vista o desenvolvimento

de sensores magnéticos menores e mais confiáveis, para emprego em aplicações tais como a gravação e leitura de dados armazenados em discos rígidos e memórias em geral [10,12,16].

As vantagens dos magnetômetros em relação a outros tipos de sensores estão associadas ao fato dos mesmos serem não-invasivos e robustos, o que os torna muito úteis em medições onde seja possível associar grandezas de interesse a quantidades eletromagnéticas. Por exemplo, amperímetros de *clamp* podem ser empregados em medições de correntes, sem necessidade de contato direto com os condutores, por meio da medição dos campos magnéticos gerados pelas correntes que fluem pelos condutores [19]. Por sua vez, medições biológicas também podem ser efetuadas por meio de leituras magnéticas inócuas e não invasivas, sem uso de eletrodos, desde que os magnetômetros utilizados tenham resolução e sensibilidade suficientes [19].

Os magnetômetros podem ser subdivididos em dois grandes grupos: escalares e vetoriais. Os primeiros medem somente o módulo do campo magnético, sem nenhuma informação direcional. Por outro lado, os segundos são capazes de avaliar as intensidades de cada componente do campo, individualmente.

Tipicamente, aplicações associadas a medições de campo magnético secundário, gerado por correntes parasitas, envolvem intensidades da ordem de nanoteslas, ou menos, e frequências de poucos kHz a centenas de kHz. Dessa forma, a fim de se realizar satisfatoriamente tais medições, é imperativo que sejam empregados magnetômetros de alta sensibilidade, com bandas compatíveis com a frequência definida para o campo magnético de excitação (campo primário) e resolução espacial suficiente (sensor compacto), em função das dimensões do corpo que se deseja detectar. Tendo em vista os aspectos aqui ressaltados, as próximas subseções da seção 1.3 discorrem de forma resumida sobre os princípios operacionais e características gerais dos magnetômetros que podem ser empregados nas medições de interesse da presente dissertação.

1.4.1. Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)

Atualmente, o SQUID é o mais sensível transdutor de campo magnético (mensurando) em tensão elétrica, sendo mandatório em aplicações críticas envolvendo medições de campos magnéticos ultra-fracos. Os sensores SQUIDs são capazes de efetuar medições multicanais com níveis de ruído extremamente baixos,

da ordem de alguns fT/\sqrt{Hz} , em câmaras magnéticas blindadas [20]. Convencionalmente, estes dispositivos apresentam bandas de frequência que podem excursionar de CC até algumas dezenas de kHz [11–16,18].

Seu princípio de funcionamento tira proveito da associação entre o efeito Meissner e o efeito Josephson. O SQUID faz uso de um *loop* fechado de material supercondutor interrompido por uma fina camada de material isolante, sendo que esta estrutura é denominada junção Josephson. Resfriando-se estas junções a temperaturas suficientemente baixas, faz-se com as camadas supercondutoras entrem efetivamente em estado supercondutor. Nesta situação, devido ao efeito Meissner, ao se submeter as junções a um campo magnético externo induz-se o surgimento de correntes internas ao material, que atuam no intuito de manter constante o fluxo magnético em seu interior (conservação de fluxo). Por sua vez, esta corrente induz uma diferença de potencial nos terminais da junção, a qual terá uma frequência inversamente proporcional ao produto da tensão pelo inverso do quantum de fluxo, de acordo com o efeito Josephson. Dessa forma, tem-se que variações no campo magnético externo implicarão em alterações na frequência deste sinal, sendo possível estabelecer uma relação direta entre estas grandezas.

Os SQUIDS podem ser subdivididos em dois grupos, em função de sua temperatura de operação: os LTS (*low temperature system*), que operam a 4,2 K (-196 °C) e são baseados em supercondutores de baixa temperatura, e os HTS (*high temperature system*), que operam a 77 K (-269 °C) e são baseados em supercondutores de alta temperatura. Os SQUIDS LTS requerem resfriamento com hélio líquido e, tipicamente, possuem níveis de ruído mais baixos. Por outro lado, os SQUIDS HTS usam refrigeração de nitrogênio líquido, a qual implica em custos menores, porém, também, em níveis de ruído mais elevados. Adicionalmente, destaca-se que a implementação de configurações gradiométricas, para aprimoramento da relação sinal-ruído, é comumente mais simples em SQUIDS LTS do que em sistemas HTS, devido a aspectos relacionados à homogeneidade das ligas supercondutoras empregadas [20].

O ruído magnético ambiental pode comprometer significativamente a resolução dos SQUIDS. Dessa forma, em função da resolução demandada pela aplicação de interesse, é mandatório o emprego de configurações gradiométricas e/ou câmaras magnéticas blindadas com camadas de μ -metal, para bloquear campos magnéticos de baixa frequência, e alumínio, para bloquear campos magnéticos de

alta frequência, a fim atingir o real potencial de medição de sistemas SQUID. Entretanto, tais aspectos elevam ainda mais o custo de sistemas de medição baseados em magnetômetros SQUID [11–16,18].

1.4.2. **Magnetorresistência Gigante**

O efeito de magnetorresistência gigante (GMR – *Giant Magnetoresistance*) consiste em intensas alterações na resistência elétrica de um material em função de variações no campo magnético ao qual o mesmo é submetido. Os sensores GMR atuais são capazes de operar à temperatura ambiente e apresentam variações de sua resistência em função do campo superiores a 10%/Oersted. Nos dias de hoje, versões miniaturizadas destes sensores são amplamente utilizadas nos cabeçotes de leitura de dispositivos de gravação magnética, como por exemplo discos rígidos, tendo possibilitado uma acentuada elevação de suas capacidades de armazenamento [12,14–16,21–24].

O princípio de operação de sensores GMR é descrito pela mecânica quântica, estando associado ao fato de certos metais (principalmente metais de transição, como: níquel, ferro e cobre) apresentarem estados com densidades de energia suficientemente diferentes, para elétrons com diferentes spins na energia de Fermi.

A principal estrutura usada para obtenção de sensores GMR é a estrutura denominada válvula de spin, composta por dois filmes magnéticos finos, com espessuras de alguns nanômetros, separados por um filme ainda mais fino de material não magnético. Nesta estrutura, quando as magnetizações dos filmes magnéticos são antiparalelas, existe uma dispersão aumentada devido a uma inversão das densidades de estado na outra camada magnética, o que leva a elevados valores de resistência. Por outro lado, quando as magnetizações são paralelas, as densidades de estado são espacialmente correspondentes, de modo que a dispersão é minimizada e, conseqüentemente, a resistência do material atinge valores baixos. Por sua vez, tem-se que estados de magnetização intermediários entre o antiparalelo e o paralelo levam a valores intermediários de resistência. Dessa forma, estas estruturas apresentam uma resistência dependente do campo magnético ao qual as mesmas são submetidas, tendo em vista que a magnetização é afetada pelo campo magnético externo [12,14–16,21–24].

Sensores GMR apresentam elevada resolução espacial (elementos sensores compactos), elevada sensibilidade, baixo custo e disponibilidade comercial. Por outro lado, a literatura indica que a sensibilidade destes sensores apresenta forte dependência com a temperatura, sendo reduzida em função de incrementos térmicos. Devido a este fato, inclusive, convencionalmente limita-se a corrente de excitação destes sensores a valores abaixo de 10 mA, a fim de evitar o superaquecimento em dispositivos comerciais, tais como cabeçotes de leitura e memórias de acesso aleatório [20]. Destaca-se ainda que as pesquisas relacionadas ao efeito GMR, explorando a influência dos *spins* na mobilidade dos elétrons em materiais ferromagnéticos, deram origem aos conceitos fundamentais da spintrônica [25].

1.4.3. Magnetoeimpedância Gigante

Esta é uma das tecnologias mais recentes de medição de campos magnéticos, tendo sido descoberta na década de 1990. O efeito GMI ocorre em determinados materiais ferromagnéticos, que apresentam uma intensa variação de suas impedâncias (módulo e fase) em função do campo magnético externo ao qual o material é submetido [12,14,26–29] .

Ao contrário do efeito GMR, o efeito GMI pode ser descrito por meio da eletrodinâmica clássica. A permeabilidade magnética de um material condutor ferromagnético mole é afetada pelo campo magnético externo aplicado. Por sua vez, ao se excitar estes materiais com uma corrente alternada, verifica-se que incrementos da permeabilidade implicam na redução da profundidade de penetração de corrente (*skin depth*) no material. Consequentemente, tais alterações na profundidade de penetração de corrente acarretam em variações na impedância do material. Dessa forma, é possível estabelecer uma relação direta entre campo magnético e impedância, o que possibilita a utilização destes materiais como sensores magnéticos.

Trabalhos apresentados na literatura indicam que as variações percentuais na impedância destes materiais podem chegar a 700%, mesmo para pequenas variações de campo magnético, da ordem de alguns Oe, ou equivalentemente, densidades de fluxo magnético da ordem de centenas de μT [15]. Adicionalmente,

é importante ressaltar que elementos GMI podem ser miniaturizados, podendo ser implementados por meio de estruturas com dimensões da ordem de 1 μm , ou inclusive menos, proporcionando-lhes alta resolução espacial em aplicações onde a miniaturização é necessária.

A variação da impedância de sensores GMI, excitados por uma corrente puramente alternada, é geralmente simétrica em torno do campo magnético nulo. Entretanto, existem determinados fatores capazes de induzir um comportamento assimétrico nas curvas características da impedância destes sensores, conhecido como Magnetoimpedância Gigante Assimétrica (AGMI). Dentre os principais fatores responsáveis pelo efeito AGMI destacam-se: adição de corrente de excitação CC, campos magnéticos CA ou por meio de uma alteração no processo de fabricação das amostras, denominado *exchange bias* [30]. Por meio da indução desta assimetria é possível aumentar a sensibilidade dos sensores e permitir a determinação do sentido do campo magnético externo aplicado, em torno do ponto de campo magnético nulo [31].

Por sua vez, estudos realizados no LaBioMet (PUC-Rio) indicaram que a medição da variação da fase de impedância de sensores GMI pode levar a sensibilidades consideravelmente maiores do que as convencionalmente obtidas por transdutores baseados na variação do módulo da impedância [32–38]. Sensores GMI possuem baixo custo, alta sensibilidade, alta resolução, ampla faixa de frequências e podem operar a temperatura ambiente.

Dentre os principais projetos recentemente desenvolvidos pelo grupo de pesquisa na PUC-Rio, destacam-se: caracterização das curvas de sensibilidade de amostras GMI [32,38], amplificação da sensibilidade de fase de sensores GMI e homogeneização da fase da impedância de sensores GMI heterogêneos [33–34,36], bem como a implementação de um magnetômetro GMI para medição de campos magnéticos ultra-baixos [31]. Por sua vez, em 2016, desenvolveu-se o protótipo de um gradiômetro GMI destinado à localização de corpos estranhos não-magnéticos, por meio da medição do campo magnético secundário associado a correntes parasitas induzidas no corpo estranho. A presente dissertação objetiva contribuir para o processamento dos sinais adquiridos com o sistema desenvolvido, a fim de se poder determinar com exatidão parâmetros de interesse do corpo, como sua posição, raio e profundidade [19,39].

1.5. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é subdividida nas seguintes subseções:

- Capítulo 1 “Introdução” - Introduz-se os aspectos mais relevantes da técnica de localização proposta no este trabalho. São abordados e discutidos os aspectos mais importantes de trabalhos anteriormente desenvolvidos, relacionados ao tema da presente pesquisa. Apresenta os conceitos básicos e fundamentos matemáticos dos princípios associados à indução de correntes parasitas em corpos metálicos, que serviram como base de estudo para o presente trabalho. Descreve-se de forma sucinta as características mais relevantes dos principais magnetômetros de alta sensibilidade atualmente existentes.
- Capítulo 2 “Redes Neurais e Algoritmos Genéticos” - Resume os principais conceitos sobre redes neurais (RN) e algoritmos genéticos (AG), que foram as técnicas de inteligência computacional empregadas nesta dissertação a fim de se solucionar o problema proposto. É fornecida uma breve explicação sobre seus princípios de funcionamento, características e funções destas técnicas. Também discute-se o ajuste dos parâmetros intrínsecos aos métodos utilizados.
- Capítulo 3 “Metodologia” - Apresenta em detalhes o modelo computacional proposto e implementado neste trabalho, desenvolvido a fim de se poder implementar de forma efetiva a técnica de localização, por meio do processamento da informação contida em mapas magnéticos. Descreve-se o modelo matemático adotado para simular o campo magnético primário e secundário, assim como a implementação da Rede Neural (RN) e do Algoritmo Genético (AG), utilizados para inferir a posição o raio do fragmento do projétil de arma de fogo, sua posição no plano xy e sua profundidade em relação ao elemento sensor. Além disso, são apresentadas e discutidas duas abordagens distintas para solução do problema analisado, uma delas utiliza-se de RNs e AGs enquanto que a outra é baseada apenas em AGs.
- Capítulo 4 “Resultados” - Explicita os testes realizados para avaliação do desempenho das técnicas desenvolvidas. Efetuam-se análises dos resultados

obtidos por meio das diferentes técnicas propostas. Estes resultados são comparados, a fim de se definir qual técnica permite a obtenção do melhor desempenho.

- Capítulo 5 “Conclusões e trabalhos futuros” - Apresenta as conclusões dos estudos realizados nesta dissertação. Discute-se de forma sucinta os principais resultados obtidos e avalia-se o desempenho das técnicas propostas. São ainda destacadas direções para continuação das pesquisas aqui conduzidas, em trabalhos futuros.

2 Redes Neurais e Algoritmos Genéticos

2.1. Redes Neurais

Uma Rede Neural Artificial é um modelo computacional não-linear inspirado na funcionalidade dos neurônios biológicos e na capacidade do cérebro humano de reconhecer, associar e generalizar padrões.

Em [40] encontra-se uma definição formal de uma rede neural: “Uma rede neural é um processador paralelo maciçamente distribuído sendo constituído por unidades de processamento simples, denominadas neurônios, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Ela é similar ao cérebro humano em dois aspectos: o conhecimento é adquirido pela rede, a partir de seu ambiente, através de um processo de aprendizado; e a intensidade das ligações entre os neurônios, conhecida como peso sináptico, é a forma usada para armazenar o conhecimento”.

As principais aplicações de redes neurais artificiais estão associadas a problemas envolvendo classificação e reconhecimento de padrões, previsão de séries temporais e aproximação de funções. O diagrama de blocos da Figura 8 mostra o modelo de um neurônio artificial [41].

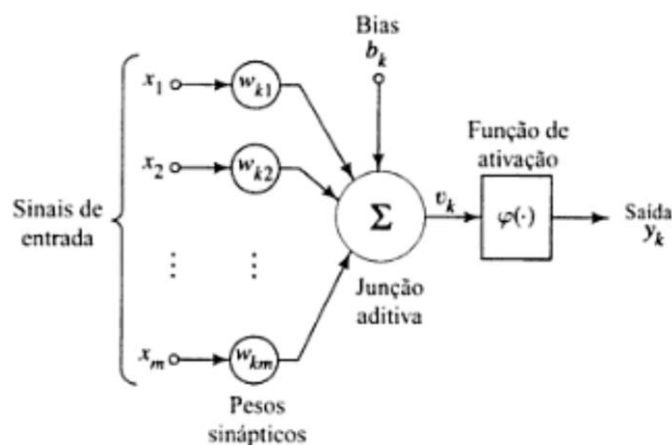


Figura 8 - Modelo de um neurônio artificial [40].

Os componentes do modelo de um neurônio artificial são:

1. Conjunto de m entradas (x_1, x_2, \dots, x_m) de um neurônio, que podem ser os padrões de entrada da rede ou as saídas de neurônios de camadas anteriores.
2. Conjunto de pesos sinápticos ($w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$). As sinapses (conexões) com pesos positivos, chamadas excitatórias, indicam o reforço na ativação do neurônio. Por outro lado, as sinapses com pesos negativos, chamadas inibitórias, indicam a inibição na ativação do neurônio.
3. Entrada da função de ativação (v_k), que é o resultado da soma ponderada das entradas por seus respectivos pesos;
4. Termo polarizador (*bias*, b_k), que assume um valor fixo e independente das entradas, permitindo o aumento ou diminuição da entrada da função de ativação.
5. Função de ativação ($\varphi(\cdot)$), que é a encargada de restringir a amplitude do intervalo de saída do neurônio;
6. Saída do k -ésimo neurônio (y_k), que é o resultado final do processamento do sinal de entrada pelo neurônio.

A saída y_k do neurônio apresentado na Figura 9 pode ser descrita matematicamente por

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (24)$$

onde

$$v_k = \left(\sum_{j=1}^m x_j \cdot w_{kj} \right) + b_k \quad (25)$$

2.1.1. Funções de Ativação

A função de ativação é responsável por determinar o valor do estado de ativação do neurônio artificial em função de suas características, tipicamente não-lineares. Ademais, a função de ativação também possibilita que se restrinja a faixa de variação do intervalo de saída do neurônio.

Na Figura 9 são apresentadas graficamente as funções de ativação mais utilizadas, as quais são descritas matematicamente a seguir [42]:

a) Função linear (Figura 9(a)): conforme o próprio nome sugere, a mesma é descrita por uma reta, estabelecendo uma relação diretamente proporcional entre v_k e y_k .

$$y_k(v_k) = av_k \quad (26)$$

b) Função degrau (Figura 9(b)): A saída assume o valor 0, para entradas negativas ou nulas, ou 1, para entradas positivas.

$$y_k(v_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } v_k > 0 \\ 0 & \text{se } v_k \leq 0 \end{cases}; \quad (27)$$

c) Função sigmoide (Figura 9(c)): é uma função contínua, estritamente crescente, que varia entre 0 e 1, também chamada de função logística.

$$y_k(v_k) = \frac{1}{1 + e^{-v_k}} \quad (28)$$

d) Função tangente hiperbólica (Figura 9(d)): apresenta comportamento similar ao apresentado por uma função sigmoide, porém com intervalo de saída limitado entre -1 e 1, ao invés de 0 e 1. Esta função é utilizada em detrimento da função sigmoide, por exemplo, em situações onde seja desejável que a saída da função de ativação possa assumir tanto valores positivos quanto negativos.

$$y_k(v_k) = \frac{1 - e^{-v_k}}{1 + e^{-v_k}} \quad (29)$$

A definição da função de ativação dos neurônios influencia fortemente no desempenho da rede neural, sendo que sua escolha é atrelada as características específicas do conjunto de dados processado pela rede.

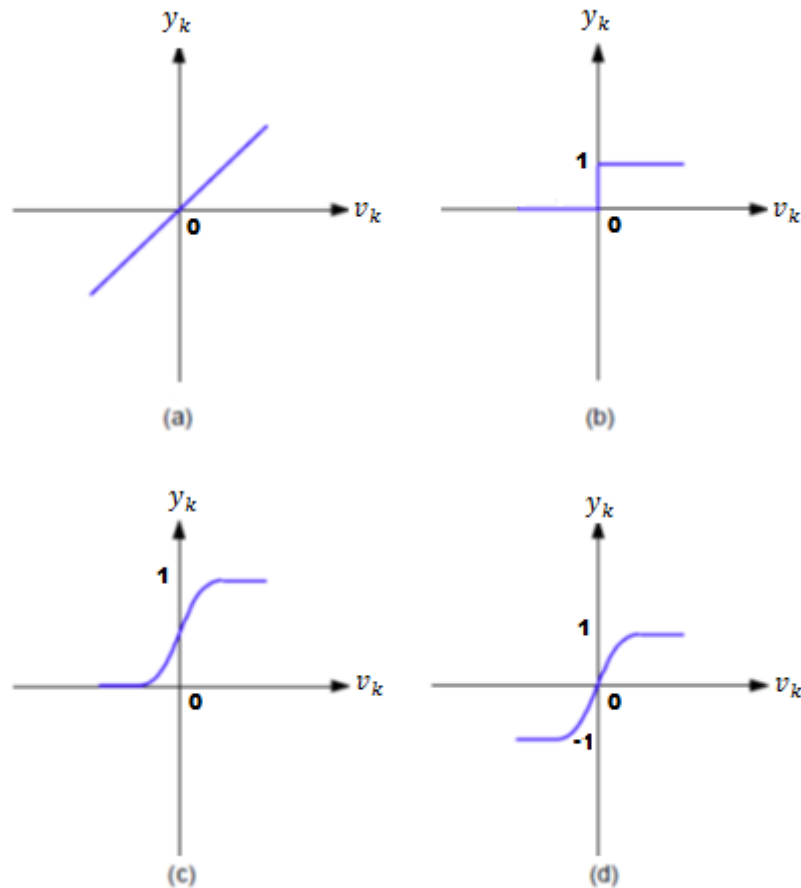


Figura 9 - Funções de ativação típicas: (a) função linear, (b) função degrau, (c) função sigmoide e (d) tangente hiperbólica [42].

2.1.2. Arquitetura de Rede

De forma geral, com relação a sua arquitetura, as redes neurais podem ser classificadas como: *não-recorrentes* e *recorrentes*.

Em redes neurais *não-recorrentes* os neurônios estão estruturados em camadas e não existe realimentação do sinal de saída de um neurônio de volta para a entrada de outros neurônios. Com relação a sua estrutura, estas redes podem ser classificadas como redes de:

- Uma única camada: possuem apenas uma camada de entrada, responsável por distribuir os padrões pela rede, que se projeta sobre uma camada de saída.

- Múltiplas camadas: existe uma ou mais camadas intermediárias (ocultas) entre as camadas de entrada e saída da rede.

Neste tipo de redes, as entradas de um neurônio são as saídas dos neurônios da camada imediatamente anterior, não havendo conexões entre neurônios de uma mesma camada ou das saídas de neurônios de uma camada as entradas de neurônios de camada anteriores. Dessa forma, o sinal de entrada sempre se propaga da entrada para a saída da rede. Consequentemente, diz-se que estas redes são estritamente do tipo alimentada adiante (*feedforward*). *Perceptron* e *Multilayer Perceptron* (MLP) são exemplos de modelos de redes não-recorrentes. Uma rede MLP *feedforward* com uma camada oculta é ilustrada na Figura 10.

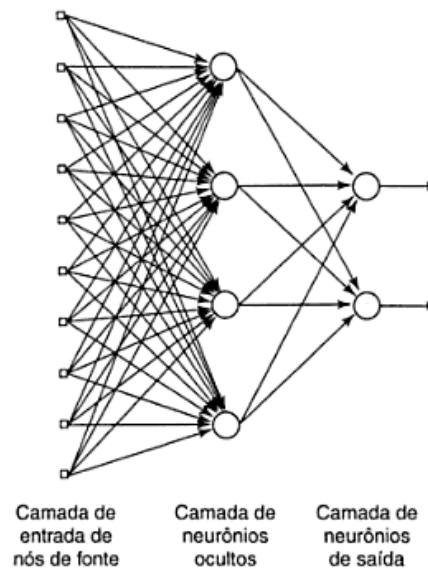


Figura 10 - Rede MLP *feedforward* totalmente conectada com uma camada oculta e uma camada de saída [40].

Por outro lado, em redes neurais *recorrentes* o sinal de saída de um neurônio retorna para a entrada de outros neurônios ou é realimentado para a sua própria entrada. Estas redes não possuem uma estrutura rígida, sendo que as saídas de seus neurônios podem se ligar as entradas de qualquer outro neurônio da estrutura, presentes tanto em camadas anteriores quanto na mesma camada [40]. A Figura 11 ilustra um exemplo de rede recorrente com neurônios ocultos [41].

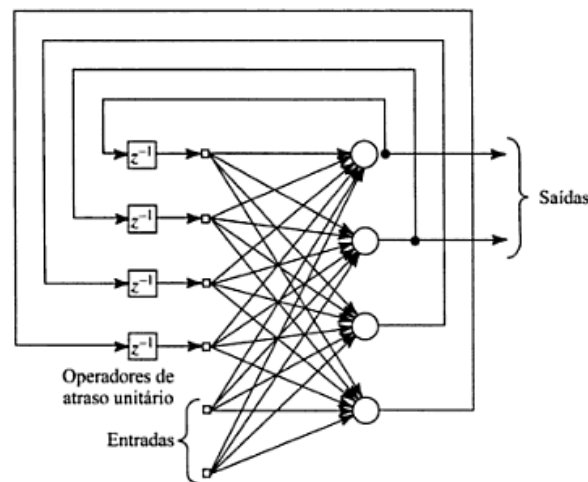


Figura 11 - Rede recorrente com neurônios ocultos [40].

2.1.3. Tipos de Aprendizado

Para adquirir conhecimento, as redes neurais utilizam-se de um processo de aprendizado pelo qual os parâmetros livres de uma RNA são adaptados por meio de um processo de estimulação do ambiente no qual a rede está inserida [40]. O tipo de aprendizagem é determinado pela forma através da qual são efetuadas as mudanças nos valores destes parâmetros.

Em um modelo de redes neurais artificiais o aprendizado é decorrente do treinamento da rede por meio da apresentação de um conjunto de padrões às suas unidades visíveis (entradas e saídas). O objetivo do treinamento consiste em atribuir valores apropriados aos parâmetros livres da rede (pesos sinápticos e *bias*), de modo a permitir que o conjunto de saídas apresente um erro inferior a um dado valor estabelecido. O conhecimento obtido pelas redes neurais é armazenado em seus parâmetros livres. Os procedimentos de aprendizado são classificados em três tipos: supervisionado, não-supervisionado e por reforço.

O *Aprendizado supervisionado* baseia-se na apresentação de um conjunto de exemplos de entrada/saída à rede, denominado conjunto de treinamento. A partir do vetor de entrada, a rede realiza seu processamento de modo a retornar uma resposta associada. Por sua vez, esta resposta é comparada com o vetor de saída ideal que a mesma deveria apresentar, para o respectivo vetor de entrada avaliado. Dessa forma, pode-se determinar o erro de processamento. Na sequência, este é realimentado através da rede e utilizado a fim de ajustar de forma adequada os

pesos, de acordo com o algoritmo de treinamento selecionado para minimizar o erro ou torná-lo aceitável. O algoritmo de retropropagação (*Backpropagation*) é o algoritmo de aprendizado supervisionado mais utilizado.

O *Aprendizado não-supervisionado* não requer o conhecimento das saídas desejadas, sendo que a aprendizagem de padrões ocorre apenas com base nas características dos conjuntos de entrada fornecidos. Durante o treinamento, os pesos da rede são modificados de forma que vetores de entrada similares resultem nos mesmos padrões de saídas. O processo de treinamento implica no agrupamento de padrões de entrada em grupos com características similares ou na criação de novos grupos automaticamente. O Algoritmo de Hopfield e os Mapas de Kohonen são os algoritmos de aprendizado não-supervisionado mais importantes [40].

O *Aprendizado por reforço* utiliza uma estrutura composta de estados, ações, penalizações e recompensas, sendo que o aprendizado se dá a partir da interação contínua do agente com o ambiente. O ambiente é descrito por um conjunto de estados e o agente pode executar, para cada estado, uma ação dentro de um conjunto de ações possíveis, recebendo do ambiente um valor de reforço em resposta à ação tomada. Este reforço indica o valor imediato da transição estado-ação-novo estado. A cada transição estado-ação-novo estado, o agente recebe um valor de reforço do ambiente. O objetivo do aprendizado é minimizar uma função de custo, definida como a expectativa do custo cumulativo de ações tomadas ao longo de uma sequência de passos, ao invés de ser simplesmente função do custo imediato [40]. Ao contrário dos aprendizados supervisionado e não-supervisionado, tem-se que o aprendizado por reforço é baseado em percepções advindas de sucessivas interações diretas com o ambiente [41].

2.1.4. Redes Multilayer Perceptron

Redes MLP (*Multilayer Perceptron*) são o tipo mais conhecido de Redes Neurais Artificiais, as quais são baseadas em uma estrutura não-recorrentes, com alimentação direta (*feedforward*) e compostas por uma camada de entrada, uma ou mais camadas escondidas (ocultas) e uma camada de saída. Uma MLP com camada oculta única é mostrada na Figura 12.

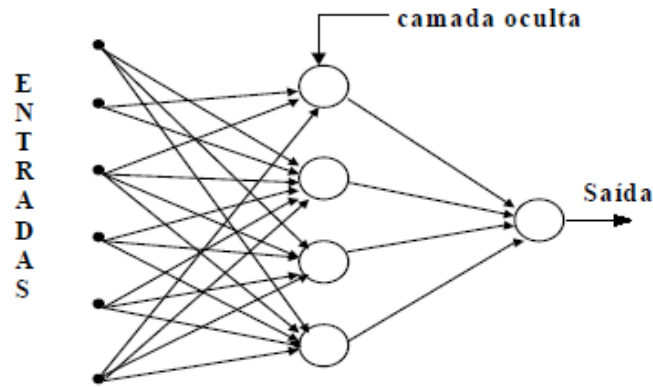


Figura 12 - Rede MLP com uma camada oculta [41].

Para este tipo de rede, o modelo de cada neurônio inclui uma função de ativação não-linear e diferenciável, sendo a função sigmoide (logística) a mais utilizada. Os parâmetros livres ajustados por meio do treinamento são pesos sinápticos e *bias* [41].

2.1.4.1. Treinamento

O algoritmo de treinamento mais utilizado em redes neurais MLP é o *Backpropagation*, o qual é um algoritmo de aprendizado supervisionado baseado na aprendizagem por correção do erro. De forma mais detalha, tem-se que o processo de aprendizagem consiste na apresentação de conjuntos de padrões de entrada-saída à rede neural. A resposta (saída) da rede para cada conjunto de entrada apresentado é comparada com a resposta idealmente esperada. Dessa forma, pode-se calcular o erro, por meio da diferença entre o valor obtido (resposta da rede) e o valor desejado. Na sequência, este erro é propagado para as camadas anteriores (retropropagação do erro) e utilizado para ajustar os pesos de cada neurônio, de modo a minimizar o erro obtido pela próxima saída da rede. O algoritmo de ajuste dos pesos baseia-se no método do gradiente descendente, no qual os ajustes dos pesos são proporcionais ao gradiente do erro. Tais ajustes podem ser implementados por meio de duas técnicas distintas: por padrão (*on-line*) ou por ciclo (*batch*). Na primeira, a atualização dos pesos é realizada imediatamente após cada padrão ser apresentado à rede. Na segunda, a atualização ocorre após subgrupos dos padrões contidos no conjunto de treinamento serem apresentados a rede.

O processo de aprendizado é interrompido por meio de critérios de parada, tais como: erro menor do que um valor pré-determinado, variação do erro satisfatoriamente pequena, número máximo de interações (épocas), etc. Na prática, na maioria das vezes, utiliza-se uma combinação dos critérios de parada anteriormente mencionado [40-41].

2.2. Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são uma técnica computacional empregada em problemas de otimização, baseada em algoritmos probabilísticos que fornecem um mecanismo de busca paralela e adaptativa. AGs são inspirados no princípio Darwiniano de sobrevivência dos mais aptos e na reprodução genética [43]. Por meio da evolução de populações de soluções codificadas por cromossomas artificiais, os AGs implementam modelos computacionais capazes de identificar as melhores soluções para um determinado problema [44].

Denomina-se cromossoma (indivíduo) a estrutura de dados que representa uma das possíveis soluções dentro do espaço de busca do problema. Por sua vez, a aptidão de cada cromossoma pode ser medida por meio de uma função de avaliação. A cada iteração do algoritmo (geração), a população de indivíduos é submetida a um processo evolucionário que envolve avaliação, seleção, recombinação (*crossover*) e mutação.

Os novos indivíduos (novos pontos no espaço de busca), gerados através de recombinação e mutação, são avaliados e reintroduzidos na população. A cada geração, o processo de evolução ocorre de modo a priorizar a manutenção dos melhores indivíduos na população, em detrimento dos piores (sobrevivência do mais apto). O processo de evolução ocorre por N gerações, até que um critério de parada seja satisfeito. Ao fim do ciclo evolutivo, o AG retorna o melhor indivíduo encontrado como solução para o problema [41]. A Figura 13 ilustra um fluxograma típico do funcionamento de um algoritmo genético.

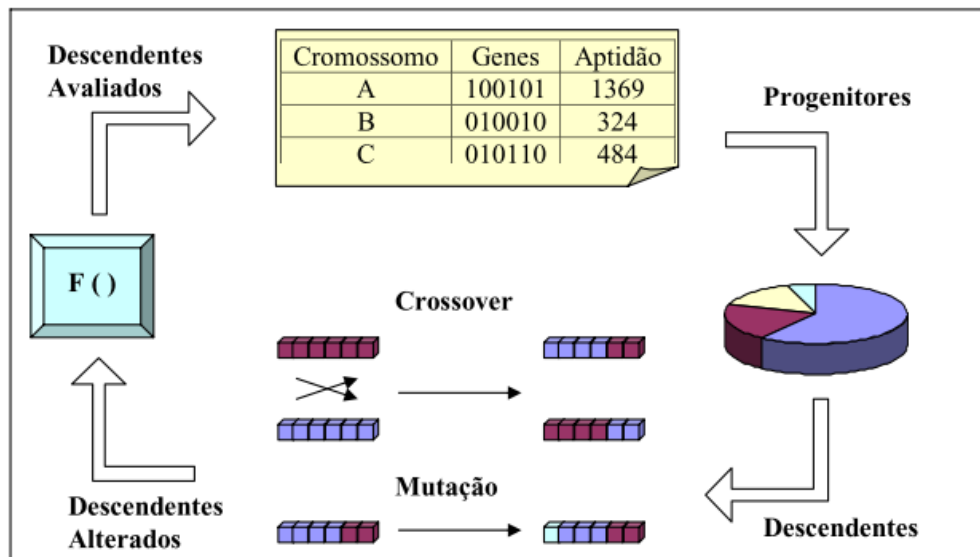


Figura 13 - Fluxograma típico de um algoritmo evolucionário [45].

Os principais aspectos inerentes à descrição de um algoritmo genético são:

- Representação das soluções,
- Decodificação do cromossoma,
- Avaliação,
- Seleção,
- Reprodução,
- Operadores Genéticos,
- População inicial, e
- Parâmetros e critérios de parada

As próximas subseções focam no detalhamento dos aspectos aqui destacados.

2.2.1. Representações das Soluções

A representação refere-se à definição da forma como as soluções do espaço de busca de um problema serão codificadas para o cromossoma, de modo que a permitir que as mesmas possam ser adequadamente manipuladas pelo algoritmo. A melhor representação a ser adotada depende das características específicas de cada tipo de problema e deve propiciar uma avaliação adequada de todo o espaço de busca que se deseja investigar [44,46-47]. Os principais tipos de representação são:

- Binária para problemas numéricos e inteiros;

- Real para problemas numéricos;
- Lista, para problemas baseados em ordem; e
- Vetorial, para problemas de agrupamento.

A solução de um problema é representada por um conjunto de parâmetros, sendo que cada um desses parâmetros é denominado gene, o qual pode ser um número real, inteiro ou binário. Um conjunto de genes com a mesma representação constitui um segmento e um conjunto de segmentos compõe um cromossoma (indivíduo). Por sua vez, um conjunto de indivíduos com a mesma estrutura forma uma população.

2.2.2. Decodificação do Cromossoma

Os cromossomas representam possíveis soluções de um problema. Por sua vez, a decodificação do cromossoma permite que as aptidões das soluções codificadas sejam efetivamente avaliadas em função das características do problema analisado. Este processo possibilita a construção da solução real do problema, fenótipo, a partir do cromossoma, genótipo. É importante garantir que cromossomas com características diferentes sejam decodificados em estruturas distintas, entretanto é possível que cromossomas diferentes possuam aptidões iguais [44-45].

2.2.3. Avaliação

Nesta fase do processo evolutivo se estabelece uma ligação direta entre o Algoritmo Genético e as características do problema a ser solucionado. A avaliação é o processo de associar um valor de aptidão a cada indivíduo, selecionado pelo AG.

A aptidão indica o quão bem um indivíduo da população atende aos requisitos de um problema. Normalmente, são atribuídos valores escalares, inteiros ou reais, associados ao grau de aptidão de cada indivíduo. Por sua vez, o cálculo da aptidão é feito por meio de uma função de avaliação, que é a função, ou procedimento, responsável por avaliar o grau de qualidade dos indivíduos (genótipos) presentes na população, levando em consideração as características do problema analisado [48].

2.2.4. Seleção

Esta fase tem por objetivo garantir a perpetuação de boas características presentes em indivíduos da população. Após a etapa de avaliação dos indivíduos, alguns deles são selecionados para a fase de reprodução, que é a base fundamental da evolução genética. O processo de seleção é baseado no princípio da sobrevivência dos indivíduos mais aptos, ou seja, os indivíduos com melhor aptidão possuem uma maior probabilidade de serem selecionados para reprodução [49].

Dessa forma, se privilegia a seleção dos indivíduos progenitores mais aptos para o cruzamento genético, e, conseqüentemente, a transmissão de seus genes para gerações futuras, as quais serão compostas majoritariamente por seus descendentes diretos [50].

Os principais mecanismos de seleção são:

- **Método da roleta:** consiste em associar os indivíduos da população a frações da área total de uma roleta de maneira estocástica, sendo que cada uma destas frações é proporcional à aptidão do indivíduo associado. Conseqüentemente, os indivíduos mais aptos têm maiores probabilidades de serem escolhidos. Devido às características da roleta, espera-se que a maioria dos indivíduos presentes nas populações de cada nova geração sejam descendentes diretos dos indivíduos mais aptos da geração anterior e, conseqüentemente, que os menos aptos tenham dificuldades de transmitir seus genes para gerações futuras [43,49]. Um exemplo de uma roleta com cinco indivíduos é apresentado na Figura 14, onde tem-se que o indivíduo 1 é o mais apto e o indivíduo 2 o menos apto.

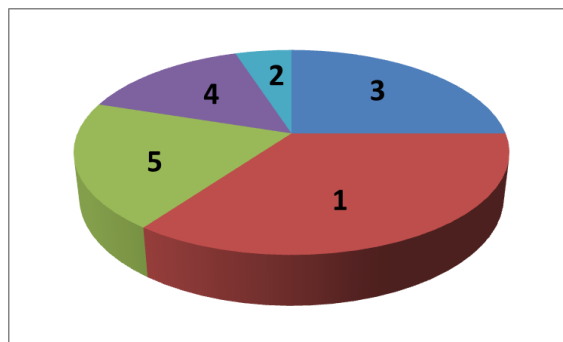


Figura 14 – Representação da seleção por roleta para 5 indivíduos.

- **Ordenação linear ou exponencial:** os indivíduos da população são ordenados em função de suas respectivas aptidões, sendo atribuído a cada indivíduo um valor correspondente à sua posição na população ordenada. Dessa forma, ao pior indivíduo é atribuído o valor 1 e ao melhor o valor N , onde N representa o tamanho da população. Na sequência, tendo em vista as posições de cada indivíduo na ordenação efetuada, atribui-se a cada um deles uma probabilidade de seleção, calculada com base em uma dada distribuição, sendo as mais usuais a linear e a exponencial [50–52].
- **Seleção de restante (*selection remainder*):** uma parcela dos indivíduos progenitores é selecionada deterministicamente, em função da parte inteira do valor esperado de cada indivíduo. Por sua vez, o valor esperado é definido como o produto da quantidade de indivíduos pertencentes à população pela probabilidade de seleção de cada indivíduo avaliado. Mais especificamente, tem-se que o indivíduo é selecionado como progenitor por uma quantidade de vezes igual a parte inteira de seu valor esperado. Por exemplo, se o valor esperado de um indivíduo for 2.3, este indivíduo é automaticamente selecionado duas vezes como progenitor, pois a parte inteira de seu valor esperado é 2. O restante do conjunto de progenitores é composto por indivíduos selecionados por meio do método de seleção da roleta, calculando-se as áreas correspondentes de cada indivíduo em função da parte fracionária de seu valor esperado [53-54]. Na Tabela 1 apresenta-se um exemplo da técnica de seleção aqui discutida, para uma população com seis indivíduos.

Tabela 1. Exemplos de parâmetros característicos do Método de Seleção de Restante.

<i>Indivíduo</i>	<i>Aptidão</i>	<i>Probabilidade de seleção</i>	<i>Valor Esperado</i>	<i>Número de vezes em que foi selecionado como progenitor</i>	<i>Probabilidade fraccionaria</i>
1	3,2	0,205	1,23	1	0,23
2	1,2	0,076	0,45	0	0,45
3	1,3	0,083	0,50	0	0,50
4	5,4	0,346	2,08	2	0,08
5	2,2	0,141	0,85	0	0,85
6	2,3	0,147	0,89	0	0,89

- **Seleção por torneio:** consiste em escolher aleatoriamente uma determinada quantidade de indivíduos da população, denominada dimensão do torneio, e fazer um torneio entre eles. Em cada torneio comparam-se os valores de aptidão dos indivíduos participantes e seleciona-se como vencedor o mais apto, o qual irá participar da etapa de reprodução genética [43,50].

2.2.5. Reprodução

Nesta fase é determinado o critério a ser adotado para substituição do conjunto de indivíduos que compõem a população de uma dada geração por um novo conjunto de indivíduos que irá compor a população da próxima geração. Existem basicamente os seguintes métodos de reprodução [44,46-47,55]:

1. **Troca de toda população:** todos os indivíduos da população corrente são substituídos por novos indivíduos a cada geração.
2. **Troca de toda a população com elitismo:** todos os cromossomas são substituídos, exceto o cromossoma mais apto da população corrente, que é copiado para a população seguinte. A técnica de elitismo garante a preservação do melhor indivíduo de uma geração na geração seguinte, evitando que a nova população se torne pior do que a população atual.
3. **Troca parcial da população (*steady state*):** os piores M indivíduos da população corrente são substituídos por novos indivíduos e os indivíduos mais aptos

são preservados. O número de indivíduos a serem substituídos é convencionalmente denominado GAP.

4. **Troca parcial da população** (*steady state*) **sem duplicados**: de forma equivalente a técnica anterior, os piores M indivíduos da população corrente são substituídos por novos indivíduos e os indivíduos mais aptos são preservados. Entretanto, aqui não permite-se a presença de indivíduos duplicados, os quais são descartados.

2.2.6. Operadores Genéticos

Os operadores genéticos são responsáveis por encontrar novos indivíduos com alta probabilidade de propiciar melhorias significativas no desempenho do sistema. Os operadores genéticos básicos se subdividem em dois grandes grupos: **cruzamento** e **mutação**.

- ❖ **Cruzamento (Crossover)**: Consiste em efetuar trocas de genes entre dois indivíduos. Neste processo são gerados dois novos indivíduos (descendentes), resultantes da combinação de informação contida em um par de indivíduos progenitores. A evolução do AG, em busca de indivíduos mais aptos, é intimamente relacionada ao sucesso do cruzamento entre progenitores, sendo que desejável que esta operação seja capaz de gerar descendentes ainda mais aptos que os progenitores envolvidos no cruzamento. O operador cruzamento visa tirar proveito do material genético presente na população [49-50]. Dependendo da representação usada na codificação dos indivíduos e das características do problema existem vários tipos de operadores de cruzamento. Os operadores de cruzamento mais comuns são [56]:

- **Cruzamento de um ponto de corte**: os descendentes são formados pela recombinação genética entre os indivíduos progenitores em torno de um ponto de corte definido aleatoriamente, conforme mostrado na Figura 15.

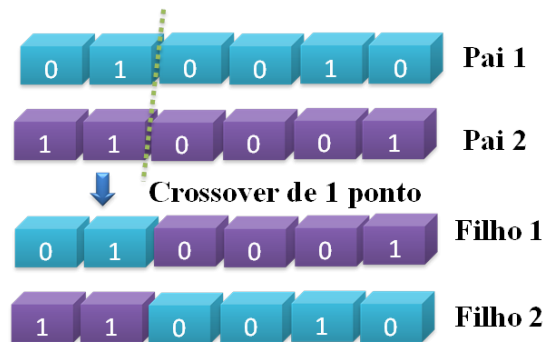


Figura 15 – Representação do cruzamento de um ponto [57].

- **Cruzamento de dois pontos de corte:** os descendentes são formados pela recombinação genética dos progenitores com base em dois pontos de corte selecionados de forma aleatória, conforme mostrado na Figura 16.

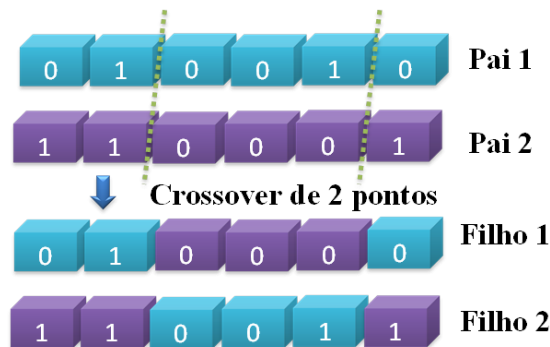


Figura 16 – Representação do cruzamento de dois pontos [57].

- **Cruzamento multiponto ou uniforme:** os descendentes são gerados por meio da recombinação genética dos progenitores de acordo com valores estabelecidos em uma máscara binária gerada aleatoriamente [58], conforme mostrado na Figura 17.

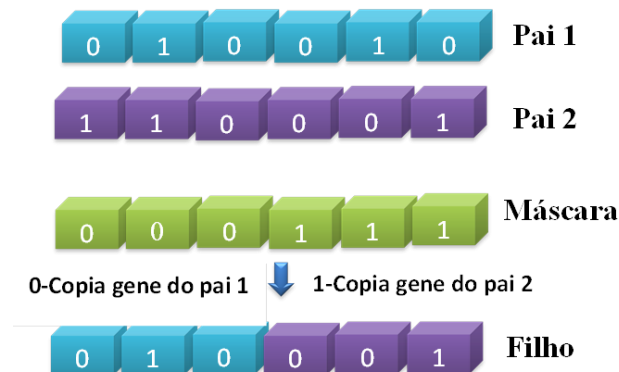


Figura 17 – Representação do cruzamento uniforme [57].

- **Cruzamento Heurístico:** retorna uma descendência que se encontra na linha que contém os dois pais, a uma pequena distância do pai com melhor aptidão e, conseqüentemente, longe do pai menos apto. O parâmetro Raio (R) especifica o quão longe o filho está em relação ao melhor pai. Admitindo que Pai1 e Pai2 sejam os progenitores e que Pai1 seja o mais apto entre eles, tem-se que o descendente (Filho) gerado por esta função de cruzamento será [43,59-60]:

$$\text{Filho} = \text{Pai1} + R * (\text{Pai1} - \text{Pai2}) \quad (30)$$

- ❖ **Mutação:** é um operador exploratório que tem por objetivo aumentar a diversidade da população [47,55,61]. Esta operação explora novas regiões do espaço de busca, evitando que o AG fique preso a uma única região do espaço. A mutação opera sobre os indivíduos resultantes do processo de cruzamento e introduz mudanças aleatórias no indivíduo, por meio da troca do conteúdo de uma posição do cromossoma (gene). A operação de mutação é aplicada em cada gene do cromossoma com uma dada probabilidade (pm), denominada taxa de mutação. A utilização deste operador genético permite que valores de genes, eventualmente perdidos durante o processo de evolução, possam retornar à população, possibilitando a avaliação dos mesmos em novos contextos populacionais [49-50]. Um exemplo de mutação binária pode ser visualizado na Figura 18.



Figura 18 – Representação da operação genética de mutação.

2.2.7. Parâmetros da Evolução

A seleção de valores adequados para os parâmetros de um AG tem impacto direto na evolução do mesmo, podendo afetar significativamente a solução do problema analisado. A etapa de ajuste destes parâmetros é denominada *tunning*.

O valor ótimo dos parâmetros de ajuste é dependente das características específicas do problema analisado, conforme concluído por diversas pesquisas. Tais estudos apontam ainda que, a cada estágio da evolução, idealmente, este conjunto de parâmetros deveria ser reajustado em função das características da população, visto que os AGs são um processo dinâmico [62].

Os parâmetros que mais influenciam o desempenho de AGs são [63]:

- ❖ **Tamanho da População:** afeta diretamente o desempenho global e a eficiência do AG. Uma população suficientemente grande fornece uma melhor cobertura do espaço de busca do problema e previne a convergência prematura para ótimos locais. Entretanto, populações muito grandes demandam um esforço computacional maior e, conseqüentemente, requerem um maior tempo de processamento computacional. Por outro lado, populações pequenas não permitem uma adequada cobertura do espaço de busca do problema, o que aumenta a probabilidade do AG ficar preso em ótimos locais.
- ❖ **Taxa de Cruzamento:** define a probabilidade de um indivíduo ser recombinado com outro. Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Isto pode gerar efeitos negativos, pois a maior parte da população será substituída (recombinada), a cada nova geração. Esta situação implicará em perda de variedade genética, podendo ocorrer perda de estruturas de alta aptidão e, conseqüentemente, convergência a uma população com indivíduos extremamente parecidos, dificultando a localização do ótimo global. Por outro lado, taxas de cruzamento baixas fazem com que o algoritmo se torne muito lento, aumentando o tempo de convergência para uma solução aceitável. Destaca-se que, a adoção de técnicas de substituição de indivíduos baseadas no conceito do elitismo evita a perda de estruturas de alta aptidão.
- ❖ **Taxa de Mutação:** determina a probabilidade do conteúdo de um gene do cromossomo ser alterado. Este parâmetro contribui para a diversidade

populacional e previne a estagnação do processo evolutivo. A fim de não se prejudicar a convergência para soluções ótimas, deve-se evitar o emprego de taxas de mutação muito altas, pois nestes casos a busca pelo ponto ótimo se tornará majoritariamente aleatória.

- ❖ **Intervalo de Geração:** determina a porcentagem da população que será substituída a cada nova geração. O AG torna-se mais rápido, quando a maior parte da população é substituída a cada nova geração. Porém, pode-se perder indivíduos com alta aptidão. Por outro lado, quando apenas uma pequena fração da população é substituída a cada nova geração, o AG torna-se mais lento. Porém, evita-se a perda de indivíduos com alta aptidão.
- ❖ **Número de gerações:** é um dos critérios de parada usado por AGs, baseado na especificação do número máximo de ciclos de evolução. Um número de gerações muito pequeno pode implicar em uma queda no desempenho, pois o ciclo evolutivo do AG poderá ser interrompido prematuramente e, conseqüentemente, a solução obtida será sub-ótima. Por outro lado, um número grande de gerações tende a propiciar uma melhor avaliação do espaço de busca do problema, evitando que o AG retorne soluções sub-ótimas, devido ao encerramento prematuro do processo de evolução. Entretanto, o aumento da quantidade de gerações implica no aumento do tempo de processamento, sendo que um número de gerações demasiadamente alto, pode implicar em um esforço computacional desnecessário e infrutífero.
- ❖ **Convergência da Função de Avaliação:** é empregada como critério de parada, a fim de evitar que o processamento consuma tempos computacionais desnecessariamente elevados. Baseia-se na interrupção automática do ciclo evolutivo, quando não ocorre melhoria significativa na solução durante um dado número de gerações.
- ❖ **Número de rodadas:** indica o número total de vezes que um AG será executado. Como Algoritmos Genéticos são uma técnica probabilística, em alguns casos, é interessante executá-los mais de uma vez, a fim de se tentar obter melhores soluções. As rodadas são independentes entre si,

Sendo que novas rodadas não estão presas aos ótimos locais encontrados em rodadas anteriores. Dessa forma, são avaliados novos pontos do espaço de busca, que podem implicar na obtenção de melhores soluções.

- ❖ ***Taxa de semeadura***: determina a porcentagem dos melhores indivíduos de uma rodada que serão utilizados como sementes na população inicial da rodada seguinte. Dessa forma, faz-se com que as rodadas seguintes tirem algum proveito dos resultados obtidos em rodadas anteriores.

3 Metodologia

Com base na fundamentação teórica apresentada em [3,6,9], neste trabalho se propõe modelar os fragmentos de projéteis de arma de fogo por meio de esferas com raio a , situadas em um espaço de busca contido em um plano xy localizado a uma distância h do sensor, medida ao longo do eixo z . Ressalta-se que o modelo esférico adotado é uma boa simplificação, devido às dimensões típicas dos fragmentos e às distâncias de separação convencionalmente existentes entre o sensor e o fragmento do projétil.

Considerando que os fragmentos esféricos que se deseja localizar são compostos por materiais não-ferromagnéticos (tipicamente chumbo), não é possível localizá-los diretamente por meio de medições magnéticas. Assim de forma análoga ao modelo teórico discutido em [3], propõe-se aplicar um *campo magnético primário* alternado, gerado por um solenoide, a fim de se induzir correntes parasitas no projétil, já que, apesar do chumbo não ter campo remanente ($\mu_r \approx 1,0$), ele é um bom condutor elétrico ($\sigma \approx 4,55 \cdot 10^6$ S/m).

É importante destacar que o modelo teórico desenvolvido em [3] admite que o campo magnético primário incidente sobre o fragmento é uniforme e possui apenas a componente ao longo do eixo z . Por outro lado, o modelo desenvolvido nesta dissertação é mais realista, pois leva em consideração as dimensões reais do solenoide de excitação a fim de modelar individualmente as três componentes da densidade de fluxo magnético primário $B_o(x)$, $B_o(y)$ e $B_o(z)$, bem como suas ***não uniformidades***.

Dessa forma, diferentemente de [3], as correntes parasitas induzidas no corpo esférico serão função de $B_o(x)$, $B_o(y)$ e $B_o(z)$. Por sua vez, estas correntes gerarão um *campo magnético secundário*, que pode ser detectado por meio de uma leitura gradiométrica entre os sensores S1 e S2, de alta sensibilidade, localizados no interior do solenoide de excitação. A Figura 19 mostra uma representação esquemática da estrutura proposta.

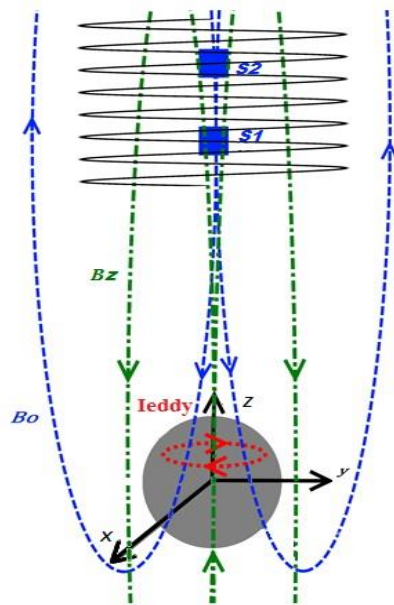


Figura 19 – Arranjo de medição proposto neste trabalho. O solenoide gera uma densidade de fluxo magnético primário B_0 (linha tracejada em azul) alternada que incide sobre o corpo esférico estranho, induzindo correntes parasitas (I_{eddy}) também alternadas (linha pontilhada em vermelho). Por sua vez, tais correntes produzem uma densidade de fluxo magnético secundário B_z (Linha traço-ponto em verde). Dessa forma, o resultado da leitura gradiométrica (diferencial) pelos elementos sensores S1 e S2 é composto principalmente pela densidade de fluxo magnético secundário [19].

Os algoritmos de localização desenvolvidos baseiam-se no processamento de mapas de campo magnético obtidos a partir de medições realizadas com a configuração apresentada na Figura 19. Admite-se que os sensores S1 e S2 utilizados são sensores GMI, orientados de modo a medir a componente z do campo magnético resultante. Tais algoritmos objetivam estimar as posições x e y do corpo esférico, sua profundidade h e seu raio a .

A primeira técnica desenvolvida (Técnica 1) determina as posições x e y por meio de um módulo de localização baseado em um método de janelamento aplicado sobre a matriz de medidas, considerando o valor médio do campo magnético no interior de janelas com dimensões decrescentes. Na sequência, a distância h da esfera ao sensor é inferida por meio de um módulo baseado em uma *rede neural*, utilizando a informação de posição obtida no módulo anterior. Finalmente, o raio a da esfera é estimado por meio de um módulo baseado em um *algoritmo genético*, que recebe os valores de x , y e h calculados pelos estágios anteriores e utiliza-os a fim de simular mapas de campo magnético para diferentes valores de a . O AG tem por objetivo minimizar o erro entre os mapas gerados pelo algoritmo genético,

usando a formulação matemática desenvolvida, e o mapa efetivamente medido (alvo).

A segunda técnica desenvolvida (Técnica 2) objetiva a determinação dos parâmetros de interesse por meio da utilização de um único módulo, baseado em um AG com quatro variáveis livres: x , y , h e a . O algoritmo atua no intuito de definir a combinação destas variáveis responsável pela minimização do erro entre os mapas gerados pelo algoritmo genético e o mapa efetivamente medido (alvo).

Destaca-se que os mapas de campo utilizados como alvo, neste trabalho, não foram experimentalmente medidos. Estes mapas foram simulados admitindo-se diferentes combinações dos parâmetros de interesse, bem como situações com e sem ruído. A seção 3.1 descreve em detalhes o modelo matemático adotado para simulação dos mapas de campo primário e secundário. Por sua vez, as seções 3.2 e 3.3 descrevem as principais características das duas técnicas desenvolvidas.

3.1. **Modelagem dos Campos Magnéticos: Primário e Secundário**

3.1.1. **Modelagem do Campo Magnético Primário**

Conforme mencionado anteriormente, o modelo aqui proposto se diferencia do arcabouço matemático definido em [3] por considerar efetivamente as três componentes do campo magnético primário incidente sobre a esfera condutora, gerado por um solenoide de excitação. O modelo atualmente desenvolvido é mais exato, visto que as componentes x e y do campo magnético primário também afetam a componente z do campo magnético secundário, a qual é a componente efetivamente medida pelos sensores.

3.1.1.1. **Fundamentos matemáticos para o Campo Magnético Primário**

Por meio da lei de Biot-Savart é possível calcular a densidade de fluxo magnético gerado por correntes elétricas [64]. No caso de correntes que circulam por circuitos filiformes, tem-se que um elemento infinitesimal de comprimento, percorrido por uma corrente I , produz uma densidade de fluxo magnético elementar $d\vec{B}$ em um dado ponto \vec{r} do espaço, localizado a uma distância r em relação a $d\vec{l}$, que possui o mesmo sentido da corrente I . Dessa forma, pode-se definir:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}. \quad (31)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, e \hat{r} é um vetor unitário com a direção do vetor \vec{r} , podendo ser expresso por

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r}. \quad (32)$$

A Figura 20 apresenta uma representação esquemática da aplicação da Lei de Biot-Savart, no intuito de inferir a densidade de fluxo magnético \vec{B} gerada em um ponto \vec{r} do espaço por uma corrente I .

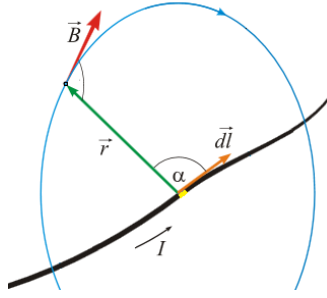


Figura 20 – Ilustração da aplicação da Lei de Biot-Savart.

Na presente dissertação, utiliza-se um solenoide de excitação para geração do campo magnético primário. O solenoide foi matematicamente modelado, de forma simplificada, como sendo composto por n espiras paralelas entre si, cada uma com o mesmo comprimento total l . Dessa forma, é possível empregar a Lei de Biot-Savart a fim de determinar as componentes da densidade de fluxo magnético primário $B_{ox}(\vec{r})$, $B_{oy}(\vec{r})$ e $B_{oz}(\vec{r})$ geradas pelo solenoide em qualquer ponto \vec{r} do espaço. Admitindo que o comprimento l das n espiras possa ser discretizado em uma quantidade inteira de segmentos com tamanho Δl , é possível definir:

$$B_{ox}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l/\Delta l} \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{l_{yji} \cdot r_{zji}}{r_{ji}^3} \right). \quad (33)$$

$$B_{oy}(\vec{r}) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\frac{l}{\Delta l}} \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{l_{xji} \cdot r_{zji}}{r_{ji}^3} \right). \quad (34)$$

$$B_{oz}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l/\Delta l} \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\frac{l_{xji} \cdot r_{xji}}{r_{ji}^3} - \frac{l_{yji} \cdot r_{yji}}{r_{ji}^3} \right) \right). \quad (35)$$

Nos estudos apresentados nesta dissertação arbitrou-se $l / \Delta l = 360$.

3.1.1.2.

Considerações sobre os parâmetros do solenoide e o espaço de busca

No segundo semestre de 2016, foi concluída uma dissertação de mestrado que tinha por objetivo implementar um protótipo inicial para o sistema de localização de projéteis de armas de fogo inseridos no corpo humano [19]. O protótipo desenvolvido em [19] utilizava um solenoide para geração do campo magnético primário e um estágio de leitura baseado em um arranjo gradiométrico de sensores GMI, conforme indicado na Figura 19, para realização das medições magnéticas de alta sensibilidade. Por sua vez, a presente dissertação foca no desenvolvimento do *software* de processamento, que tem por objetivo extrair os parâmetros de interesse (x , y , h e a) a partir das informações contidas nos mapas magnéticos medidos.

Dessa forma, a fim de modelar o problema da forma mais realista possível, foram considerados os parâmetros reais do solenoide de excitação, implementado em [19], a fim de se poder calcular as componentes da densidade de fluxo magnético primário $B_{ox}(\vec{r})$, $B_{oy}(\vec{r})$ e $B_{oz}(\vec{r})$, geradas pelo solenoide sobre o plano xy . As principais características do solenoide de excitação são: raio de 0,01 m, 40 espiras, comprimento total de 0,07 m e a espessura do fio utilizado de 0,00175 m. Ademais, o solenoide foi excitado por meio de uma corrente senoidal com 2 mA de amplitude e 8 kHz de frequência

As dimensões do espaço de busca (área de mapeamento) foram limitadas entre -0,03 m e 0,03 m, tanto para o eixo x quanto para o eixo y . Por sua vez, admitiu-se que o mapeamento seja feito em passos de 0,001 m (resolução espacial), resultando em uma matriz de medição com 61 x 61 posições, o que equivale a 3721 pontos de medição. Nos estudos realizados, considerou-se que a distância de separação h entre o sensor, situado na base inferior do solenoide, e o plano xy pudesse variar entre 0,006 m e máxima de 0,15 m. O limite superior foi arbitrado tendo em vista aspectos anatômicos, pois é razoável assumir que em muitos poucos casos clínicos esta distância seja superior a 0,15 m.

A Figura 21 apresenta uma representação esquemática do solenoide aqui descrito, para a situação na qual seu eixo central é alinhado com a origem do plano de busca ($x = 0$ e $y = 0$).

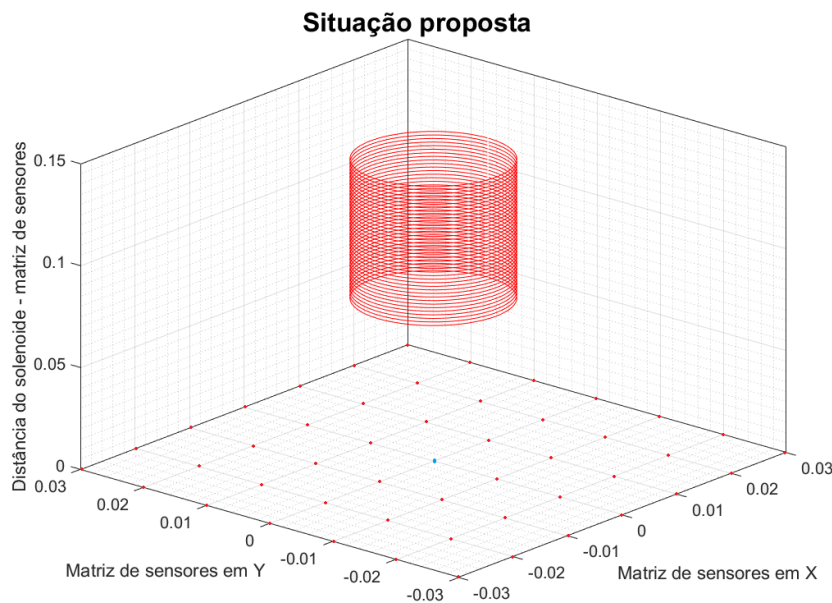


Figura 21 – Ilustração do solenoide utilizado para geração do campo magnético primário.

3.1.1.3.

Simulações dos mapas de campo magnético primário desconsiderando o ruído magnético

Utilizando-se o equacionamento matemático definido pelas eqs. (33)-(35) e considerando os parâmetros reais do solenoide, definidos na seção 3.1.1.2, é possível simular o comportamento das três componentes da densidade de fluxo magnético sobre o plano de busca xy . Admitindo que o eixo central do solenoide e o centro da esfera condutora estejam alinhados com a origem do plano de busca ($x = 0$ e $y = 0$), a Figura 22 apresenta os resultados destas simulações para três distâncias h diferentes: 0,006 m (Figura 22 (a)), 0,05 m (Figura 22 (b)) e 0,15 m (Figura 22 (c)).

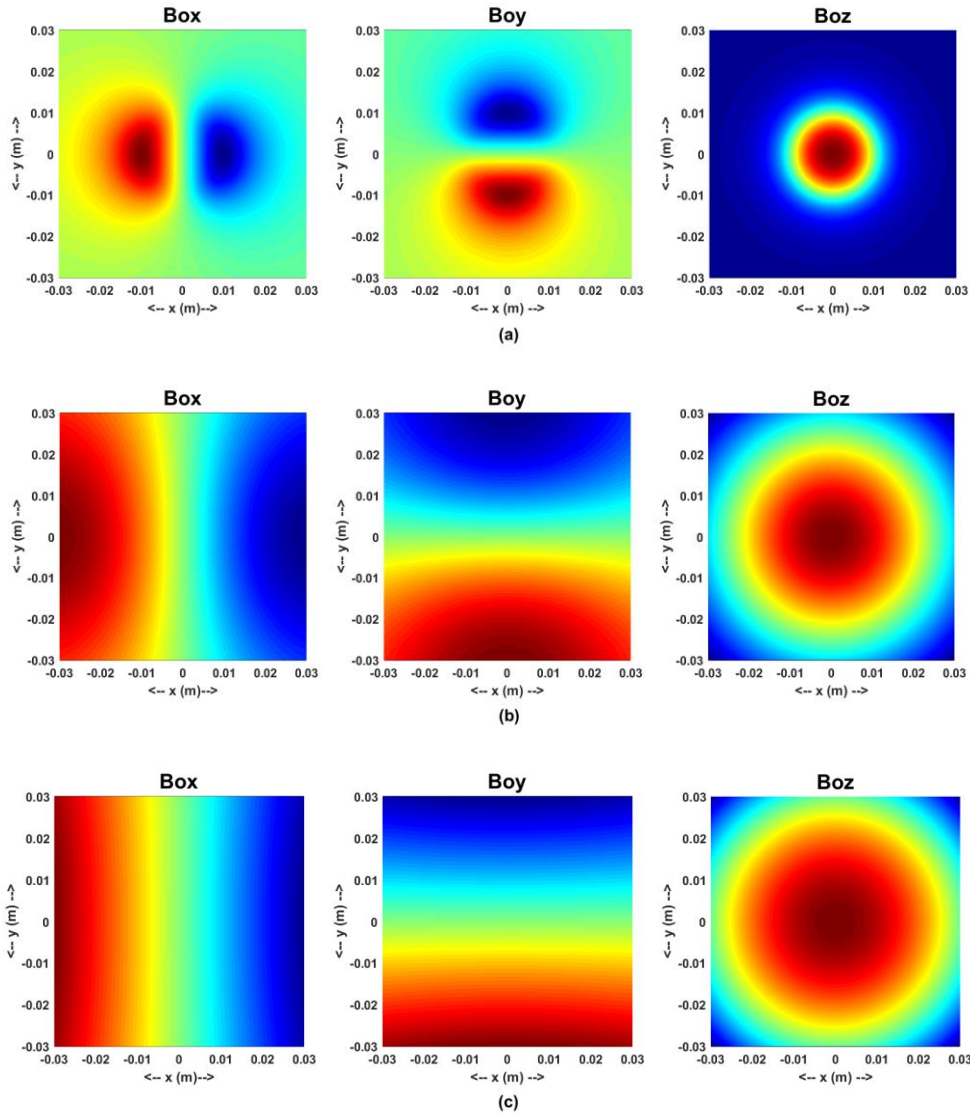


Figura 22 – Mapas das componentes Box , Boy e Boz da densidade de fluxo magnético primário gerado pelo solenoide, localizado na origem do plano xy , para h igual a: (a) 0,006 m, (b) 0,05 m e (c) 0,15 m.

3.1.1.4.

Simulações dos mapas de campo magnético primário considerando o ruído magnético

As simulações das componentes da densidade de fluxo magnético primário, apresentadas na seção 3.1.1.3, representam uma situação ideal, pois desconsideram a presença de ruído magnético ($e_r = 0\%$). Por outro lado, a fim de tornar as simulações mais robustas e permitir uma melhor análise dos algoritmos de localização desenvolvidos, decidiu-se também avaliá-los na presença de ruído magnético. Neste intuito, foram realizados testes considerando que densidade de fluxo magnético primário incidente sobre a esfera condutora possa apresentar

diferentes níveis de ruído aleatório (e_r), ajustáveis entre 0% e 5% do valor máximo da densidade de fluxo magnético ideal (sem ruído). Para consecução destas simulações, calcula-se a matriz de densidade de fluxo magnético primário ideal e, na sequência, gera-se uma matriz de ruído aleatório com a mesma dimensão (61 x 61) da matriz ideal. Em seguida, adiciona-se a matriz de ruído à matriz ideal, de forma a simular a influência do ruído ambiental.

Admitindo que o eixo central do solenoide e o centro da esfera condutora estejam alinhados com a origem do plano de busca ($x = 0$ e $y = 0$), para $e_r = 5\%$, a Figura 23 apresenta as componentes da densidade de fluxo magnético primário $B_{ox}(\vec{r})$, $B_{oy}(\vec{r})$ e $B_{oz}(\vec{r})$ no plano xy da esfera, para três distâncias h diferentes: 0,006 m (Figura 23 (a)), 0,05 m (Figura 23 (b)) e 0,15 m (Figura 23 (c)). Note que, estes mesmos casos foram apresentados na Figura 22, para $e_r = 0\%$, isto é, sem ruído magnético. Dessa forma, comparando-se as Figura 22 e 23 é possível verificar as distorções introduzidas pela presença de ruído.

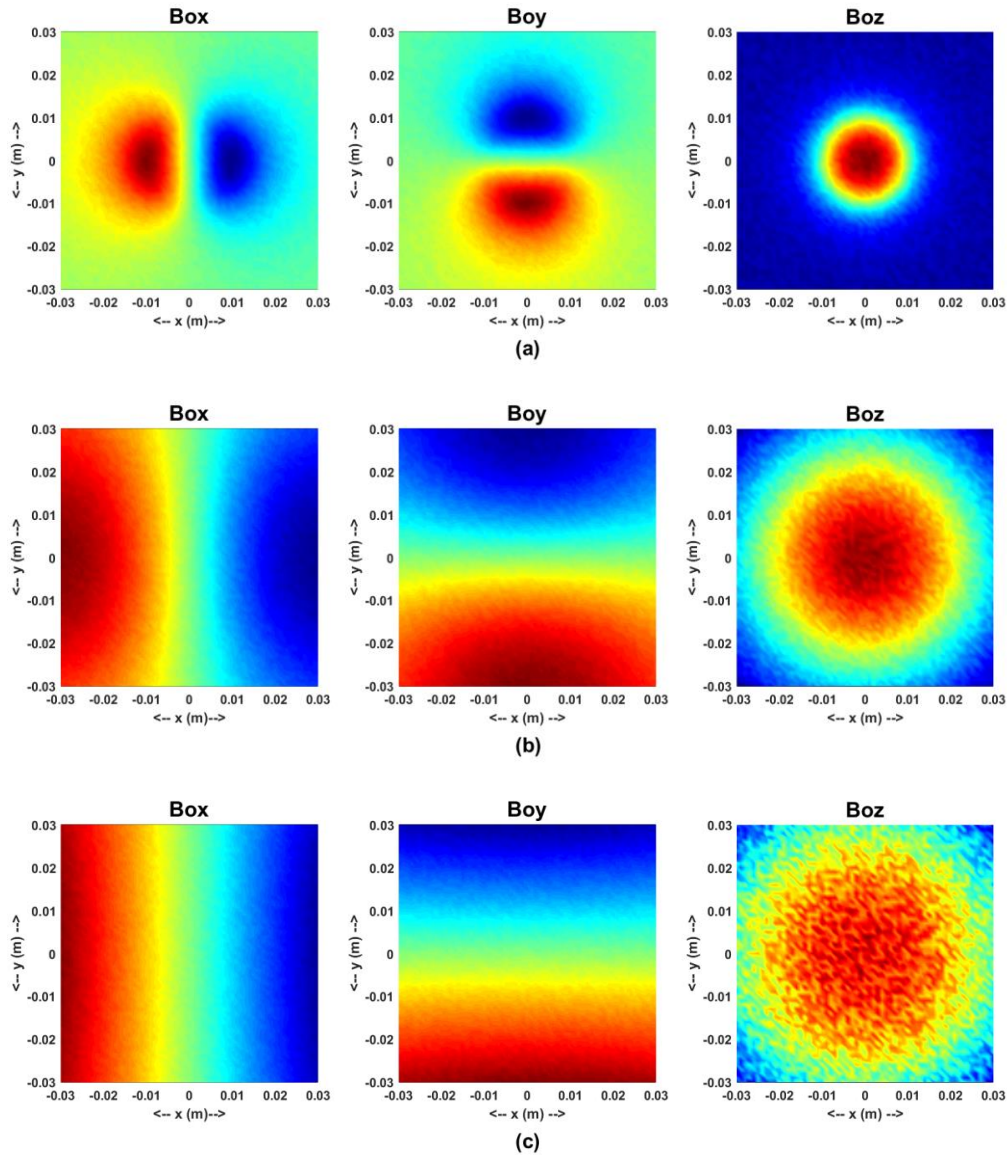


Figura 23 – Mapas das componentes Box , Boy e Boz da densidade de fluxo magnético primário gerada pelo solenoide, localizado na origem do plano xy , a uma distância h igual a: (a) 0,006 m, (b) 0,05 m e (c) 0,15 m. Considerando-se a presença de ruído aleatório ($e_r = 5\%$).

3.1.2. Modelagem do Campo Magnético Secundário

No método teórico de localização proposto em [3] admitia-se que a densidade de fluxo magnético primário era uniforme e apresentava apenas a componente $B_{oz}(\vec{r})$ a qual era responsável por induzir correntes parasitas na esfera condutora e, consequentemente, uma densidade de fluxo magnético secundário associada.

Por outro lado, conforme discutido em seções anteriores, no presente trabalho adotou-se um modelo mais fidedigno para a densidade de fluxo magnético primário, gerada pelo solenoide de excitação. Em particular, desenvolveu-se um modelo mais realista, que considera a distribuição não uniforme do mesmo e permite estimar suas três componentes: $B_{ox}(\vec{r})$, $B_{oy}(\vec{r})$ e $B_{oz}(\vec{r})$. Dessa forma, a estimativa da densidade de fluxo magnético secundário torna-se mais confiável, visto que as correntes parasitas induzidas na esfera condutora são dependentes das três componentes da densidade de fluxo magnético primário. Mais especificamente, ressalta-se que a componente z da densidade de fluxo magnético secundário, que é a componente efetivamente medida pelo sistema, é afetada não apenas pela componente primária $B_{oz}(\vec{r})$, mas também por $B_{ox}(\vec{r})$ e $B_{oy}(\vec{r})$.

3.1.2.1.

Fundamentos matemáticos para o Campo Magnético Secundário

A partir da fundamentação matemática explicitada em [3,6,9,19] e detalhada na seção 1.3.1 de este trabalho, é possível modelar a densidade de fluxo magnético secundário gerada pela esfera condutora, em função da presença de correntes parasitas induzidas por uma densidade de fluxo magnético primária alternada.

Tendo em vista a definição da densidade de fluxo magnético secundário $\mathbf{B}_i(r, \theta, \phi)$, apresentada em coordenadas esféricas na eq. (10), e as expressões de suas componentes individuais $\mathbf{B}_{ir}(r, \theta, \phi)$, $\mathbf{B}_{i\theta}(r, \theta, \phi)$ e $\mathbf{B}_{i\phi}(r, \theta, \phi)$, definidas também em coordenadas esféricas, respectivamente, nas eqs. (11)-(13), é possível estabelecer uma relação direta entre as componentes cartesianas da densidade de fluxo magnético secundário ($\mathbf{B}_x(x, y, h)$, $\mathbf{B}_y(x, y, h)$ e $\mathbf{B}_z(x, y, h)$) e suas componentes esféricas ($\mathbf{B}_{ir}(r, \theta, \phi)$, $\mathbf{B}_{i\theta}(r, \theta, \phi)$ e $\mathbf{B}_{i\phi}(r, \theta, \phi)$), conforme definido por

$$B_x(x, y, h) = B_{ir}(r, \theta, \phi) \sin \theta \cos \phi + B_{i\theta}(r, \theta, \phi) \cos \theta \cos \phi - B_{i\phi}(r, \theta, \phi) \sin \phi, \quad (36)$$

$$B_y(x, y, h) = B_{ir}(r, \theta, \phi) \sin \theta \sin \phi + B_{i\theta}(r, \theta, \phi) \cos \theta \sin \phi + B_{i\phi}(r, \theta, \phi) \cos \phi \quad \text{e} \quad (37)$$

$$B_z(x, y, h) = B_{ir}(r, \theta, \phi) \sin \theta - B_{i\theta}(r, \theta, \phi) \sin \theta. \quad (38)$$

Na sequência, substituindo as eqs. (11), (12), (13) e (16), apresentadas na seção 1.3.1, nas eqs. (36), (37) e (38), tem-se que

$$B_{xp}(x, y, h) = \frac{3}{2} B_{ox} V(a, f_0) \frac{xh}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}}. \quad (39)$$

$$B_{yp}(x, y, h) = \frac{3}{2} B_{oy} V(a, f_0) \frac{yh}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}}. \quad (40)$$

$$B_{zp}(x, y, h) = \frac{B_{oz}}{2} V(a, f_0) \times \left(\frac{2h^2 - x^2 - y^2}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} \right). \quad (41)$$

Por sua vez, ressalta-se que as eqs. (39), (40) e (41) definem as componentes da densidade de fluxo magnético secundário ($B_{xp}(x, y, h)$, $B_{yp}(x, y, h)$ e $B_{zp}(x, y, h)$), em coordenadas cartesianas. Note que h representa a distância de afastamento, ao longo do eixo z , entre o plano xy e o sensor S1, localizado na base inferior do solenoide de excitação.

Conforme discutido anteriormente, as medições magnéticas são efetuadas por meio de uma leitura diferencial entre os sensores S1 e S2, que são sensíveis apenas à componente $B_z(x, y, z)$ da densidade de fluxo magnético secundário. Em [3], a componente $B_z(x, y, z)$ foi modelada de forma simplificada como sendo função apenas da componente $B_{oz}(\vec{r})$ da densidade de fluxo magnético primário, a qual era considerada uniformemente distribuída no plano xy .

Por outro lado, no presente trabalho, desenvolveu-se um modelo mais realista, a fim de tornar a estimativa de $B_z(x, y, z)$ mais exato. O modelo aqui desenvolvido considera que $B_z(x, y, z)$ é efetivamente afetada pelas três componentes da densidade de fluxo magnético primário, as quais podem ser não uniformemente distribuídas ao longo do plano xy . Dessa forma, é possível modelar de forma mais realista tanto o campo magnético primário, gerado pelo solenoide de excitação, quanto o campo magnético secundário, produzido pelas correntes parasitas induzidas pelo campo primário.

Para estimar individualmente a influência das componentes primárias $B_{ox}(\vec{r})$ e $B_{oy}(\vec{r})$ sobre o valor da componente secundária $B_z(x, y, z)$ é possível empregar um raciocínio análogo ao adotado em [3], para avaliação da influência de $B_{oz}(\vec{r})$ sobre $B_z(x, y, z)$, em conjunto com a aplicação das *matrizes de rotação* adequadas.

Matrizes de rotação podem ser empregadas a fim de converter um sistema de coordenadas em outro, por meio de rotações em seus eixos. Para o sistema de coordenadas cartesiano, tem-se que as eqs. (42)-(44) apresentam a definição matemática das matrizes de rotação utilizadas para operações de rotação, no sentido anti-horário, em torno dos eixos x , y e z , respectivamente [65]. A Figura 24 mostra representações gráficas das operações de rotação definidas por meio das eqs. (42)-(44).

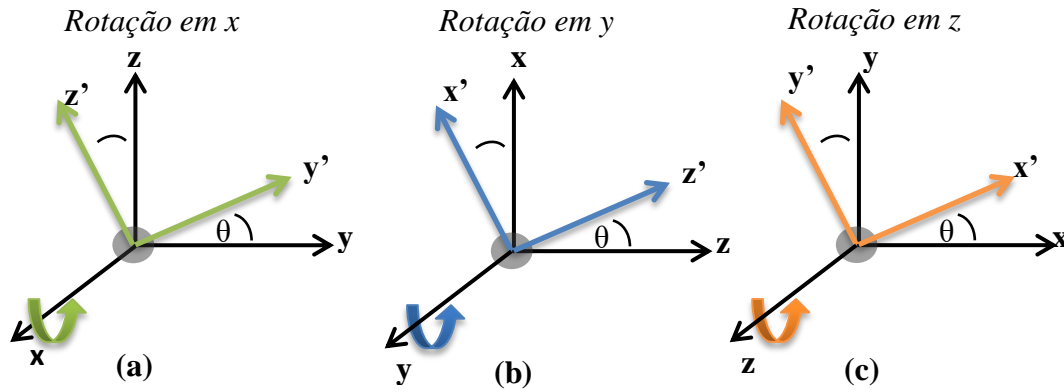


Figura 24 – Representações gráficas de rotações em torno dos eixos cartesianos: (a) x , (b) y e (c) z .

$$R_x(\theta) \rightarrow \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (42)$$

$$R_y(\theta) \rightarrow \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (43)$$

$$R_z(\theta) \rightarrow \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (44)$$

Utilizando os conceitos aqui descritos, a componente $B_z(x, y, z)$ da densidade de fluxo magnético secundário pode ser obtida empregando-se o princípio da *superposição*, em quatro passos:

1. Determinar $B_{zx}(x, y, z)$, que representa a contribuição individual da componente da densidade de fluxo magnético primário $B_{ox}(\vec{r})$ para o valor total da componente $B_z(x, y, z)$ da densidade de fluxo magnético secundário,
2. Determinar $B_{zy}(x, y, z)$, que representa a contribuição individual da componente da densidade de fluxo magnético primário $B_{oy}(\vec{r})$ para o valor

total da componente $B_z(x, y, z)$ da densidade de fluxo magnético secundário,

3. Determinar $B_{zz}(x, y, z)$, que representa a contribuição individual da componente da densidade de fluxo magnético primário $B_{oz}(\vec{r})$ para o valor total da componente $B_z(x, y, z)$ da densidade de fluxo magnético secundário,
4. Determinar o valor da componente $B_z(x, y, z)$ da densidade de fluxo magnético secundário, a partir dos valores calculados nos passos anteriores, por meio de

$$\mathbf{B}_z(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = B_{zx}(x, y, z) + B_{zy}(x, y, z) + B_{zz}(x, y, z). \quad (45)$$

Em [3], calculou-se a componente $B_z(x, y, z)$ da densidade de fluxo magnético secundário, admitindo-se que a mesma era afetada exclusivamente pela componente $B_{oz}(\vec{r})$ da densidade de fluxo magnético primário, conforme ilustrado na Figura 25(a). Por sua vez, objetivando estimar $B_{zx}(x, y, z)$, exclusivamente em função de $B_{ox}(\vec{r})$, percebe-se que é necessário efetuar uma rotação de 270° em torno do eixo y , em sentido anti-horário, de modo a se obter o sistema resultante apresentado na Figura 25(b).

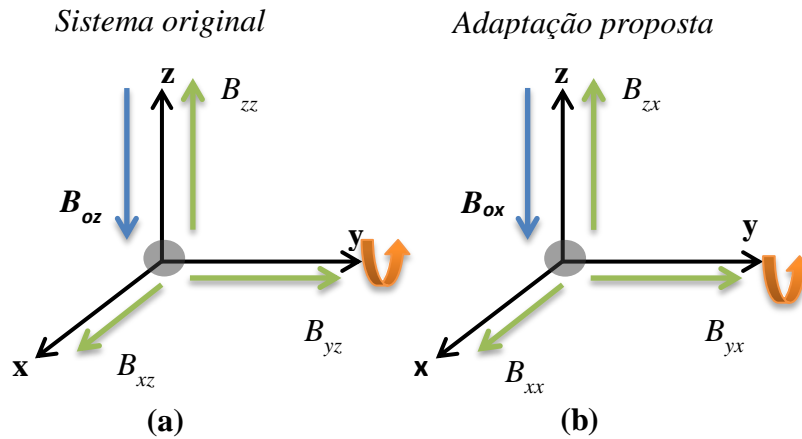


Figura 25 – Aplicação da matriz de rotação $R_y(\theta = 270^\circ)$, para cálculo de $B_{zx}(x, y, z)$, exclusivamente em função de $B_{ox}(\vec{r})$. (a) Sistema original e (b) Sistema Rotacionado.

Dessa forma, aplicando a matriz de rotação $R_y(\theta = 270^\circ)$, cuja expressão analítica é definida por meio da eq. (43), obtém-se

$$\begin{bmatrix} B_{xx}(x, y, z) \\ B_{yx}(x, y, z) \\ B_{zx}(x, y, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(270) & 0 & \sin(270) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(270) & 0 & \cos(270) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_{xp}(x, y, z) \\ B_{yp}(x, y, z) \\ B_{zp}(x, y, z) \end{bmatrix}. \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} B_{xx}(x, y, z) \\ B_{yx}(x, y, z) \\ B_{zx}(x, y, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} B_{xp}(x, y, z) \\ B_{yp}(x, y, z) \\ B_{zp}(x, y, z) \end{bmatrix}. \quad (47)$$

Consequentemente, verifica-se que

$$B_{zx}(x, y, z) = B_{xp}(x, y, z). \quad (48)$$

A Figura 26(a) mostra a representação do mesmo sistema apresentado na Figura 25(a). Por sua vez, objetivando estimar $B_{zy}(x, y, z)$, exclusivamente em função de $B_{oy}(\vec{r})$, percebe-se que é necessário efetuar uma rotação de 90° em torno do eixo x , em sentido anti-horário, de modo a se obter o sistema resultante apresentado na Figura 26(b).

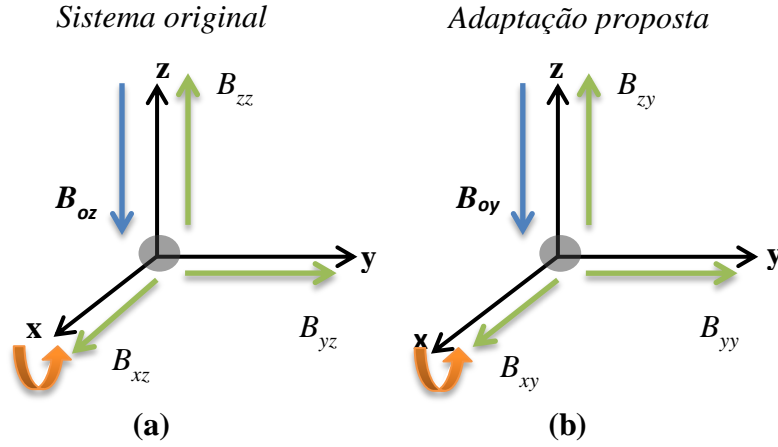


Figura 26 – Aplicação da matriz de rotação $R_x(\theta = 90^\circ)$, para cálculo de $B_{zy}(x, y, z)$, exclusivamente em função de $B_{oy}(\vec{r})$. (a) Sistema original e (b) Sistema Rotacionado.

Dessa forma, aplicando a matriz de rotação $R_x(\theta = 90^\circ)$, cuja expressão analítica é definida por meio da eq. (42), obtém-se

$$\begin{bmatrix} B_{xy}(x, y, z) \\ B_{yy}(x, y, z) \\ B_{zy}(x, y, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} B_{xp}(x, y, z) \\ B_{yp}(x, y, z) \\ B_{zp}(x, y, z) \end{bmatrix}. \quad (49)$$

$$\begin{bmatrix} B_{xy}(x, y, z) \\ B_{yy}(x, y, z) \\ B_{zy}(x, y, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} B_{xp}(x, y, z) \\ B_{yp}(x, y, z) \\ B_{zp}(x, y, z) \end{bmatrix}. \quad (50)$$

Consequentemente, verifica-se que

$$B_{zy}(x, y, z) = B_{yp}(x, y, z). \quad (51)$$

Finalmente, devido às características do problema analisado, percebe-se que não é necessária a realização de rotações para estimativa de $B_{zz}(x, y, z)$, exclusivamente em função de $B_{oz}(\vec{r})$, a qual pode ser definida diretamente como

$$\mathbf{B}_{zz}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = B_{zp}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}). \quad (52)$$

Substituindo as eqs. (48), (51) e (52) em (45) é possível definir o valor total da componente $B_z(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ da densidade de fluxo magnético secundário por meio de

$$\mathbf{B}_z(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = B_{xp}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) + B_{yp}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) + B_{zp}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}). \quad (53)$$

onde $B_{xp}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ é definida por meio da eq. (39), $B_{yp}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ por meio da eq. (40) e $B_{zp}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ por meio da eq. (41).

Por sua vez, substituindo as eqs. (39), (40) e (41) na eq. (53) obtém-se

$$\begin{aligned} B_z(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{h}) = & \frac{3}{2} B_{ox}(\vec{r}) V(a, f_0) \frac{xh}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} \\ & + \frac{3}{2} B_{oy}(\vec{r}) V(a, f_0) \frac{yh}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} \\ & + \frac{B_{oz}(\vec{r})}{2} V(a, f_0) \times \left(\frac{2h^2 - x^2 - y^2}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} \right). \end{aligned} \quad (54)$$

Inspecionando-se a eq. (54), verifica-se que, conforme esperado, a componente z da densidade de fluxo magnético secundário é efetivamente afetada pelas três componentes da densidade de fluxo magnético primário: $B_{ox}(\vec{r})$, $B_{oy}(\vec{r})$ e $B_{oz}(\vec{r})$.

3.1.2.2.

Aplicação do efeito gradiométrico

A eq. (54) modela a componente $B_z(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{h})$ da densidade de fluxo magnético secundário em uma dada posição do espaço. Por sua vez, a estrutura de medição proposta baseia-se em leituras gradiométricas (diferenciais) entre dois sensores magnéticos S1 e S2, separados entre si por uma distância l_s , ao longo do eixo z , a fim de aprimorar a relação sinal-ruído. Admitindo que a densidade de fluxo magnético primário à qual ambos os sensores estão submetidos é a mesma (os sensores estão inseridos no interior de um solenoide), tem-se que o gradiente de campo ΔB_z entre os mesmos pode ser expresso por meio de

$$\begin{aligned}
 \Delta B_z &= B_z(x, y, h) - B_z(x, y, h + l_s) \\
 &= \frac{3}{2} B_{ox} V(a, f_0) x \left(\frac{h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} - \frac{h + l_s}{(x^2 + y^2 + (h + l_s)^2)^{5/2}} \right) \\
 &+ \frac{3}{2} B_{oy} V(a, f_0) y \left(\frac{h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} - \frac{h + l_s}{(x^2 + y^2 + (h + l_s)^2)^{5/2}} \right) \\
 &+ \frac{B_{oz}}{2} V(a, f_0) \left(\frac{2h^2 - x^2 - y^2}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} - \frac{2(h + l_s)^2 - x^2 - y^2}{(x^2 + y^2 + (h + l_s)^2)^{5/2}} \right).
 \end{aligned} \tag{55}$$

Em particular, por meio da eq. (55), percebe-se que, quando o eixo central do solenoide de excitação está alinhado com o centro da esfera condutora ($x = 0$ e $y = 0$), tem-se o valor máximo da leitura gradiométrica da densidade de fluxo magnético secundário, o qual é dado por

$$\Delta B_{zmax}(h) = B_{oz} V(a, f_0) \left(\frac{1}{h^3} - \frac{1}{(h + l_s)^3} \right). \tag{56}$$

No equacionamento matemático até então desenvolvido admite-se que a esfera condutora está posicionada na origem do plano xy . Entretanto, os estudos aqui realizados requerem que o problema seja generalizado a fim de modelar o gradiente de campo ΔB_z também em situações onde a esfera esteja em outras posições do plano xy . Para tal fim, a eq. (57) apresenta uma generalização da eq. (55), de forma a se poder modelar ΔB_z para qualquer posição da esfera no plano xy .

$$\begin{aligned}
 \Delta B_z(x_s, y_s, h) &= \frac{3}{2} B_{ox} V(a, f_0) (x_b - x_s) \left(\frac{h}{((x_b - x_s)^2 + (y_b - y_s)^2 + h^2)^{5/2}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{h + l_s}{((x_b - x_s)^2 + (y_b - y_s)^2 + (h + l_s)^2)^{5/2}} \right) \\
 &+ \frac{3}{2} B_{oy} V(a, f_0) (y_b - y_s) \left(\frac{h}{((x_b - x_s)^2 + (y_b - y_s)^2 + h^2)^{5/2}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{h + l_s}{((x_b - x_s)^2 + (y_b - y_s)^2 + (h + l_s)^2)^{5/2}} \right) \\
 &+ \frac{B_{oz}}{2} V(a, f_0) \left(\frac{2h^2 - (x_b - x_s)^2 - (y_b - y_s)^2}{((x_b - x_s)^2 + (y_b - y_s)^2 + h^2)^{5/2}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{2(h + l_s)^2 - (x_b - x_s)^2 - (y_b - y_s)^2}{((x_b - x_s)^2 + (y_b - y_s)^2 + (h + l_s)^2)^{5/2}} \right).
 \end{aligned} \tag{57}$$

onde x_b é a posição da esfera em relação ao eixo x , x_s é a posição do sensor em relação ao eixo x , y_b é a posição da esfera em relação ao eixo y , e y_s é a posição do sensor em relação ao eixo y .

3.1.2.3.**Considerações de parâmetros para campo magnético secundário**

Com base no modelo matemático desenvolvido, é possível simular o campo magnético secundário gerado por correntes parasitas induzidas em uma esfera condutora, submetida a um campo magnético primário gerado por um solenoide de excitação. Em particular, utilizando-se a eq. (57) pode-se estimar o gradiente da densidade de fluxo magnético secundário ΔB_z , em qualquer posição do espaço, que é o parâmetro efetivamente medido pelo arranjo gradiométrico composto pelos sensores S1 e S2. Ressalta-se que o parâmetro l_s , presente na eq. (57), representa a linha de base do gradiômetro, isto é, a distância de afastamento entre os sensores S1 e S2, ao longo do eixo z . Consequentemente, de modo a tornar o modelo compatível com o sistema desenvolvido em [3,19] definiu-se $l_s = 0,07$ m, em todas as simulações apresentadas nesta dissertação.

As subseções 3.1.2.4 e 3.1.2.5 apresentam simulações de mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, ΔB_z , gerados por uma esfera condutora com raio $a = 0,005$ m, situada na origem do espaço de busca ($x_b = 0$ e $y_b = 0$) e excitada pelo campo magnético primário gerado pelo solenoide de excitação descrito em 3.1.1.2. O espaço de busca foi limitado entre $-0,03$ m e $0,03$ m, tanto para o eixo x quanto para o eixo y . Por sua vez, h representa a distância de afastamento, ao longo do eixo z , entre o plano xy e o sensor S1, localizado na base inferior do solenoide de excitação. A seção 3.1.2.4 modela a situação ideal, isto é, sem ruído magnético; enquanto que a seção 3.1.2.5 simula os efeitos do ruído magnético nas medições.

3.1.2.4.**Simulações dos mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário desconsiderando o ruído magnético**

Considerando os parâmetros explicitados na seção 3.1.2.3, foram realizadas simulações dos mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, ΔB_z , desconsiderando o ruído magnético. Os resultados destas simulações são apresentados na Figura 27, para três diferentes alturas h : $0,006$ m (Figura 27(a)), $0,05$ m (Figura 27(b)) e $0,15$ m (Figura 27(c)). Além disso, destaca-se que cada uma destas subfiguras apresenta duas representações alternativas dos resultados, à

esquerda tem-se um mapa de cores (*pcolor*) e a direita um gráfico tridimensional clássico (*mesh*).

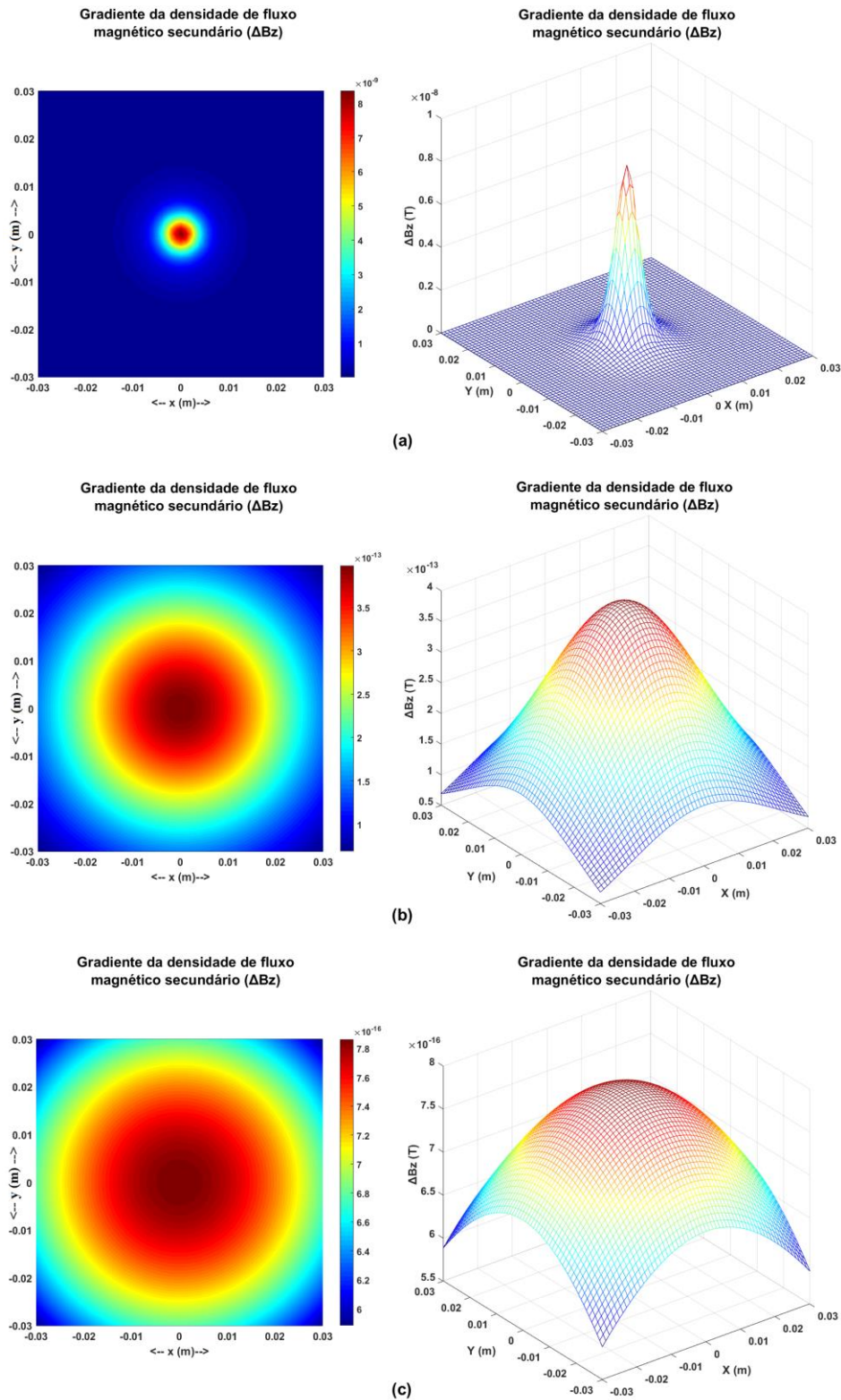


Figura 27 – Simulações do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para três alturas h distintas: (a) 0,006 m, (b) 0,05 m e (c) 0,15 m. O problema foi configurado de acordo com os parâmetros explicitados na seção 3.1.2.3.

3.1.2.5.

Simulações dos mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário considerando o ruído magnético

A fim de tornar as simulações mais realistas, também se avaliou o gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, na presença de ruído magnético. Neste intuito, conforme descrito na seção 3.1.1.4, considerou-se que a densidade de fluxo magnético primário, gerada pelo solenoide de excitação, apresenta um ruído aleatório (e_r) superposto, que pode variar entre 0% e 5% do valor máximo da densidade de fluxo magnético primário ideal, isto é, sem ruído.

Dessa forma, como a densidade de fluxo magnético secundário é função da densidade de fluxo magnético primário, conforme explicitado pela eq. (57), tem-se que o ruído presente no campo primário afetará o comportamento do campo secundário induzido. Considerando os parâmetros explicitados na seção 3.1.2.3 e admitindo-se $e_r = 5\%$, os resultados das simulações são apresentados na Figura 28, para três alturas h distintas: 0,006 m (Figura 28(a)), 0,05 m (Figura 28(b)) e 0,15 m (Figura 28(c)).

Ressalta-se que os casos explicitados na Figura 28 referem-se exatamente às mesmas situações apresentadas na Figura 27, exceto pela Figura 28 considerar a presença de ruído e a Figura 27 desconsiderar. Dessa forma, por meio de uma análise comparativa entre estas figuras, é possível verificar a presença de distorções introduzidas pelo ruído.

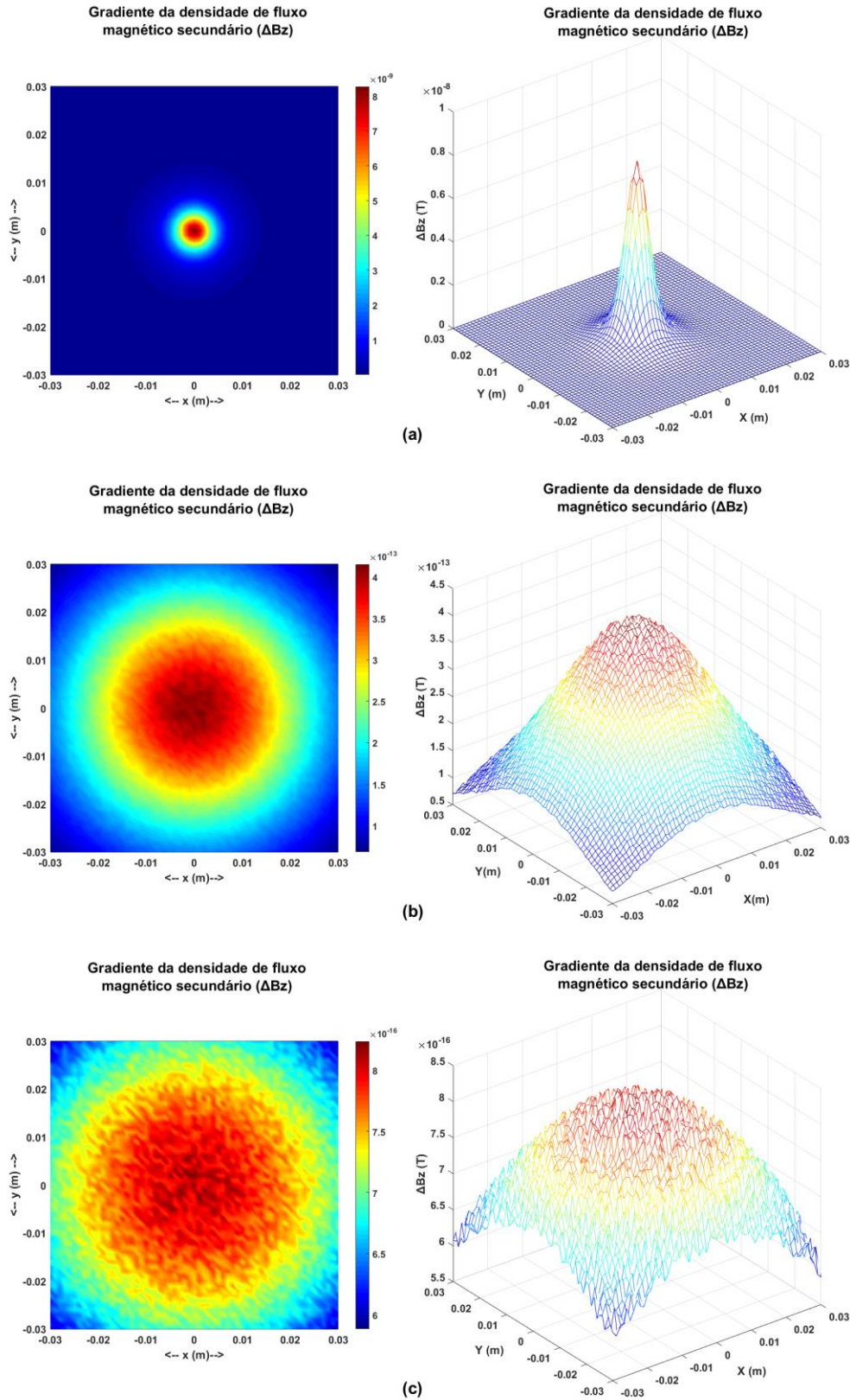


Figura 28 – Simulações do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, na presença de ruído magnético aleatório, para três alturas h distintas: (a) 0,006 m, (b) 0,05 m e (c) 0,15 m. O problema foi configurado de acordo com os parâmetros explicitados na seção 3.1.2.3, arbitrando-se $e_r = 5\%$.

3.2. Técnica 1

Os mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário são processados, a fim de se extrair os parâmetros de interesse. A primeira técnica de localização desenvolvida é composta por três módulos principais:

- *Módulo de determinação da posição* (seção 3.2.1) : Para determinar as posições x_b e y_b da esfera no plano xy , foi desenvolvido um *algoritmo de localização iterativo* baseado no valor máximo e médio dos valores de submatrizes, com dimensões decrescentes, da matriz de medidas original. Ao final do ciclo iterativo o algoritmo infere a posição aproximada da esfera no plano de busca (xy).
- *Módulo de determinação da profundidade h* (seção 3.2.2): Para determinar a distância (profundidade) h da esfera em relação ao sensor S1, disposto na base inferior do solenoide de excitação, foi desenvolvido um módulo de processamento baseado em *redes neurais*, que utiliza os valores de posição x_b e y_b , calculados pelo estágio anterior. Extrai-se da matriz de medidas original um subconjunto de dados, localizados na vizinhança de (x_b, y_b) . Na sequência, calculam-se alguns parâmetros relevantes com base na informação contida neste subconjunto, os quais são apresentados como padrões de entrada da rede. Por sua vez, a rede processa estes padrões a fim de inferir o valor da profundidade h .
- *Módulo de determinação do raio a* (seção 3.2.3): Para determinar o raio da esfera, foi desenvolvido um módulo baseado em *algoritmos genéticos*, que se utiliza dos valores de x_b , y_b e h , calculados por estágios anteriores. O AG foi implementado a fim de identificar o raio a que minimiza o erro entre a matriz de medidas (objetivo) e as matrizes simuladas pelo AG, para diferentes valores de a , com base na eq. (57).

Ao fim desta cadeia de processamento é possível inferir os quatro parâmetros de interesse: x , y , h e a . A Figura 29 apresenta um fluxograma simplificado da cadeia de processamento desenvolvida.

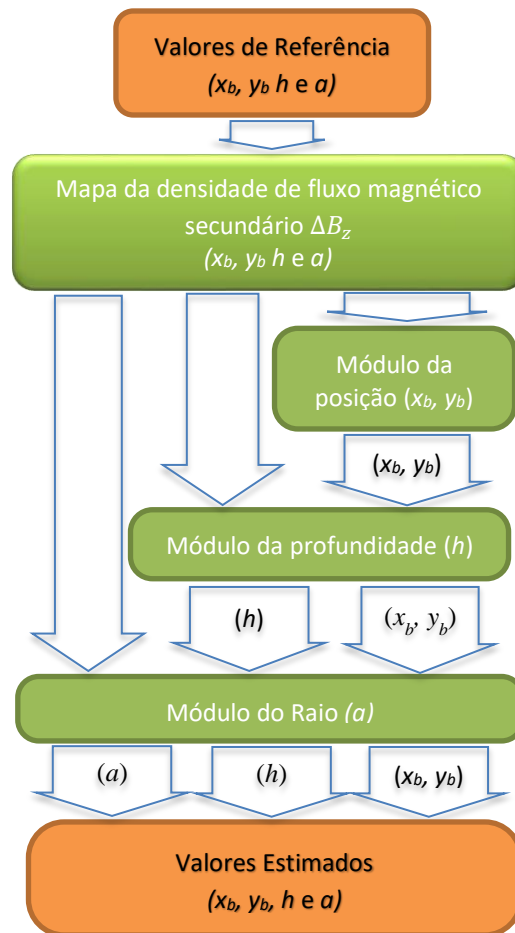


Figura 29 – Fluxograma de processamento de sinal para a Técnica 1.

3.2.1. Módulo de determinação da posição (x_b , y_b)

Tendo em vista as características do problema abordado, a posição da esfera poderia ser encontrada identificando-se simplesmente o ponto (x_b, y_b) correspondente ao máximo valor presente no mapa de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário. Apesar deste método ser eficaz em situações ideais (sem ruído), verifica-se que o mesmo passa a incorrer em erros significativos na estimativa da posição, ao tratar casos onde os mapas de gradiente apresentem ruído. Dessa forma, como na prática as medições são afetadas por ruído, propõe-se um algoritmo computacional de determinação da posição que faz o cálculo de médias sucessivas dentro de janelas de tamanhos decrescentes. Tal algoritmo oferece uma maior imunidade ao ruído e, conseqüentemente, melhora a estimativa da posição.

A matriz de medidas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário é processada pelo módulo descrito nesta seção, a fim de se estimar a posição da esfera (x_b, y_b) no plano xy . Conforme mencionado em seções anteriores, considera-se que o intervalo espacial entre posições sucessivas da matriz de medidas corresponde a 0,001 m (resolução espacial). A metodologia de processamento adotada pelo algoritmo de localização desenvolvido pode ser subdividida nos seguintes passos:

- **Primeiro:** Definir uma máscara de dimensão $n \times n$, obrigatoriamente inferior à dimensão da matriz de medidas, e fazer uma varredura com esta máscara por todas as posições possíveis da matriz de medidas. Em cada posição avaliada, calcula-se e armazena-se o valor médio das medidas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, contidas na região delimitada pelas respectivas máscaras. Ao final da varredura, identifica-se em qual posição da matriz de medidas a máscara obteve o maior valor médio e, na sequência, cria-se uma submatriz M_1 com os valores pertencentes a esta máscara. A Figura 30 apresenta uma representação ilustrativa do processo de varredura, admitindo a utilização de uma máscara com dimensão 5×5 . Os valores indicados na parte interna da matriz exemplificam as intensidades do gradiente de fluxo magnético secundário, em diferentes posições do espaço. Por sua vez, os valores indicados nos eixos x e y exemplificam as dimensões do espaço de busca.

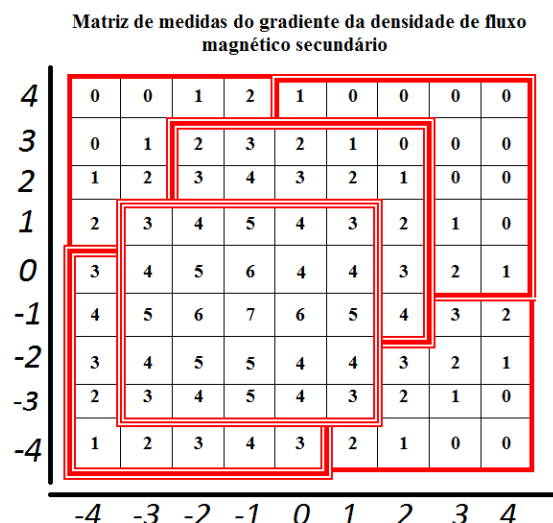


Figura 30 – Representação ilustrativa do processo de varredura com uma máscara 5×5 , realizado a fim de identificar em qual posição da máscara obtém-se o maior valor médio dos valores de gradiente de fluxo magnético, contidos em seu interior.

- **Segundo:** Define-se uma nova máscara com dimensão $(n - 1) \times (n - 1)$, a qual é utilizada para se fazer uma varredura no interior da região delimitada pela submatriz M_1 , obtida no primeiro passo. De forma análoga ao processo efetuado na etapa anterior, em cada posição avaliada, calcula-se e armazena-se o valor médio das medidas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, contidas na região delimitada pelas respectivas máscaras. Ao final da varredura, identifica-se em qual posição a máscara obteve o maior valor médio e, na sequência, cria-se uma submatriz M_2 com os valores pertencentes a esta máscara. Esta nova etapa de processamento é exemplificada na Figura 31, que indica o processo de varredura sendo realizado por meio de uma máscara de 4×4 , no interior da submatriz de medidas com o maior valor médio de gradiente de fluxo magnético, dentre as submatrizes avaliadas na Figura 30.

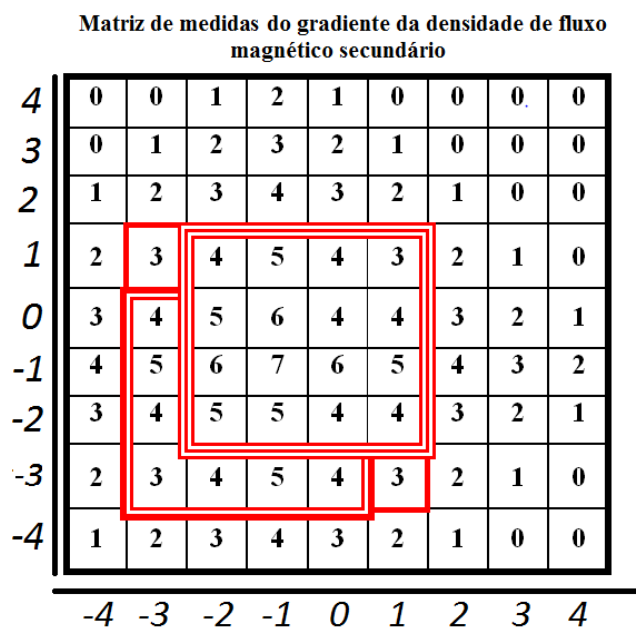


Figura 31 – Representação ilustrativa do segundo passo do processo de varredura, realizado com uma máscara 4×4 dentro da submatriz M_1 , a fim de identificar em qual posição da máscara obtém-se o maior valor médio dos valores de gradiente de fluxo magnético, contidos em seu interior.

- **Terceiro:** Na sequência, define-se uma nova máscara com dimensão $(n - 2) \times (n - 2)$, a qual é utilizada para se fazer uma varredura no interior da região delimitada pela submatriz M_2 , obtida no segundo passo. Por sua vez, esta nova máscara é utilizada para se fazer uma varredura dentro da região definida pela submatriz M_2 , a fim de se identificar em qual posição desta

nova máscara obtém-se o maior valor médio do gradiente de fluxo magnético. Em seguida, define-se a submatriz M_3 a partir dos dados contidos nesta posição da máscara. Esta nova etapa de processamento é exemplificada na Figura 32, que indica o processo de varredura sendo realizado por meio de uma máscara de 3 x 3, no interior da submatriz de medidas com o maior valor médio de gradiente de fluxo magnético, dentre as submatrizes avaliadas na Figura 31.

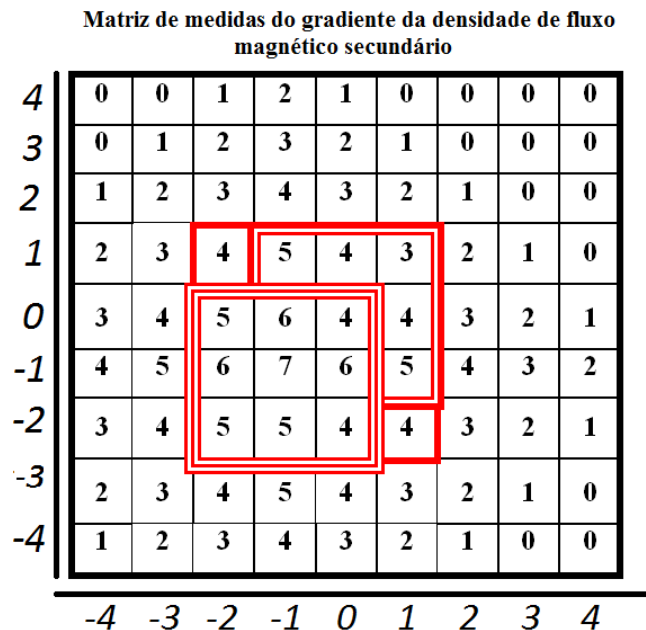


Figura 32 – Representação ilustrativa do terceiro passo do processo de varredura, realizado com uma máscara 3x3 dentro da submatriz M_2 , a fim de identificar em qual posição da máscara obtém-se o maior valor médio dos valores de gradiente de fluxo magnético, contidos em seu interior.

Este processo prossegue, de modo que a cada novo passo a dimensão da máscara seja reduzida até se chegar a uma máscara de varredura com dimensão 1 x 1. A posição da máscara 1 x 1 que implica no maior gradiente de fluxo magnético é definida como a posição (x_b, y_b) do centro da esfera condutora que se deseja localizar. Para o exemplo específico discutido nesta seção, o processamento teria dois passos adicionais, que reduziriam sucessivamente o tamanho da máscara para 2 x 2 e 1 x 1. As Figuras 33 e 34 exemplificam estas etapas da varredura.

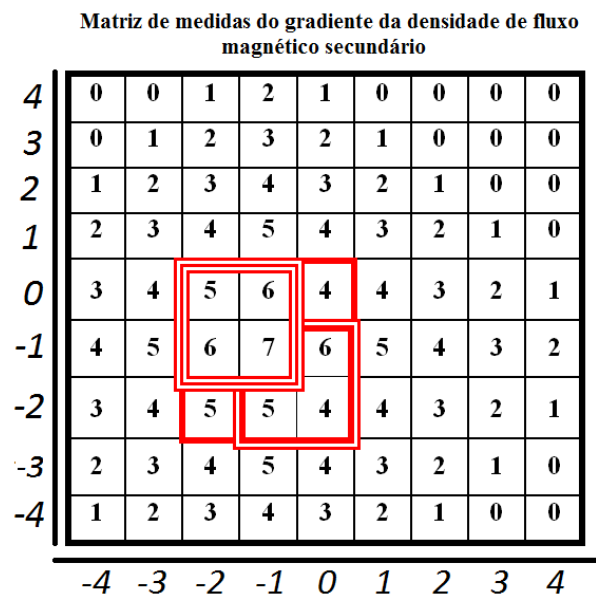


Figura 33 – Representação ilustrativa do quarto passo do processo de varredura, realizado com uma máscara 2x2, a fim de identificar em qual posição da máscara obtém-se o maior valor médio dos valores de gradiente de fluxo magnético, contidos em seu interior.

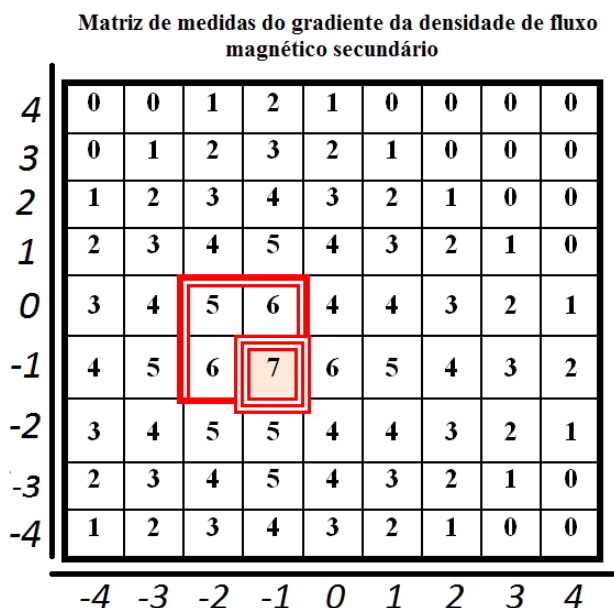


Figura 34 – Representação ilustrativa do quinto passo do processo de varredura, realizado com uma máscara 1x1, a fim de identificar em qual posição da máscara obtém-se o maior valor médio dos valores de gradiente de fluxo magnético, contidos em seu interior. Esta posição é considerada a posição do centro da esfera que se deseja localizar.

Para o exemplo aqui abordado, verifica-se que a técnica definiria a posição (x_b, y_b) do centro da esfera como $x_b = -1$ e $y_b = -1$, tendo em vista que, conforme indicado na Figura 34, esta é a posição da máscara 1x1 que resulta no maior valor de gradiente de fluxo magnético, isto é, 7.

3.2.2. Módulo de determinação da profundidade (h)

Este módulo objetiva inferir a profundidade h da esfera condutora em relação ao sensor S1, localizado na base inferior do solenoide de excitação. Para tal fim, o módulo emprega uma *rede neural* projetada de modo a inferir h , a partir de um conjunto de atributos de entrada, extraídos da matriz de medidas dos valores de gradiente de fluxo magnético secundário, na vizinhança da posição (x_b, y_b) da esfera, informada pelo módulo de processamento anterior.

Este tópico está dividido nas seguintes subseções: adaptação do princípio matemático adotado em [3] para estimativa de h ; descrição da rede neural desenvolvida; criação da base de dados simulada; condicionamento das entradas e parâmetros de treinamento; e seleção da melhor rede.

3.2.2.1. Adaptação do princípio matemático adotado em [3] para estimativa de h

Na técnica de localização anteriormente desenvolvida em [3], a posição (x_b, y_b) do centro da esfera era determinada identificando-se a posição do espaço de busca correspondente ao maior valor medido de gradiente de densidade de fluxo magnético secundário, visto que, desprezando-se a influência de ruído magnético, espera-se que este ponto ocorra quando o eixo central do solenoide esteja alinhado com o centro da esfera condutora.

Uma vez identificada a posição (x_b, y_b) , o método descrito em [3] propõe normalizar os valores da matriz de gradiente de densidade de fluxo magnético secundário, com respeito ao seu valor máximo. Na sequência, deve-se manter y_b fixo e se efetuar deslocamentos ao longo do eixo x , a fim de se identificar os pontos à esquerda (x_{besq}) e à direita (x_{bdir}) de x_b correspondentes ao valor normalizado de 0,9. Em seguida, calcula-se o parâmetro w , que representa a distância entre estes dois pontos, isto é: $w = x_{bdir} - x_{besq}$, conforme indicado na Figura 35(a) para $(x_b = 0, y_b = 0)$. Por sua vez, conforme apresentado na Figura 35(b), a análise apresentada em [3] mostra que há uma dependência linear entre a profundidade h da esfera e o parâmetro w , sendo possível inferir h a partir da estimativa de w . Também, é importante destacar que é demonstrado em [3] que tal processo para estimativa de

h é independente de parâmetros geométricos da esfera, como por exemplo, seu raio a .

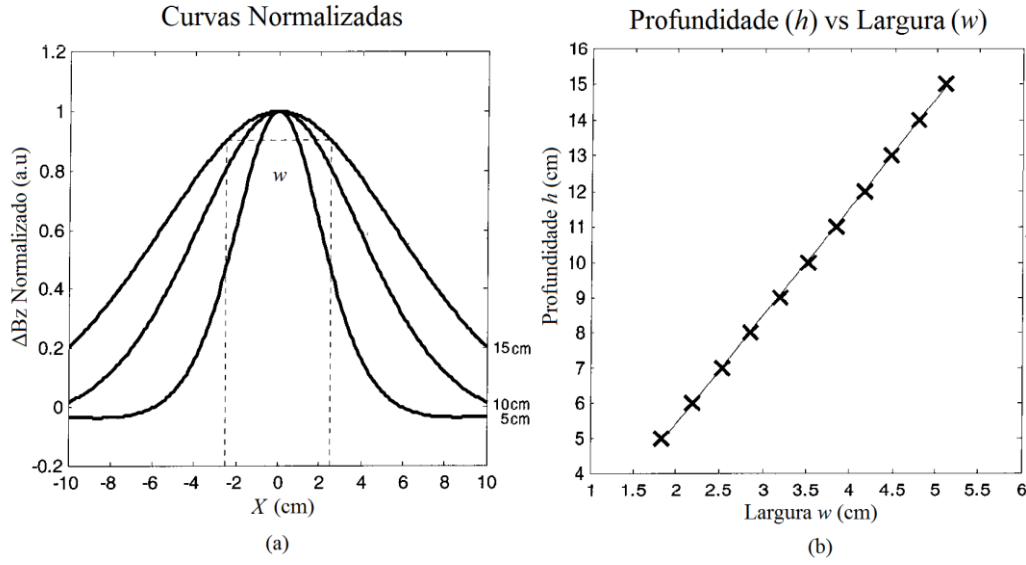


Figura 35 – Utilizando-se o método descrito em [4], apresenta-se: a.) Curvas normalizadas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para profundidades h iguais a: 5 cm, 10 cm e 15 cm. b.) Relação entre h e w .

Em [3], a componente z da densidade de fluxo magnético secundário era estimada admitindo que a mesma era atribuída exclusivamente à componente z da densidade de fluxo magnético primário, considerada uniforme. Por sua vez, conforme discutido em seções anteriores, no presente trabalho obteve-se um novo modelo para estimativa da componente z da densidade de fluxo magnético secundário, levando em consideração a influência das três componentes da densidade de fluxo magnético primário.

Dessa forma, para a esfera em $x_b = 0$ e $y_b = 0$, pode-se construir a matriz normalizada de valores de densidade de fluxo magnético secundário, dividindo-se a eq. (55) pela eq. (56), de forma a obter-se

$$\begin{aligned} \frac{\Delta B_z(x, y, h)}{\Delta B_{zmax}(h)} = & \frac{3 B_{ox}}{2 B_{oz}} x \left(\frac{h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} - \frac{h + l_s}{(x^2 + y^2 + (h + l_s)^2)^{5/2}} \right) \times \frac{1}{\left(\frac{1}{h^3} - \frac{1}{(h + l_s)^3} \right)} \\ & + \frac{3 B_{oy}}{2 B_{oz}} y \left(\frac{h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} - \frac{h + l_s}{(x^2 + y^2 + (h + l_s)^2)^{5/2}} \right) \times \frac{1}{\left(\frac{1}{h^3} - \frac{1}{(h + l_s)^3} \right)} \\ & + \left(\frac{h^2 - (x^2 - y^2)/2}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} - \frac{(h + l_s)^2 - (x^2 + y^2)/2}{(x^2 + y^2 + (h + l_s)^2)^{5/2}} \right) \times \frac{1}{\left(\frac{1}{h^3} - \frac{1}{(h + l_s)^3} \right)} \quad . \quad (58) \end{aligned}$$

Assim como em [3], inspecionando-se a eq. (58) pode-se verificar que a matriz normalizada será completamente independente dos parâmetros da esfera. Entretanto, ao contrário de [3], a eq. (58) também explicita claramente que esta matriz será dependente do valor das três componentes da densidade de fluxo magnético primário: B_{ox} , B_{oy} e B_{oz} .

A Figura 36 evidencia as diferenças entre as estimativas da normalização dos valores de gradiente de fluxo magnético secundário, estimados pelo equacionamento apresentado em [3] e aqueles inferidos pela eq. (58) desta dissertação. São efetuadas comparações do comportamento das curvas referentes a três profundidades h : 5 cm, 10 cm e 15 cm. As curvas pretas indicam os valores obtidos por [3] e as curvas vermelhas os resultados provenientes do equacionamento proposto no presente trabalho.

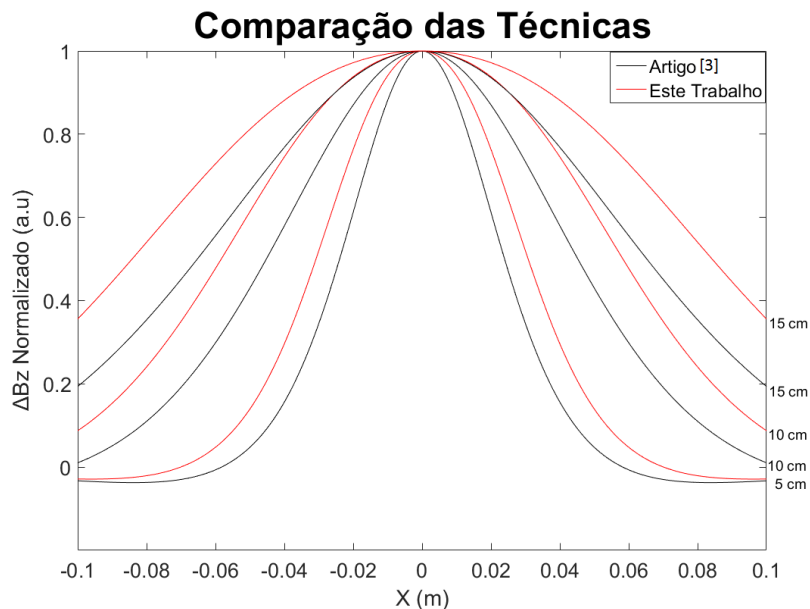


Figura 36 – Comparação das estimativas das curvas normalizadas do gradiente de campo magnético secundário, obtidas de acordo com o equacionamento proposto em [3] (curvas pretas) e com o proposto no presente trabalho (curvas vermelhas).

Os resultados obtidos indicam que as componentes x e y da densidade de fluxo magnético primário também afetam de forma significativa a componente z da densidade de fluxo magnético secundário. Por conseguinte, tem-se que a estimativa do valor do parâmetro w será afetada e, conseqüentemente, a estimativa de h .

3.2.2.2.**Descrição da rede neural desenvolvida**

Neste trabalho propõe-se utilizar uma *Rede Neural tipo Multilayer Perceptron* (MLP) para estimar a distância h entre o sensor S1 e a esfera condutora (fragmento do projétil de arma de fogo). Note que, na descrição aqui realizada, admite-se que a posição (x_b, y_b) da esfera seja previamente conhecida, pois considera-se que a mesma seja calculada pelo módulo de determinação de posição e informada ao módulo de determinação de profundidade, conforme explicitado no fluxograma da Figura 29. Os padrões de entrada da rede neural são obtidos a partir de características extraídas dos mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário. Em particular, são extraídos três parâmetros de interesse: área sob a curva (A), média (md) e desvio padrão (dp); os quais são descritos a seguir:

1. **Área sob a curva (A):** este parâmetro é inspirado no método de inferência de h empregado em [3] descrito na seção 3.2.2, porém a metodologia atual apresenta certas variações em relação à versão original. Na implementação aqui proposta, deve-se normalizar os valores da matriz de gradiente de densidade de fluxo magnético secundário, com respeito ao seu valor máximo. Na sequência, deve-se manter y_b fixo e se efetuar deslocamentos ao longo do eixo x , a fim de se identificar os pontos à esquerda (x_{besq}) e à direita (x_{bdir}) de x_b correspondentes ao valor normalizado de 0,8. Em seguida, obtém-se um polinômio de ajuste que modela o conjunto de dados e calcula-se a área sob a curva delimitada por x_{besq} e x_{bdir} , conforme indicado na (Figura 37) para $(x_b = 0, y_b = 0)$.

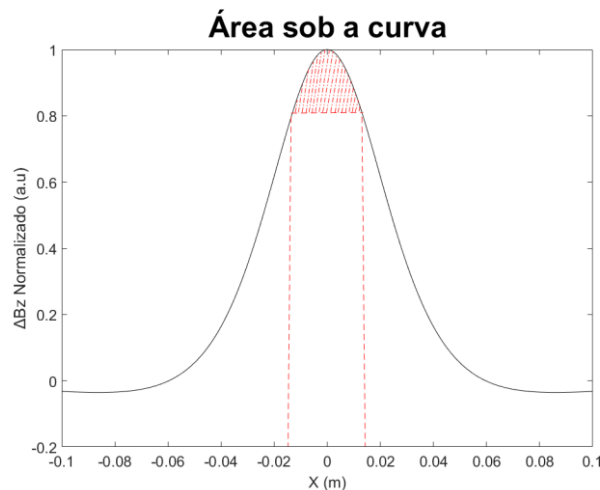


Figura 37 – Determinação do parâmetro Área sob a curva (A), utilizado como um dos padrões de entrada da rede neural desenvolvida.

Optou-se por se estimar a área sob a curva (A), ao invés de largura w (vide seção 3.2.2.1), a fim de tornar este parâmetro mais imune ao ruído magnético, visto que a área é calculada a partir de uma integral. Entretanto, foi observado que, mesmo assim, o valor estimado deste parâmetro pode ser afetado pela presença de ruído. A Figura 38 apresenta curvas de ΔB_z normalizado, simuladas considerando-se a presença de ruído magnético ($er = 5\%$). São apresentadas três curvas distintas, obtidas para profundidades h diferentes: 0,01 m, 0,05 m e 0,1 m.

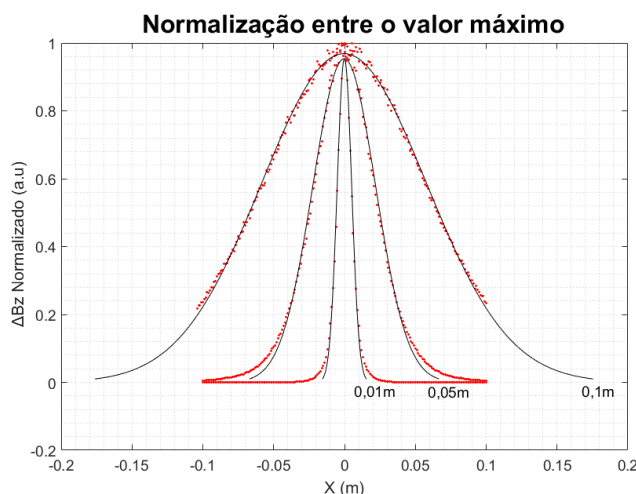


Figura 38 – Influência do ruído magnético ($er = 5\%$) na estimativa da área sob a curva de ΔB_z normalizado em função de x , para três profundidades h diferentes: 0,01 m, 0,05 m e 0,1 m. Os pontos em vermelho indicam os valores discretos efetivamente simulados e os polinômios de ajuste são representados pelas linhas sólidas em preto.

Inspecionando-se a Figura 38, verifica-se que as medições são afetadas pelo ruído, que introduz distorções no comportamento ideal das curvas. Em particular, devido ao ruído, tem-se que o valor máximo do gradiente pode não ocorrer na posição (x_b, y_b) inferida pelo estágio de determinação da posição. Dessa forma, ao se efetuar a normalização com base no valor do gradiente ΔB_z neste ponto, pode-se obter uma curva normalizada que nunca atinge o valor unitário. Note que este efeito indesejável é perceptível em todas as curvas apresentadas na Figura 38, podendo afetar significativamente o valor estimado para o parâmetro A .

A fim de minimizar este problema, adotou-se uma técnica alternativa de normalização. Ao invés de efetuar a normalização com base no valor do gradiente ΔB_z no ponto (x_b, y_b) , informado pelo estágio de determinação da posição, define-se o polinômio de ajuste que melhor modela o conjunto de valores discretos ΔB_z simulados. Na sequência, obtém-se o valor máximo deste polinômio de ajuste $\Delta B_{z_aj_max}$. Por fim, divide-se os pontos do polinômio de ajuste por $\Delta B_{z_aj_max}$. Dessa forma, garante-se que o valor máximo deste polinômio será sempre unitário. Esta nova métrica de cálculo resulta nas curvas normalizadas apresentadas na Figura 39, as quais também foram calculadas para três alturas h distintas: 0,01 m, 0,05 m e 0,1 m.

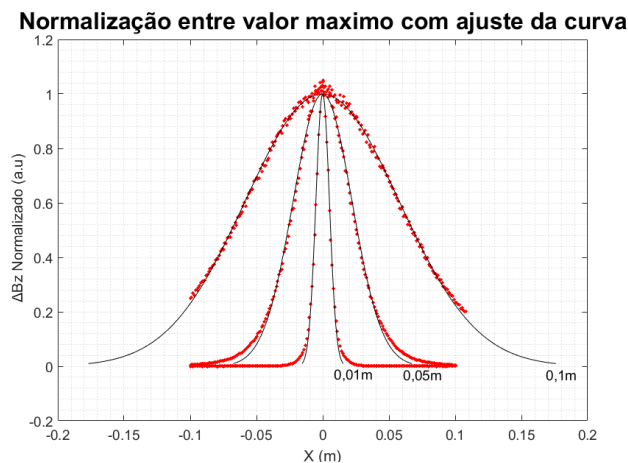


Figura 39 – Métrica alternativa para minimização da influência do ruído magnético ($\epsilon_r = 5\%$) na estimativa da área sob a curva de ΔB_z normalizado em função de x , para três profundidades h diferentes: 0,01 m, 0,05 m e 0,1 m. Os pontos em vermelho indicam os valores discretos efetivamente simulados e os polinômios de ajuste são representados pelas linhas sólidas em preto.

Verificou-se que esta métrica alternativa permite que a estimativa da área sob a curva seja significativamente menos afetada pela presença de ruído magnético. Por outro lado, é importante ressaltar que, mesmo admitindo que a esfera esteja posicionada em $x = 0$, o valor de x para o qual ΔB_z normalizado é unitário pode ser ligeiramente deslocado de $x = 0$, devido à métrica de cálculo adotada.

2. Valor médio (*md*): este parâmetro é obtido por meio do cálculo da média dos valores de ΔB_z contidos em uma submatriz da matriz de medidas. Esta submatriz contém apenas os valores de ΔB_z correspondentes a pontos com valores superiores a 0,5, pertencentes à matriz normalizada de ΔB_z . A Figura 40(b) retrata um exemplo de extração desta submatriz, a partir dos dados contidos na matriz de ΔB_z normalizado, indicada na Figura 40(a).

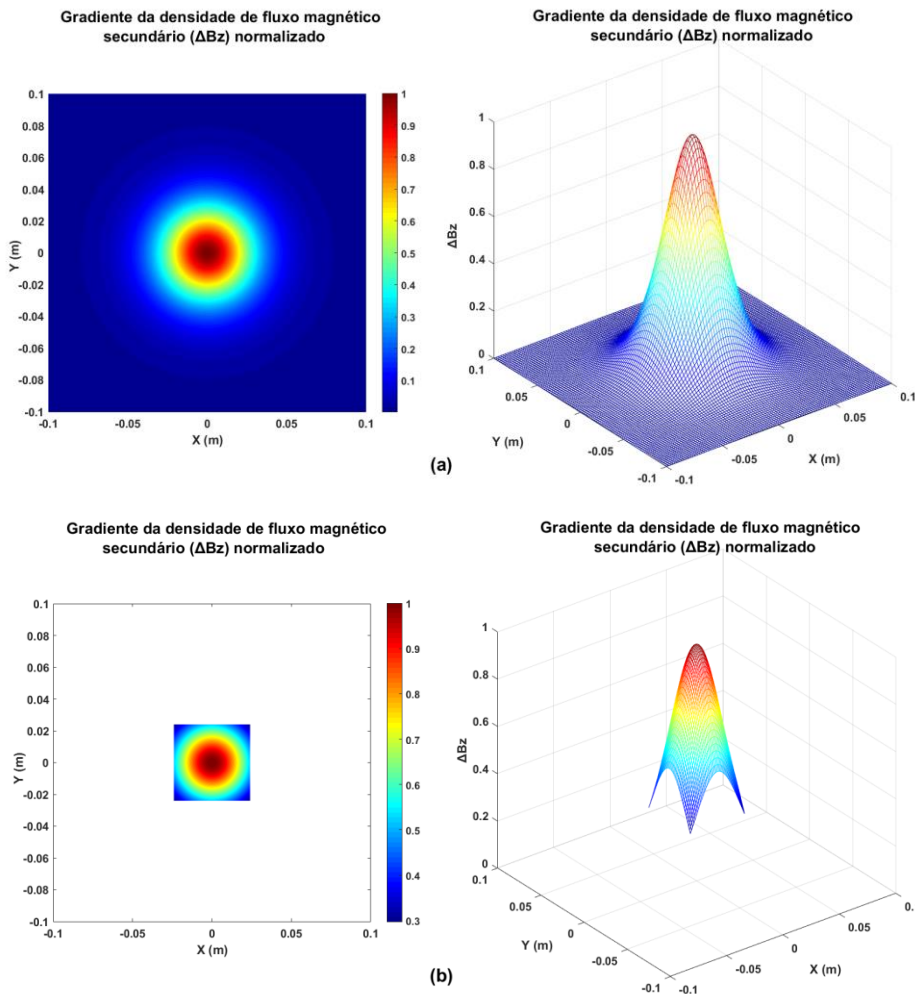


Figura 40 – Mapas de ΔB_z normalizado: (a) matriz de medição completa e (b) submatriz utilizada para extrair a média e o desvio padrão.

3. Desvio Padrão (dp): este parâmetro é obtido por meio do cálculo do desvio padrão dos valores de ΔB_z , contidos em uma submatriz da matriz de medidas, em relação ao valor médio md , que é o parâmetro descrito anteriormente. A submatriz empregada no cálculo de dp é a mesma utilizada na estimativa do valor médio (md).

Destaca-se que podem ocorrer situações em que a esfera esteja em uma posição (x_b, y_b) muito próxima dos limites do espaço de busca, conforme, por exemplo, a situação ilustrada na Figura 41(a). Nestes casos, pode ser inviável aplicar diretamente as métricas de cálculo aqui propostas. Dessa forma, recomenda-se que o mapeamento magnético seja refeito, utilizando o ponto (x_b, y_b) , identificado no módulo de determinação da posição, como origem do espaço de busca. Este novo mapeamento é indicado na Figura 41(b), cujos dados possibilitam a extração dos três parâmetros de interesse definidos nesta subseção.

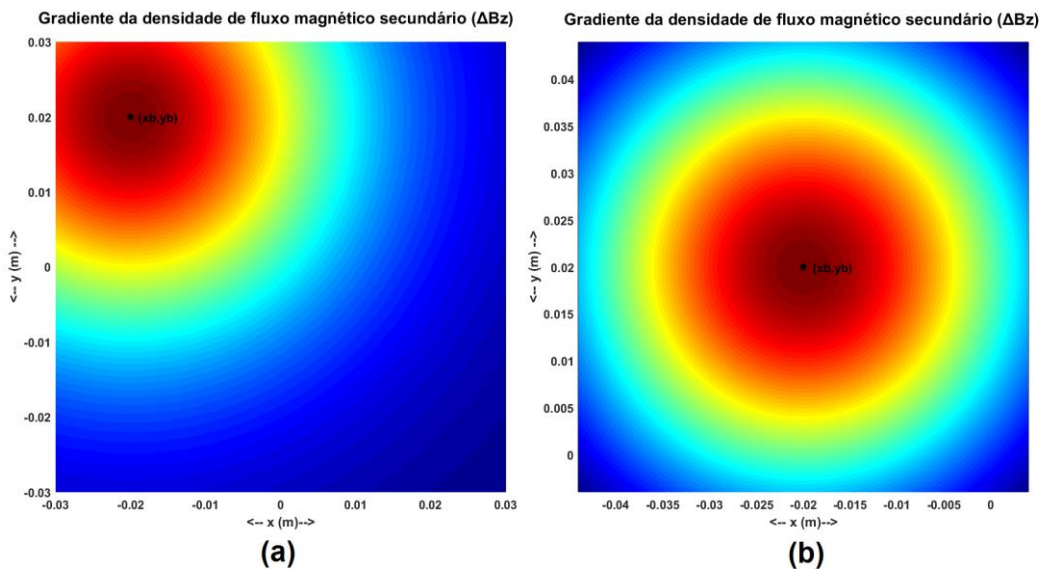


Figura 41 – Exemplos de mapeamento magnético, em (a) apresenta-se o resultado de um mapeamento inicial e em (b) apresenta-se um segundo mapeamento, realizado a fim de tornar o ponto (x_b, y_b) o centro do espaço de busca.

Deseja-se utilizar como entradas da rede neural os parâmetros área sob a curva (A), média (md) e desvio padrão (dp), extraídos dos mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário. A fim de avaliar a relevância destes parâmetros na estimativa da profundidade h retornada pela rede, foram analisadas quatro configurações diferentes de redes neurais, as quais são explicitadas a seguir:

- Rede neural 1 (RN1):** Possui apenas uma entrada: Área sob a curva (A).

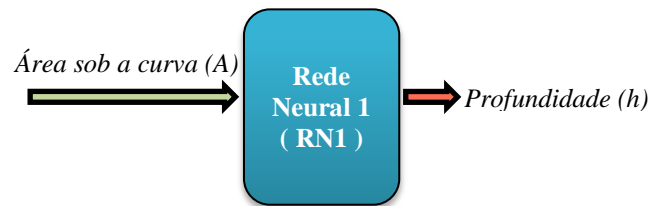


Figura 42 – Diagrama de blocos da rede neural 1 (RN1).

- Rede neural 2 (RN2):** Possui duas entradas: Área sob a curva (A) e valor médio (md).

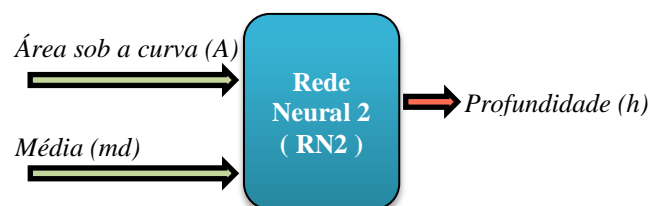


Figura 43 – Diagrama de blocos da rede neural 2 (RN2).

- Rede Neural 3 (RN3):** Possui duas entradas: Área sob a curva (A) e desvio padrão (dp).

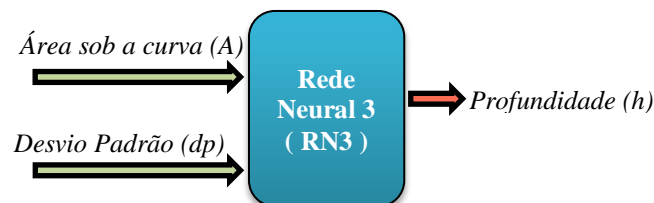


Figura 44 – Diagrama de blocos da rede neural 3 (RN3).

- Rede Neural 4 (RN4):** Possui três entradas: Área sob a curva (A), valor médio (md) e desvio padrão (dp).

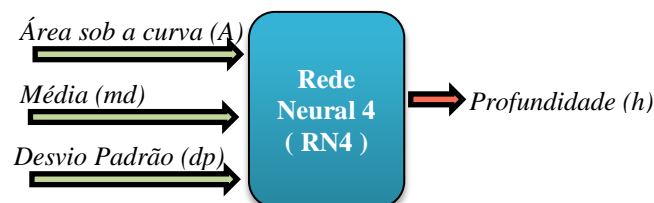


Figura 45 – Diagrama de blocos da rede neural 4 (RN4).

3.2.2.3. Criação da base de dados simulada

No momento em que os presentes estudos foram conduzidos, não se dispunha de um banco de dados suficientemente grande, contendo um conjunto de medidas experimentais de mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para diferentes combinações de x_b , y_b , h e a . Dessa forma, optou-se por implementar um banco de dados simulados, com base no equacionamento matemático descrito na presente dissertação.

Foram simulados mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, associados a diferentes combinações de x_b , y_b , h e a . Para cada um dos mapas simulados, armazena-se o valor de h correspondente (padrão de saída das redes) e extraem-se os padrões de entrada das redes avaliadas: A , md e dp . Destaca-se que, tendo em vista a metodologia de cálculo descrita na seção 3.2.2.2, o padrão A é influenciado apenas pelas variáveis x_b e h . Ademais, devido à simetria do problema e à metodologia de cálculo descrita na seção 3.2.2.2, os atributos md e dp são independentes do valor específico de y_b , visto que a posição (x_b, y_b) da esfera é sempre o ponto central da submatriz utilizada para o cálculo destes atributos. Consequentemente, decidiu-se definir $y_b = 0$, para todos os mapas pertencentes ao banco de dados.

Ressalta-se ainda que foi superposta uma matriz de ruído aleatório a cada mapa da densidade de fluxo magnético primário, com a mesma dimensão da matriz original. A intensidade do ruído em cada posição da matriz é dada por $noise_{ij}$, onde i indica a linha da matriz e j a coluna. O parâmetro $noise_{ij}$ é definido por meio do produto de um valor aleatório e_{rij} , que pode variar entre 0 e 5 %, pelo máximo valor da densidade de fluxo magnético primário presente em cada caso analisado.

Para cada um dos parâmetros utilizados para geração dos mapas magnéticos, a Tabela 2 apresenta sua faixa de variação, o passo adotado e a quantidade de valores testados. Os mapas magnéticos simulados foram gerados para todas as combinações possíveis destes parâmetros, resultando em um banco de dados com um total de 22475 mapas.

Tabela 2. Parâmetros utilizados para simulação dos mapas do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário.

<i>Variável</i>	<i>Valores possíveis</i>	<i>Passo</i>	<i>Faixa de variação</i>
x_b	31	0,002 m	$-0,03 \text{ m} < x_b < 0,03 \text{ m}$
h	145	0,001 m	$0,006 \text{ m} < h < 0,15 \text{ m}$
a	5	0,001 m	$0,001 \text{ m} < a < 0,005 \text{ m}$

Por sua vez, a Tabela 3 explicita aspectos relevantes da base de dados criada.

Tabela 3. Características da base de dados criada.

Características dos dados	Numéricos	Número de mapas magnéticos simulados	22475
Características dos atributos de entrada	Reais	Número de atributos extraídos dos mapas	3 (A, md, dp)
Características da Saída	Real	Número de saídas	1 (h)

3.2.2.4.

Condicionamento das entradas e parâmetros de treinamento

As entradas das redes neurais avaliadas são representadas por números reais, associados aos atributos (A , md e dp) extraídos dos mapas simulados de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário. Por sua vez, a saída da rede neural é um número real associado à profundidade h . Optou-se por efetuar uma normalização linear tanto do atributo de entrada A (Área sob a curva), quanto da variável de saída h (profundidade). Esta normalização pode ser efetuada empregando-se diretamente a eq. (59), onde x representa a variável original e y a variável normalizada.

$$y = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (59)$$

onde x_{min} indica o mínimo valor da variável original e x_{max} o máximo valor.

Por outro lado, para a normalização dos atributos de entrada md (Média) e dp (Desvio Padrão), decidiu-se empregar uma função logarítmica ao conjunto x de variáveis originais, conforme definido pela eq. (60), de modo a tornar mais uniforme a distribuição dos dados. Na sequência, aplica-se a eq. (61) a fim de se obter o valor normalizado y .

$$g = \log x \quad e \quad (60)$$

$$y = \frac{g - g_{\min}}{g_{\max} - g_{\min}}, \quad (61)$$

onde g_{\min} indica o mínimo valor da variável g e g_{\max} o seu máximo valor.

A Tabela 4 indica a faixa de valores dos parâmetros de interesse antes da normalização e depois da normalização.

Tabela 4. Faixa de valores dos parâmetros desnormalizados e normalizados.

<i>Parâmetro</i>	<i>Limites experimentais</i>		<i>Valores Normalizados</i>
	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	
Área sob a Curva	0,0032 m ²	0,0702 m ²	[0,1]
Saída (h)	0,0060 m	0,1500 m	[0,1]
Média da matriz	2,3815x10 ⁻¹⁸ T	6,8759x10 ⁻⁸ T	[0,1]
Desvio Padrão	7,3756x10 ⁻²¹ T	1,6851x10 ⁻⁹ T	[0,1]

Na sequência, passou-se a avaliar a *topologia* da rede que permite a obtenção das melhores respostas, isto é, a estrutura que possibilita a determinação de h com o menor erro possível. As redes neurais desenvolvidas foram baseadas em uma topologia com ***uma única camada escondida***, pois esta configuração mostrou-se suficiente para modelar adequadamente a profundidade h em função dos parâmetros de entrada das redes avaliadas. A ***função de ativação*** escolhida para os neurônios da camada escondida foi a ***tangente hiperbólica*** (*tansig* no *Matlab*®). Por sua vez, escolheu-se a ***função de ativação linear*** (*purelin* no *Matlab*®) para o neurônio da camada de saída, visto que esta função não satura, possibilitando que a rede tenha saídas normalizadas acima de 1, que correspondem a valores de h acima de 15 cm.

O ***algoritmo de treinamento*** utilizado foi o *Levenberg-Marquardt Backpropagation*, que é a função de treinamento padrão do *Matlab*® (*trainlm*) para redes neurais *feedforward*. O banco de dados foi dividido de forma aleatória em três subconjuntos, adotando as porcentagens padrão definidas pelo *Matlab*® para redes neurais *feedforward*: ***Treinamento*** (70%), ***Validação*** (15%) e ***Teste*** (15%). A Tabela 5 indica o total de padrões pertencentes a cada um destes subconjuntos.

Tabela 5. Quantidade de padrões pertencentes aos subconjuntos de treinamento, validação e teste.

<i>Conjunto</i>	<i>Total de padrões</i>
Treinamento (70%)	15733
Validação (15%)	3371
Teste (15%)	3371
Total	22474

O *número máximo de épocas* foi utilizado como critério de interrupção do treinamento, em conjunto com o método de parada antecipada (*early stopping*), de modo a se evitar um super treinamento (*overfitting*) e, consequentemente, garantir que as redes tenham uma boa capacidade de generalização. O *número máximo de épocas* foi arbitrado em 1000 e número de *falhas sucessivas na validação* do método *early stopping* foi fixado em 50. Para estes parâmetros, verificou-se que, na maioria dos casos, o treinamento é interrompido pelo crescimento do erro em relação ao conjunto de validação, antes de alcançar o número máximo de épocas.

Por sua vez, a fim de se definir a quantidade de *neurônios* na camada escondida das redes neurais aqui avaliadas (RN1, RN2, RN3 e RN4), foram realizados testes objetivando a minimização do erro em relação ao conjunto de teste. As métricas de avaliação de erro utilizadas foram o MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) e o RMSE (*Root Mean Squared Error*), as quais são expressas por:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{P_j - T_j}{T_j} \right| \quad e \quad (62)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (P_j - T_j)^2} \quad , \quad (63)$$

onde P_j é o valor previsto pela rede para a amostra j do conjunto de teste, T_j é o valor experimental (alvo) da amostra j do conjunto de teste e N é quantidade de amostras do conjunto de teste.

Para cada uma das redes avaliadas, foram analisadas configurações com 15 diferentes quantidades de neurônios na camada escondida, variando de 3 até 45

neurônios, em passos incrementais de 3 neurônios. Cada topologia foi avaliada 5 vezes, sendo que em cada repetição os pesos sinápticos eram reiniciados com valores aleatórios e pequenos.

Calculou-se o RMSE e o MAPE de cada uma das topologias de redes neurais testadas, a fim de se poder comparar seus desempenhos. Por sua vez, optou-se por selecionar a quantidade de neurônios responsável pela minimização do RMSE médio de cada uma das quatro redes avaliadas, tendo em vista que este parâmetro é menos afetado por valores muito pequenos pertencentes ao conjunto de alvos. Os resultados obtidos indicaram que as redes conseguem fazer uma boa estimativa de h , mesmo para conjuntos de dados com presença de ruído. A Tabela 6 indica a quantidade de neurônios na camada escondida que otimiza o desempenho de cada uma das quatro redes avaliadas, bem como seus respectivos RMSE e MAPE.

Tabela 6. Topologias com melhor resposta e seus respectivos RMSE e MAPE, para as quatro redes neurais avaliadas.

<i>Rede neural</i>	<i>Número de Neurônios na Camada Escondida</i>	<i>RMSE Médio (mm)</i>	<i>MAPE Médio (%)</i>
RN1	30	0,7244	0,5080
RN2	27	0,7145	0,5435
RN3	27	0,5831	0,4829
RN4	30	0,3627	0,3006

Por sua vez, a Figura 46 apresenta um gráfico comparativo entre os valores de RMSE médio apresentados na Tabela 6. Por meio desta figura, fica claro que a rede RN4 apresenta um desempenho superior às demais. Lembrando que a rede RN4 é aquela que efetivamente recebe os três atributos de entrada (A , mp e dp), percebe-se que a informação advinda destes três atributos é de fato relevante, pois contribui para a redução do erro.

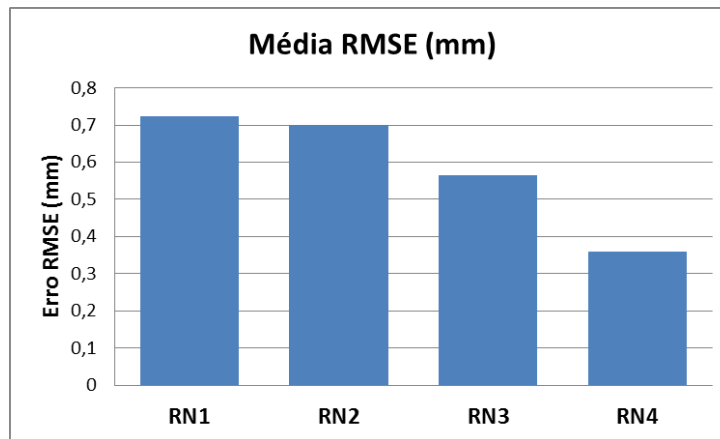


Figura 46 – RMSE médio das quatro redes neurais propostas, configuradas com a quantidade ótima de neurônios em suas camadas escondidas.

3.2.2.5. Seleção da Rede Neural ótima

Os resultados obtidos na subseção 3.2.2.4, em particular aqueles explicitados na Tabela 6 e na Figura 46, indicam que a melhor resposta é obtida com a rede RN4, configurada com uma camada escondida com 30 neurônios. Esta rede apresenta um RMSE médio, na estimativa da profundidade h , de aproximadamente 0,3627 mm. Por sua vez, destaca-se que as redes RN1, RN2 e RN3 também apresentam um desempenho aceitável, apesar de inferior ao apresentado por RN4. Por exemplo, por meio da Tabela 6, verifica-se que o RMSE médio obtido pelas melhores configurações das redes RN1 e RN2 é o dobro do valor obtido para a melhor configuração da rede RN4.

Consequentemente, a rede RN4, configurada com 30 neurônios em sua camada escondida, foi a estrutura selecionada para efetuar a estimativa da profundidade h . Dessa forma, os resultados apresentados nas próximas seções, referentes à estimativa de h pela **Técnica 1**, foram obtidos por meio do emprego desta rede, cujo diagrama de blocos é explicitado na Figura 47.

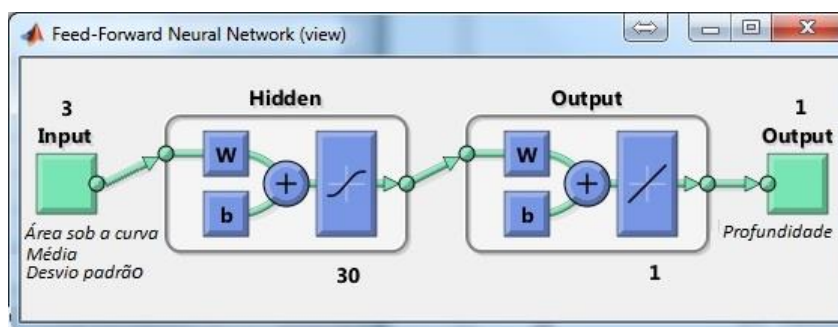


Figura 47 – Configuração da rede neural RN4 selecionada.

3.2.3. Módulo de determinação do raio (a)

Destaca-se que em [3], o método teórico de estimativa do raio a era baseado na medição da diferença de fase entre a densidade de fluxo magnético primário e secundário, a qual é definida por:

$$\varphi(a, f_o) = \tan^{-1} \left[\frac{(2\mu_r + 1) - (2\mu_r + v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}}{(\mu_r - 1) - (\mu_r - v^2 + 1) \frac{\tanh v}{v}} \right]. \quad (64)$$

Conforme descrito pela eq. (64), destaca-se que a diferença de fase não é afetada por h , o que a torna um parâmetro de interesse para a estimativa do raio a . Por sua vez, utilizando a eq. (64) é possível obter curvas características que explicitam a dependência desta diferença de fase com o raio a da esfera. A Figura 48 ilustra algumas destas curvas [3].

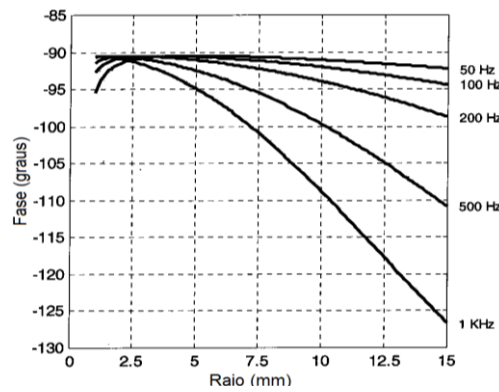


Figura 48 – Dependência da diferença de fase entre a densidade de fluxo magnético primário e secundário em função do raio a da esfera, para frequências de excitação entre 50 Hz e 1 kHz [3].

Por meio das curvas explicitadas na Figura 48 e sabendo-se que a frequência de excitação é conhecida, percebe-se que é possível associar a diferença de fase medida ao valor do raio a . Entretanto, ressalta-se que, na prática, a medição da diferença de fase entre a densidade de fluxo magnético primário e secundário não é um processo trivial, devido à grande diferença entre a amplitude destes sinais.

Dessa forma, na presente dissertação optou-se por desenvolver uma técnica de estimativa do raio a que não necessite da medição da diferença de fase. Ademais, também é importante ressaltar que se objetiva que os algoritmos de processamento aqui desenvolvidos possam processar os sinais adquiridos pelo protótipo desenvolvido por [19], o qual não prevê medições da diferença de fase.

Consequentemente, para a implementação do módulo de determinação do raio, propõe-se uma solução baseada diretamente no processamento dos mapas de gradiente de fluxo magnético secundário. O método proposto utiliza os parâmetros estimados pelos módulos anteriores (posição da esfera (x_b, y_b) e profundidade (h)), a fim de inferir o valor do raio a com ajuda da abordagem matemática apresentada na 3.1.2.2, (eq. (57)) e o emprego de uma técnica de otimização por *algoritmos genéticos* (GA).

3.2.3.1. Abordagem da solução com GA

Conhecendo-se os valores da posição da esfera (x_b, y_b) e de sua profundidade (h) , estimados pelos módulos anteriores, pode-se utilizar a eq. (57), apresentada na seção 3.1.2.2, a fim de se obter matrizes de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário em função de valores arbitrados para o raio a . Consequentemente, é possível implementar um algoritmo que busque minimizar o erro entre matrizes geradas para um raio a arbitrário e a matriz de medidas efetivamente avaliada. Por sua vez, o valor do raio a responsável pela minimização deste erro é considerado a estimativa correta de a .

O processo de otimização aqui descrito foi implementado por meio de um algoritmo genético, que busca otimizar o valor de a por meio da geração de *Matrizes de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário*, denominadas $B_{ztGA}(a)$, associadas a diversos valores de raio a . Na sequência, são efetuadas as comparações entre as matrizes $B_{ztGA}(a)$ geradas e a matriz de medidas avaliada, de modo a se identificar o raio a que minimiza o erro entre elas. O AG evolui por sucessivas gerações repetindo este processo, até que se atinja um determinado critério de parada.

3.2.3.2. Função de avaliação

Tendo em vista as características do problema, a função de avaliação proposta é baseada no erro médio entre a matriz de medidas $B_{zt}(a)$ (matriz alvo) e as matrizes geradas pelo algoritmo genético $B_{ztGA}(a)$. As matrizes $B_{zt}(a)$ e $B_{ztGA}(a)$ são normalizadas em relação ao máximo valor contido em cada uma delas, conforme dado por

$$B_{ztnorm}(a) = \frac{B_{zt}(a)}{\max(B_{zt}(a))},$$

$$B_{ztGANorm}(a) = \frac{B_{ztGA}(a)}{\max(B_{ztGA}(a))}. \quad (65)$$

A fim de se reduzir o custo computacional, reduz-se a dimensão destas matrizes, aplicando uma metodologia análoga à adotada para definição da submatriz utilizada para a estimativa do parâmetro *valor médio (md)*, definido na seção 3.2.2.2. No caso tratado na presente seção, tem-se que a submatriz $B_{ztnorm}^{red}(a)$ é uma versão reduzida da matriz de medidas normalizada original $B_{ztnorm}(a)$, contendo apenas os valores de $B_{ztnorm}(a)$ superiores a 50 %. Por sua vez, o AG irá gerar matrizes simuladas $B_{ztGA}(a)$ com a mesma dimensão de $B_{ztnorm}^{red}(a)$, de modo que as matrizes $B_{ztGANorm}^{red}(a)$ também possuirão a mesma dimensão de $B_{ztnorm}^{red}(a)$. Dessa forma, faz-se com que o algoritmo genético trabalhe apenas com os dados mais relevantes do mapeamento magnético, que de fato contribuem para a estimativa do raio a .

Por sua vez, a eq. (66) apresenta a definição matemática da função de avaliação empregada, admitindo que ambas as matrizes possuam dimensão $n \times n$.

$$e = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left| \frac{B_{ztGANormij}^{red} - B_{ztnormij}^{red}}{B_{ztnormij}^{red}} \right|. \quad (66)$$

onde i indica a linha da matriz e j a coluna.

O AG implementado tem por objetivo minimizar a eq. (66), que é usada como sua função de avaliação (*fitness*). Note-se que é razoável admitir que o valor de raio a responsável pela minimização do erro seja considerado como a melhor estimativa do raio “real” da esfera.

3.2.3.3.

Definição dos parâmetros do AG implementado

O algoritmo genético (AG) desenvolvido foi implementado em *Matlab*®. Tendo em vista as características do problema abordado, foram avaliadas diversas combinações dos parâmetros intrínsecos do AG e das funções disponíveis no *toolbox*, a fim de se melhorar seu desempenho e eficiência.

A variável a ser otimizada é o raio da esfera a , que é representada por um número real, cujo espaço de busca foi limitado entre 0 mm e 10 mm. Por sua vez, o

tamanho da **população** foi fixado em 100 indivíduos. Utilizou-se o método de **Seleção de restante** (*selectionremainder*) como critério de seleção, o qual é descrito na seção 2.2.4. Este método apresentou desempenho superior aos demais métodos avaliados, isto é: roleta, ordenação linear, ordenação exponencial e torneio.

Utilizou-se critérios de elitismo no método de reprodução empregado, de modo a preservar os melhores indivíduos de uma dada geração na geração seguinte. Definiu-se o parâmetro *Elitecount* de forma a garantir que os 2 melhores indivíduos de uma geração sejam preservados e, conseqüentemente, estejam presentes na geração posterior. Esta técnica impede que os indivíduos mais aptos sejam descartados ao longo do processo evolutivo.

O operador genético de cruzamento escolhidos foi o **crossover heurístico** (*Crossoverheuristic*), cuja operação foi descrita na seção 2.2.6, pois, dentre os operadores de *crossover* avaliados, este foi o operador que apresentou o melhor desempenho. O parâmetro Raio (R), que especifica o quão longe o filho está em relação ao pai mais apto, foi ajustado para 6. Por sua vez, a taxa de *crossover* foi fixada em 0,1. Por outro lado, o operador de mutação selecionado foi a função **mutação adaptável** (*Mutationadaptfeasible*), com uma taxa de mutação ajustada para 0,01. Esta função gera de forma aleatória as direções de crescimento e os tamanhos de passo, cujos valores são adaptados em função do desempenho da geração anterior.

Como critério de parada rígido, adotou-se um número máximo de 200 **gerações**. Adicionalmente, também se empregou um critério de parada flexível que interrompe a execução do AG quando a variação relativa média da função de avaliação, ao longo de uma quantidade pré-determinada de gerações (**StallGenLimit**), é menor do que um dado valor de tolerância arbitrado pelo usuário (**TolFun**). O parâmetro *StallGenLimit* foi definido em 30 gerações e o valor de tolerância *TolFun* como 10^{-8} . Em todos os casos avaliados, observou-se que o AG convergiu antes de atingir as 200 gerações do critério rígido. Os demais parâmetros assumiram seus respectivos valores padrão, estabelecidos para o *toolbox* de AG do *Matlab*®.

3.3. Técnica 2

Nesta técnica, objetiva-se que os quatro parâmetros de interesse (posição (x_b , y_b), profundidade (h) e raio da esfera (a)) sejam determinados diretamente por um único módulo de processamento, baseado em algoritmos genéticos. Com este intuito, representa-se cada um destes parâmetros por meio de um gene, de modo que os cromossomos sejam dados por combinações dos quatro parâmetros de interesse.

Esta nova técnica guarda similaridade com o módulo de determinação do raio a , descrito na seção 3.2.3. Entretanto, o AG implementado para a **Técnica 1** possuía apenas uma variável livre (raio da esfera), pois a posição da esfera e a profundidade eram estimadas pelo módulo de processamento anterior. Por outro lado, o AG proposto para implementação da **Técnica 2** possui efetivamente quatro variáveis livres, devendo ser capaz de inferi-las. A Figura 49 apresenta uma representação do fluxograma de processamento proposto para implementação da Técnica 2.

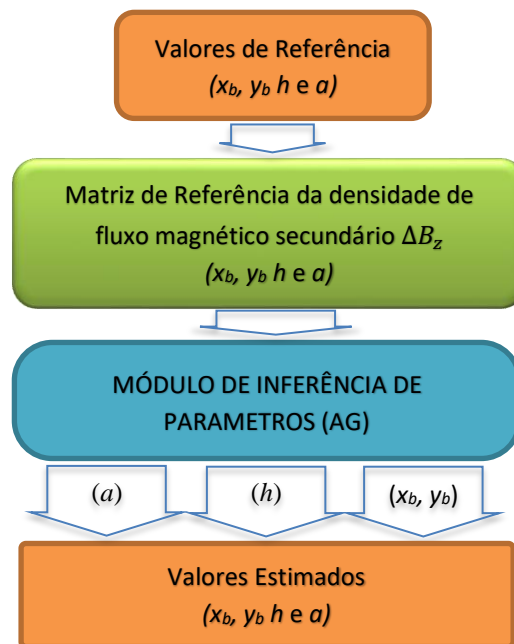


Figura 49 – Fluxograma de processamento de sinal para a Técnica 2.

Utilizando-se a eq. (57), apresentada na seção 3.1.2.2, é possível construir um mapa do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, em função de combinações das 4 variáveis de interesse: posição (x_b , y_b), profundidade (h) e raio (a). Este processo é utilizado para gerar mapas de campo simulados pelo algoritmo genético $B_{ztGA}(x_b, y_b, h, a)$. Estes mapas são comparados com o mapa magnético

de referência, a fim de se identificar a combinação das variáveis de interesse responsável pela minimização do erro entre os mesmos.

O processo de otimização é implementado por meio de um AG, que tem por objetivo a minimização deste erro, sendo que a combinação de (x_b, y_b, h, a) responsável pela minimização do erro é considerada a melhor estimativa para estes parâmetros.

3.3.1.

Função de avaliação

A função de avaliação aqui adotada é análoga à anteriormente definida na seção 3.2.3. Entretanto, aqui tem-se que as matrizes de medidas são efetivamente funções de 4 variáveis, enquanto que em 3.2.3 considerava-se que estas matrizes eram função de uma única variável (a), pois admitia-se que x_b , y_b e h eram conhecidos. A matriz de medida é denominada $B_{zt}(x_b, y_b, h, a)$ (matriz alvo) e as matrizes geradas pelo algoritmo genético são denominadas $B_{ztGA}(x_b, y_b, h, a)$.

As matrizes $B_{zt}(x_b, y_b, h, a)$ e $B_{ztGA}(x_b, y_b, h, a)$ são normalizadas em relação ao máximo valor contido em cada uma delas, conforme dado por

$$\begin{aligned} B_{ztnorm}(x_b, y_b, h, a) &= \frac{B_{zt}(x_b, y_b, h, a)}{\max(B_{zt}(x_b, y_b, h, a))}, \\ B_{ztGANorm}(x_b, y_b, h, a) &= \frac{B_{ztGA}(x_b, y_b, h, a)}{\max(B_{ztGA}(x_b, y_b, h, a))}. \end{aligned} \quad (67)$$

Na sequência, a fim de se reduzir o custo computacional, reduz-se a dimensão destas matrizes, empregando-se uma metodologia idêntica à apresentada na seção 3.2.3. Dessa forma obtém-se as submatrizes reduzidas normalizadas $B_{ztnorm}^{red}(x_b, y_b, h, a)$ e $B_{ztGANorm}^{red}(x_b, y_b, h, a)$, de mesma dimensão, as quais são empregadas na definição da função de avaliação.

A função de avaliação, que objetiva-se minimizar, é o erro médio entre $B_{ztnorm}^{red}(x_b, y_b, h, a)$ e $B_{ztGANorm}^{red}(x_b, y_b, h, a)$, de modo que pode-se defini-la por

$$e = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} \left| \frac{B_{ztGANorm}^{red}(x_b, y_b, h, a) - B_{ztnorm}^{red}(x_b, y_b, h, a)}{B_{ztnorm}^{red}(x_b, y_b, h, a)} \right|. \quad (68)$$

Note-se que a melhor estimativa dos parâmetros x_b, y_b, h, a é dada pela combinação dos valores destes parâmetros responsável por minimizar a função de

avaliação, eq. (68). Dessa forma, tem-se que o AG evoluirá para a solução do problema.

3.3.2.

Definição dos parâmetros do AG implementado

O problema atualmente abordado é similar ao descrito na seção 3.2.3, exceto por aqui existirem quatro variáveis livres, ao invés de uma. Esta variação requer ajustes nos parâmetros do algoritmo genético (AG) anteriormente implementado, de forma a garantir que o mesmo continue a apresentar um bom desempenho. Consequentemente, esta seção explicita os principais parâmetros intrínsecos e funções do novo AG implementado.

O problema aqui abordado envolve a otimização de quatro variáveis, todas representadas por números reais, com espaços de busca assim definidos: $-30 \text{ mm} \leq x_b \leq 30 \text{ mm}$, $-30 \text{ mm} \leq y_b \leq 30 \text{ mm}$, $0,6 \text{ mm} \leq h \leq 150 \text{ mm}$ e $0 \text{ mm} \leq a \leq 10 \text{ mm}$. Por sua vez, o tamanho da **população** foi fixado em 60 indivíduos. Outros valores foram avaliados para este parâmetro e, em todos os casos, o algoritmo apresentou uma boa convergência e tempo de resposta com este valor. Assim como na seção 3.2.3.3, utilizou-se o método de **Seleção de restante** (*selectionremainder*), visto que este método continuou a apresentar desempenho superior aos demais.

Também utilizaram-se critérios de elitismo no método de reprodução aqui empregado, de modo a se preservar os melhores indivíduos de uma dada geração na geração seguinte. Entretanto, aqui o parâmetro *Elitecount* foi estabelecido de forma a garantir que os 5 melhores indivíduos de uma geração sejam preservados, ao invés de apenas 2.

O operador genético de cruzamento escolhido foi o **crossover heurístico** (*Crossoverheuristic*), pois este continua a apresentar desempenho superior em relação aos demais. O parâmetro Raio (R) foi fixado em 6. Por sua vez, a taxa de *crossover* foi fixada em 0,8. Com relação ao operador de mutação, continuou-se a empregar a função **mutação adaptável** (*Mutationadaptfeasible*), porém ajustou-se a taxa de mutação para 0,05.

Como critério de parada rígido, adotou-se um número máximo de 150 **gerações**. Apesar do incremento do número de variáveis, optou-se pela redução do número máximo de gerações, em relação ao adotado em 3.2.3.3, tendo em vista

manter o tempo de processamento computacional dentro de valores razoáveis. Adicionalmente, também se empregou um critério de parada flexível idêntico ao adotado em 3.2.3.3, definido o parâmetro *StallGenLimit* foi para 30 gerações e o valor de tolerância *TolFun* para 10^{-8} . Destaca-se que, ao contrário do AG implementado na seção 3.2.3, cuja execução sempre foi interrompida pelo critério de parada flexível, observou-se que em alguns dos casos avaliados para o AG aqui implementado, a execução foi interrompida pelo critério de parada rígido (número máximo de gerações). Este comportamento era esperado, devido ao aumento da complexidade do problema, associado à redução do número máximo de gerações. Os demais parâmetros assumiram seus respectivos valores padrão, estabelecidos pelo *toolbox* de AG do *Matlab*®.

4 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados das duas técnicas desenvolvidas, descritas no Capítulo 3, para localização de fragmentos de projéteis de armas de fogo, inseridos no corpo humano, a partir da extração de informações contidas em mapas magnéticos. Os projéteis são modelados por esferas condutoras de chumbo. As técnicas propostas propiciam a determinação do raio a da esfera, bem como de sua posição no plano de busca xy e de sua profundidade h em relação à base inferior do solenoide de excitação. Foram feitas diversas análises a fim de avaliar e comparar o desempenho das técnicas aqui propostas. As seções seguintes apresentam resultados gráficos e avaliações qualitativas e quantitativas dos mesmos.

4.1. Avaliação do Desempenho da Técnica 1

Esta seção apresenta e discute os principais resultados associados à avaliação do desempenho da *Técnica 1*. Os três módulos que compõem esta técnica são avaliados separadamente. Inicialmente, avalia-se o módulo de determinação da posição, na sequência, o módulo de determinação da profundidade e, por fim, o módulo de determinação do raio.

Adotou-se a seguinte metodologia para avaliação do desempenho da *Técnica 1*:

1. Empregando os processos matemáticos descritos no Capítulo 3, são simuladas matrizes de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para diferentes combinações dos valores das variáveis de interesse (x_b , y_b , a e h). Estas matrizes simulam o gradiente da densidade de fluxo magnético lido pelo gradiômetro e, conseqüentemente, são utilizadas como matrizes de referência, visto que são obtidas a partir de um conjunto de parâmetros conhecido.

2. As matrizes de campo secundário, são apresentadas ao módulo de determinação da posição, a fim de se obter os parâmetros x_b e y_b associados a cada uma delas.
3. As matrizes de campo secundário em conjunto com seus respectivos valores de x_b e y_b , estimados pelo módulo de determinação da posição, são apresentadas ao módulo de determinação da profundidade, a fim de se obter o parâmetro h associado a cada uma delas.
4. As matrizes de campo secundário em conjunto com seus respectivos valores de x_b e y_b , estimados pelo módulo de determinação da posição, e os valores de h , estimados pelo módulo de determinação da profundidade, são apresentados ao módulo de determinação do raio, a fim de se obter o parâmetro a associado a cada uma delas.
5. O conjunto de parâmetros estimados (x_b , y_b , a e h), para cada uma das matrizes avaliadas, é armazenado em conjunto com os respectivos valores de referência destes parâmetros, de modo a se poder avaliar o erro associado a cada caso analisado.

4.1.1.

Avaliação do Módulo de Determinação da Posição

Inicialmente, avalia-se o desempenho do módulo de determinação da posição para um conjunto de matrizes de referência da densidade de fluxo magnético secundário, obtidas admitindo-se ausência de ruído aleatório. Na sequência, analisa-se o comportamento deste módulo ao ter que realizar estimativas de x_b e y_b a partir de matrizes contendo ruído magnético aleatório. Por fim, o desempenho do módulo é avaliado para um conjunto de dados maior, contendo tanto matrizes sem ruído quanto matrizes com ruído.

4.1.1.1.

Análise de casos *sem ruído magnético* ($e_r = 0\%$)

A Tabela 7 apresenta as estimativas dos valores de posição (x_b , y_b), efetuadas pelo módulo de determinação da posição, para nove diferentes matrizes de referência – todas sem ruído aleatório ($e_r = 0\%$). As matrizes foram obtidas para 3 profundidades h diferentes: 0,01 m, 0,05 m e 0,10 m. Para cada um dos valores de

profundidade avaliados, foram simuladas matrizes associadas a três diferentes posições (x_b, y_b) da esfera: $(-0,02 \text{ m}, 0,02 \text{ m})$, $(0,00 \text{ m}, 0,00 \text{ m})$ e $(0,02 \text{ m}, -0,02 \text{ m})$. Em todos os casos, admitiu-se que o raio da esfera era de $a = 5 \text{ mm}$. Na Tabela 7, também pode-se observar o erro associado à estimativa de x_b , denominado E_{xb} , e de y_b , denominado E_{yb} .

Tabela 7. Comparação dos valores de referência com os valores estimados pelo módulo de determinação da posição, para matrizes sem ruído.

$x_b (m)$ (Referência)	$x_b (m)$ (Estimado)	E_{xb} (mm)	$y_b (m)$ (Referência)	$y_b (m)$ (Estimado)	$E_{yb} (mm)$
$h = 0,01 \text{ m}$					
-0,020	-0,020	0,000	0,020	0,020	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,020	0,020	0,000	-0,020	-0,020	0,000
$h = 0,05 \text{ m}$					
-0,020	-0,020	0,000	0,020	0,020	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,020	0,020	0,000	-0,020	-0,020	0,000
$h = 0,10 \text{ m}$					
-0,020	-0,020	0,000	0,020	0,020	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,020	0,020	0,000	-0,020	-0,020	0,000

Por sua vez, a Figura 50 apresenta os mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, associados a cada um dos casos apresentados na Tabela 7. Nesta figura, o símbolo +, em amarelo, indica a posição de referência da esfera, enquanto que símbolo x, em verde, marca a posição estimada pelo módulo de determinação da posição. A Figura 50(a) retrata a situação para a qual $h = 0,01 \text{ m}$, por sua vez, a Figura 50(b) refere-se a $h = 0,05 \text{ m}$ e a Figura 50(c) a $h = 0,10 \text{ m}$. A coluna da esquerda indica os casos associados à posição de referência $(x_b, y_b) = (-0,02 \text{ m}, 0,02 \text{ m})$, a coluna central a $(x_b, y_b) = (-0,00 \text{ m}, 0,00 \text{ m})$ e a coluna da direita a $(x_b, y_b) = (0,02 \text{ m}, -0,02 \text{ m})$.

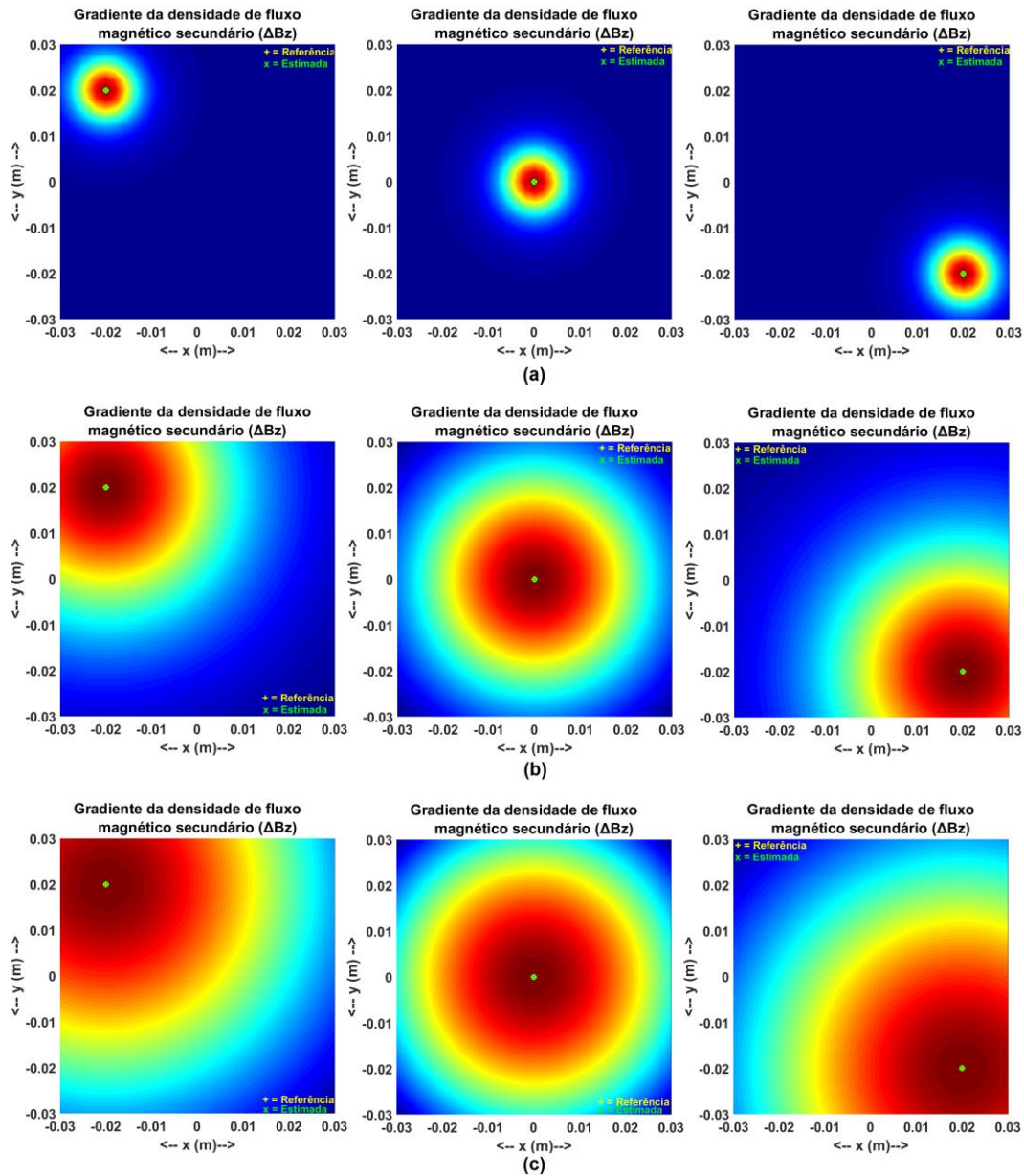


Figura 50 – Mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, sem ruído, contendo a indicação da posição de referência da esfera (+) e da posição estimada pelo Módulo de Determinação da Posição (x).

Inspecionando-se os resultados apresentados na Tabela 7 e na Figura 50, verifica-se que o módulo de determinação de posição conseguiu estimar x_b e y_b com elevada exatidão, visto que, para todos os casos avaliados, obteve-se erro nulo nas estimativas destes parâmetros. Este fato é explicitado observando as colunas referentes aos erros E_{xb} e E_{yb} , apresentados na Tabela 7. Por outro lado, por meio da Figura 54, percebe-se que em todos os mapas apresentados o marcador + está superposto ao marcador x, o que indica que o valor de posição estimado é igual ao valor de referência. Consequentemente, os resultados indicam que o módulo

apresenta excelente desempenho para estimativa da posição da esfera, em casos sem ruído ($e_r = 0 \%$).

4.1.1.2.

Análise de casos com ruído magnético ($e_r = 5 \%$)

A Tabela 8 apresenta as estimativas dos valores de posição (x_b , y_b), efetuadas pelo módulo de determinação da posição, para nove diferentes matrizes de referência. As matrizes aqui avaliadas retratam exatamente os mesmos casos avaliados na Tabela 7, isto é, foram testadas as mesmas combinações de valores de referência (x_b , y_b , h e a). Entretanto, ao contrário dos resultados apresentados na seção 4.1.1.1, que foram obtidos na ausência de ruído ($e_r = 0 \%$), os resultados apresentados nesta seção foram obtidos admitindo-se que as matrizes de referência possuem ruído magnético aleatório ($e_r = 5 \%$). Ressalta-se que esta análise é mais realista que a apresentada em 4.1.1.1, visto que, na prática, as medições são efetivamente afetadas por ruído. Na Tabela 8, também pode-se observar o erro associado à estimativa de x_b , denominado E_{xb} , e de y_b , denominado E_{yb} .

Tabela 8. Comparação dos valores de referência com os valores estimados pelo módulo de determinação da posição, para matrizes com ruído.

x_b (m) (Referência)	x_b (m) (Estimado)	E_{xb} (mm)	y_b (m) (Referência)	y_b (m) (Estimado)	E_{yb} (mm)
$h = 0,01 \text{ m}$					
-0,020	-0,020	0,000	0,020	0,020	0,000
0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000
0,020	0,020	0,000	-0,020	-0,020	0,000
$h = 0,05 \text{ m}$					
-0,020	-0,019	0,001	0,020	0,020	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,020	0,020	0,000	-0,020	-0,020	0,000
$h = 0,10 \text{ m}$					
-0,020	-0,020	0,000	0,020	0,018	-0,002
0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,001
0,020	0,020	0,000	-0,020	-0,019	0,001

Por sua vez, a Figura 51 apresenta os mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, associados a cada um dos casos apresentados na Tabela 8. Nesta figura, o símbolo +, em amarelo, indica a posição de referência da esfera, enquanto que o símbolo x, em verde, marca a posição estimada pelo módulo de determinação da posição. A Figura 51(a) retrata a situação para a qual $h = 0,01$

m, por sua vez, a Figura 51(b) refere-se a $h = 0,05$ m e a Figura 51(c) a $h = 0,10$ m. A coluna da esquerda indica os casos associados à posição de referência $(x_b, y_b) = (-0,02$ m, $0,02$ m), a coluna central a $(x_b, y_b) = (-0,00$ m, $0,00$ m) e a coluna da direita a $(x_b, y_b) = (0,02$ m, $-0,02$ m).

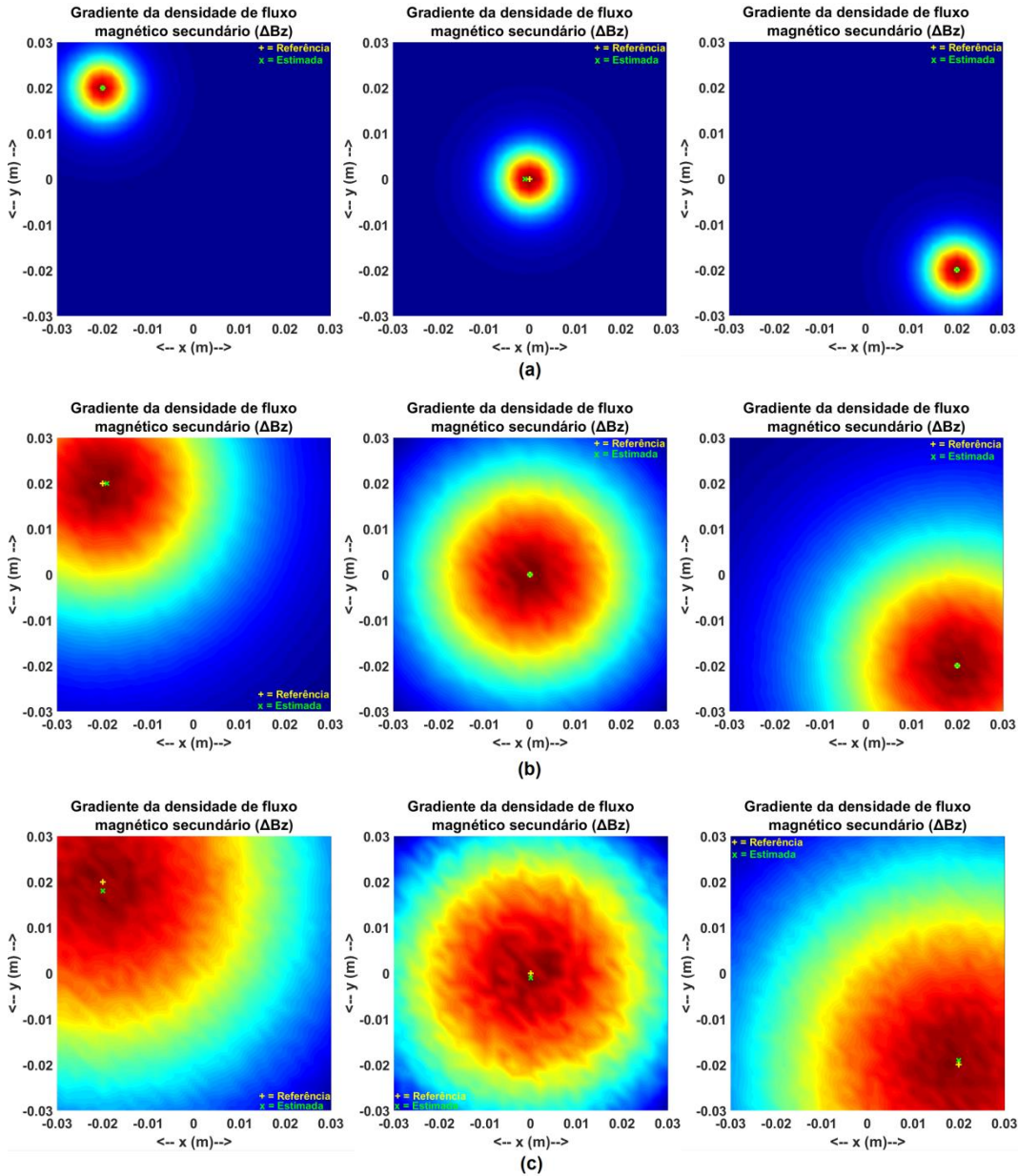


Figura 51 – Mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, com ruído, contendo a indicação da posição de referência da esfera (+) e da posição estimada pelo Módulo de Determinação da Posição (x).

Comparando-se os casos apresentados na Figura 51 com os casos correspondentes da Figura 50, é possível verificar que o ruído efetivamente afeta as medições e, conseqüentemente, dificulta o processamento efetuado pelo módulo de determinação da posição. Os resultados apresentados na Tabela 8 e na Figura 51

corroboram esta expectativa, visto que os erros E_{xb} e E_{yb} , apresentados na Tabela 8, são sempre maiores ou iguais aos seus respectivos valores apresentados na Tabela 7. Por outro lado, por meio da Figura 51, percebe-se que o marcador + sempre está satisfatoriamente próximo ao marcador x, o que indica que o valor de posição estimado é uma boa aproximação do valor de referência. Entretanto, na Figura 50 (sem ruído), o marcador + estava sempre superposto ao marcador x, indicando uma maior exatidão.

Dentre os casos avaliados, em valor absoluto, o maior erro obtido na estimativa de x_b foi de 1 mm e na estimativa de y_b foi de 2 mm, conforme indicado na Tabela 8. Dessa forma, percebe-se que o módulo de determinação da posição consegue efetuar uma boa estimativa da posição da esfera, mesmo para matrizes com ruído magnético ($e_r = 5\%$).

4.1.1.3. Análise aprofundada

De modo a se poder avaliar de forma mais fidedigna o módulo de determinação da posição, decidiu-se submetê-lo a uma análise mais aprofundada. Nesta análise, testou-se o desempenho do módulo para um total de 6860 matrizes de referência distintas. Estas matrizes foram geradas para diferentes combinações das variáveis de interesse: posição (x_b , y_b), profundidade h e raio a . Cada matriz associada a uma combinação de x_b , y_b , h e a foi superposta a matrizes de ruído magnético aleatório, com quatro diferentes intensidades e_r : 0 %, 1 %, 3 % e 5 %. Dessa forma, o conjunto de dados contém tanto matrizes sem ruído magnético ($e_r = 0\%$), quanto matrizes com níveis de ruído magnético mais ou menos intensos. A Tabela 9 define o conjunto de valores de cada variável de interesse que foi efetivamente utilizado para geração das matrizes.

Tabela 9. Parâmetros utilizados para geração das matrizes utilizadas para avaliação do módulo de determinação da posição.

<i>Variável</i>	<i>Quantidade de Valores Testados</i>	<i>Passo</i>	<i>Faixa de variação</i>
x_b	7	0,01 m	$-0,03 < x_b < 0,03$ (m)
y_b	7	0,01 m	$-0,03 < y_b < 0,03$ (m)
h	7	0,02 m	$0,006 < h < 0,126$ (m)
a	5	0,001 m	$0,001 < a < 0,005$ (m)
e_r	4	--	0%, 1%, 3% e 5%

Cada um dos 6860 mapas de referência simulados do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário foi apresentado ao módulo de determinação da posição. Consequentemente, o mesmo efetuou 6860 estimativas de (x_b, y_b) . Para cada uma destas estimativas, calcularam-se os erros E_{xb} e E_{yb} , em relação aos valores de referência de x_b e y_b , respectivamente. A Tabela 10 mostra as distribuições de frequências dos erros E_{xb} e E_{yb} , considerando os valores obtidos nos 6860 experimentos realizados.

Tabela 10. Análise do erro de posição (x_b, y_b) , por meio da distribuição de frequências.

x_b		y_b	
$E_{xb} (mm)$	Frequência	$E_{yb} (mm)$	Frequência
-5	5	-5	2
-4	11	-4	13
-3	60	-3	64
-2	273	-2	267
-1	861	-1	906
0	4168	0	4170
1	1047	1	958
2	320	2	335
3	86	3	111
4	25	4	27
5	4	5	7

Por meio dos resultados apresentados na Tabela 10, verifica-se que se obteve erro nulo em cerca de 60,8% das estimativas efetuadas para a variável x_b e para a variável y_b . Também, percebe-se que mais de 99% das estimativas de x_b e y_b obtiveram valores de erros contidos entre ± 3 mm, a qual é considerada uma faixa de erros toleráveis. Por sua vez, o maior erro absoluto obtido nos testes realizados foi de 5 mm, tanto para x_b quanto y_b . Os resultados obtidos indicam que o módulo de determinação da posição se comporta de forma satisfatória, apresentando alta exatidão na estimativa de x_b e y_b , na grande maioria dos casos avaliados. Para uma melhor visualização da distribuição dos dados contidos na Tabela 10, apresentam-se os histogramas da distribuição de frequências dos erros E_{xb} e E_{yb} , nas Figuras 52 e 53, respectivamente.

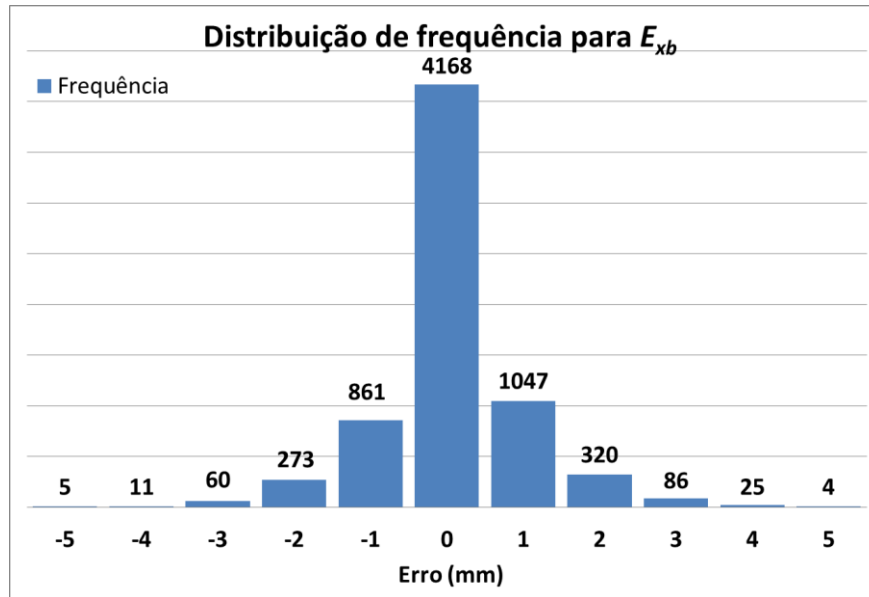


Figura 52 – Distribuição de frequências do erro E_{xb} , considerando os resultados dos 6860 testes efetuados.

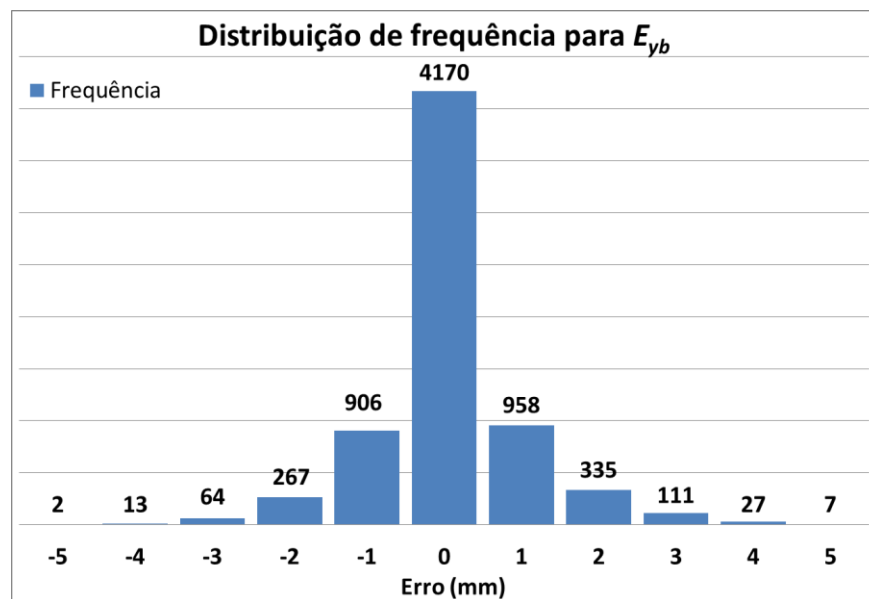


Figura 53 – Distribuição de frequências do erro E_{yb} , considerando os resultados dos 6860 testes efetuados.

Para o conjunto de dados avaliado (Figuras 52 e 53), tem-se que o coeficiente *t de student* é $t_{stud} = 2,576$, com um nível de confiança de 99%, considerando que ambos possuem 6859 graus de liberdade [66-68]. Dessa forma, se μ_{Exb} e σ_{Exb} são respectivamente a média e o desvio padrão do erro E_{xb} , garante-se que o erro na estimativa de x_b estará contido em um intervalo

$$[E_{xb1}, E_{xb2}] = \mu_{Exb} \pm 2,576 \sigma_{Exb}. \quad (69)$$

De forma equivalente, pode-se garantir com um nível de confiança de 99% que o erro na estimativa de y_b estará contido entre

$$[E_{yb1}, E_{yb2}] = \mu_{E_{yb}} \pm 2,576 \sigma_{E_{yb}}. \quad (70)$$

Considerando os 6860 testes efetuados, a Tabela 11 indica os limites inferior e superior das distribuições de frequência dos erros E_{xb} e E_{yb} , apresentadas respectivamente nas Figuras 52 e 53, bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão.

Tabela 11. Parâmetros extraídos das distribuições de frequência de E_{xb} e E_{yb} .

	E_{xb} (mm)	E_{yb} (mm)
Mínimo	-5	-5
Máximo	5	5
Média	-0,06	-0,06
Desvio Padrão	0,964	0,987

Consequentemente, por meio da eq. (69) e utilizando-se as informações explicitadas na Tabela 11, pode-se calcular a faixa de valores na qual garante-se que o erro E_{xb} estará contido, com um nível de confiança de 99%. Esta faixa é dada por

$$\begin{cases} [E_{xb1}, E_{xb2}] = -0,06 \pm 2,483mm \\ -2,543 mm \leq E_{xb} \leq 2,423 mm \end{cases} \quad (71)$$

Por sua vez, por meio da eq. (70) e utilizando-se as informações explicitadas na Tabela 11, pode-se calcular a faixa de valores na qual garante-se que o erro E_{yb} estará contido, com um nível de confiança de 99%. Esta faixa é dada por

$$\begin{cases} [E_{yb1}, E_{yb2}] = -0,06 \pm 2,543mm \\ -2,602 mm \leq E_{yb} \leq 2,482 mm \end{cases} \quad (72)$$

O banco de dados com 6860 matrizes de referência foi gerado utilizando 7 valores distintos de profundidade h e 4 valores distintos de intensidade de ruído magnético e_r . Consequentemente, o mesmo pode ser dividido em 28 subconjuntos, cada qual correspondente a uma combinação específica de h e e_r . A fim de se evidenciar a influência da profundidade h e da intensidade do ruído magnético e_r na exatidão das estimativas de x_b e y_b , efetuadas pelo módulo de determinação da posição, apresenta-se na Tabela 12 as médias dos valores absolutos de E_{xb} e E_{yb} , pertencentes a cada um destes 28 subconjuntos, denominadas $|E_{xb}|_{\text{mean}}$ e $|E_{yb}|_{\text{mean}}$, respectivamente.

Tabela 12. Médias dos valores absolutos de E_{xb} e E_{yb} , para 28 combinações específicas de profundidade h e intensidade de ruído magnético e_r .

Profundidade h (m)	$e_r = 0\%$		$e_r = 1\%$		$e_r = 3\%$		$e_r = 5\%$	
	$ E_{xb} _{\text{mean}}$ (mm)	$ E_{yb} _{\text{mean}}$ (mm)	$ E_{xb} _{\text{mean}}$ (mm)	$ E_{yb} _{\text{mean}}$ (mm)	$ E_{xb} _{\text{mean}}$ (mm)	$ E_{yb} _{\text{mean}}$ (mm)	$ E_{xb} _{\text{mean}}$ (mm)	$ E_{yb} _{\text{mean}}$ (mm)
0,006	0	0	0	0	0	0	0	0
0,026	0	0	0,19	0,13	0,39	0,4	0,52	0,58
0,046	0	0	0,38	0,39	0,64	0,64	0,82	0,77
0,066	0	0	0,58	0,56	0,83	0,82	0,98	1,07
0,086	0	0	0,71	0,69	1,08	1	1,17	1,24
0,106	0	0	0,68	0,77	1,21	1,24	1,28	1,33
0,126	0	0	0,93	0,85	1,29	1,32	1,49	1,73

Os resultados da Tabela 12 são representados por meio de dois gráficos de barras, apresentados nas Figuras 54 e 55. Estes gráficos indicam os valores de $|E_{xb}|_{\text{mean}}$ (Figura 54) e $|E_{yb}|_{\text{mean}}$ (Figura 55) em função da profundidade h . Por sua vez, para cada valor de h são apresentadas 4 barras, uma correspondente a cada valor de e_r avaliado.

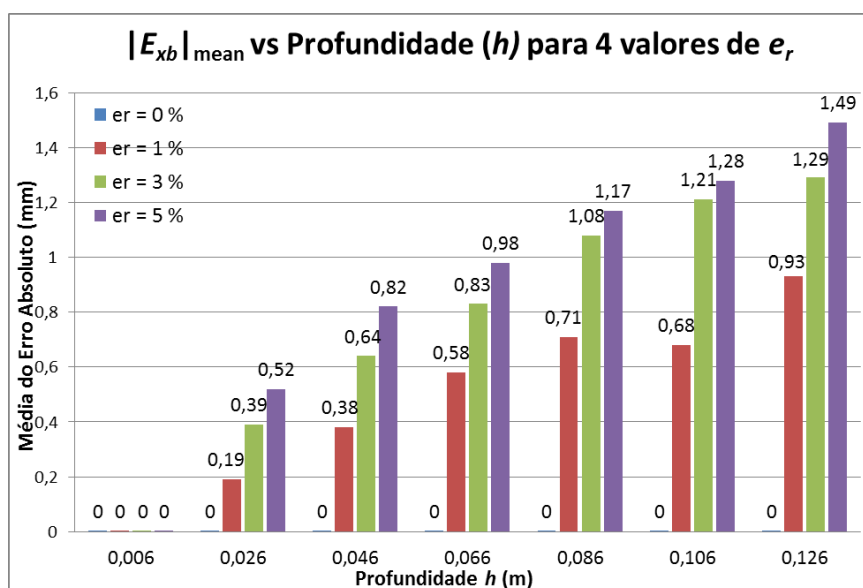


Figura 54 – $|E_{xb}|_{\text{mean}}$ em função da profundidade h . Foram avaliados quatro diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.

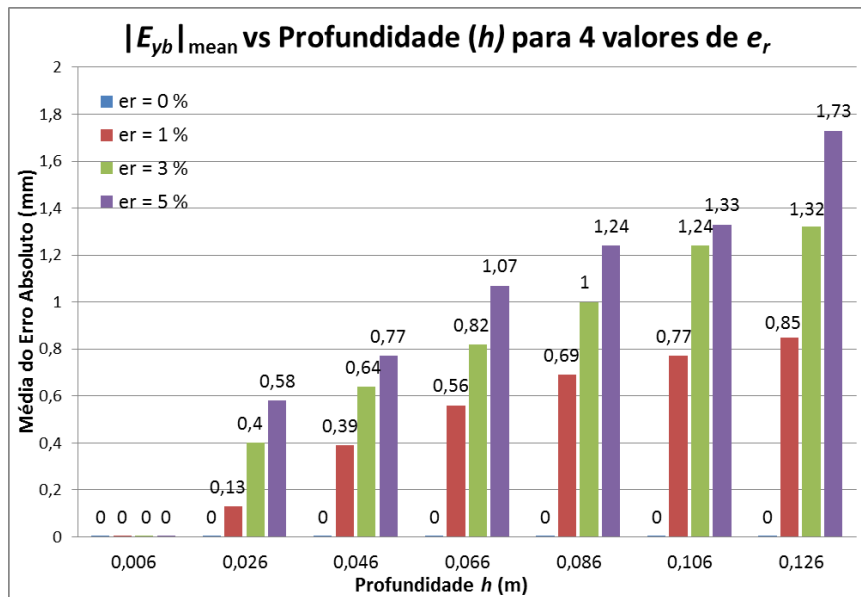


Figura 55 – $|E_{yb}|_{\text{mean}}$ em função da profundidade h . Foram avaliados quatro diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.

Analisando as informações contidas na Tabela 12 e nas Figuras 54 e 55, comparando-se os casos com os mesmos e_r , percebe-se que os erros $|E_{xb}|_{\text{mean}}$ e $|E_{yb}|_{\text{mean}}$ tendem a aumentar com a profundidade h . Por sua vez, comparando-se os casos com os mesmos h , verifica-se que os erros $|E_{xb}|_{\text{mean}}$ e $|E_{yb}|_{\text{mean}}$ tendem a aumentar com a intensidade de ruído e_r . Consequentemente, conclui-se que, conforme esperado, a exatidão do método piora com incrementos de h e e_r .

Dentre todos os casos avaliados, o pior valor de $|E_{xb}|_{\text{mean}}$ foi 1,49 mm e o de $|E_{yb}|_{\text{mean}}$ foi 1,73 mm, ambos para $h = 0,126$ m (maior profundidade) e $e_r = 5\%$ (maior intensidade de ruído). É importante ressaltar que mesmo os piores valores obtidos para $|E_{xb}|_{\text{mean}}$ e $|E_{yb}|_{\text{mean}}$ ainda podem ser considerados satisfatórios.

4.1.2. Avaliação do Módulo de determinação da profundidade

Tendo em vista a discussão apresentada na seção 3.2.2.5, selecionou-se a rede neural RN4 para ser empregada como parte integrante do módulo de determinação da profundidade. RN4 é uma rede *multilayer perceptron* com 3 entradas (Área sob a curva (A), Média (md) e Desvio Padrão (dp)), uma camada escondida com 30 neurônios e uma saída (profundidade (h)). Os atributos de entrada da rede são extraídos de matrizes de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, conforme discutido na seção 3.2.2.2.

Por sua vez, conforme detalhado na seção 3.2.2, esta rede foi treinada com o algoritmo *Levenberg-Marquardt Backpropagation* no *Matlab®*. Neste processo, o banco de dados, composto por matrizes de gradiente de densidade de fluxo magnético secundário, foi dividido em três subconjuntos: treinamento (70%), validação (15%) e teste (15%). A fim de se avaliar o desempenho da rede RN4 na estimativa da profundidade h , apresentaram-se à rede os padrões pertencentes ao conjunto de teste.

O conjunto de testes é composto por 3371 matrizes de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, geradas para diversas combinações de x_b , y_b , a e h . A base de dados contém tanto casos com ruído quanto casos sem ruído, pois foram geradas matrizes para valores de e_r entre 0 % e 5 %. Conforme descrito em 3.2.2.3, a base de dados possui matrizes associadas a valores de h entre 0,006 m e 0,015 m. Entretanto, de modo a compatibilizar os resultados apresentados nesta seção com os descritos na seção 4.1.1, decidiu-se fixar o limite superior de h em 0,13 m. Dessa forma, o tamanho do conjunto de teste foi reduzido para 2899 padrões.

A fim de propiciar uma melhor visualização dos resultados, optou-se por segmentar o conjunto de testes em 5 subconjuntos distintos, utilizando o raio a como critério de segmentação. A Tabela 13 indica as características dos 5 subconjuntos gerados a partir dos 2899 padrões de teste.

Tabela 13. Características dos 5 subconjuntos gerados a partir dos 2899 padrões de teste.

<i>Subconjunto</i>	<i>Raio a (m)</i>	<i>Faixa de Profundidade h (m)</i>	<i>Quantidade de padrões</i>
Teste-a1	0,001	$0,006 \leq h \leq 0,13$	575
Teste-a2	0,002	$0,006 \leq h \leq 0,13$	581
Teste-a3	0,003	$0,006 \leq h \leq 0,13$	564
Teste-a4	0,004	$0,006 \leq h \leq 0,13$	587
Teste-a5	0,005	$0,006 \leq h \leq 0,13$	592
Total			2899

A fim de se analisar o desempenho do módulo de determinação da profundidade, avaliou-se a resposta da rede RN4 para cada um dos 2899 diferentes padrões de teste. As Figuras 56 a 60 apresentam a relação entre a estimativa da profundidade h , efetuada pela rede RN4, e os respectivos valores alvo de h , definidos para cada um dos 2899 padrões avaliados. Os resultados são agrupados

em função dos subconjuntos definidos na Tabela 13, sendo que: a Figura 56 refere-se aos dados do subconjunto Teste-a1, a Figura 57 refere-se aos dados do subconjunto Teste-a2, a Figura 58 refere-se aos dados do subconjunto Teste-a3, a Figura 59 refere-se aos dados do subconjunto Teste-a4 e a Figura 60 refere-se aos dados do subconjunto Teste-a5.

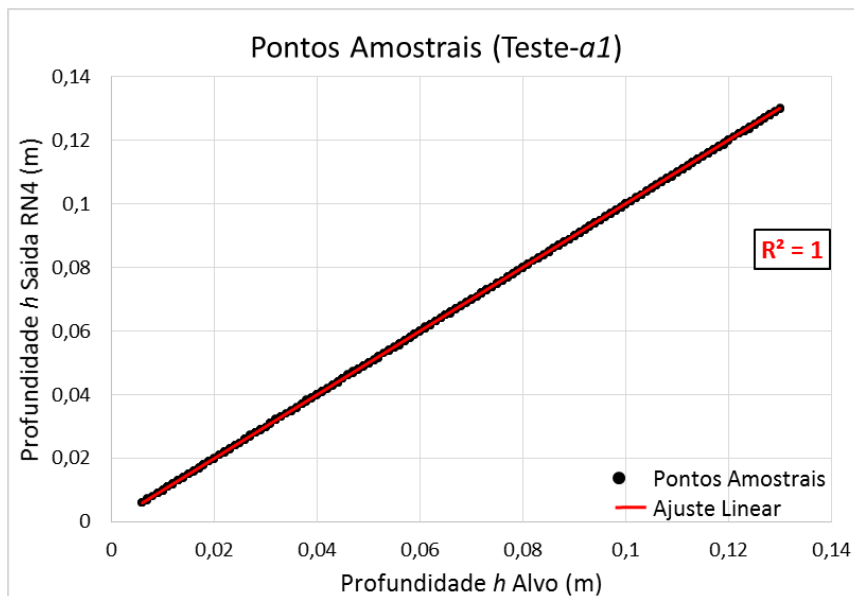


Figura 56 – Relação entre a saída da rede neural RN4 e seus respectivos valores alvo, para o subconjunto Teste-a1, formado por dados associados a um raio $a = 0,001$ m.

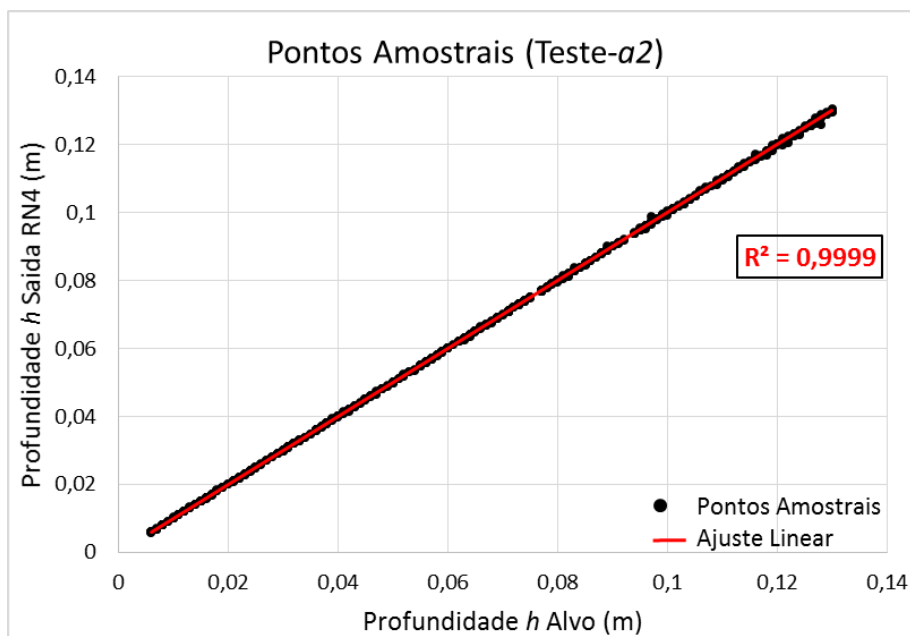


Figura 57 – Relação entre a saída da rede neural RN4 e seus respectivos valores alvo, para o subconjunto Teste-a2, formado por dados associados a um raio $a = 0,002$ m.

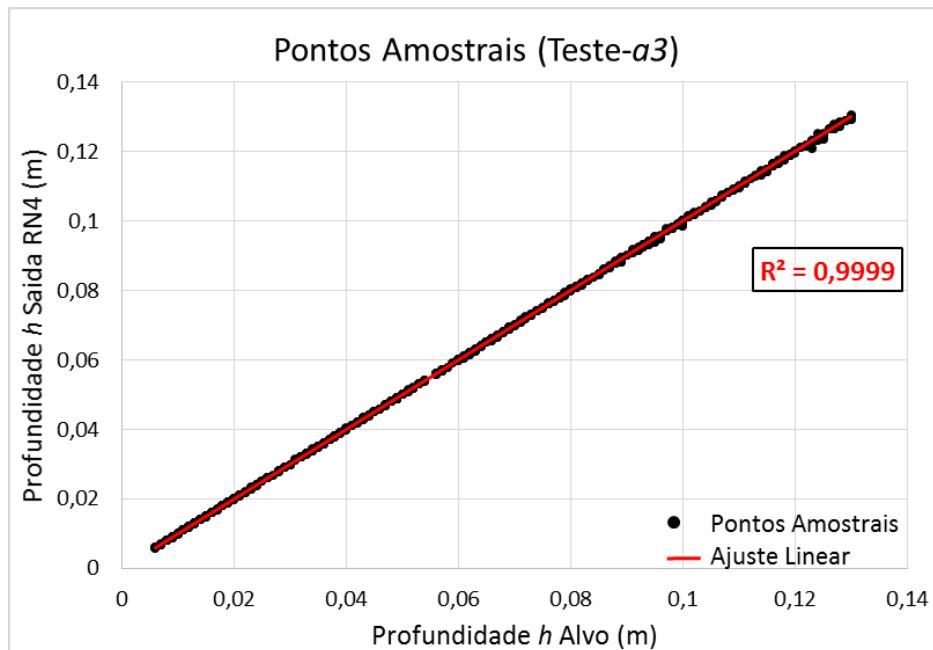


Figura 58 – Relação entre a saída da rede neural RN4 e seus respectivos valores alvo, para o subconjunto Teste-a3, formado por dados associados a um raio $a = 0,003$ m.

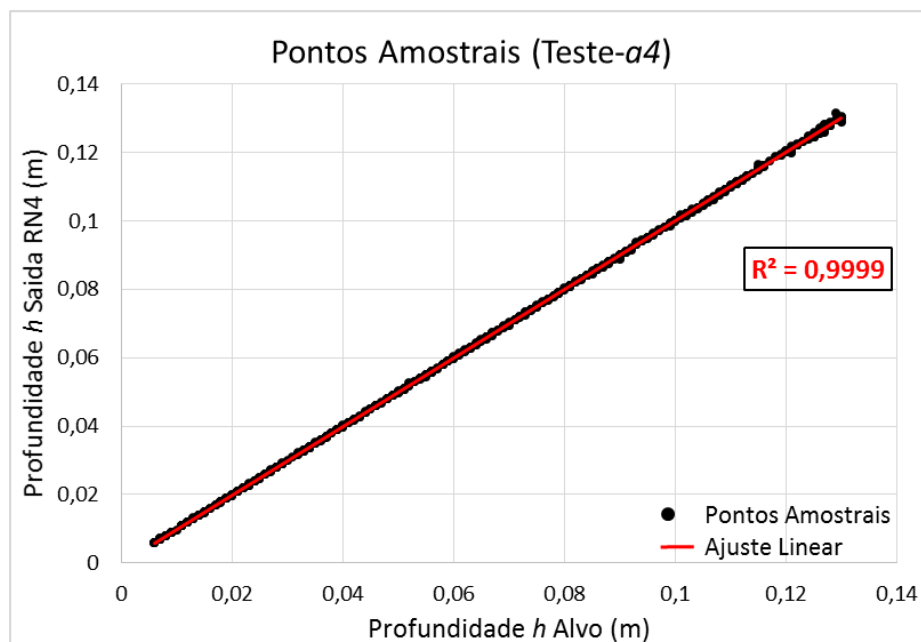


Figura 59 – Relação entre a saída da rede neural RN4 e seus respectivos valores alvo, para o subconjunto Teste-a4, formado por dados associados a um raio $a = 0,004$ m.

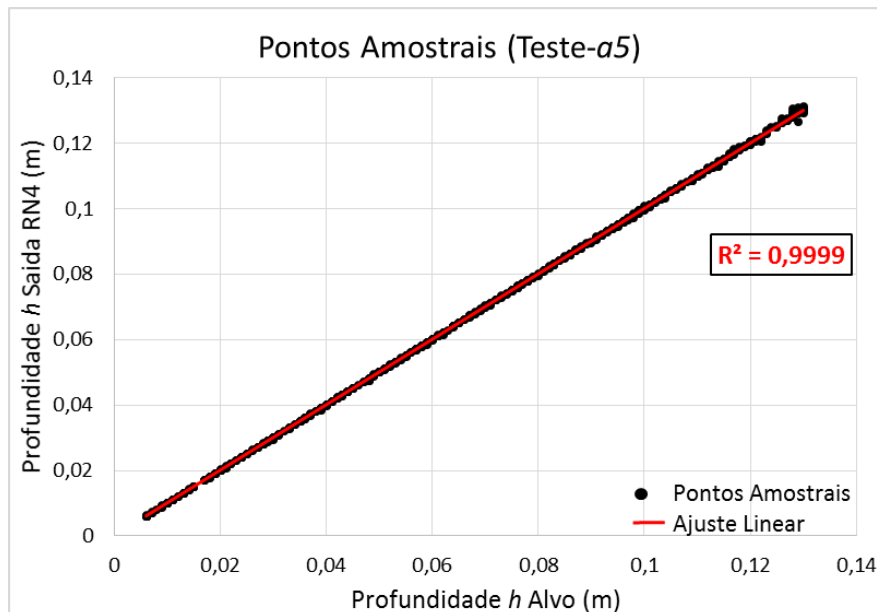


Figura 60 – Relação entre a saída da rede neural RN4 e seus respectivos valores alvo, para o subconjunto Teste-a1, formado por dados associados a um raio $a = 0,005$ m.

Observando-se os resultados explicitados nas Figuras 56 a 60, verifica-se que, para todos os casos analisados, a estimativa de h efetuada pela rede neural RN4 é satisfatoriamente próxima ao respectivo valor de referência de h (alvo). Este fato é evidenciado pela análise gráfica, que mostra que os pontos amostrais (círculos pretos) são muito bem modelados por meio de um ajuste linear (Linha vermelha), com coeficiente angular aproximadamente unitário. Conforme indicado nas figuras, ressalta-se que todos os ajustes lineares efetuados obtiveram coeficientes R^2 de aproximadamente 1, o que indica que de fato os valores alvo e a saída da rede seguem uma relação satisfatoriamente linear. É importante ressaltar que as avaliações aqui apresentadas se referem à estimativas de h efetuadas para dados pertencentes ao conjunto de testes, o qual contém padrões desconhecidos pela rede, isto é, que não foram utilizados em seu treinamento. Dessa forma, verifica-se que a rede desenvolvida apresenta boa capacidade de generalização e possibilita estimar a profundidade h de forma satisfatória.

De modo a se efetuar uma análise mais quantitativa do erro associado à estimativa de h , E_h , agruparam-se os 2899 padrões de teste avaliados em um conjunto único e, em seguida, calculou-se o erro E_h para cada um destes casos. O erro E_h é definido como a diferença entre a saída da rede (valor estimado de h) e seu respectivo valor de referência (alvo). A Tabela 14 apresenta a distribuição de frequências dos 2899 valores de E_h obtidos, dividindo-se a faixa total de excursão

de E_h em 33 subintervalos (*bins*). Explicita-se também os valores mínimos e máximos das variáveis h e e_r , relacionadas aos valores de E_h pertencentes a cada um destes 33 subintervalos.

Tabela 14. Análise do erro entre a profundidade simulada (alvo) e a profundidade dada pela saída da rede neural.

E_h (mm)	Frequência	Profundidade h		Ruído e_r	
		h_{\min} (m)	h_{\max} (m)	e_r mín. (%)	e_r máx. (%)
-2,3	1	0,129	0,129	4,68	4,68
-1,9	2	0,123	0,128	4,00	4,12
-1,5	1	0,10	0,10	4,94	4,94
-1,3	5	0,122	0,127	2,70	4,96
-1,2	3	0,09	0,122	3,87	4,71
-1,1	3	0,118	0,124	2,65	3,57
-1	2	0,096	0,13	2,90	3,58
-0,9	4	0,10	0,121	3,40	4,62
-0,8	6	0,094	0,128	4,05	4,71
-0,7	12	0,062	0,13	3,38	4,90
-0,6	17	0,042	0,127	1,53	4,96
-0,5	32	0,03	0,13	1,23	4,87
-0,4	38	0,022	0,127	2,24	4,96
-0,3	68	0,01	0,126	1,41	4,98
-0,2	172	0,007	0,13	1,03	4,95
-0,1	312	0,006	0,13	0,54	4,99
0	582	0,006	0,13	0,018	4,99
0,1	883	0,006	0,13	0,003	4,99
0,2	414	0,006	0,13	0,002	4,98
0,3	157	0,007	0,13	0,03	4,98
0,4	77	0,007	0,13	0,03	4,95
0,5	33	0,02	0,129	0,32	4,92
0,6	21	0,007	0,13	0,94	4,93
0,7	12	0,009	0,13	0,85	4,57
0,8	10	0,052	0,128	2,06	4,89
0,9	10	0,10	0,128	2,63	4,95
1	6	0,089	0,13	2,09	4,84
1,1	5	0,116	0,127	3,69	4,99
1,2	3	0,117	0,13	2,14	4,85
1,3	1	0,128	0,128	3,99	3,99
1,5	2	0,126	12,8	4,48	4,71
1,7	1	12,9	12,9	3,42	3,42
2	2	12,8	12,9	4,05	4,68
2,6	2	12,9	0,13	4,68	4,99

Observando-se os dados contidos na Tabela 14, verifica-se que $-2,3 \text{ mm} < E_h < 2,6 \text{ mm}$, para todos os casos avaliados. Adicionalmente, em aproximadamente 81,5 % dos casos avaliados o E_h esteve contido entre $-0,2 \text{ mm}$ e $0,2 \text{ mm}$.

Consequentemente, verifica-se que o módulo de determinação da profundidade apresenta elevada exatidão, inclusive superior à obtida pelo método de determinação da posição. Este fato é parcialmente atribuído à capacidade de rejeição de ruído das redes neurais, bem como às técnicas adotadas para extração de atributos das matrizes de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, as quais foram discutidas na seção 3.2.2.2.

A análise da Tabela 14 também permite concluir que o valor do erro E_h tende a aumentar com a profundidade h e com a intensidade de ruído e_r . Em particular, verifica-se que o limite inferior da faixa de erros E_h (-2,3 mm) ocorre para uma profundidade alta (0,129 m) e um nível de ruído elevado ($e_r = 4,68\%$). Por sua vez, o limite superior da faixa de erros E_h (2,6 mm) ocorre para profundidades acima de 0,129 m e níveis de ruído acima de $e_r = 4,68\%$.

Para uma melhor visualização da distribuição dos dados contidos na Tabela 14, apresenta-se na Figura 61 o histograma da distribuição de frequências de E_h .

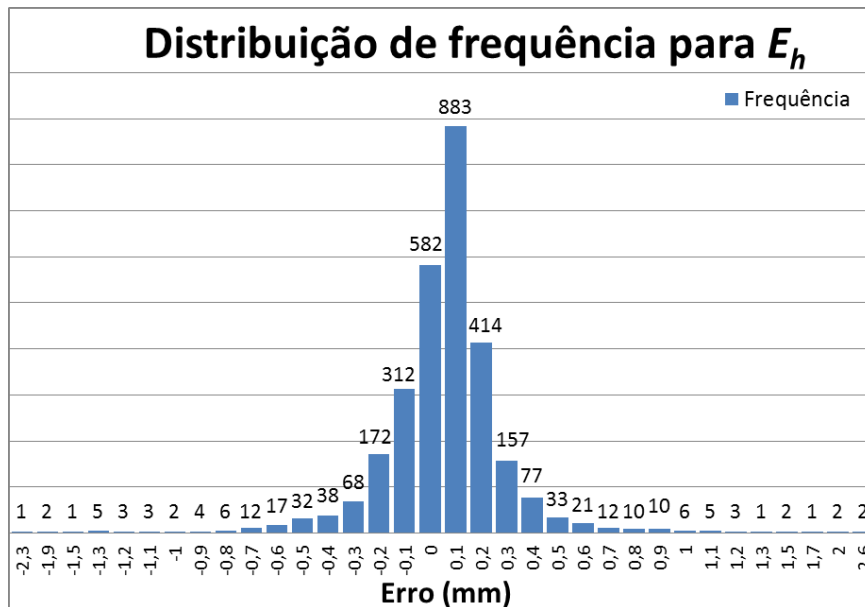


Figura 61 – Distribuição de frequências do erro E_h , considerando os resultados dos 2899 testes efetuados.

Para o conjunto de dados avaliado (Figuras 61), tem-se que o coeficiente *t de student* é $t_{stud} = 2,577$, com um nível de confiança de 99%, considerando que o mesmo possui 2898 graus de liberdade [66-68]. Dessa forma, se μ_{Eh} e σ_{Eh} são respectivamente a média e o desvio padrão do erro E_h , garante-se que o erro na estimativa de h estará contido em um intervalo

$$[E_{h1}, E_{h2}] = \mu_{Eh} \pm 2,577 \sigma_{Eh}. \quad (73)$$

Considerando os 2899 testes efetuados, a Tabela 15 indica os limites inferior e superior da distribuição de frequências do erro E_h , apresentada na Figura 61, bem como seu respectivo valor médio e desvio padrão.

Tabela 15. Parâmetros extraídos da distribuição de frequências de E_h .

	E_h (mm)
Mínimo	-2,383
Máximo	2,574
Média	0,008
Desvio Padrão	0,267

Consequentemente, por meio da eq. (73) e utilizando-se as informações explicitadas na Tabela 15, pode-se calcular a faixa de valores na qual garante-se que o erro E_h estará contido, com um nível de confiança de 99%. Esta faixa é

$$\begin{cases} [E_{h1}, E_{h2}] = 0,008 \pm 0,688 \text{ mm} \\ -0,680 \text{ mm} \leq E_h \leq 0,696 \text{ mm} \end{cases} \quad (74)$$

Os 2899 padrões de teste foram divididos em subgrupos correspondentes a 13 faixas de profundidade h diferentes. A fim de se evidenciar a influência da profundidade h na exatidão da estimativa deste parâmetro pelo módulo de determinação da profundidade, apresenta-se na Tabela 16 as médias dos valores absolutos de E_h , pertencentes a cada um destes 13 subgrupos, denominada $|E_h|_{\text{mean}}$. A Tabela 16 apresenta ainda a média dos máximos valores de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário ($|\max(\Delta B_z)|_{\text{mean}}$) obtidos para os mapas contidos nos conjuntos pertencentes a cada uma destas 13 faixas de profundidade.

Tabela 16. $|E_h|_{\text{mean}}$ e $|\max(\Delta B_z)|_{\text{mean}}$ em função da profundidade h .

Faixa de Profundidade h (m)	$E_h _{\text{mean}}$ (mm)	$\max(\Delta B_z) _{\text{mean}}$ (T)
$0,006 \leq h \leq 0,01$	0,079	1,255E-08
$0,01 < h \leq 0,02$	0,077	7,661E-10
$0,02 < h \leq 0,03$	0,101	5,082E-11
$0,03 < h \leq 0,04$	0,110	8,018E-12
$0,04 < h \leq 0,05$	0,115	2,229E-12
$0,05 < h \leq 0,06$	0,118	7,678E-13
$0,06 < h \leq 0,07$	0,139	3,084E-13
$0,07 < h \leq 0,08$	0,135	1,414E-13
$0,08 < h \leq 0,09$	0,165	7,031E-14
$0,09 < h \leq 0,10$	0,201	3,605E-14
$0,10 < h \leq 0,11$	0,200	2,087E-14
$0,11 < h \leq 0,12$	0,252	1,234E-14
$0,12 < h \leq 0,13$	0,373	7,378E-15

Por meio dos resultados apresentados na Tabela 16, percebe-se que o erro $|E_h|_{\text{mean}}$ tende a aumentar com a profundidade h . Em particular, o erro $|E_h|_{\text{mean}}$ obtido para $0,006 \text{ m} \leq h \leq 0,01 \text{ m}$ foi de apenas, aproximadamente, 0,08 mm, o que indica que o módulo de determinação da profundidade efetua uma estimativa extremamente exata. Por outro lado, para o extremo oposto, ou seja $0,12 \text{ m} \leq h \leq 0,13 \text{ m}$, o erro $|E_h|_{\text{mean}}$ foi cerca de 0,37 mm. Ressalta-se que este valor de $|E_h|_{\text{mean}}$ ainda é bastante satisfatório, apesar de superior ao erro obtido para $0,006 \text{ m} \leq h \leq 0,01 \text{ m}$.

Por sua vez, conforme esperado, verifica-se que $|\max(\Delta B_z)|_{\text{mean}}$ tende a diminuir significativamente com o aumento da profundidade h , sendo reduzido em cerca de 1,6 milhões de vezes ao se variar a profundidade de 0,01 m para 0,13 m. É razoável assumir que esta redução de $|\max(\Delta B_z)|_{\text{mean}}$ com a profundidade seja a responsável pelo aumento do erro $|E_h|_{\text{mean}}$, visto que valores menores de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário tornam as leituras magnéticas mais susceptíveis ao ruído magnético. Em particular, para $h = 0,13 \text{ m}$, $|\max(\Delta B_z)|_{\text{mean}}$ atinge seu valor mínimo, da ordem de femtoteslas.

Destaca-se que apenas magnetômetros SQUID teriam resolução suficiente para efetuar tais leituras. Por outro lado, considerando que o sistema proposto é baseado em leituras efetuadas por um gradiômetro GMI, com resolução da ordem de picoteslas, verifica-se que o mesmo seria capaz de efetuar leituras satisfatórias até no máximo $h = 5 \text{ cm}$. Consequentemente, recomenda-se que o campo magnético primário gerado pela configuração atual seja aumentado, a fim de se elevar os valores de $|\max(\Delta B_z)|_{\text{mean}}$ e, consequentemente, propiciar medições adequadas em profundidades maiores. Entretanto, destaca-se que tais limitações não foram consideradas nos estudos aqui realizados, sendo sempre considerado que os sensores utilizados para efetuar as medições do gradiente de campo possuem resolução suficiente.

A dependência de $|E_h|_{\text{mean}}$ com a profundidade h é evidenciada na Figura 62, obtida a partir dos dados contidos na Tabela 16.

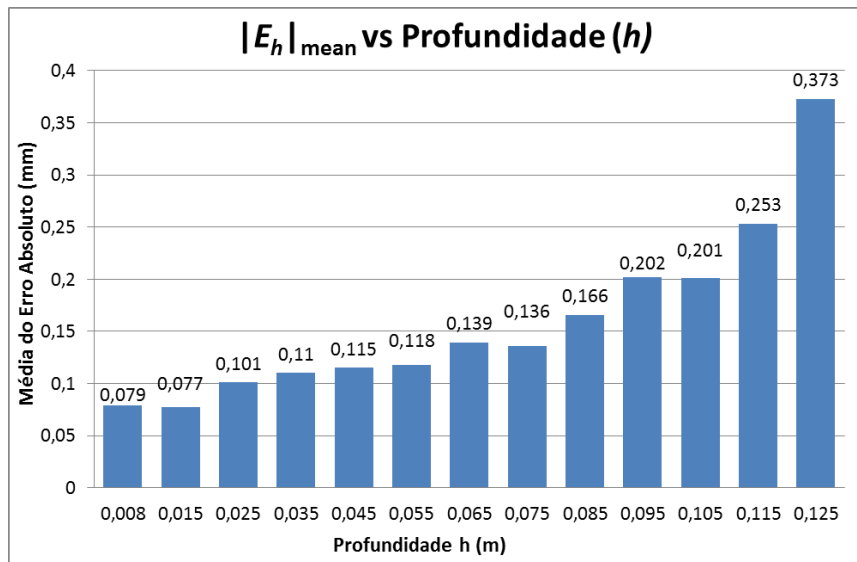


Figura 62 – Dependência de $|E_h|_{\text{mean}}$ com a profundidade h .

Observa-se na Figura 62 que o erro $|E_h|_{\text{mean}}$ tende a aumentar com a profundidade. Por sua vez, também nota-se que a taxa de incremento do erro tende a aumentar com a profundidade. Tendo em vista que foram avaliados valores de profundidade h em passos de 0,01 m, verifica-se que os incrementos de $|E_h|_{\text{mean}}$ para as variações de h de 0,11 m para 0,12 m e de 0,12 m para 0,13 m são muito mais substanciais do que os incrementos observados para profundidades menores. Isto indica que o erro $|E_h|_{\text{mean}}$ tende a aumentar consideravelmente para profundidades acima de 0,13 m. Entretanto, ressalta-se que, para a faixa de profundidades avaliada, todos os erros obtidos foram considerados satisfatórios, mantendo-se sempre abaixo de 0,4 mm.

4.1.3. Avaliação do Módulo de Determinação do Raio

Na seção 3.2.3.3 foram descritas as principais características do Algoritmo Genético desenvolvido para estimar o valor do raio a da esfera, a partir das matrizes de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário e do conhecimento dos parâmetros x_b , y_b e h , determinados pelos módulos de processamento anteriores. Este módulo foi testado por meio das mesmas 6860 matrizes de referência utilizadas para avaliação do módulo de determinação da posição. Dessa forma, conforme descrito na Tabela 9 da seção 4.1.1.3, foram avaliadas matrizes geradas por combinações de 49 valores distintos de posições da esfera (x_b , y_b), 7 valores de

profundidade (h), 5 valores de raio (a) e 4 valores de intensidade de ruído magnético (e_r).

Cada um dos 6860 mapas de referência simulados, do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, em conjunto com seus respectivos valores de x_b , y_b e h , estimados pelos módulos de processamento anteriores (seções 4.1.1 e 4.1.2), foi apresentado ao módulo de determinação do raio. Consequentemente, o mesmo efetuou 6860 estimativas do raio a da esfera. Para cada uma destas estimativas, calculou-se o erro E_a , em relação aos respectivos valores de referência de a . A Tabela 17 mostra a distribuição de frequências do erro E_a , considerando os valores obtidos nos 6860 experimentos realizados.

Tabela 17. Análise do erro na estimativa do raio a , por meio da distribuição de frequências.

E_a (mm)	Frequência	E_a (mm)	Frequência	E_a (mm)	Frequência
-0, 0275	1	-0, 0050	18	0, 0075	6
-0, 0260	1	-0, 0045	22	0, 0080	7
-0, 0250	1	-0, 0040	27	0, 0085	2
-0, 0235	1	-0, 0035	47	0, 0090	2
-0, 0230	1	-0, 0030	56	0, 0095	3
-0, 0215	1	-0, 0025	92	0, 0100	1
-0, 0210	1	-0, 0020	131	0, 0105	1
-0, 0200	2	-0, 0015	200	0, 0115	2
-0, 0195	2	-0, 0010	315	0, 0125	1
-0, 0180	1	-0, 0005	465	0, 0130	1
-0, 0170	1	0, 0000	1122	0, 0135	1
-0, 0165	1	0, 0005	1864	0, 0140	1
-0, 0145	1	0, 0010	737	0, 0150	1
-0, 0140	1	0, 0015	537	0, 0155	1
-0, 0135	1	0, 0020	323	0, 0165	1
-0, 0115	1	0, 0025	250	0, 0170	1
-0, 0095	1	0, 0030	168	0, 0215	1
-0, 0090	3	0, 0035	133	0, 0235	1
-0, 0085	1	0, 0040	92	0, 0260	1
-0, 0080	3	0, 0045	72	0, 0270	1
-0, 0075	1	0, 0050	50	0, 0312	1
-0, 0070	1	0, 0055	28	0, 0316	1
-0, 0065	3	0, 0060	9	0, 0332	1
-0, 0060	6	0, 0065	11	Total	6860
-0, 0055	8	0, 0070	7		

Observando-se os dados contidos na Tabela 17, verifica-se que $-0,0275 \text{ mm} < E_a < 0,0332 \text{ mm}$, para todos os casos avaliados. Consequentemente, conclui-se que todas as estimativas do raio foram efetuadas com erros inferiores a $\pm 0,04 \text{ mm}$, o que indica que o módulo de determinação do raio realiza estimativas extremamente exatas. Adicionalmente, em aproximadamente 83,0 % dos casos avaliados o erro E_a esteve contido entre $-0,002 \text{ mm}$ e $0,002 \text{ mm}$, o que reforça a exatidão da técnica proposta. Dessa forma, verifica-se que o módulo de determinação do raio apresenta elevada exatidão, inclusive superior às obtidas pelos módulos de determinação da posição e de determinação da profundidade.

Para uma melhor visualização da distribuição dos dados contidos na Tabela 17, apresenta-se na Figura 63 o histograma da distribuição de frequências do erro E_a .

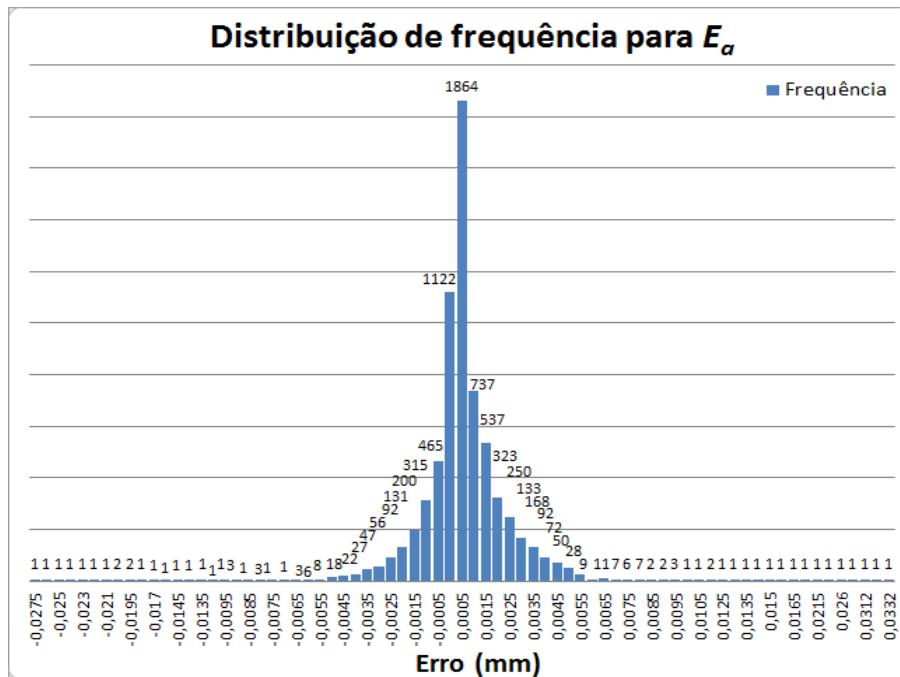


Figura 63 – Distribuição em frequência do erro para o valor do raio a , nos 6860 experimentos.

Para o conjunto de dados avaliado (Figuras 63), tem-se que o coeficiente t de student é $t_{stud} = 2,576$, com um nível de confiança de 99%, considerando que o mesmo possui 6859 graus de liberdade [66-68]. Dessa forma, se μ_{Ea} e σ_{Ea} são respectivamente a média e o desvio padrão do erro E_a , garante-se que o erro na estimativa de a estará contido em um intervalo

$$[E_{a1}, E_{a2}] = \mu_{Ea} \pm 2,576 \sigma_{Ea}. \quad (75)$$

Considerando os 6860 testes efetuados, a Tabela 18 indica os limites inferior e superior da distribuição de frequências do erro E_a , apresentada na Figura 63, bem como seu respectivo valor médio e desvio padrão.

Tabela 18. Parâmetros extraídos da distribuição de frequências de E_a .

	E_a (mm)
Mínimo	-0,0278
Máximo	0,0332
Média	0,0003
Desvio Padrão	0,0022

Por meio da eq. (75) e utilizando-se as informações explicitadas na Tabela 18, pode-se calcular a faixa de valores na qual garante-se que o erro E_a estará contido, com um nível de confiança de 99 %. Esta faixa é dada por

$$\begin{cases} [E_{a1}, E_{a2}] = 0,0003 \pm 0,0057 \text{ mm} \\ -0,0054 \text{ mm} \leq E_a \leq 0,0060 \text{ mm} \end{cases} \quad (76)$$

Na sequência, efetua-se uma análise equivalente à apresentada na Tabela 12 da seção 4.1.1, para avaliação do módulo de determinação da posição. O banco de dados com 6860 matrizes de referência foi gerado utilizando 7 valores distintos de profundidade h e 4 valores distintos de intensidade de ruído magnético e_r . Consequentemente, o mesmo pode ser dividido em 28 subconjuntos, cada qual correspondente a uma combinação específica de h e e_r . A fim de se evidenciar a influência da profundidade h e da intensidade do ruído magnético e_r na exatidão das estimativas do raio a , efetuadas pelo módulo de determinação do raio, apresenta-se na Tabela 19 as médias dos valores absolutos de E_a , pertencentes a cada um destes 28 subconjuntos, denominadas $|E_a|_{\text{mean}}$.

Tabela 19. Médias dos valores absolutos de E_a , para 28 combinações específicas de profundidade h e intensidade de ruído magnético e_r .

Profundidade h (m)	$ E_a _{\text{mean}}$ (mm)			
	$e_r = 0\%$	$e_r = 1\%$	$e_r = 3\%$	$e_r = 5\%$
0,006	0,001	0,0009	0,001	0,0008
0,026	0,0009	0,0012	0,0016	0,0015
0,046	0,0011	0,0012	0,0012	0,0013
0,066	0,001	0,0009	0,0011	0,0013
0,086	0,0009	0,001	0,0011	0,0013
0,106	0,0011	0,001	0,0011	0,0016
0,126	0,0013	0,0012	0,0013	0,0025

Os resultados da Tabela 19 são representados por meio de um gráfico de barras, apresentado na Figura 64. Este gráfico indica os valores de $|E_a|_{\text{mean}}$ em função da profundidade h . Por sua vez, para cada valor de h são apresentadas 4 barras, uma correspondente a cada valor de e_r avaliado.

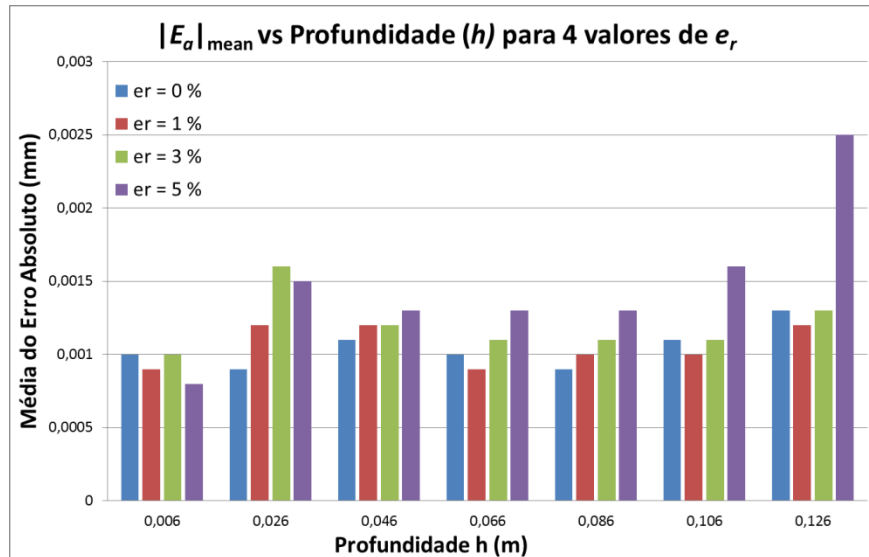


Figura 64 – $|E_a|_{\text{mean}}$ em função da profundidade h . Foram avaliados quatro diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.

Analisando as informações contidas na Tabela 19 e na Figura 64, percebe-se certa tendência de incremento do erro $|E_a|_{\text{mean}}$ com o aumento da profundidade h e da intensidade de ruído e_r . Entretanto, destaca-se que esta dependência não é tão forte quanto a observada para os erros associados às estimativas dos parâmetros x_b , y_b e h . De forma geral, nota-se que a exatidão tende a piorar levemente com incrementos de h e e_r .

Dentre todos os casos avaliados, o pior valor de $|E_a|_{\text{mean}}$ foi 0,0025 mm, ambos para $h = 0,126$ m (maior profundidade) e $e_r = 5$ % (maior intensidade de ruído). É importante ressaltar que mesmo os piores valores obtidos para $|E_a|_{\text{mean}}$ são considerados extremamente satisfatórios.

4.2. Avaliação do Desempenho da Técnica 2

A *Técnica 2* é baseada em um módulo único composto por um algoritmo genético responsável por inferir as quatro variáveis de interesse (x_b , y_b , h , a). As características do AG implementado foram descritas detalhadamente na seção 3.3, onde se estabelecem os parâmetros mais adequados para a execução desta técnica

de otimização, destinada à localização de fragmentos de projéteis de arma de fogo inseridos no corpo humano.

De modo a se poder avaliar esta técnica, decidiu-se testar seu desempenho para um total de 405 matrizes de referência distintas. Estas matrizes foram geradas para diferentes combinações das variáveis de interesse: posição (x_b , y_b), profundidade h e raio a . Cada matriz associada a uma combinação de x_b , y_b , h e a foi superposta a matrizes de ruído magnético aleatório, com três diferentes intensidades e_r : 0 %, 3 % e 5 %. Dessa forma, o conjunto de dados contém tanto matrizes sem ruído magnético ($e_r = 0$ %), quanto matrizes com níveis de ruído magnético mais ou menos intensos. A Tabela 20 define o conjunto de valores de cada variável de interesse que foi efetivamente utilizado para geração das matrizes.

Tabela 20. Parâmetros utilizados para geração das matrizes utilizadas para avaliação da Técnica 2.

<i>Variável</i>	<i>Quantidade de Valores testados</i>	<i>Passo</i>	<i>Faixa de Variação</i>
x_b	3	0,02 (m)	$-0,02 < x_b < 0,02$ (m)
y_b	3	0,02 (m)	$-0,02 < y_b < 0,02$ (m)
h	3	0,04 (m)	$0,01 < h < 0,09$ (m)
a	5	0,001 (m)	$0,001 < a < 0,005$ (m)
e_r	3	0-3-5 (%)	$0 < e_r < 5$ (%)

A Tabela 21 apresenta estimativas das variáveis de interesse (x_b , y_b , h e a), efetuadas pela Técnica 2, para três matrizes de referência diferentes. As matrizes foram geradas para três níveis distintos de ruído aleatório e_r , conforme indicado. Os parâmetros específicos utilizados para geração de cada matriz de referência são apresentados na Tabela 21, para fins de comparação com os respectivos valores estimados. Por sua vez, por meio desta comparação pode-se avaliar os erros associados à estimativa de cada variável de interesse, os quais são explicitados na coluna *Erro (m)*, da Tabela 21.

Tabela 21. Comparação dos valores de referência das variáveis de interesse com seus respectivos valores estimados pela Técnica 2.

<i>Caso</i>	<i>Variável</i>	<i>Valor de Referência (m)</i>	<i>Valor Estimado (m)</i>	<i>Erro (mm)</i>
1 ($e_r = 0\%$)	x_b	-0,02	-0,020012	-0,012
	y_b	0,02	0,019983	-0,016
	h	0,01	0,010004	0,004
	a	0,002	0,002000	0,000
2 ($e_r = 3\%$)	x_b	0	-0,000021	-0,021
	y_b	0	-0,000024	-0,024
	h	0,05	0,048545	-1,454
	a	0,005	0,004827	-0,173
3 ($e_r = 5\%$)	x_b	0,02	0,019674	0,325
	y_b	-0,02	-0,020408	0,408
	h	0,09	0,081169	-8,831
	a	0,005	0,004392	-0,608

Por sua vez, as Figuras 65 a 67 apresentam os mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, associados respectivamente aos casos 1, 2 e 3 da Tabela 21. Nestas figuras, os símbolos + e x indicam a posição da esfera. Para fins de comparação e avaliação qualitativa de desempenho, estas figuras apresentam tanto o mapa de referência, gerado a partir dos parâmetros de referência (x_b , y_b , h e a), quanto o mapa obtido a partir dos valores estimados para estes parâmetros, utilizando-se a *Técnica 2*.

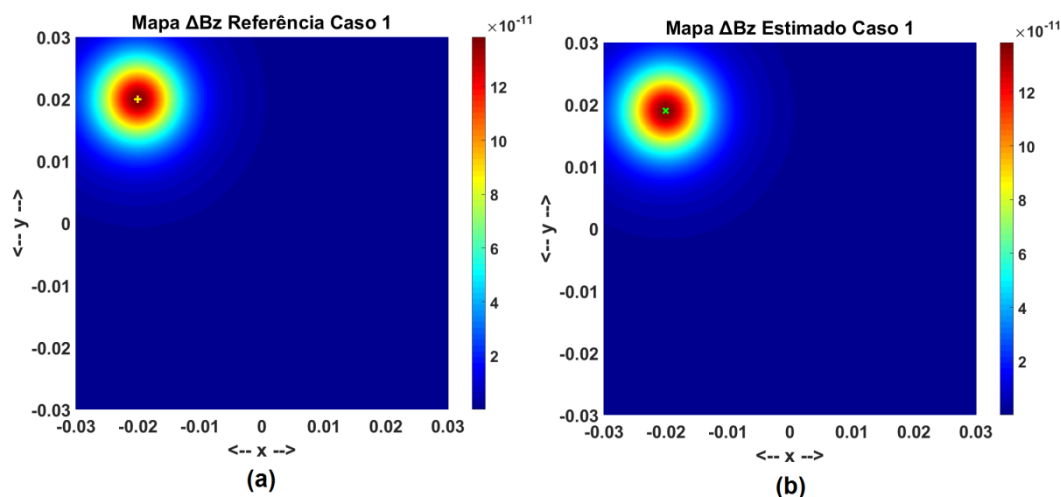


Figura 65 – Mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para o caso 1 da Tabela 21: (a) Mapa de Referência e (b) Mapa Estimado pela Técnica 2. O símbolo + indica a posição da esfera.

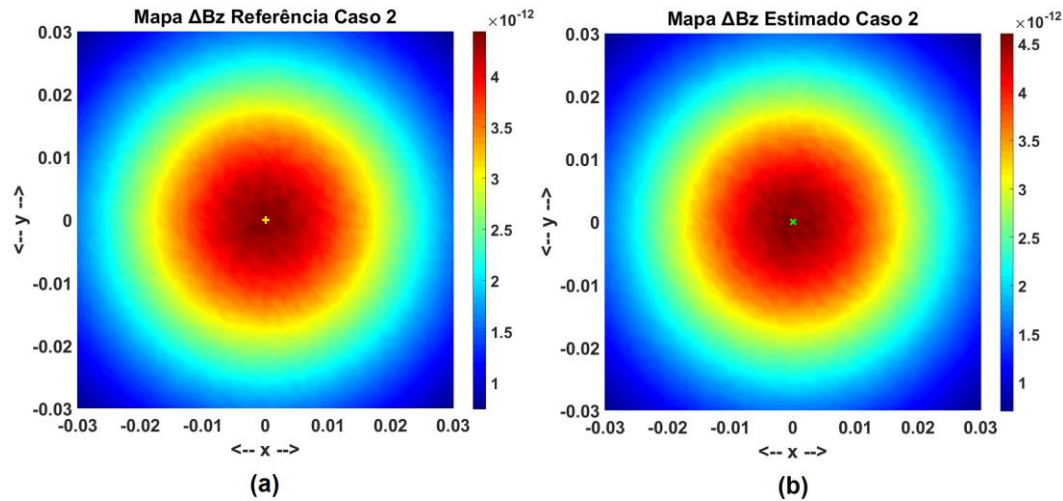


Figura 66 – Mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para o caso 2 da Tabela 21: (a) Mapa de Referência e (b) Mapa Estimado pela Técnica 2. O símbolo + indica a posição da esfera.

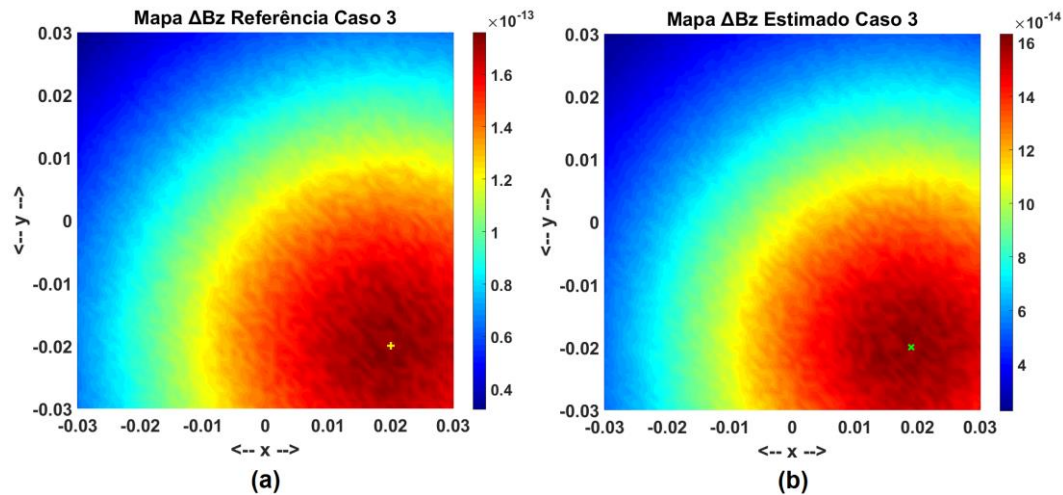


Figura 67 – Mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para o caso 3 da Tabela 21: (a) Mapa de Referência e (b) Mapa Estimado pela Técnica 2. O símbolo + indica a posição da esfera.

As Figuras 65 a 67 indicam que os mapas gerados a partir dos parâmetros estimados pela **Técnica 2**, são significativamente próximos de seus respectivos mapas de referência. Por outro lado, observando-se os resultados obtidos para os três casos avaliados, apresentados na Tabela 21, percebe-se que a **Técnica 2** permitiu a realização de estimativas satisfatórias de todas as variáveis de interesse, exceto para a variável h no caso 3, cuja estimativa teve um erro de 8,8 mm. Todos os demais valores de erro obtidos mantiveram-se abaixo de 1,5 mm. Ressalta-se que, dentre os casos avaliados, o caso 3 é aquele que apresenta a maior profundidade (9 cm) e a maior intensidade de ruído ($e_r = 5\%$). Por sua vez, nota-se que as piores

estimativas de todas as quatro variáveis de interesse (x_b , y_b , h e a) ocorreram exatamente para este caso, conforme esperado, tendo em vista as discussões efetuadas ao longo do capítulo 4, que indicam que a exatidão é comprometida em função do aumento da profundidade e da intensidade de ruído.

De modo a se poder avaliar o desempenho da **Técnica 2** de forma mais fidedigna e abrangente, decidiu-se submetê-la a uma análise mais aprofundada. Nesta análise, testou-se o desempenho da Técnica para todas as 405 matrizes de referência geradas. Cada um dos 405 mapas de referência simulados, do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, foi apresentado ao módulo de determinação da posição. Consequentemente, o mesmo efetuou 405 estimativas das variáveis de interesse (x_b , y_b , h e a). Para cada uma destas estimativas, calcularam-se os erros E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , respectivamente associados a x_b , y_b , h e a . A Tabela 22 mostra as distribuições de frequências dos erros E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , considerando os valores obtidos nos 405 experimentos realizados.

Tabela 22. Análise dos erros E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , obtidos para a Técnica 2, por meio de suas distribuições de frequências.

x_b		y_b		h		a	
E_{xb} (mm)	Frequência	E_{yb} (mm)	Frequência	E_h (mm)	Frequência	E_a (mm)	Frequência
		-0,95	1			-1,3	1
-1,02	1	-0,7	1			-0,75	2
-0,75	1	-0,6	1			-0,65	1
-0,6	1	-0,55	3	-20	1	-0,6	3
-0,5	1	-0,5	1	-11	2	-0,5	3
-0,45	3	-0,45	2	-9	3	-0,45	3
-0,4	3	-0,4	6	-8	1	-0,4	2
-0,35	6	-0,35	4	-7	4	-0,35	9
-0,3	4	-0,3	6	-6	4	-0,3	5
-0,25	9	-0,25	14	-5	9	-0,25	6
-0,2	9	-0,2	9	-4	8	-0,2	4
-0,15	14	-0,15	7	-3	7	-0,15	12
-0,1	19	-0,1	22	-2	15	-0,1	26
-0,05	29	-0,05	35	-1	27	-0,05	20
0	138	0	123	0	89	0	69
0,05	113	0,05	126	1	128	0,05	147
0,1	20	0,1	20	2	41	0,1	33
0,15	10	0,15	9	3	17	0,15	27
0,2	8	0,2	6	4	9	0,2	11
0,25	6	0,25	1	5	5	0,25	10
0,3	3	0,3	1	6	5	0,3	3
0,35	4	0,35	2	7	1	0,35	5
0,45	2	0,4	1	8	7	0,4	1
0,6	1	0,45	1	9	3	0,55	1
		0,5	2	10	6	0,65	1
		0,6	1	11	2		
				12	3		
				13	3		
				15	1		
				17	1		
				18	1		
				24	1		
				25	1		
Total	405		405		405		405

Observando-se os dados contidos na Tabela 22, para todos os casos avaliados, verifica-se que:

- $-1,02 \text{ mm} < E_{xb} < 0,6 \text{ mm}$,
- $-0,95 \text{ mm} < E_{yb} < 0,6 \text{ mm}$,
- $-20 \text{ mm} < E_h < 25 \text{ mm}$, e
- $-1,3 \text{ mm} < E_a < 0,65 \text{ mm}$,

Adicionalmente, verifica-se que cerca de 78,8 % das estimativas de x_b e aproximadamente 80,5% das estimativas de y_b possuem erros contidos entre $\pm 0,1$ mm. Por sua vez, cerca de 74,1% das estimativas de h possuem erros contidos entre ± 2 mm, e aproximadamente 86,2% das estimativas de a possuem erros contidos entre $\pm 0,2$ mm. Dessa forma, pode-se concluir que, na grande maioria dos casos, a Técnica 2 permite que se estime as quatro variáveis de interesse com alta exatidão. Entretanto, também percebe-se que as exatidões associadas às estimativas de x_b , y_b e a são significativamente melhores do que a exatidão associada à estimativa de h . Em particular, observando-se o limite inferior (-20 mm) e superior (25 mm) da faixa de excursão de E_h , percebe-se que em alguns casos críticos os erros obtidos podem ser consideráveis. Apesar de raros, estes casos podem comprometer significativamente o desempenho do método.

Para uma melhor visualização da distribuição dos dados contidos na Tabela 22, apresentam-se os histogramas das distribuições de frequências dos erros E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , respectivamente nas Figuras 68 a 71.

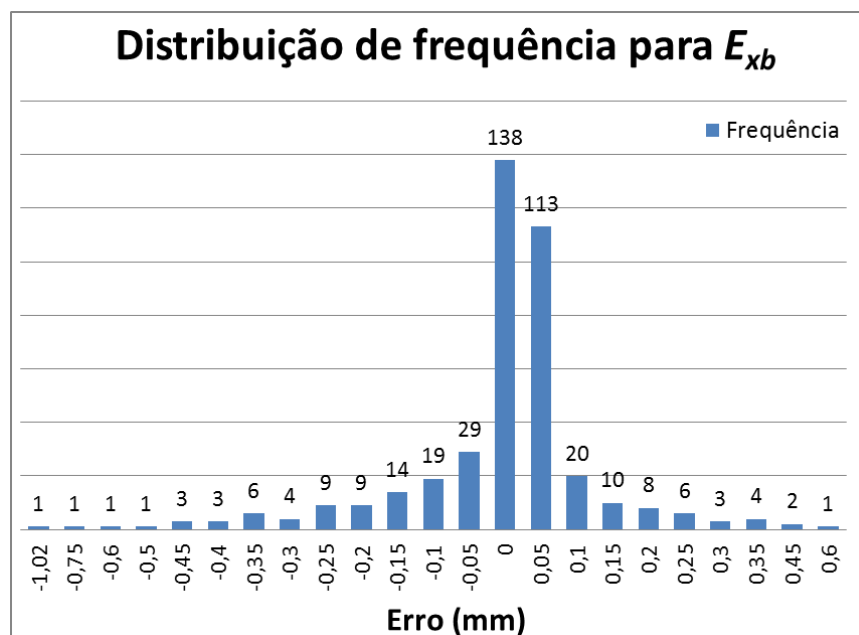


Figura 68 – Distribuição de frequências do erro E_{xb} , considerando os resultados dos 405 testes efetuados.

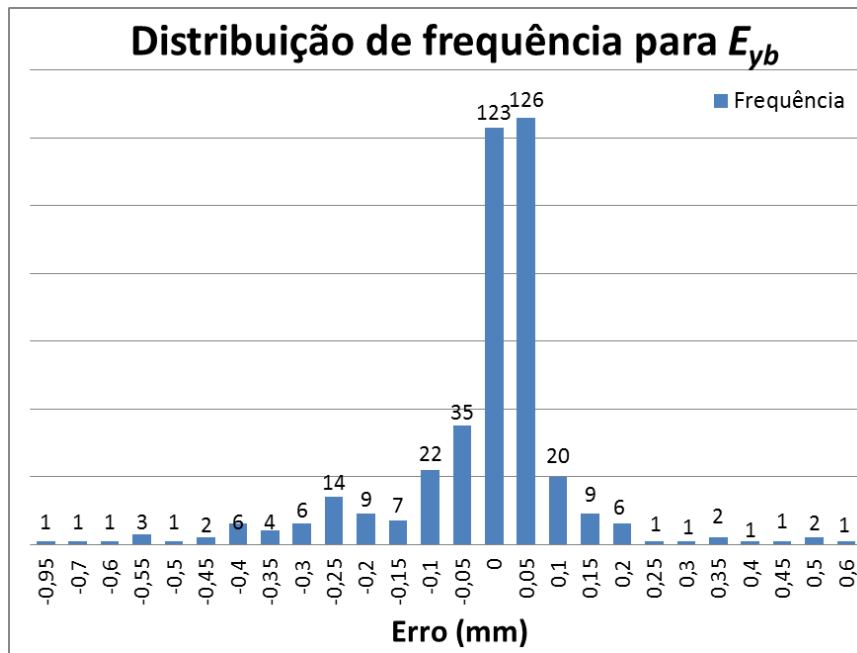


Figura 69 – Distribuição de frequências do erro E_{yb} , considerando os resultados dos 405 testes efetuados.

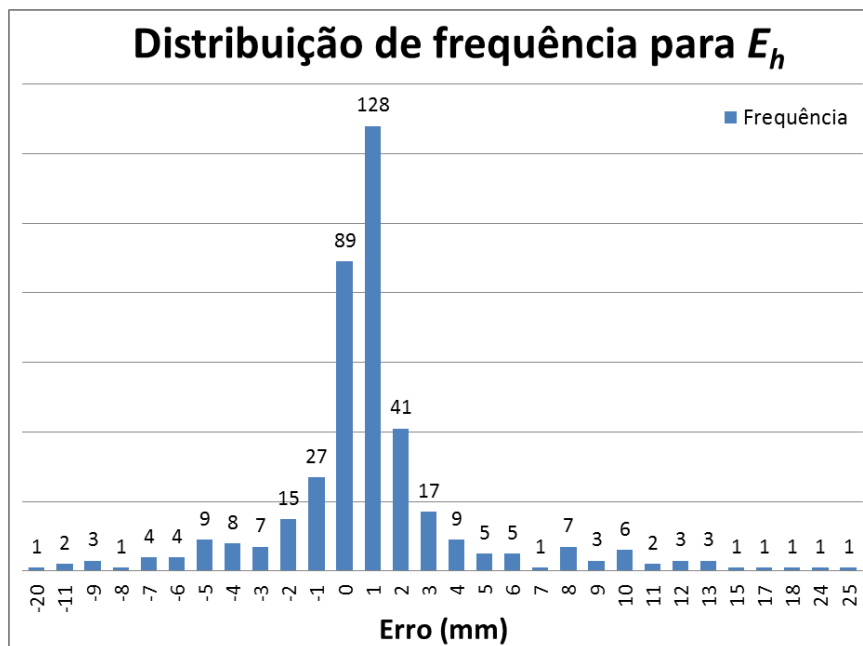


Figura 70 – Distribuição de frequências do erro E_h , considerando os resultados dos 405 testes efetuados.

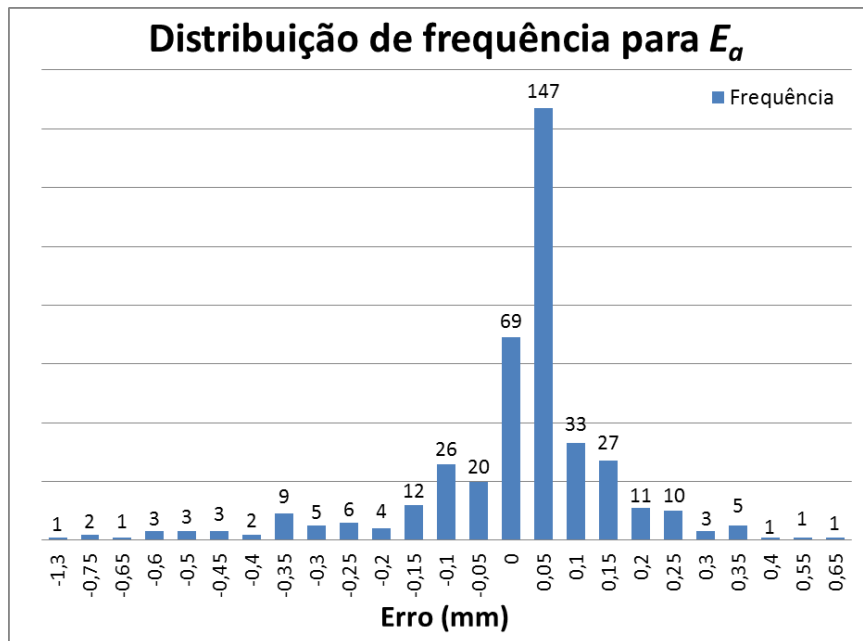


Figura 71 – Distribuição de frequências do erro E_a , considerando os resultados dos 405 testes efetuados.

Para os conjuntos de dados avaliados (Figuras 68 a 71), tem-se que o coeficiente *t de student* é $t_{stud} = 2,588$, com um nível de confiança de 99%, considerando que todos possuem 404 graus de liberdade [66-68]. Dessa forma, se μ_x e σ_x são respectivamente a média e o desvio padrão da variável x , onde $x = E_{xb}$, E_{yb} , E_h e E_a , garante-se que seus erros estarão contidos no intervalo

$$[E_{x1T_2}, E_{x2T_2}] = \mu_x \pm 2,588 \sigma_x. \quad (77)$$

Considerando os 405 testes efetuados, a Tabela 23 indica os limites inferior e superior da distribuição de frequências dos erros E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , apresentados na Tabela 23, bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão.

Tabela 23. Parâmetros extraídos das distribuições de frequências dos erros E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , obtidos para a Técnica 2.

	E_{xb} (mm)	E_{yb} (mm)	E_h (mm)	E_a (mm)
Mínimo	-1,021	-0,957	-20,220	-1,330
Máximo	0,560	0,583	24,807	0,619
Média	-0,029	-0,042	0,528	-0,019
Desvio Padrão	0,147	0,152	4,105	0,176

Consequentemente, por meio da eq. (77) e utilizando-se as informações explicitadas na Tabela 23, pode-se calcular as faixas de valores nas quais garante-se que os erros E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a estarão contidos, com um nível de confiança de 99 %.

Para E_{xb} esta faixa é definida por:

$$\begin{aligned} [E_{xb1_T2}, E_{xb2_T2}] &= -0,029 \pm 0,380 \text{ mm} \\ -0,409 \text{ mm} &\leq E_{xb} \leq 0,351 \text{ mm} \end{aligned} \quad (78)$$

Para E_{yb} esta faixa é definida por:

$$\begin{aligned} [E_{yb1_T2}, E_{yb2_T2}] &= -0,041 \pm 0,393 \text{ mm} \\ -0,435 \text{ mm} &\leq E_{yb} \leq 0,351 \text{ mm} \end{aligned} \quad (79)$$

Para E_h esta faixa é definida por:

$$\begin{aligned} [E_{h1_T2}, E_{h2_T2}] &= 0,528 \pm 10,624 \text{ mm} \\ -10,096 \text{ mm} &\leq E_h \leq 11,152 \text{ mm} \end{aligned} \quad (80)$$

Para E_a esta faixa é definida por:

$$\begin{aligned} [E_{a1_T2}, E_{a2_T2}] &= -0,019 \pm 0,455 \text{ mm} \\ -0,474 \text{ mm} &\leq E_a \leq 0,436 \text{ mm} \end{aligned} \quad (81)$$

O banco de dados com 405 matrizes de referência foi gerado utilizando 3 valores distintos de profundidade h e 3 valores distintos de intensidade de ruído magnético e_r . Consequentemente, o mesmo pode ser dividido em 9 subconjuntos, cada qual correspondente a uma combinação específica de h e e_r . A fim de se evidenciar a influência da profundidade h e da intensidade do ruído magnético e_r na exatidão das estimativas de x_b , y_b , h e a , efetuadas pela **Técnica 2**, apresentam-se na Tabela 24 as médias dos valores absolutos de E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , pertencentes a cada um destes 9 subconjuntos, denominadas $|E_{xb}|_{\text{mean}}$, $|E_{yb}|_{\text{mean}}$, $|E_h|_{\text{mean}}$ e $|E_a|_{\text{mean}}$, respectivamente.

Tabela 24. Médias dos valores absolutos de E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , para 9 combinações específicas de profundidade h e intensidade de ruído magnético e_r .

Profundidade h (m)	$e_r = 0\%$	$e_r = 3\%$	$e_r = 5\%$
$ E_{xb} _{\text{mean}}$ (mm)			
0,01	0,008	0,028	0,02
0,05	0,019	0,082	0,102
0,09	0,023	0,167	0,289
$ E_{yb} _{\text{mean}}$ (mm)			
0,01	0,007	0,026	0,025
0,05	0,017	0,099	0,103
0,09	0,028	0,18	0,296
$ E_h _{\text{mean}}$ (mm)			
0,01	0,06	0,215	0,221
0,05	0,573	1,389	1,548
0,09	3,408	5,684	6,471
$ E_a _{\text{mean}}$ (mm)			
0,01	0,012	0,046	0,051
0,05	0,039	0,096	0,1
0,09	0,139	0,212	0,223

Os resultados da Tabela 24 são representados por meio de gráficos de barras, apresentados nas Figuras 72 a 75 respectivamente para: $|E_{xb}|_{\text{mean}}$, $|E_{yb}|_{\text{mean}}$, $|E_h|_{\text{mean}}$ e $|E_a|_{\text{mean}}$. Estes gráficos indicam os valores dos erros $|E_{xb}|_{\text{mean}}$, $|E_{yb}|_{\text{mean}}$, $|E_h|_{\text{mean}}$ e $|E_a|_{\text{mean}}$ em função da profundidade h . Por sua vez, para cada valor de h são apresentadas 3 barras, uma correspondente a cada valor de e_r avaliado.

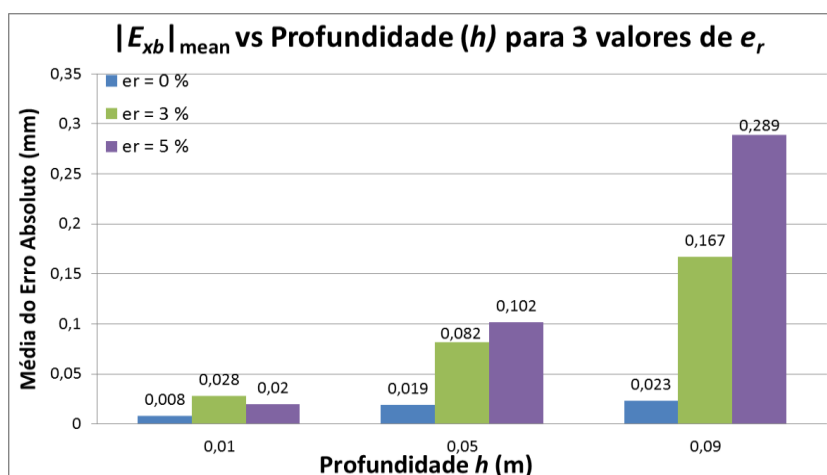


Figura 72 – $|E_{xb}|_{\text{mean}}$ em função da profundidade h , para avaliação da Técnica 2. Foram avaliados três diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.

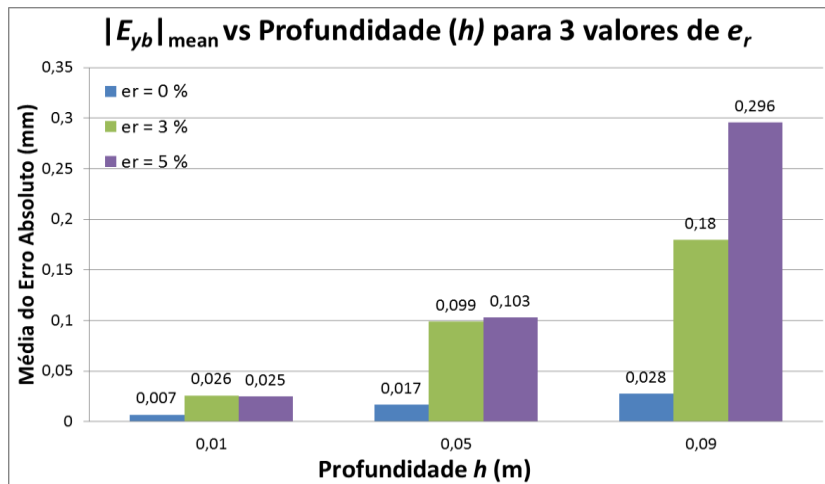


Figura 73 – $|E_{yb}|_{\text{mean}}$ em função da profundidade h , para avaliação da Técnica 2. Foram avaliados três diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.

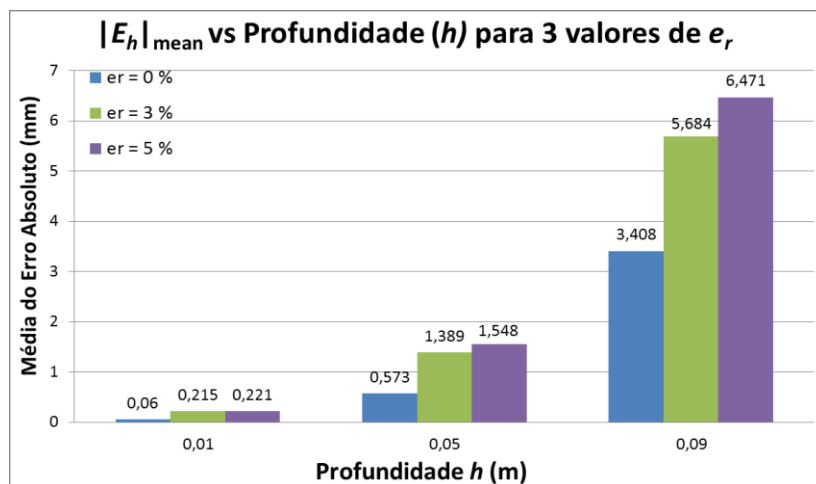


Figura 74 – $|E_h|_{\text{mean}}$ em função da profundidade h , para avaliação da Técnica 2. Foram avaliados três diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.

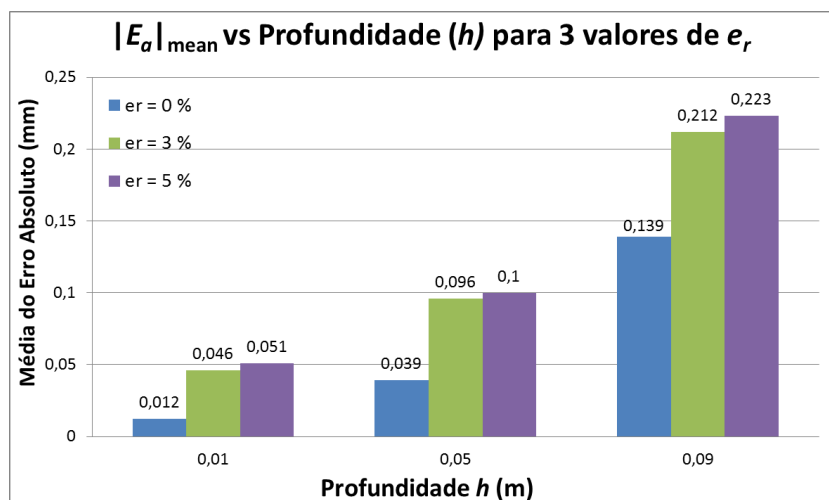


Figura 75 – $|E_a|_{\text{mean}}$ em função da profundidade h , para avaliação da Técnica 2. Foram avaliados três diferentes níveis de ruído e_r para cada profundidade.

Analisando as informações contidas na Tabela 24 e nas Figuras 72 a 75, comparando-se os casos com os mesmos e_r , percebe-se que os erros $|E_{xb}|_{\text{mean}}$, $|E_{yb}|_{\text{mean}}$, $|E_h|_{\text{mean}}$ e $|E_a|_{\text{mean}}$ tendem a aumentar com a profundidade h . Por sua vez, comparando-se os casos com os mesmos h , verifica-se que, de forma geral, os erros $|E_{xb}|_{\text{mean}}$, $|E_{yb}|_{\text{mean}}$, $|E_h|_{\text{mean}}$ e $|E_a|_{\text{mean}}$ tendem a aumentar com a intensidade de ruído e_r . Consequentemente, conclui-se que, conforme esperado, a exatidão do método piora com incrementos de h e e_r . Observando-se os resultados, também conclui-se que, conforme observado em análises anteriores relacionadas ao desempenho da **Técnica 2**, as estimativas de h são significativamente piores do que as dos demais parâmetros (x_b , y_b e a).

Dentre todos os casos avaliados, verifica-se que as piores estimativas de todas as quatro variáveis de interesse (x_b , y_b , h e a) ocorrem para $h = 0,09$ m (maior profundidade avaliada) e $e_r = 5$ % (maior intensidade de ruído avaliada). Em particular, tem-se que o pior valor de $|E_{xb}|_{\text{mean}}$ foi 0,289 mm, o de $|E_{yb}|_{\text{mean}}$ foi 0,296 mm, o de $|E_h|_{\text{mean}}$ foi 6,470 mm e o de $|E_a|_{\text{mean}}$ foi 0,223 mm. Os valores obtidos para os erros $|E_{xb}|_{\text{mean}}$, $|E_{yb}|_{\text{mean}}$ e $|E_a|_{\text{mean}}$ são considerados satisfatórios, em todos os casos avaliados. Por outro lado, verifica-se que o erro $|E_h|_{\text{mean}}$ passa a assumir valores indesejáveis a partir de $h = 0,09$ m.

4.3. Comparação das Técnicas

Nesta seção apresenta-se uma comparação entre os resultados obtidos pelas duas técnicas desenvolvidas para localização de fragmentos de projéteis de armas de fogo inseridos no corpo humano. Os resultados associados com a **Técnica 1** foram apresentados e discutidos na seção 4.1, enquanto que os resultados associados com a **Técnica 2** foram apresentados e discutidos na seção 4.2. Adicionalmente, além de comparar os resultados anteriormente explicitados, esta seção também avalia e compara o tempo de processamento computacional requerido por cada uma das técnicas propostas.

Para efetuar a comparação das técnicas em condições de equidade, decidiu-se avaliar o desempenho de ambas quando submetidas ao mesmo conjunto de matrizes de referência. Em particular, optou-se por fazer com que a **Técnica 1** processe o mesmo conjunto de 405 matrizes de referência já utilizadas para

avaliação da **Técnica 2**. Dessa forma, conforme descrito na Tabela 20 da seção 4.1.1.3, foram avaliadas matrizes geradas por combinações de 9 valores distintos de posições da esfera (x_b , y_b), 3 valores de profundidade (h), 5 valores de raio (a) e 3 valores de intensidade de ruído magnético (e_r).

Para todos os 405 casos avaliados, tanto para a **Técnica 1** quanto para a **Técnica 2**, calcularam-se os erros E_{xb} , E_{yb} , E_h e E_a , entre os valores estimados e os valores de referência das variáveis de interesse (x_b , y_b , h e a). Por sua vez, também mediu-se e armazenou-se o tempo de processamento computacional associado a cada uma das 405 estimadas de x_b , y_b , h e a , efetuadas por meio de ambas as Técnicas.

Considerando os 405 testes efetuados, para a **Técnica 1** e para a **Técnica 2**, a Tabela 25 indica os limites inferior e superior da distribuição de frequências dos erros E_{xb} e E_{yb} , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão. Estes parâmetros também são expressos graficamente nas Figura 76 para o erro E_{xb} , e Figura 77, para o erro E_{yb} .

Tabela 25. Limites inferior e superior da distribuição de frequências dos erros E_{xb} e E_{yb} , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão.

	E_{xb} (mm)		E_{yb} (mm)	
	Técnica 1	Técnica 2	Técnica 1	Técnica 2
Mínimo	-4	-1,021	-5	-0,957
Máximo	3	0,56	3	0,583
Média	-0,091	-0,029	-0,077	-0,042
Desvio Padrão	0,847	0,147	0,937	0,152

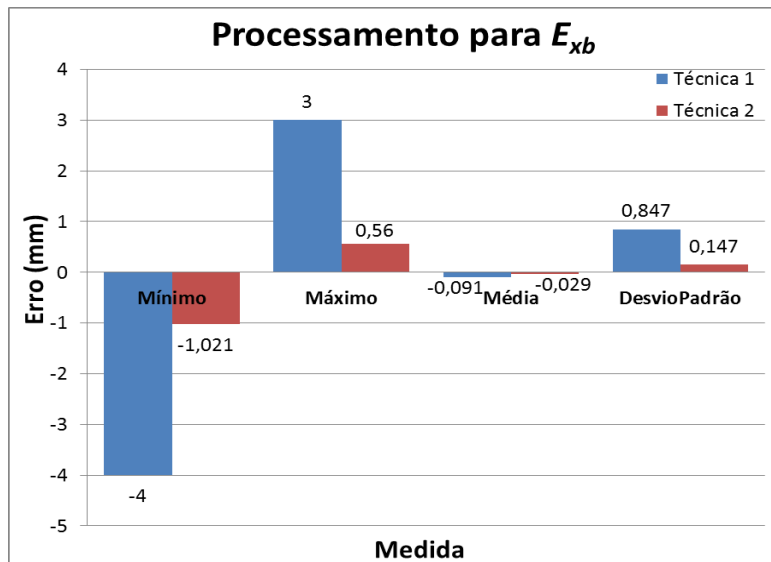


Figura 76 – Limites inferior e superior da distribuição de frequências do erro E_{xb} , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão, obtidos por meio da Técnica 1 e da Técnica 2.

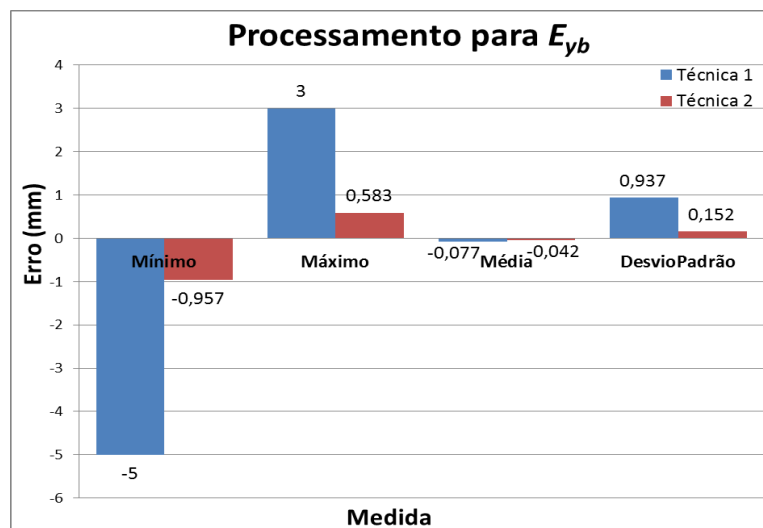


Figura 77 – Limites inferior e superior da distribuição de frequências do erro E_{yb} , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão, obtidos por meio da Técnica 1 e da Técnica 2.

Por meio das informações contidas na Tabela 25 e nas Figuras 76 e 77, verifica-se que:

- $4 \text{ mm} < E_{xb} < 3 \text{ mm}$, para a **Técnica 1**.
- $-1,021 \text{ mm} < E_{xb} < 0,56 \text{ mm}$, para a **Técnica 2**.
- E_{xb} está contido no intervalo $-0,091 \pm 2,192 \text{ mm}$, com 99% de confiança, para a **Técnica 1**.

- E_{xb} está contido no intervalo $-0,029 \pm 0,380$ mm, com 99% de confiança, para a **Técnica 2**.
- $-5 \text{ mm} < E_{yb} < 3 \text{ mm}$, para a **Técnica 1**.
- $-0,957 \text{ mm} < E_{yb} < 0,583 \text{ mm}$, para a **Técnica 2**.
- E_{yb} está contido no intervalo $-0,077 \pm 2,425$ mm, com 99% de confiança, para a **Técnica 1**.
- E_{yb} está contido no intervalo $-0,042 \pm 0,393$ mm, com 99% de confiança, para a **Técnica 2**.

Os resultados explicitados, indicam que na grande maioria dos casos (99 %), tanto a **Técnica 1** quanto a **Técnica 2** permitem efetuar estimativas satisfatórias de x_b e y_b , com alta exatidão. Entretanto, percebe-se que os valores médios de E_{xb} e E_{yb} obtidos pela **Técnica 2** são inferiores aos obtidos com a **Técnica 1**. Adicionalmente, também constata-se que a dispersão em torno do valor médio dos erros E_{xb} e E_{yb} obtidos pela **Técnica 2** é cerca de 6 vezes inferior à dispersão obtida com a **Técnica 1**.

Por sua vez, o maior erro absoluto obtido pela **Técnica 1** para estimativas de x_b foi 4 mm e para estimativa de y_b foi 5 mm. Por outro lado, o maior erro absoluto obtido pela **Técnica 2** para estimativas de x_b foi 1,021 mm e para estimativa de y_b foi 0,957 mm. Dessa forma, nota-se que todas as estimativas de x_b e y_b , efetuadas pela **Técnica 2**, ficam dentro de limites aceitáveis de erro. Entretanto, em alguns raros casos, as estimativas efetuadas pela **Técnica 1** podem assumir valores de erro indesejáveis.

Consequentemente, tendo em vista os aspectos aqui avaliados, verifica-se que a **Técnica 2** possui um desempenho superior ao apresentado pela **Técnica 1** na estimativa de x_b e y_b , apesar de a **Técnica 1** também apresentar um desempenho satisfatório na grande maioria dos casos.

Considerando os 405 testes efetuados, para a **Técnica 1** e para a **Técnica 2**, a Tabela 26 indica os limites inferiores e superiores da distribuição de frequências dos erros E_h , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão. Estes parâmetros também são expressos graficamente na Figura 78.

Tabela 26. Limites inferior e superior da distribuição de frequências dos erros E_h , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão.

	E_h (mm)	
	Técnica 1	Técnica 2
Mínimo	-0,372	-20,221
Máximo	0,364	24,807
Média	-0,009	0,528
Desvio Padrão	0,098	4,105

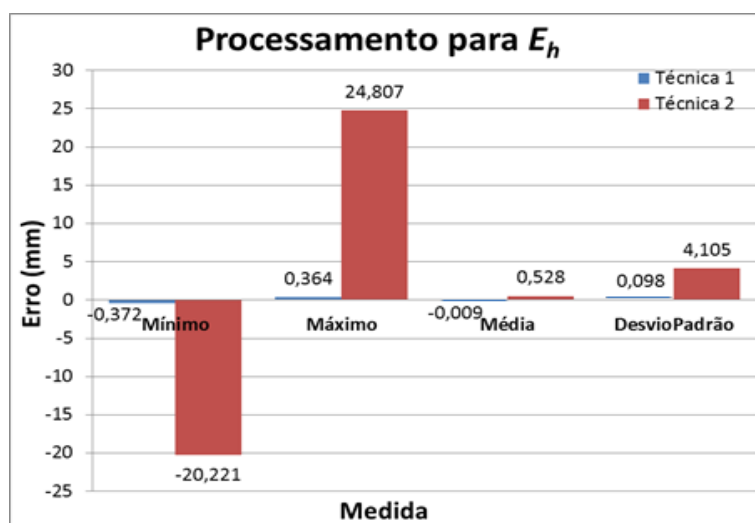


Figura 78 – Limites inferior e superior da distribuição de frequências do erro E_h , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão, obtidos por meio da Técnica 1 e da Técnica 2.

Por meio das informações contidas na Tabela 26 e na Figura 78, verifica-se que:

- $-0,372 \text{ mm} < E_h < 0,364 \text{ mm}$, para a **Técnica 1**.
- $-20,221 \text{ mm} < E_h < 24,807 \text{ mm}$, para a **Técnica 2**.
- E_h está contido no intervalo $-0,009 \pm 0,254 \text{ mm}$, com 99% de confiança, para a **Técnica 1**.
- E_h está contido no intervalo $-0,528 \pm 10,624 \text{ mm}$, com 99% de confiança, para a **Técnica 2**.

Percebe-se que o valor médio de E_h obtido pela **Técnica 1** é cerca de 60 vezes inferior ao obtido com a **Técnica 2**, isto indica uma grande vantagem da **Técnica 1** em relação a **Técnica 2**. Adicionalmente, também constata-se que a dispersão em torno do valor médio do erro E_h obtido pela **Técnica 1** é cerca de 42 vezes inferior à dispersão obtida com a **Técnica 2**, sendo este outro ponto a favor da **Técnica 1**.

Os resultados explicitados indicam que, na grande maioria dos casos (99 %), a **Técnica 1** permite efetuar estimativas satisfatórias de h , com alta exatidão. Entretanto, esta afirmação não pode ser feita para a **Técnica 2**, principalmente devido à grande dispersão dos erros em torno do valor médio de E_h , obtido para a **Técnica 2**.

Por sua vez, o maior erro absoluto obtido pela **Técnica 1** para estimativas de h foi 0,372 mm. Por outro lado, o maior erro absoluto obtido pela **Técnica 2** para estimativas de h foi 24,807 mm. Dessa forma, nota-se que todas as estimativas de h efetuadas pela **Técnica 1** ficam dentro de limites aceitáveis de erro. Entretanto, observa-se que as estimativas efetuadas pela **Técnica 2** podem assumir valores de erro excessivamente altos.

Consequentemente, tendo em vista os aspectos aqui avaliados, verifica-se que a **Técnica 1** possui um desempenho substancialmente superior ao apresentado pela **Técnica 2** na estimativa de h . Também, verifica-se que a **Técnica 2** não apresenta um desempenho satisfatório na estimativa de h , não sendo recomendado seu emprego na estimativa desta variável.

Considerando os 405 testes efetuados, para a **Técnica 1** e para a **Técnica 2**, a Tabela 27 indica os limites inferiores e superiores da distribuição de frequências dos erros E_a , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão. Estes parâmetros também são expressos graficamente na Figura 79.

Tabela 27. Limites inferior e superior da distribuição de frequências dos erros E_a , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão.

	E_a (mm)	
	Técnica 1	Técnica 2
Mínimo	-0,019	-1,331
Máximo	0,033	0,619
Média	0,001	-0,019
Desvio Padrão	0,005	0,176

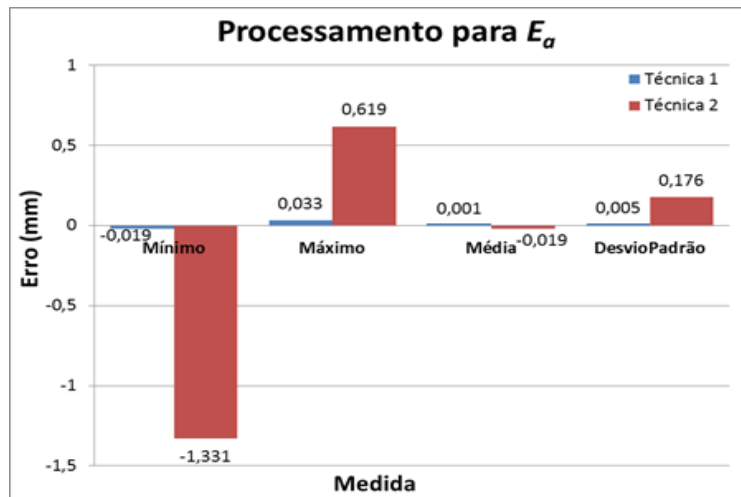


Figura 79 – Limites inferior e superior da distribuição de frequências do erro E_a , bem como seus respectivos valores médios e desvios padrão, obtidos por meio da Técnica 1 e da Técnica 2.

Por meio das informações contidas na Tabela 27 e na Figura 79, verifica-se que:

- $-0,019 \text{ mm} < E_a < 0,033 \text{ mm}$, para a **Técnica 1**.
- $-1,331 \text{ mm} < E_a < 0,619 \text{ mm}$, para a **Técnica 2**.
- E_a está contido no intervalo $0,001 \pm 0,013 \text{ mm}$, com 99% de confiança, para a **Técnica 1**.
- E_a está contido no intervalo $-0,019 \pm 0,455 \text{ mm}$, com 99% de confiança, para a **Técnica 2**.

Os resultados explicitados indicam que, na grande maioria dos casos (99 %), tanto a **Técnica 1** quanto a **Técnica 2** permitem efetuar estimativas satisfatórias de a , com alta exatidão. Entretanto, percebe-se que o valor médio de E_a obtido pela **Técnica 1** é cerca de 27 vezes inferior ao obtido com a **Técnica 2**, apesar de ambos serem satisfatoriamente pequenos. Adicionalmente, também constata-se que a dispersão em torno do valor médio do erro E_a obtido pela **Técnica 1** é cerca de 35 vezes inferior à dispersão obtida com a **Técnica 2**, apesar de ambas serem satisfatoriamente pequenas.

Por sua vez, o maior erro absoluto obtido pela **Técnica 1** para estimativas de a foi 0,033 mm. Por outro lado, o maior erro absoluto obtido pela **Técnica 2** para estimativas de a foi 1,331 mm. Dessa forma, nota-se que todas as estimativas de a efetuadas tanto pela **Técnica 1** quanto pela **Técnica 2** ficam dentro de limites

aceitáveis de erro, apesar do máximo valor de erro absoluto obtido pela *Técnica 1* ser significativamente inferior ao obtido pela *Técnica 2*.

Consequentemente, tendo em vista os aspectos aqui avaliados, verifica-se que a *Técnica 1* possui um desempenho consideravelmente superior ao apresentado pela *Técnica 2* na estimativa de a . Entretanto, o desempenho da *Técnica 2* também é satisfatório em estimativas do raio a .

Os tempos demandados para o processamento de cada uma das 405 matrizes de referência avaliadas por ambas as Técnicas foi medido. A Tabela 28 indica parâmetros associados aos tempos de processamento demandados pela *Técnica 1* e pela *Técnica 2*. São indicados os tempos mínimos e máximos associados ao processamento de uma matriz de referência, o tempo médio de processamento e o tempo total para processamento das 405 matrizes avaliadas por cada Técnica. Note que, os tempos associados à *Técnica 1* são expressos em segundos, enquanto que os tempos associados à *Técnica 2* são expressos em minutos.

Tabela 28. Parâmetros associados aos tempos de processamento demandados pela Técnica 1 e pela Técnica 2.

	<i>Tempo</i>	
	Técnica 1 (Segundos)	Técnica 2 (Minutos)
Mínimo	1,37	4,37
Máximo	20,74	68,01
Média	6,11	38,11
Total	2474,72	15435,10

Por meio da Tabela 28, verifica-se que a *Técnica 1* leva em média 6,11 s para estimar o conjunto de parâmetros de interesse (x_b , y_b , h e a) associados a um dado mapa de gradiente da densidade de fluxo magnético. O tempo mínimo de processamento de um destes mapas foi de 1,37 s e o máximo de 20,74 s. As 405 matrizes avaliadas foram processadas em 2474,72 s. Dessa forma, nota-se que, em todos os casos avaliados, a *Técnica 1* possibilitou a obtenção dos parâmetros de interesse de forma rápida e ágil, demandando tempos de processamento sempre inferiores a 21 s.

Por outro lado, verifica-se que a *Técnica 2* leva em média 38,11 min para estimar o conjunto de parâmetros de interesse (x_b , y_b , h e a) associados a um dado mapa de gradiente da densidade de fluxo magnético, ou seja, um tempo cerca de

374 vezes superior ao requerido pela *Técnica 1*. O tempo mínimo de processamento de um destes mapas foi de 4,37 min (191 vezes maior que o tempo mínimo obtido pela *Técnica 1*) e o máximo de 68,01 min (197 vezes maior que o tempo máximo obtido pela *Técnica 1*). As 405 matrizes avaliadas foram processadas em 15435,10 min, ou seja, um tempo cerca de 374 vezes superior ao requerido pela *Técnica 1*.

Comparando-se os tempos de processamento computacionais de ambas as Técnicas, conclui-se que a *Técnica 1* é significativamente mais rápida do que a Técnica 2 na extração dos parâmetros de interesse, a partir da informação contida nos mapas magnéticos. Em média, a *Técnica 1* é cerca de 374 vezes mais rápida que a *Técnica 2*. Apesar deste fato, ressalta-se que o tempo médio de processamento demandado pela *Técnica 2*, cerca de 38 min, não chega a ser um impeditivo para sua aplicação.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Nos grandes centros urbanos, são cada vez mais comuns os casos clínicos associados a pacientes feridos por armas de fogo. As técnicas convencionalmente adotadas para localização destes objetos são: radiografia, tomografia computadorizada e procedimentos de radioscopia. Entretanto, estes métodos são muitas vezes ineficazes, levando a procedimentos cirúrgicos que duram por várias horas e geralmente terminam sem sucesso, especialmente ao se lidar com a localização de objetos pequenos [1]. Além disso, é importante destacar que tanto pacientes quanto equipe médica são expostos a riscos, já que estas técnicas de imageamento utilizam radiação ionizante.

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de dois modelos computacionais, baseados em técnicas de inteligência artificial, para localização de projéteis de armas de fogo inseridos no corpo humano, por meio de medições magnéticas de alta sensibilidade. Normalmente, estes projéteis são compostos por chumbo, que é um material não ferromagnético. Consequentemente, não é possível identificá-los por meio de medições magnéticas diretas, visto que os mesmos não possuem magnetismo remanente.

Dessa forma, as técnicas de localização aqui proposta são baseadas nos desenvolvimentos teóricos apresentados em [3], que sugerem que utilize-se uma fonte de campo magnético primário alternado, a fim de se induzir correntes parasitas nos fragmentos dos projéteis que se deseja detectar. Por sua vez, estas correntes induzirão um campo magnético secundário, que pode ser medido por sensores magnéticos de alta resolução. No final de 2016, desenvolveu-se o *hardware* do sistema de localização [19], baseado em leituras gradiométricas efetuadas por sensores GMI. Por sua vez, o campo magnético primário foi gerado por meio de um solenoide, composto por 40 espiras, raio de 1 cm e comprimento de 7 cm. Este solenoide era excitado por uma corrente senoidal com 2 mA de amplitude e 8 kHz de frequência.

As técnicas de localização aqui propostas objetivam auxiliar os processos de extração cirúrgica de corpos estranhos metálicos não magnéticos, tais como projéteis de chumbo, inseridos no corpo humano. Os métodos propostos não submetem o paciente e equipe médica à radiação ionizante. É imperativo que as técnicas desenvolvidas possuam alta exatidão e alta precisão na determinação dos parâmetros associados ao corpo estranho que se deseja detectar, a fim de se minimizar os riscos inerentes a sua remoção cirúrgica [1,2,4].

Os estudos desenvolvidos na presente dissertação focam no desenvolvimento do *software* de processamento do sistema de localização. Os fragmentos de projéteis de armas de fogo foram modelados como esferas de raio a , localizadas em uma posição (x_b, y_b) de um plano de busca xy , situado a uma profundidade h em relação à base inferior do solenoide. Objetiva-se que o algoritmo de processamento seja capaz de determinar os parâmetros x_b, y_b, h e a , a partir de mapas de gradiente da densidade de fluxo magnético secundário. No presente trabalho, a fim de se avaliar os algoritmos desenvolvidos, foram simulados mapas de referência, para diferentes combinações dos parâmetros de interesse $(x_b, y_b, h$ e $a)$. As simulações consideraram a presença de ruído aleatório e levaram em consideração particularidades do *hardware* desenvolvido em [5].

Tendo em vista as características do solenoide utilizado, observou-se que o máximo valor do campo magnético primário em um plano xy , localizado a uma profundidade h , pode variar entre centenas de nanoteslas, para $h = 1$ cm, até poucos nanoteslas, para $h = 13$ cm. Por sua vez, admitindo-se uma esfera com raio $a = 3$ mm, o máximo valor do gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, medido pela estrutura gradiométrica proposta em [5], irá variar de dezenas de nanoteslas, para $h = 1$ cm, até dezenas de femtoteslas, para $h = 13$ cm. Dessa forma, enquanto verifica-se uma redução da ordem de 100 vezes no campo magnético primário, para variações de h entre 1 cm e 13 cm, observa-se uma redução da ordem de um milhão de vezes no gradiente da densidade de fluxo magnético secundário, para a mesma variação de h .

Por sua vez, destaca-se que apenas magnetômetros SQUID teriam resolução suficiente para efetuar tais leituras. Por outro lado, considerando que o sistema proposto é baseado em leituras efetuadas por um gradiômetro GMI, com resolução da ordem de picoteslas, verifica-se que o mesmo seria capaz de efetuar leituras satisfatórias até no máximo $h = 5$ cm. Consequentemente, recomenda-se que o

campo magnético primário gerado pela configuração atual seja aumentado, a fim de se elevar o gradiente da densidade de fluxo magnético secundário e, conseqüentemente, propiciar medições adequadas em profundidades maiores. Adicionalmente, podem ser investigadas variações na configuração gradiométrica proposta, como por exemplo o aumento da linha de base (distância de separação entre o par de sensores que compõem o gradiômetro), a fim de aumentar os gradientes de campo medidos.

Ao longo do trabalho foram propostas, discutidas e comparadas duas técnicas de localização (*Técnica 1* e *Técnica 2*). Na *Técnica 1*, os mapas magnéticos são processados sequencialmente por três módulos principais: o módulo de determinação da posição (x_b, y_b), o módulo de determinação da profundidade (h) e o módulo de determinação do raio (a). Ao fim desta cadeia de processamento é possível inferir os quatro parâmetros de interesse: x_b, y_b, h e a .

O módulo de determinação da posição, descrito na seção 3.2.1, baseia-se em uma técnica de janelamento e busca, considerando valores médios e máximos presentes no espaço de busca. Por sua vez, o módulo de determinação da profundidade, descrito na seção 3.2.2, recebe os valores de x_b e y_b estimados pelo módulo anterior e emprega uma rede neural a fim de inferir o valor de h , a partir de atributos extraídos do mapa magnético medido. Por fim, o módulo de determinação do raio, descrito na seção 3.2.3, recebe os valores de x_b, y_b e h estimados pelo módulo anterior e emprega um algoritmo genético a fim de inferir o valor de a , a partir da minimização do erro entre a matriz de medidas (objetivo) e matrizes simuladas pelo AG.

Por sua vez, a *Técnica 2* é baseada em um único estágio de processamento, implementado por meio de um algoritmo genético com quatro variáveis livres (x_b, y_b, h e a). Este AG objetiva identificar qual combinação destas variáveis é responsável pela minimização do erro entre a matriz de medidas (objetivo) e matrizes simuladas pelo AG.

Para a *Técnica 1*, os resultados obtidos indicaram que os erros E_{xb}, E_{yb}, E_h e E_a , associados respectivamente às estimativas de x_b, y_b, h e a , estão contidos nos seguintes intervalos, com 99 % de confiança:

- $[E_{xb1}, E_{xb2}] = -0,091 \pm 2,192 \text{ mm},$
- $[E_{yb1}, E_{yb2}] = -0,077 \pm 2,425 \text{ mm},$

- $[E_{h1}, E_{h2}] = -0,009 \pm 0,254 \text{ mm}$, e
- $[E_{a1}, E_{a2}] = 0,001 \pm 0,013 \text{ mm}$.

Por outro lado, para **Técnica 2**, os resultados obtidos indicaram que estes erros estão contidos nos seguintes intervalos, com 99 % de confiança:

- $[E_{xb1_{T2}}, E_{xb2_{T2}}] = -0,029 \pm 0,380 \text{ mm}$,
- $[E_{yb1_{T2}}, E_{yb2_{T2}}] = -0,042 \pm 0,393 \text{ mm}$,
- $[E_{h1_{T2}}, E_{h2_{T2}}] = -0,528 \pm 10,624 \text{ mm}$, e
- $[E_{a1_{T2}}, E_{a2_{T2}}] = -0,019 \pm 0,455 \text{ mm}$.

Adicionalmente, dentre todos os testes realizados para a **Técnica 1**, os maiores erros absolutos obtidos, $|E_{xb}|$, $|E_{yb}|$, $|E_h|$ e $|E_a|$, foram:

- $|E_{xb}| = 4,00 \text{ mm}$,
- $|E_{yb}| = 5,00 \text{ mm}$,
- $|E_h| = 0,37 \text{ mm}$, e
- $|E_a| = 0,02 \text{ mm}$.

Por outro lado, para **Técnica 2**, obteve-se:

- $|E_{xb}| = 1,02 \text{ mm}$,
- $|E_{yb}| = 0,96 \text{ mm}$,
- $|E_h| = 24,81 \text{ mm}$, e
- $|E_a| = 1,33 \text{ mm}$.

As análises efetuadas indicaram ainda que o tempo médio de processamento, para inferência dos parâmetros de interesse (x_b , y_b , h e a), é de 6 segundos para a **Técnica 1** e 38 minutos para a **Técnica 2**.

Por meio da comparação dos resultados aqui explicitados, pode-se obter importantes conclusões sobre o desempenho de ambas as Técnicas. O Quadro 1 apresenta uma comparação direta de parâmetros associados ao desempenho de ambas as Técnicas. Em função dos resultados obtidos, classificou-se cada parâmetro como: muito fraco (MF), fraco (F), regular (R), bom (B) ou muito bom (MB).

Quadro 1. Comparação de parâmetros associados ao desempenho da Técnica 1 e da Técnica 2.

	Técnica 1				Técnica 2			
	x_b	y_b	h	a	x_b	y_b	h	a
Exatidão	B	B	MB	MB	B	B	R	B
Precisão	B	B	MB	MB	MB	MB	MF	MB
Máximo Erro Absoluto	R	R	B	MB	B	B	MF	B
Tempo de Processamento	MB				R			

Tendo em vista os resultados explicitados e as informações contidas no Quadro 1, percebe-se que ambas as técnicas realizam estimativas satisfatórias de x_b e y_b . Entretanto, a **Técnica 2** apresenta desempenho ligeiramente superior ao se considerar os parâmetros precisão e máximo erro absoluto. Por outro lado, a estimativa de h efetuada por meio da **Técnica 1** é muito melhor do que a obtida pela **Técnica 2**. Com relação à estimação de h , a **Técnica 1** supera consideravelmente o desempenho da **Técnica 2** quanto a exatidão, precisão e máximo erro absoluto. Ademais, o desempenho de **Técnica 2** foi classificado como MF com relação a precisão e ao máximo erro absoluto associado as estimativas de h . Consequentemente, não recomenda-se o emprego desta Técnica em estimativas da profundidade. Por sua vez, as estimativas do raio a são efetuadas de forma satisfatória por ambas as Técnicas. Entretanto, verifica-se que o desempenho da **Técnica 1** é superior nas estimativas de a . Ressalta-se, que apesar de ambas as Técnicas terem recebido avaliação MB para a precisão das estimativas do raio, verifica-se que a precisão da **Técnica 1** é cerca de 35 vezes melhor do que a da **Técnica 2**. Os resultados obtidos indicam ainda que a **Técnica 1** é cerca de 380 vezes mais rápida do que a **Técnica 2**.

Em função da análise aqui realizada, recomenda-se que a **Técnica 1** seja empregada para inferência das variáveis de interesse, visto que ela possibilita estimativas satisfatórias de todas as variáveis e possui um tempo de processamento consideravelmente pequeno. Entretanto, destaca-se que, em alguns casos, a **Técnica 2** obteve resultados superiores. Em particular, destaca-se que nas estimativas de posição (x_b , y_b) a **Técnica 2** apresenta uma precisão aproximadamente 6 vezes melhor do que a da **Técnica 1**. Dessa forma, sugere-se que este aspecto seja avaliado, objetivando a criação de uma nova Técnica que seja capaz de superar o

desempenho individual apresentado pelas Técnicas desenvolvidas nesta dissertação, propiciando a obtenção de estimativas ainda melhores das variáveis de interesse.

A fim de se reduzir o tempo de processamento computacional da **Técnica 2**, sugere-se paralelizar o cálculo da função de avaliação do AG, por meio de programação paralela baseada em GPUs. Desse modo, em um ciclo de processamento, seria possível avaliar simultaneamente a aptidão de todos os indivíduos da população.

Dentre os estudos futuros, propõe-se ainda que as Técnicas aqui desenvolvidas sejam reavaliadas, ajustando-se a configuração proposta para o gradiômetro e aumentando-se o campo magnético primário, a fim de se possibilitar que os sensores GMI consigam efetuar leituras satisfatórias do gradiente de campo secundário, a profundidades de até 15 cm.

Sugere-se que, em trabalhos futuros, sejam avaliados novos algoritmos para implementação do Módulo de determinação da posição x_b e y_b , que compõe a **Técnica 1**, a fim de reduzir a influência do ruído magnético sobre as estimativas efetuadas. Por exemplo, propõe-se que seja avaliado o desempenho deste módulo ao se adotar um algoritmo que faça um ajuste de superfície na matriz de medidas e, na sequência, encontre a posição do valor máximo, a qual corresponderá a posição da esfera.

Por fim, recomenda-se que as Técnicas aqui desenvolvidas sejam avaliadas utilizando-se mapas magnéticos experimentalmente obtidos pelo protótipo experimental desenvolvido em [5], ou por uma versão aprimorada do mesmo.

Referências bibliográficas

- [1] MONTEIRO, E.C.; BARBOSA, C.H.; LIMA, E.A.; RIBEIRO, P.C.; BOECHAT, P. Locating steel needles in the human body using a SQUID magnetometer. **Physics in Medicine and Biology**, v. 45, n. 8, p. 2389, 2000.
- [2] BARBOSA, C.H.; MONTEIRO, E.C.; LIMA, E.A.; SANTOS, S.F.; CAVALCANTI, E.G.; RIBEIRO, P.C. Improvement of a technique for localization of steel needles in humans using a SQUID magnetometer. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 11, n. 1, p. 677–680, 2001.
- [3] BARBOSA, C.H. Localization of firearm projectiles in the human body using a superconducting quantum interference device magnetometer: A theoretical study. **REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS**, v. 75, n. 6, p. 2098–2106, 2004.
- [4] MONTEIRO, E.C., KELBER, C., LIMA, E.A., RIBEIRO, P.C., BRUNO, A.C., BARBOSA, C.H., RIBEIRO, E.P., & BOECHAT, P. magnetic measurement techniques for locating foreign bodies in humans. **biomag '96, 10th international conference on biomagnetism**, 314-. 1996
- [5] MONTEIRO, E.C.; LEON, L.F. Metrological Reliability of Medical Devices. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 588, n. 1, p. 12032, 2015.
- [6] WILLIAM R. SMYTHE **Static and Dynamic Electricity**. New York, NY: McGraw-Hill, 1968.
- [7] ILMONIEMI, R.J.; WILLIAMSON, S.J.; KAUFMAN, L.; WEINBERG, H.J.; BOYD, A.D. Method for locating a small magnetic object in the human body. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 35, n. 7, p. 561–564, 1988.
- [8] KRIEZIS, E.E.; TSIBOUKIS, T.D.; PANAS, S.M.; TEGOPOULOS, J.A. Eddy currents: theory and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 80, n. 10, p. 1559–1589, 1992.
- [9] SILVESTER, P.P.; OMERAGIC, D. Sensitivity maps for metal detector design. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 3, p. 788–792, 1996.
- [10] LI, W.; WANG, J.; ACUÑA, M.H.; AFZAL, M.H.; POPOVIC, R.S.; et al. Magnetic Sensors for Navigation Applications: An Overview. **The Journal of**

Navigation, v. 67, n. 2, p. 263–275, 2014.

[11] ANDRÄ, W.; NOWAK, H. **Magnetism in Medicine: A Handbook**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2007.

[12] MAHDI, A.E.; PANINA, L.; MAPPS, D. Some new horizons in magnetic sensing: High-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 105, n. 3, p. 271–285, 2003.

[13] CLARKE, J.; BRAGINSKI, A.I. **The SQUID Handbook: Vol 2 Applications of SQUIDS and SQUID Systems**. 2006.

[14] LENZ, J.; EDELSTEIN, S. Magnetic sensors and their applications. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, n. 3, p. 631–649, 2006.

[15] RIPKA, P. **Magnetic sensors and magnetometers**. Artech House, 2001.

[16] LENZ, J.E. A Review of Magnetic Sensors. **Proceedings of the IEEE**, v. 78, n. 6, p. 973–989, 1990.

[17] BARBOSA, C.H.; MONTEIRO, E.C.; POMPEIA, F. Localization of magnetic foreign bodies in humans using magnetic field sensors. **Proceedings, XVII IMEKO World Congress**. Dubrovnik: [s.n.]. 2003. p. 1510-1513.

[18] BOLL, R.; OVERSHOTT, K.J. **Magnetic sensors**. VCH, 1989.

[19] FORTALEZA, L.G. e S. **Non-ferromagnetic metallic foreign body detection by eddy currents**. Rio de Janeiro, 2016. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

[20] ROBBES, D. Highly sensitive magnetometers-a review. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 129, n. 1–2 SPEC. ISS., p. 86–93, 2006.

[21] SMITH, C.H.; SCHNEIDER, R.W. Magnetic field sensing utilizing GMR materials. **Sensor Review**, v. 18, n. 4, p. 230–236, 1998.

[22] S TUMANSKI **Thin Film Magnetoresistive Sensors**. Bristol, U.K.: Inst. Phys., 2001.

[23] KAWAI, T.; SAGARA, T.; SYONOWAKI, Y.; TANAKA, A. Magnetoresistive Sensors. **IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan**, v. 8, n. 6, p. 381–387, 1993.

[24] BAIBICH, M.N.; BROTO, J.M.; FERT, A.; DAU, F.N. VAN; PETROFF, F.; ETIENNE, P.; CREUZET, G.; FRIEDERICH, A.; CHAZELAS, J. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices. **Physical Review Letters**, v. 61, n. 21, p. 2472–2475, 1988.

- [25] TIAN, Y.; YAN, S. Giant magnetoresistance: History, development and beyond. **Science China: Physics, Mechanics and Astronomy**, v. 56, n. 1, p. 2–14, 2013.
- [26] PHAN, M.H. & PENG, H.X. Giant magnetoimpedance materials: fundamentals and applications. **Progress in materials science**, 53, 323–420. 2008
- [27] GONÇALVES, L.A.P. **Efeito Hall planar e magnetoimpedância gigante em liga ferromagnética amorfa $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$** . Recife, 2006. Tese de Doutorado – Programa de Pós-graduação em Ciência de Materiais, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).
- [28] MENDES, K.C. **Estudo da magneto-impedância gigante e do efeito hall em fitas amorfas de $\text{Co}_{70.4}\text{Fe}_{4.6}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$** . João Pessoa, 2000. Tese de Doutorado – Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB).
- [29] CAVALCANTI, F.M.P. **Desenvolvimento e caracterização de um transdutor magnético baseado no fenômeno da magnetoimpedância gigante**. Rio de Janeiro, 2005. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).
- [30] SILVA, E.C. da; VELLASCO, M.M.B.R.; BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C.; GUSMÃO, L.A.P. de Modelagem da sensibilidade de amostras GMI por redes neurais. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 23, n. 5, p. 636–648, 2012.
- [31] COSTA DA SILVA, E. **Magnetômetro GMI de Alta Sensibilidade para Medição de Campos Magnéticos Ultra-fracos**. Rio de Janeiro 2013. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).
- [32] CARNEIRO, J.H.C.C.; SILVA, E.C.; GUSMÃO, L.A.P.; BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C. System For Automatic Characterization of Giant Magneto-Impedance Samples. In: XX IMEKO World Congress, Busan, 2012. **Proceedings of the XX IMEKO World congress**, 2012, p 1-4.
- [33] FORTALEZA, L.G. e S. Homogeneização das características de fase de amostras GMI para leitura gradiométrica. **Proc. of the 10th International Congress on Electrical Metrology. Buenos Aires, Argentina: International Congress on Electrical Metrology**, p. 4, 2013.
- [34] SILVA, E.C. da; GUSMÃO, L.A.P.; BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C.

An electronic approach to homogenize the impedance phase characteristics of heterogeneous GMI sensors. **ACTA IMEKO**, v. 1, n. 1, p. 70–76, 2012.

[35] SILVA, E.C.; GUSMÃO, L. a P.; BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C.; MACHADO, F.L. a High sensitivity giant magnetoimpedance (GMI) magnetic transducer: magnitude versus phase sensing. **Measurement Science and Technology**, v. 22, n. 3, p. 35204, 2011.

[36] SILVA, E.C.; BARBOSA, C.R.H.; GUSMÃO, L. a P.; LEIPNER, Y.; FORTALEZA, L.G.S.; MONTEIRO, E.C. Point matching: A new electronic method for homogenizing the phase characteristics of giant magnetoimpedance sensors. **The Review of scientific instruments**, v. 85, n. 8, p. 84708, 2014.

[37] SILVA, E.C.; GUSMÃO, L.A.P.; BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C. Homogenization of The Impedance Phase Characteristics of Giant Magnetoimpedance Sensors. In: XVIII IMEKO TC4 Symposium and IX SEMETRO, Natal, 2011. **Proceedings of the XVIII IMEKO TC4 Symposium and IX Semetro**, 2011, p. 1-6

[38] SILVA, E.C. da; CARNEIRO, J.H.C.C.; GUSMÃO, L.A.P. de; BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C. Development of a fast and reliable system for the automatic characterization of Giant magnetoimpedance samples. **ACTA IMEKO**, v. 2, n. 1, p. 21–26, 2013.

[39] FORTALEZA, G.S.; BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C.; SILVA, E.C.; GUSMÃO, L.A.P. Detecting non-magnetic metallic foreign bodies by GMR sensors through the use of eddy currents. **th Brazilian Congress on Metrology**, 2015.

[40] HAYKIN, S. Redes neurais: princípios e prática. **Bookman**, p. 900, 2001.

[41] CESAR, A. & PITTA, D.O. **Modelo Inteligente para Otimização da Sensibilidade de Amostras GMI**. Rio de Janeiro 2014. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

[42] ROSA, H.N.S. Redes Neurais na previsão de Séries Temporais. **I Workshop de Computação da Região Sul**, 2004.

[43] GOLDBERG, D.E. (David E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.

[44] PACHECO, M.A.C. Algoritmos genéticos: princípios e aplicações. **ICA:**

Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada -, p. 9, 1999.

[45] VARGAS ABS DA CRUZ, A. **Otimização de Planejamentos com Restrição de Precedência usando Algoritmos Genéticos e Co-Evolução Cooperativa**. Rio de Janeiro 2003. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

[46] FOGEL, D.B. An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 5, n. 1, p. 3–14, 1994.

[47] MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. Springer-Verlag, 1996.372–373p.

[48] BARRICO, C.M.C.S. **Otimização Evolucionária Multi-Objectivo em Ambientes Incertos: Pesquisa de Soluções Robustas**. Coimbra 2007. Universidade de Coimbra.

[49] GONCALVES MENDES, B. **Otimização da Localização de Poços de Petróleo com Completação Seca Utilizando Algoritmos Genéticos**. Rio de Janeiro 2013. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

[50] MALDONADO TÁVARA E.G., E. **Algoritmo Genético Multiobjetivo na Predição de Estruturas Proteicas no Modelo Hidrofóbico - Polar**. Rio de Janeiro 2012. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

[51] BAKER, J.E. Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm. **Proceedings of the first International conference on Genetic Algorithms and theirs Applications** [S.1]: Grefenstette.1987. p. 14-21.

[52] BAKER, J.E. Adaptive selection methods for genetic algorithms. **Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and their Applications**. [S.1]: J.J Grefenstette. 1985. p. 101-111.

[53] A.BRINDLE AND S. **Genetic Algorithms for Function Optimization**. Edmonton, Canada: University of Alberta, 1981.

[54] GIL, F. **Optimización de tensión en redes de distribución utilizando técnicas evolutivas**. Editorial de la Universidad de Granada, 2009.

[55] MITCHELL, M. (Computer scientist) **An introduction to genetic algorithms**. MIT Press, 1996.

[56] EMERICK, A.A., SILVA, E., MESSER, B., ALMEIDA, L.F., SZWARCMAN, D., PACHECO, M.A.C., VELLASCO, M.M.B.R. Well

Placement Optimization Using a Genetic Algorithm With Nonlinear Constraints. In: **SPE Reservoir Simulation Symposium**. SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 2009,

[57] OTERO, J.A.B. **Algoritmos Genéticos Aplicados à Solução do Problema Inverso Biomagnético**. Rio de Janeiro, 2016. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

[58] LIEPINS, G.E.; VOSE, M.D. Characterizing crossover in genetic algorithms. **Annals of Mathematics and Artificial Intelligence**, v. 5, n. 1, p. 27–34, 1992.

[59] YANG, S. Adaptive Crossover in Genetic Algorithms Using Statistics Mechanism. **Artificial Life VIII**, p. 182–185, 2002.

[60] CONN, A.R.; GOULD, N.I.M.; TOINT., P.L. A Globally Convergent Augmented Lagrangian Barrier Algorithm for Optimization with General Inequality Constraints and Simple Bounds. **Mathematics of Computation**, v. 66, n. 217, p. 261–288, 1997.

[61] DAVIS, L. **Handbook of Genetic Algorithms**. 1991.

[62] RICARDO LINDEN **Algoritmos Genéticos**. 2012.

[63] MENDES SIMAO, L. **Otimização da Programação da Produção em Refinarias de Petróleo Utilizando Algoritmos Genéticos e Co-Evolução Cooperativa**. Rio de Janeiro 2004. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

[64] JUSTIN, A. Biot-Savart Law. **International Journal of Research**, v. 2, n. 4, p. 2348–6848, 2015.

[65] GOLDSTEIN, H. **Classical mechanics**. Addison-Wesley Pub. Co, 1980.

[66] WALPOLE RE, MYERS RH, MYERS SL, YE K. **Probability & Statistics for Engineers Scientists**. Prentice Hall; 2012.

[67] JACKMAN, S. **Bayesian Analysis for the Social Sciences**. Wiley. 2009.

[68] MANDEL, J. **The statistical analysis of experimental data**. Dover, 1984.