



Vinicius Tostes Seixas

**Projeto de Sistema de Detecção de Corpos Estranhos
Metálicos Não-Ferromagnéticos Baseado em Eddy
Currents e Magnetômetro GMI**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa
Coorientadora: Elisabeth Costa Monteiro

Rio de Janeiro,
outubro de 2022



Vinicius Tostes Seixas

**Projeto de Sistema de Detecção de Corpos Estranhos
Metálicos Não-Ferromagnéticos Baseado em Eddy
Currents e Magnetômetro GMI**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Profa. Elisabeth Costa Monteiro

Coorientadora

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Daniel Ramos Louzada

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. José Franco Machado do Amaral

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Prof. Jorge Luís Machado do Amaral

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Rio de Janeiro, 11 de outubro de 2022

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

Vinicius Tostes Seixas

Graduado em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), em 2018. Atualmente mestrando do Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI) pela PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Seixas, Vinicius Tostes

Projeto de sistema de detecção de corpos estranhos metálicos não-ferromagnéticos baseado em Eddy currents e magnetômetro GMI / Vinicius Tostes Seixas ; orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa ; coorientadora: Elisabeth Costa Monteiro. – 2022.

84 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2022.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação – Teses. 3. Metrologia. 4. Corpos estranhos metálicos. 5. Correntes parasitas. 6. Magnetômetros GMI. 7. Dispositivo médico portátil. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Monteiro, Elisabeth Costa. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. IV. Título.

CDD: 389.1

Este trabalho é dedicado ao meu avô, farmacêutico José Barroso Tostes, e
a todas as pessoas de bem que apareceram na minha vida.

Agradecimentos

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

Agradecimentos especiais aos mestres Carlos Roberto Hall Barbosa e Elisabeth Costa Monteiro. Professor Carlos Hall, pela oportunidade única e ímpar concedida de me evoluir como engenheiro, otimizar as capacidades técnicas e dominar tecnologias em engenharia e metrologia que me geraram grandes oportunidades e a perscrutar novos universos. À professora Elisabeth Costa Monteiro, pelo método interativo de ensino na área de biometrologia, assim como a dedicação.

Agradeço também aos professores Eduardo Costa da Silva e Ivan Motta, pela oportunidade, pelo inventivo à pesquisa e a atenção aos temas metrológicos.

A todos os demais professores e equipe da PUC-Rio que se dedicam à academia, engenharia e bem-estar social.

Nunca me esqueceria de todo o corpo de alunos de Metrologia da PUC-Rio, aos quais, mais que amigos, formamos uma verdadeira família, conjecturando em uma sinergia de aprendizagem que nos levou a perscrutar os limites do conhecimento.

Ao meu pai, Marcus Vinicius Seixas, pelo incentivo e forte educação. Agradeço também a minha mãe, Tania Maria Tostes, pela força, personalidade e vontade de fazer o bem.

Ao meu amor, Vanessa, por toda paciência, compreensão e carinho em minha jornada pelo conhecimento e à Ester, por me permitir a ser professor.

E finalmente a Deus, por ter me dado graças o suficiente e colocado as pessoas certas durante minha jornada no programa de mestrado para ser capaz de enfrentar todas as adversidades.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Seixas, Vinicius Tostes; Barbosa, Carlos Roberto Hall; Monteiro, Elisabeth Costa. **Projeto de Sistema de Detecção de Corpos Estranhos Metálicos Não-Ferromagnéticos Baseados em Eddy Currents e Magnetômetros GMI**. Rio de Janeiro, 2022. 84 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação apresenta um projeto de sistema portátil de localização de corpos estranhos metálicos não ferromagnéticos por meio de mapeamento magnético. O sistema baseia-se na indução de correntes parasitas no corpo estranho por um estágio de excitação e na medição por um magnetômetro GMI comercial de elevada resolução (25 pT). A topologia do instrumento é baseada no desacoplamento dos estágios de excitação e medição, com uma configuração que produz linhas de campo magnético primário elevadas na região do corpo estranho e tênues na região do sensor. Esta característica supera as limitações de um instrumento previamente desenvolvido, permitindo aumentar o campo magnético primário de excitação sem saturar o magnetômetro. O projeto é baseado em simulações computacionais, considerando dois tipos de excitação e duas orientações para o eixo de sensibilidade do magnetômetro. Diretrizes internacionais para os limites de exposição à radiação não-ionizante, aspectos biometrológicos, construtivos e elétricos também foram levados em consideração no projeto. A análise de desempenho das configurações mais promissoras confirmou a viabilidade do instrumento de medição proposto, otimizando a operação linear do magnetômetro durante o procedimento de medição e contribuindo para a futura construção de um protótipo de sistema de medição completo, com características de desempenho e segurança asseguradas para a aplicação biomédica pretendida.

Palavras-chave

Metrologia; Corpos Estranhos Metálicos; Correntes Parasitas; Magnetômetros GMI; Dispositivo Médico Portátil.

Abstract

Seixas, Vinicius Tostes; Barbosa, Carlos Roberto Hall; Medeiros, Elizabeth Costa. **Design of a System for Detection of Non-ferromagnetic Metallic Foreign Bodies Based in Eddy Currents and GMI Magnetometer.** Rio de Janeiro, 2022. 84 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation presents a portable system for the localization of non-ferromagnetic foreign metal bodies by magnetic mapping. The system is based on the induction of eddy currents in the foreign body by an excitation stage and the measurement by a high resolution commercial GMI magnetometer (25 pT). The instrument topology is based on the decoupling of the stages of excitation and measurement, with a configuration that produces a high primary magnetic field in the foreign body region and a weak one in the sensor region. This feature surpasses the limitations of a previously developed instrument, allowing to increase the primary excitation magnetic field without saturating the magnetometer. The project is based on computational simulations, considering two types of excitation and two orientations for the magnetometer sensitivity axis. International guidelines for exposure limits to non-ionizing radiation, biometrological, constructive and electrical aspects were also taken into consideration in the project. The performance analysis of the most promising settings confirmed the viability of the proposed measurement instrument, optimizing the linear operation of the magnetometer during the measurement procedure and contributing to the future construction of a complete measurement system prototype, with performance and safety characteristics ensured for the intended biomedical application.

Keywords

Metrology; Metallic Foreign Bodies; Eddy-Currents; GMI Magnetometer; Portable Medical Devices.

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução..... | 16 |
| 1.1. | Contextualização | 16 |
| 1.2. | Objetivos: geral e específicos | 20 |
| 1.3. | Estrutura da dissertação | 21 |
| 2 | Magnetismo: Grandezas Magnéticas e Magnetômetros GMI..... | 23 |
| 2.1 | Grandezas Magnéticas..... | 23 |
| 2.2 | Magnetômetros GMI | 25 |
| 2.2.1 | Princípios de Operação | 25 |
| 2.2.2 | Transdutor GMI Aichi | 28 |
| 2.2.3 | Sensor GMI baseado em Fitas Amorfas | 30 |
| 2.3 | Limites de Exposição a Campos Magnéticos | 31 |
| 3 | Modelagem Computacional do Campo Primário..... | 34 |
| 3.1 | Lei de Biot-Savart | 34 |
| 3.2 | Modelo Computacional para o Campo Magnético Primário | 35 |
| 3.3 | Configurações de Excitação | 39 |
| 3.3.1 | Campo Magnético Primário na Região do Corpo Estranho | 42 |
| 3.3.2 | Campo Magnético Primário na Região do Magnetômetro | 46 |
| 3.3.3 | Otimização da Configuração de Excitação 1 com Sensor GMI Horizontal | 51 |
| 4 | Modelagem Teórica e Computacional do Campo Magnético Secundário..... | 57 |
| 4.1 | Eddy Currents..... | 57 |
| 4.2 | Simulação Computacional..... | 60 |
| 4.2.1 | Simulações Unidimensionais..... | 61 |
| 4.2.1.1 | Sensor GMI Horizontal..... | 61 |
| 4.2.1.2 | Sensor GMI Vertical | 64 |
| 4.2.1.3 | Comparação entre Orientações do Sensor GMI..... | 67 |
| 4.2.2 | Simulações Bidimensionais | 69 |
| 4.2.2.1 | Sensor GMI Horizontal..... | 69 |
| 4.2.2.2 | Sensor GMI Vertical | 71 |
| 5 | Análise da Capacidade de Medição do Instrumento Proposto..... | 73 |
| 5.1 | Capacidade de Medição de Corpos Estranhos a Grandes Profundidades | 74 |
| 5.2 | Capacidade de Medição de Pequenos Corpos Estranhos..... | 76 |
| 6 | Conclusão..... | 79 |
| | Referências bibliográficas | 82 |

Lista de figuras

- Figura 1 – Radiografia mostrando um fragmento de agulha, que foi evidenciado na medição magnética, mas originalmente não fora reconhecido na mesma. O marcador radiopaco colocado sobre a pele evidencia a posição do corpo estranho [2]. 17
- Figura 2 – Mapa do campo magnético gerado por um corpo estranho ferromagnético, medido por meio de um sensor SQUID [2]...... 17
- Figura 3 – Configuração experimental usada para a localização de agulhas de aço em pacientes, empregando magnetômetro SQUID [2]. .. 18
- Figura 4 – Esquema do processo de transdução desenvolvido em [9], utilizando um solenoide longo para geração do campo magnético primário. 20
- Figura 5 – Esquema Típico de Medição de um Sensor GMI..... 25
- Figura 6 – Relação logarítmica entre módulo e frequência de campos magnéticos de baixa frequência para os limites de exposição [12]...... 33
- Figura 7 – Geometria para definição da Lei de Biot-Savart..... 34
- Figura 8 – Representação gráfica conceitual dos termos de entradas da função de cálculo da distribuição da densidade de fluxo magnético primário segundo a Lei de Biot-Savart. O eixo inercial de coordenadas espaciais é centrado na origem do sistema de medição, enquanto os solenoides são representações de pontos discretos, assim como o espaço de monitoramento. O vetor de cor verde é relativo ao vetor de indução magnética em um ponto onde se encontra o corpo estranho. 38
- Figura 9 – (a) bobinas planares; (b) solenoides verticais 39
- Figura 10 – Campo vetorial da densidade do fluxo magnético gerado pelos estágios de excitação e perfis dos elementos de atuação e do corpo estranho. O gráfico à esquerda é relativo à distribuição gerada pelo estágio que aborda bobinas planares, enquanto o gráfico da distribuição à direita é relativo ao estágio de excitação abordando bobinas longas ... 40
- Figura 11 – Campo vetorial normalizado da densidade do fluxo magnético gerado pelos estágios de excitação. À esquerda, o gráfico é relativo ao estágio de excitação que aborda bobinas planares, enquanto

à direita, o gráfico é relativo a estágio de excitação que aborda bobinas longas.....41

Figura 12 – Densidade de fluxo magnético primário ao longo do eixo-x para três profundidades distintas: $h = 20$ mm (curva vermelha), $h = 40$ mm (curva verde) e $h = 60$ mm (curva azul), as curvas à esquerda são relativas ao estágio de excitação que aborda bobinas planares, enquanto as curvas à direita são relativas ao estágio de excitação que aborda bobinas longas42

Figura 13 – Comportamento do valor máximo da densidade de fluxo magnético primário ao longo do eixo-z, a curva verde é relativa ao estágio de excitação que aborda bobinas longas, enquanto a curva vermelha é relativa ao estágio de excitação que aborda bobinas planares43

Figura 14 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 20 mm, gerada pela Configuração 1 (bobinas planares).44

Figura 15 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 20 mm, gerada pela Configuração 2 (solenoides verticais).44

Figura 16 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 40 mm, gerada pela Configuração 1 (bobinas planares).45

Figura 17 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 40 mm, gerada pela Configuração 2 (solenoides verticais).45

Figura 18 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 60 mm, gerada pela Configuração 1 (bobinas planares).45

Figura 19 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 60 mm, gerada pela Configuração 1 (solenoides verticais).45

Figura 20 – Conceito de medição com sensor em posição horizontal, coplanar ao plano xy, para as Configurações 1 (esquerda) e 2 (direita)..46

Figura 21 – Distribuição espacial da densidade de fluxo magnético primário na região do sensor, na posição horizontal e alinhado com o eixo X, para as Configurações 1 (esquerda) e 2 (direita).47

Figura 22 – Conceito de medição com sensor em posição vertical, coplanar ao plano x, para as Configurações 1 (esquerda) e 2 (direita).... 47

Figura 23 – Distribuição espacial da densidade de fluxo magnético primário na região do sensor, estando este na posição vertical e alinhado com o eixo Z nas duas configurações de excitação. 48

Figura 24 – Comportamento do valor máximo da densidade de fluxo magnético primário ao longo do eixo-z. A curva vermelha corresponde à Configuração 1 (corrente de 100 mA); a curva azul corresponde à Configuração 2 com o sensor GMI vertical (corrente de 70 mA); a curva verde corresponde à Configuração 2 com o sensor GMI horizontal (corrente de 6,7 mA) 49

Figura 25 – Representação das variáveis que devem corresponder as diretrizes do ICNIRP em relação a exposição humana a radiação magnética não ionizante. As setas são representativas das componentes de interesse B_{pz} (amarela) e B_{px} (verde) condensadas na região em que ambas devem possuir intensidade máxima de $70 \mu T$ 52

Figura 26 – Densidade de fluxo magnético primário horizontal no corpo estranho na Configuração 1 (bobinas planares e sensor em posição horizontal) para diferentes profundidades. A linha tracejada verde é relativa à configuração base apresentada na Figura 22 (10 espiras e corrente elétrica de 100 mA), enquanto a linha sólida azul é relativa à configuração otimizada. A reta tracejada preta representa o limite do módulo de medição linear do sensor GMI Aichi abordado que é de $1 \mu T$. 55

Figura 27 – (a) Sistema de coordenadas utilizado na formulação original do campo magnético secundário; (b) Sistema de coordenadas alinhado com o campo magnético primário de excitação (na direção horizontal, B_{px} , conforme descrito no Capítulo 3). As letras em vermelho (e roxo) indicam o sistema de coordenadas utilizado na formulação apresentada anteriormente, e as letras em verde indicam o sistema de coordenadas inercial utilizado no Capítulo 3. 59

Figura 28 – Distribuição unidimensional da densidade de fluxo magnético primário B_{px} (excitação) produzido pela Configuração 1A na região do corpo estranho, considerando três níveis de profundidade..... 61

Figura 29 – Distribuição unidimensional da densidade de fluxo magnético secundário na região do corpo estranho segundo as excitações representadas pela Figura 2. 62

Figura 30 – Variação unidimensional, com a profundidade Z, da componente horizontal da densidade de fluxo magnético secundário medida pelo sensor GMI, para diferentes raios do corpo estranho. 63

- Figura 31 – Distribuição unidimensional da densidade de fluxo magnético primário B_{px} (excitação) produzido pela Configuração 1B na região do corpo estranho, considerando três níveis de profundidade..... 64
- Figura 32 – Distribuição unidimensional da densidade de fluxo magnético secundário na região do corpo estranho segundo as excitações representadas pela Figura 2. 65
- Figura 33 – Variação unidimensional, com a profundidade Z , da componente vertical da densidade de fluxo magnético secundário medida pelo sensor GMI, para diferentes raios do corpo estranho. 66
- Figura 34 – Distribuição da componente horizontal da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 20 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição 69
- Figura 35 – Distribuição da componente horizontal da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 40 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição 70
- Figura 36 – Distribuição da componente horizontal da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 60 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição 70
- Figura 37 – Distribuição da componente vertical da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 20 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição 71
- Figura 38 – Distribuição da componente vertical da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 40 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição 71
- Figura 39 – Distribuição da componente vertical da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 60 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição 72
- Figura 40 – Profundidade máxima de detecção de corpos estranhos. Gráficos na parte superior da Figura são relativos às configurações em particular, sendo o de cor vermelha relativo à Configuração 1A enquanto o de cor azul é relativo à Configuração 1B. O gráfico inferior da Figura é o comparativo entre as duas configurações..... 74

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Representação de grandezas magnéticas conforme os sistemas ISQ e SI..... | 23 |
| Quadro 2 - Representação de grandezas magnéticas conforme os sistemas ISQ e CGS | 23 |
| Tabela 1 – Relação entre as unidades de grandezas magnéticas nos sistemas SI e CGS | 24 |
| Tabela 2 – Exemplos de valores quantitativos da densidade de fluxo Magnético..... | 25 |
| Tabela 3 – Especificações Técnicas do Sensor Aichi Modelo MI-CB-1DJ-M-B..... | 29 |
| Tabela 4– Sensibilidade das fitas GMI em Relação à Variação da Fase e Magnitude da Impedância | 31 |
| Tabela 5– Limites de exposição ocupacional segura a campos magnéticos de baixa frequência [12]..... | 32 |
| Tabela 6 – Limites de exposição segura a campos magnéticos de baixa frequência para o público em geral [12]..... | 33 |
| Tabela 7 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} ao longo do eixo central longitudinal para diferentes profundidades do corpo estranho em relação às bobinas de excitação. | 43 |
| Tabela 8 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} máximo na região do sensor GMI para ambas as Configurações de excitação e ambas as orientações do sensor..... | 48 |
| Tabela 9 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} máximo na região do sensor GMI para ambas as Configurações de excitação e ambas as orientações do sensor, após o ajuste das correntes de excitação. | 49 |
| Tabela 10 – Quantidade de espiras, corrente máxima, indutância e tensão induzida pelas bobinas planares para os diversos diâmetros de fios condutores, de acordo com o padrão AWG..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Tabela 11 – Densidades de fluxo magnético primário B_p máximo na região do sensor GMI, na superfície da pele (a 10 mm de distância da base das bobinas) e no corpo estranho, para as duas orientações do sensor. | 56 |
| Tabela 12 – Variação da intensidade máxima da densidade de fluxo magnético secundário em relação à variação de profundidade e raio do corpo estranho | 63 |
| Tabela 13 – Proporção crescente entre o mensurando segundo a variação crescente do raio do corpo estranho..... | 64 |
| Tabela 14 – Variação da intensidade máxima da densidade de fluxo magnético secundário em relação à variação de profundidade e raio do corpo estranho | 67 |
| Tabela 15 – Proporção crescente entre o mensurando segundo a variação crescente do raio do corpo estranho..... | 67 |
| Tabela 16 – Razão entre a componente horizontal e vertical da densidade de fluxo magnético secundário B_{S_x} B_{S_z} | 68 |
| Tabela 17 – Tabela da sequência de simulações bidimensionais da densidade do fluxo magnético secundário gerado por indução de Correntes Parasitas no corpo estranho | 69 |
| Tabela 18 – Profundidade máxima de detecção de corpos estranhos para as duas Configurações do instrumento de medição. | 75 |
| Tabela 19 – Menor corpo estranho detectável a uma determinada profundidade. | 76 |

Edifica-se a casa pela Sabedoria,
pela inteligência ela se firma;
pela ciência se enche o seu interior
de todo bem precioso e agradável”

(Provérbios, Capítulo 24, versículos 3 a 4)

1

Introdução

1.1. Contextualização

A ocorrência de corpos estranhos metálicos em pacientes devido a acidentes e ferimentos é uma situação comumente vivenciada em centros médicos. A presença de corpos estranhos metálicos no corpo humano pode provocar quadros sintomáticos adversos relativos à saúde do paciente. Em diversos contextos justifica-se sua remoção cirúrgica. Contudo, os procedimentos cirúrgicos usuais adotados para a remoção destes objetos têm-se demonstrado empreendimentos desafiadores aos cirurgiões, devido à ineficácia das técnicas de imageamento que são usualmente adotadas para a localização de corpos estranhos metálicos, acarretando em procedimentos cirúrgicos longos e sem sucesso [1,2].

As abordagens usuais de imageamento para a detecção de corpos estranhos se realizam por meio de radiografia e tomografia computadorizada, além de técnicas de radioscopia realizadas durante o procedimento cirúrgico [2]. As técnicas são não-invasivas mas, por envolverem o emprego de radiação ionizante, não são inócuas [2,3]. Como já mencionado, as abordagens convencionais, além de exporem paciente e profissionais a radiação ionizante, não determinam o exato posicionamento do corpo estranho, levando a procedimentos cirúrgicos prolongados, associados a elevados níveis de insucesso na remoção do corpo estranho [2].

O desenvolvimento de técnica baseada no mapeamento da densidade de fluxo magnético produzido pelo corpo estranho possibilitou a determinação não-invasiva e com elevada exatidão da localização do objeto ferromagnético [1,2]. Nesta técnica empregou-se um dispositivo supercondutor SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*), o magnetômetro mais sensível até então disponível [1,2,4]. A técnica, já aplicada em sete casos clínicos, resultou na rápida e bem-sucedida remoção cirúrgica de todos os corpos estranhos, constituídos por agulhas hipodérmicas e de costura [2].

A Figura 1 apresenta uma imagem radiográfica com um pequeno fragmento de agulha que inicialmente não havia sido identificado (na imagem radiográfica) e só foi evidenciado após o mapeamento magnético, com o qual se realizou a exata localização, possibilitando sua rápida remoção cirúrgica [2]. A técnica desenvolvida baseia-se na medição da densidade do fluxo magnético gerado pelo objeto ferromagnético, conforme apresentado na Figura 2 [1,2].



Figura 1 – Radiografia mostrando um fragmento de agulha, que foi evidenciado na medição magnética, mas originalmente não fora reconhecido na mesma. O marcador radiopaco colocado sobre a pele evidencia a posição do corpo estranho [2].

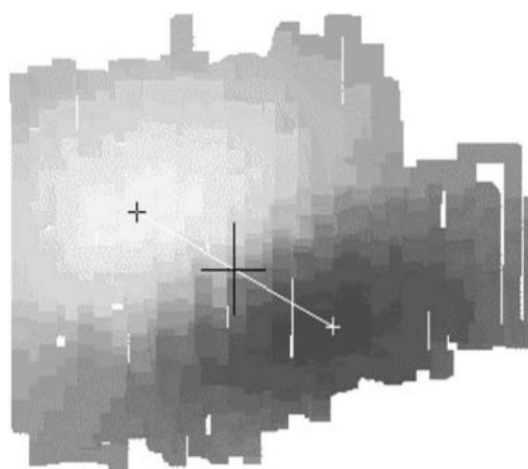


Figura 2 – Mapa do campo magnético gerado por um corpo estranho ferromagnético, medido por meio de um sensor SQUID [2].

Desta forma, as informações obtidas por meio do mapeamento magnético são utilizadas como entradas para algoritmos de solução do problema inverso magnético, que estimam as grandezas físicas espaciais de distância e ângulo plano entre instrumento de medição e a fonte do campo, além de estimar as dimensões do corpo estranho [2,4].

Porém, este sistema de medição magnética era baseado em um sistema SQUID (Figura 3) que, além de ser um equipamento de elevado custo, opera em

temperaturas criogênicas (cerca de $-269,5^{\circ}\text{C}$) para que ocorra o seu processo físico de transdução, requerendo um volume de hélio líquido e um recipiente Dewar a fim de comportar e pressurizar esse fluido [2,4].

Estas características inviabilizam a aplicação do magnetômetro SQUID para a sua implementação em larga escala, impossibilitando sua conformidade com os Princípios Biometrológicos que, além da elevada exatidão, não-invasividade, inocuidade, dentre outros, exigem que os desenvolvimentos com aplicação biomédica se caracterizem pela portabilidade e pelo baixo custo de implementação e operação [3].

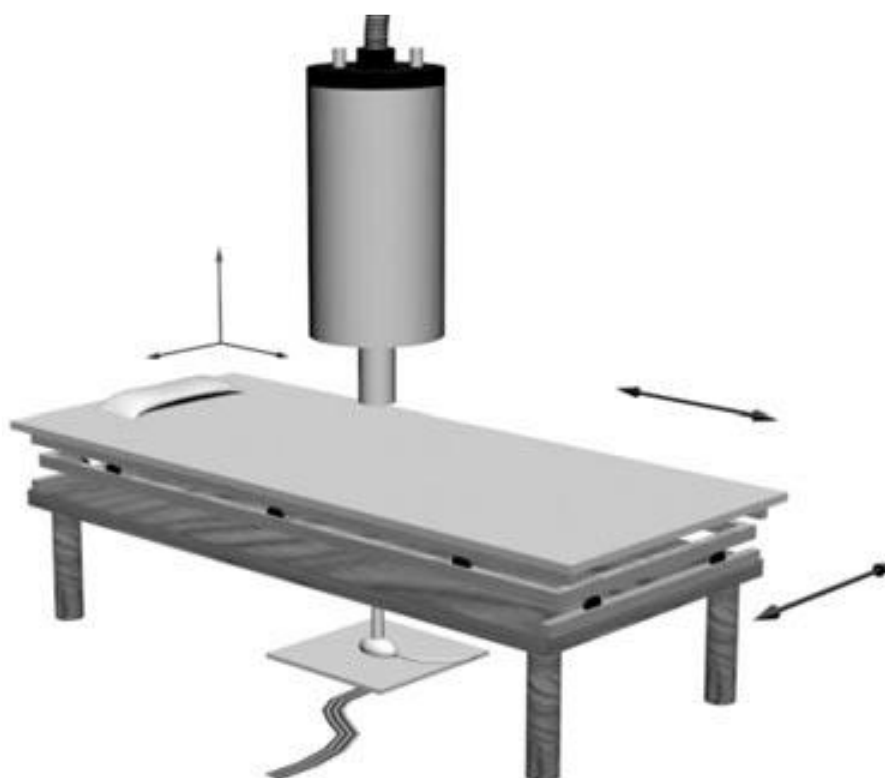


Figura 3 – Configuração experimental usada para a localização de agulhas de aço em pacientes, empregando magnetômetro SQUID [2].

Mais recentemente, esforços vêm sendo realizados pela equipe do Laboratório de Biometrologia (LabBioMet) da PUC-Rio para o desenvolvimento de sistemas de medição de baixo custo, portáteis e que operem à temperatura ambiente para a detecção de corpos estranhos metálicos no corpo humano, baseados em transdutores GMR (*Giant Magnetoresistance*) e GMI (*Giant Magnetoimpedance*) para uso em larga escala pelos centros médicos [5-10].

A localização de corpos estranhos metálicos não-ferromagnéticos no corpo humano impõe um desafio adicional. Estes objetos, como por exemplo projéteis de arma de fogo, são compostos basicamente de elemento químico com

propriedade diamagnética, como o chumbo (Pb), não possuindo campo magnético remanente. Nestes casos, para localização por meio de mapeamento magnético, o processo a ser aplicado deve basear-se na teoria explicitada pelo eletromagnetismo clássico de indução de *eddy currents* no corpo estranho, de forma que este produza (de forma induzida) um campo magnético secundário, que seja percebido pelo sistema de medição e tenha seus dados processados computacionalmente para a construção do mapa da densidade do fluxo magnético gerado pelas correntes induzidas no objeto [8,9,11].

Estudos realizados no LabBioMet demonstraram que um sistema de bobinas excitadas por corrente alternada consegue produzir um campo magnético secundário no corpo estranho a fim de que este seja detectado com um elevado grau de sensibilidade, exatidão e inocuidade [8,9,11]. Porém, o fenômeno de *eddy currents* em objetos metálicos não-magnéticos induz campos magnéticos de ordens inferiores aos que o geraram (primário), além do fato de que a densidade do fluxo magnético decai conforme o cubo da distância relativa entre transdutor e mensurando [9,11].

O sistema desenvolvido [8,9], ilustrado na Figura 4, é constituído por um solenoide longo e dois sensores GMI (S1 e S2) localizados nos limites do eixo longitudinal do solenoide. O solenoide gera um campo magnético alternado primário, com a frequência de 8 kHz e a amplitude em seus limites de 1 μT (limite de saturação dos sensores GMI). Este campo primário induz *eddy currents* no corpo estranho, representado simplificada por uma esfera de raio a , e localizado a uma distância z da base do solenoide. Estas *eddy currents*, por sua vez, geram um campo magnético alternado secundário que pode ser medido pelos sensores GMI. Ambos os sensores S1 e S2 estão expostos ao mesmo campo primário, cujo efeito pode então ser cancelado por meio de uma medição diferencial. Contudo, como S1 está mais próximo do corpo estranho, o campo secundário que nele incide é significativamente maior que o campo secundário que incide em S2, permitindo então a discriminação do corpo estranho.

O sistema de medição mostrou-se eficaz na estimativa do raio do projétil e sua profundidade em relação à pele do paciente [8,9]. Entretanto, como o campo magnético de excitação B_0 (primário) é limitado ao valor máximo da faixa de operação linear do sensor GMI, que é de $\pm 1 \mu\text{T}$, o campo secundário B_s gerado pela indução de *eddy currents* também é limitado, reduzindo a capacidade de detecção do instrumento dependendo da dimensão e profundidade do corpo estranho metálico.

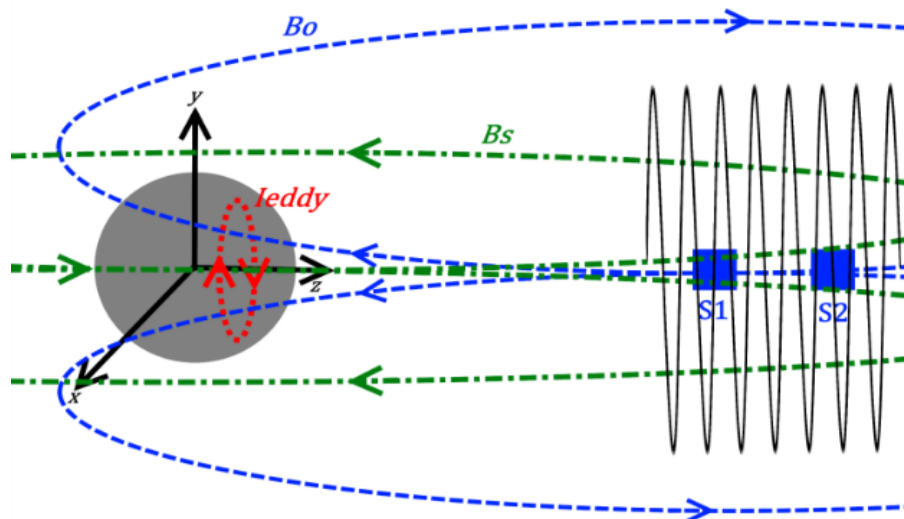


Figura 4 – Esquema do processo de transdução desenvolvido em [9], utilizando um solenoide longo para geração do campo magnético primário.

Dessa forma, faz-se necessário desenvolver configurações do sistema de medição que superem as limitações à capacidade de medição do transdutor impostas pela interferência do campo magnético primário na operação dos elementos sensores. Um sistema de bobinas de excitação alternativo deve gerar uma distribuição espacial do campo primário com níveis adequados de densidade do fluxo magnético na região do corpo estranho e níveis quase imperceptíveis na região onde se localiza o elemento sensor. Com essa configuração seria possível amplificar o campo secundário gerado pelas *eddy currents* para detecção de fragmentos menores de projéteis, localizados mais profundamente na pele, respeitando os limites de segurança recomendados pela Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não-Ionizante (ICNIRP - *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) [12].

Essas características, associadas a um baixo custo relativo do sistema de medição, atendendo aos princípios biometrológicos, viabilizariam a adoção em larga escala de dispositivo portátil para localização não-invasiva e inócua de corpos estranhos metálicos não-ferromagnéticos [3,9].

1.2.

Objetivos: geral e específicos

O objetivo geral desta dissertação de mestrado é projetar e validar computacionalmente um sistema de localização de corpos estranhos metálicos não-magnéticos no corpo humano com base na geração de *eddy currents* e

mapeamento do campo magnético secundário por sensor GMI. São considerados objetivos específicos dessa pesquisa:

- Pesquisa bibliográfica e documental sobre magnetômetros GMI, que têm sensibilidade e resolução adequadas aos objetivos da pesquisa;
- Pesquisa bibliográfica e documental sobre limites de exposição a campos magnéticos, de acordo com as diretrizes da ICNIRP;
- Modelagem computacional do campo magnético primário gerado por bobinas e solenoides de configuração genérica, com base na Lei de Biot-Savart;
- Projeto e simulação computacional de diferentes alternativas de sistemas de excitação (geração de campos magnéticos primários), compostos por bobinas e solenoides de variadas geometrias;
- Modelagem teórica e computacional do campo magnético secundário gerado por *eddy currents* induzidas em corpos estranhos metálicos não-magnéticos por campos magnéticos primários conhecidos;
- Simulação computacional dos mapas de campo magnético secundário medidos por magnetômetros GMI em diferentes orientações espaciais; e
- Projeto e simulação computacional do sistema de detecção completo, estimando seus parâmetros de desempenho.
- Determinação da configuração mais apropriada do sistema de medição com base em parâmetros de desempenho e segurança adequados à aplicação clínica.

1.3. Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos:

Este capítulo 1 apresenta a introdução da dissertação, em que é contextualizado o problema e apresentado o tema proposto.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre as grandezas magnéticas de interesse para esta dissertação, incluindo os limites de exposição a campos magnéticos definidos pela ICNIRP. Também é apresentada uma descrição dos princípios de operação dos magnetômetros GMI, incluindo características metrológicas de modelos comerciais e laboratoriais atualmente disponíveis.

O capítulo 3 descreve a modelagem computacional implementada para simular o campo magnético primário gerado por condutores de geometria arbitrária, com correntes alternadas, com base na Lei de Biot-Savart. Apresenta

ainda as diferentes alternativas de configurações de bobinas e solenoides que foram estudadas no decorrer da dissertação.

O capítulo 4 apresenta a modelagem teórica e a implementação computacional do campo magnético secundário gerado pelas *eddy currents*, que são induzidas em corpos estranhos metálicos não-magnéticos pelo campo magnético primário alternado. Apresenta ainda os mapas de campo magnético secundário simulados para as diferentes topologias e excitação e duas orientações do sensor GMI.

No capítulo 5, avaliam-se as diferentes alternativas apresentadas nos capítulos anteriores, estimando o desempenho do sistema de localização em termos de diâmetro do corpo estranho e distância de detecção, e indicando a combinação mais adequada de sistema de excitação e orientação do sensor GMI.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões e indica possíveis trabalhos futuros.

2

Magnetismo: Grandezas Magnéticas e Magnetômetros GMI

Este capítulo apresenta uma revisão sobre as grandezas magnéticas de interesse para esta dissertação, incluindo os limites de exposição a campos magnéticos definidos pela ICNIRP. Também é apresentada uma descrição dos princípios de operação dos magnetômetros GMI, incluindo características metrológicas de modelos comerciais e laboratoriais atualmente disponíveis.

2.1

Grandezas Magnéticas

Conforme definido pelo VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia), uma grandeza é a “propriedade de um fenômeno, de um corpo ou de uma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma de um número e de uma referência” [13], sendo classificada como grandeza de base ou derivada. A série normativa ISO/IEC 80000 designa o nome e simbologia das grandezas e implementa o ISQ (Sistema Internacional de Grandezas) baseado nas suas sete grandezas de base. O SI (Sistema Internacional de Unidades), correlaciona as respectivas unidades das grandezas do sistema ISQ. Todas as grandezas físicas e respectivas unidades abordadas nessa dissertação estão em conformidade com estes sistemas representativos [13,14].

As principais grandezas magnéticas de interesse abordadas nesta dissertação são a intensidade do campo magnético (H) e a densidade de fluxo magnético (B), sendo ambas classificadas como grandezas derivadas.

Segundo o IECV (International Electrotechnical Vocabulary) definido pela série normativa IEC 60050 [15], a definição para intensidade do campo magnético (H), comumente denominada como campo magnético, é “a grandeza vetorial obtida em um dado ponto subtraindo a magnetização (M) da densidade do fluxo magnético dividida pela permeabilidade magnética no vácuo” ($\mu_0=4\pi\times10^{-7} \text{ H/m}$), segundo a relação

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M. \quad (1)$$

No vácuo, o vetor de magnetização é nulo, sendo considerada uma boa aproximação para o ambiente atmosférico, logo

$$H = \frac{B}{\mu_0}. \quad (2)$$

Portanto, neste caso, a densidade de fluxo magnético (B), também denominada vetor de indução magnética, é a grandeza vetorial definida pelo

produto entre a intensidade do campo magnético e a permeabilidade magnética aproximada do ar:

$$B = \mu_0 H \quad (3)$$

O quadro 1 identifica essas duas grandezas magnéticas conforme o IEV e o SI.

Quadro 1 – Representação de grandezas magnéticas conforme os sistemas ISQ e SI

| Grandezas (IEV) | | Unidades (SI) | |
|--------------------------------|---------|------------------|---------|
| Nomenclatura | Símbolo | Nomenclatura | Símbolo |
| Intensidade de Campo Magnético | H | ampere por metro | A/m |
| Densidade de Fluxo Magnético | B | tesla | T |

Em folha de dados de magnetômetros e em algumas bibliografias a respeito do efeito GMI, é comum encontrar estas grandezas representadas em unidades do sistema CGS (centímetro-grama-segundo), conforme caracterizado no Quadro 2.

Quadro 2: Representação de grandezas magnéticas conforme os sistemas ISQ e CGS

| Grandezas (IEV) | | Unidades (CGS) | |
|--------------------------------|---------|----------------|---------|
| Nomenclatura | Símbolo | Nomenclatura | Símbolo |
| Intensidade de Campo Magnético | H | oersted | Oe |
| Densidade de Fluxo Magnético | B | gauss | G |

A conversão entre as unidades nos sistemas SI e CGS está indicada na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre as unidades de grandezas magnéticas nos sistemas SI e CGS

| Grandezas (ISQ) | | Conversão SI/CGS |
|--------------------------------|-----|--|
| Intensidade de Campo Magnético | H | $1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ A/m}$ |
| Densidade de Fluxo Magnético | B | $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ |

Deve-se mencionar ainda que, no sistema CGS de unidades, a permeabilidade magnética do vácuo possui valor unitário. Desta forma, considerando o ambiente atmosférico, as grandezas intensidade do campo magnético e densidade do fluxo magnético possuem valores numéricos idênticos, ou seja,

$$B [G] = H [\text{Oe}]. \quad (4)$$

A densidade de fluxo magnético (B) associada a diferentes fontes [4, 11, 16] é exemplificada na Tabela 2.

Tabela 2 – Exemplos de valores quantitativos da densidade de fluxo Magnético

| Fonte de campo magnético | B |
|---|-----------------------------|
| Planeta Terra | [25 μ T, 65 μ T] |
| Máquina de Ressonância Magnética (Típica) | 1,5 T |
| Agulha Hipodérmica e de Costura | [0,05 μ T; 100 μ T] |
| Resolução Magnetômetro SQUID | 300 fT |

2.2 Magnetômetros GMI

2.2.1 Princípios de Operação

Um magnetômetro, ou sensor magnético, é um transdutor que converte uma grandeza magnética (intensidade de campo magnético ou densidade de fluxo magnético) em uma grandeza elétrica, tipicamente tensão ou resistência elétrica [17].

Magnetômetros são amplamente utilizados na era digital, para gravação e leitura de informação em discos rígidos e diferentes tipos de memórias em computadores, celulares e tecnologias digitais. Estes sensores também têm sido amplamente utilizados em sistemas de controle e monitoramento, assim como em transdutores de movimento de alta resolução [17].

Magnetômetros têm a característica de serem robustos e permitir processos de medição não destrutivos e não invasivos, oferecendo uma grande vantagem em relação a outras categorias de sensores [17].

O fenômeno da magnetoimpedância gigante foi descoberto no início dos anos 1990, quando se observou que materiais condutores ferromagnéticos moles compostos de $C_oF_eS_iB$, alimentados por uma corrente elétrica alternada de alta frequência, apresentavam grande variação na sua impedância elétrica ((40-100%)Oe) quando expostos a um campo magnético externo [17-20]. O esquema básico de excitação e medição de magnetômetros GMI é mostrado na Figura 5 [6].

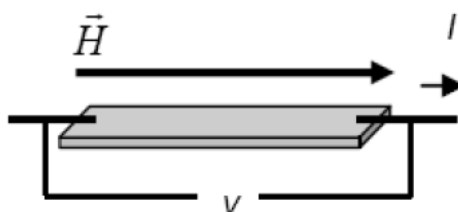


Figura 5 – Esquema Típico de Medição de um Sensor GMI.

Esta variação da impedância é explicada pelo eletromagnetismo clássico, em que a magnetização do elemento sensor aumenta conforme a percepção de um campo magnético externo, levando a um aumento da permeabilidade magnética do material, fato que altera a profundidade de corrente do sensor, já que esta é inversamente proporcional tanto à frequência da corrente de excitação quanto à permeabilidade magnética do elemento GMI, como mostrado em (5). Este fato leva a uma variação do caminho da corrente no elemento sensor, consecutivamente variando a sua impedância elétrica [20].

$$\delta(\mu(H)) = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu(H)}} \quad (5)$$

Tendo os parâmetros:

- H : Campo Magnético Externo (Ambiente)
- μ : Permeabilidade Magnética do Elemento Sensor
- δ : Profundidade de Penetração da Corrente Elétrica
- ρ : Resistividade Elétrica
- ω : frequência angular

A intensidade da variação da impedância elétrica de magnetômetros GMI depende de fatores como o módulo e frequência da corrente de excitação, temperatura de operação do elemento, campo de polarização e geometria do elemento sensor.

A impedância dos sensores GMI pode ser modelada eletricamente como uma carga indutiva consistente de uma conexão em série entre um resistor e um indutor, conforme o modelo matemático

$$Z_{GMI} = \frac{\dot{V}}{I} = \frac{|V|}{|I|} e^{\phi} = |Z| \cos \phi + j |Z| \sin \phi = R + X_L \quad (6)$$

Tendo os parâmetros:

- Z_{GMI} : Impedância Elétrica Complexa do Elemento Sensor
- V : Tensão Elétrica sobre o Elemento Sensor
- I : Corrente Elétrica Aplicada Sobre o Elemento Sensor
- ϕ : Ângulo de Fase Entre Tensão e Corrente
- R : Resistência Elétrica do Elemento Sensor
- X_L : Reatância Indutiva do Elemento Sensor

Miniaturização (elementos GMI podem ter 1 μm de comprimento), alta sensibilidade e resolução espacial, capacidade de operação em temperatura ambiente, resposta rápida a estímulos, baixo custo, baixo nível de ruído intrínseco

e robustez a campos magnéticos cruzados são algumas vantagens na utilização de magnetômetros GMI.

As curvas GMI indicam que a variação da impedância em função de um campo magnético externo é geralmente simétrica em relação à região em que este é nulo. Porém, há formas de tornar esta relação assimétrica, obtendo vantagens como discernimento do sentido do mensurando e considerável aumento da sensibilidade da variação do módulo e fase do sensor GMI em relação ao campo magnético externo na região em que esse é nulo.

Este efeito é denominado AGMI (Magnetoimpedância Gigante Assimétrica), podendo ser obtido de três formas distintas, com a aplicação de um campo magnético alternado, aplicação de corrente contínua no material GMI, ou com um processo de manufatura denominado “Exchange bias” [21].

Esta dissertação aborda dois tipos distintos de magnetômetros GMI, cada um com suas peculiaridades e características próprias, apesar de ambos operarem conforme o efeito da magnetoimpedância gigante. Logo, para fins comparativos com demais documentos e bibliografias, os aspectos metrológicos da sensibilidade e resolução são ressaltados. Ao longo da dissertação, estes termos são mencionados de acordo com a definição do Vocabulário Internacional da Metrologia [13].

Segundo o VIM, a sensibilidade de um sistema de medição é definida como o “quociente entre a variação de uma indicação de um sistema de medição e a variação correspondente do valor da grandeza medida”, tendo dois adendos, explicitando que a sensibilidade depende do valor da grandeza medida e que a variação da grandeza medida deve ser grande em relação ao valor da resolução do instrumento de medição. Logo, ao comparar a sensibilidade de sistemas de transdução baseados em magnetômetros, há a necessidade de informar a faixa de medição em que grandeza de medição foi variada. Além do mais, há de se enfatizar o sinal de saída do magnetômetro. No caso dos magnetômetros GMI analisados, a saída é dada em tensão elétrica, logo no sistema SI, a sensibilidade do magnetômetro é representada na unidade V/T, enquanto no sistema CGS, usa-se V/G, quando a grandeza referente é densidade do fluxo magnético. Já quando a grandeza em questão é intensidade de campo magnético, no sistema SI, a sensibilidade é representada na unidade (V·m)/A, ou V/Oe no sistema CGS.

Novamente referenciando-se ao VIM, o termo resolução possui a definição: “menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente”, com os adendos de que este termo pode depender do

valor da grandeza medida, mas também de fatores como ruído interno e externo do instrumento de medição. Vale evidenciar que magnetômetros GMI são sensíveis a campos magnéticos externos variáveis, logo, considerando operação em regime senoidal permanente, a resolução depende fortemente da frequência de operação do instrumento. A maior limitação para resolução de magnetômetros GMI é o ruído $1/f$. Logo, para fins comparativos, há de se considerar a banda de frequência em que esta medida foi obtida. A resolução é estimada a partir da curva de ruído $1/f$, que representa a densidade espectral de ruído (em $T/\sqrt{\text{Hz}}$), na faixa de frequências de interesse.

O ambiente de medição do instrumento, utilizando blindagem magnética ou não, e o emprego de configuração gradiométrica dos magnetômetros também influenciam no valor da resolução, tendo que ser levada em consideração na comparação entre transdutores magnéticos.

2.2.2

Transdutor GMI Aichi

Os magnetômetros GMI comerciais da fabricante Aichi Micro Technology são baseados na variação do módulo da impedância elétrica do elemento sensor. Capazes de medir densidades de fluxo magnético na ordem dos nT, satisfazem as necessidades de medição do instrumento projetado nesta dissertação. Pelo fato de serem baratos e possuírem pequena área de sensibilidade (aproximadamente 13,5 mm de comprimento por 1,2 mm de largura), estes sensores também se adequam ao propósito de implementação em larga escala de um transdutor portátil completo para a localização de corpos estranhos metálicos diamagnéticos no corpo humano [22].

Além de medirem somente a componente espacial do mensurando cuja direção é paralela ao comprimento do elemento sensor, magnetômetros da fabricante Aichi são transdutores completos, ou seja, o elemento sensor é integrado a um circuito elétrico de alimentação e oscilador auxiliar para o caso de modelos de transdutores com um único elemento sensor ou entradas para osciladores externos para o caso de modelos com mais de um elemento sensor. O transdutor também apresenta um filtro analógico para rejeição de campos magnéticos constantes e uniformes (frequência de corte de 0,1 Hz), como o campo geomagnético, sendo sensível a campos magnéticos alternados. Este fato viabiliza a simplificação do sistema de excitação do sistema de medição, já que a não há a necessidade de um campo magnético de polarização constante (caso de

sensores GMR e Efeito Hall). Assim, o sistema de excitação é mais compacto e opera com baixo nível de tensão auto-induzida sobre seus terminais [22].

O modelo escolhido, *MI-CB-1DJ-M-B*, é um magnetômetro escalar, sensível à componente espacial do mensurando paralela ao comprimento do elemento sensor. Possui uma banda de frequência compreendida entre 0,1 Hz e 10 kHz. Sua resolução é limitada principalmente pelo ruído do tipo 1/f (*flicker noise*), caracterizado por uma densidade espectral de ruído no ar de 10 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ na frequência de 1 Hz, estimando-se uma resolução analógica entre 0,3 nT e 1 nT, em uma região de operação linear simétrica de $\pm 1 \mu\text{T}$, apresentando uma sensibilidade típica de 5 V/T. As principais especificações técnicas do magnetômetro são caracterizadas na Tabela 3, de acordo com sua folha de dados [22].

Tabela 3 – Especificações Técnicas do Sensor Aichi Modelo MI-CB-1DJ-M-B

| Parâmetro | Condição de Medição | Valores | | | Unidade |
|--|---|---------|-----------|----------|---------------------------|
| | | Mínimo | Típico | Máximo | |
| Tensão de alimentação | — | -0,3 | 15 | 20 | V |
| Temperatura de operação | — | -20 | — | 50 | — |
| Tensão de saturação de saída | Onda senoidal de 1 Hz com módulo de 1 μT | — | 14,9 | — | V |
| Tensão de saída normal | 0 μT | 6,4 | 7,1 | 7,8 | V |
| Corrente de Operação | 0 μT , sem carga | — | 16 | — | mA |
| Faixa de detecção linear | $\pm 30 \mu\text{T}$ (Campo CC) | — | $\pm 1,0$ | — | μT |
| Resposta em frequência | -3 dB | 0,1 | — | 10000 | Hz |
| Densidade de Ruído | No ar, 1 Hz | — | 10 | — | 10 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| Faixa de Operação Linear | No ar, $\pm 30 \mu\text{T}$ (Campo DC) | -1 | — | +1 | μT |
| | | -10 | — | +10 | mO _e |
| Resolução de Banda Cheia (Ruído pico a pico) | No ar, 1 Hz | — | $\pm 0,3$ | 1 | nT |
| | | — | ± 3 | ± 10 | μO_e |
| Sensibilidade | No ar, 10 Hz | 4,5 | 5 | 5,5 | V/ μT |
| | | 0,45 | 0,5 | 5,5 | V/mOe |

As limitações para a resolução do magnetômetro são interferências eletromagnéticas provenientes de fontes externas, além do ruído intrínseco do próprio circuito eletrônico de alimentação e leitura do sensor GMI (efeito Joule e principalmente ruído tipo 1/f).

Este magnetômetro já foi utilizado em trabalhos anteriores implementados pela equipe do Laboratório de Biometrologia da PUC-RIO [8,9,23], visando otimizar a resolução de um sistema de detecção de corpos estranhos metálicos não-ferromagnéticos. Nestes trabalhos, adotou-se a frequência de operação de 8 kHz, e para otimizar a relação sinal-ruído, empregou-se um filtro passa-banda analógico Butterworth de quarta ordem baseado na topologia de dois filtros Sallen-

Key em cascata, centrado na frequência de operação do instrumento. As simulações e ensaios experimentais deste sistema indicou uma melhoria considerável da resolução do sistema de medição, para o valor de 25 pT [23], sendo este o valor considerado como a menor densidade de fluxo magnético mensurável por este modelo de sensor GMI operando na frequência específica de 8 kHz.

2.2.3

Sensor GMI baseado em Fitas Amorfas

Trabalhos e pesquisas realizadas no Laboratório de Biometrologia (LaBioMet) e no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento em Eletrônica (LPDE) da PUC-Rio visam explorar as características de sensibilidade e resolução espacial de magnetômetros GMI, desenvolvendo instrumentos para aplicação nas áreas da biometrologia e biomedicina, como transdutores para medição de pressão arterial e localização de corpos estranhos metálicos ferromagnéticos e diamagnéticos, além de desenvolver um método automático para caracterizar a variação de módulo e fase de amostras GMI conforme os mais diversos parâmetros de influência [5-10, 24-26].

Estes instrumentos foram desenvolvidos com a aplicação do efeito AGMI e características do efeito GMI de fitas amorfas fornecidas pela UFPE (Universidade Federal do Pernambuco) que, devido a sua composição e processo de manufatura, operam conforme o princípio da LMI (magneto impedância gigante longitudinal), caracterizado por uma elevada variação da impedância do material GMI devida à influência de um campo magnético externo com direção longitudinal ao seu comprimento [6,7].

Trabalhos implementados pelo LaBioMet demonstraram que transdutores baseados na variação de fase da impedância das fitas GMI apresentaram elevada sensibilidade (250 V/nT), representando ganhos muito superiores aos protótipos baseados na variação do módulo da impedância, operando com alimentação de corrente alternada com frequências próximas de 100 kHz, possibilitando alcançar resoluções correspondentes a campos biomagnéticos [6].

A Tabela 4 ilustra sensibilidades típicas obtidas, de acordo com o comprimento da fita amorfa.

Tabela 4– Sensibilidade das fitas GMI em Relação à Variação da Fase e Magnitude da Impedância

| Comprimento das Fitas GMI (cm) | Sensibilidade | | Razão entre Variação de Fase e Magnitude |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------|--|
| | $\phi_{Z_{GMI}}$ (V/Oe) | $ Z_{GMI} $ (V/Oe) | |
| 1 | 69,36 | 0,84 | 82,57 |
| 3 | 483,48 | 13,64 | 35,45 |
| 5 | 550,80 | 39,48 | 13,95 |
| 15 | 887,91 | 108,95 | 8,15 |

2.3

Limites de Exposição a Campos Magnéticos

O sistema projetado para localização de corpos estranhos diamagnéticos no corpo humano é baseado na indução de correntes parasitas no mensurando, que produzam um campo magnético secundário que possa ser medido por um magnetômetro GMI com sensibilidade e resolução condizente com o processo. A fim de induzir correntes parasitas, um sistema de excitação produz um campo magnético alternado em regime permanente de energia (campo primário), com intensidade suficiente para que o campo secundário produzido pelas correntes parasitas seja percebido pelo sensor.

Um estudo teórico anterior [11] mostrou que o campo magnético secundário produzido pelas correntes parasitas possui ordem de grandeza muito menor (cerca de 10000 vezes) que o campo magnético primário. Considerando a resolução típica dos magnetômetros disponíveis, por exemplo 1 nT [17], o campo primário precisaria ter intensidade significativa, da ordem de 10 μ T ou superior, dependendo da configuração do instrumento.

Em paralelo, uma das principais premissas do sistema proposto é que o processo de medição seja feito de maneira inócua, de forma a não causar nenhum efeito adverso à saúde tanto no paciente quanto no corpo clínico. Assim, há a necessidade de se respeitar as diretrizes de exposição de seres humanos a campos eletromagnéticos variantes no tempo de baixa frequência, contida na faixa de 1 Hz até 100 kHz, conforme definido pelo documento ICNIRP GUIDELINES 2010 [12]. Campos eletromagnéticos de baixa frequência ([1 Hz, 100 kHz]), chamados de radiação não-ionizante, podem interferir na distribuição do potencial elétrico interno de sistemas fisiológicos humanos, devido à indução de Faraday de campos elétricos, gerando correntes elétricas e absorção de energia nos tecidos. A variação do potencial elétrico interno de órgãos depende da condutividade do tecido biológico em específico, assim como da intensidade e frequência do campo eletromagnético incidente [12].

Estas diretrizes são decorrentes de diversos estudos relativos à exposição de seres humanos a campos eletromagnéticos, levando em conta os potenciais efeitos nocivos à saúde causados por radiação eletromagnética não ionizante de baixa frequência. Aspectos relativos a possíveis efeitos adversos em sistemas fisiológicos distintos, como sistema endócrino, sistema nervoso central e periférico, estruturas musculares e visuais foram estudadas para a elaboração das diretrizes de segurança [12].

O documento considera que a permeabilidade magnética de tecidos vivos é igual à permeabilidade magnética do vácuo (considerada $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) e atesta que a exposição à grandeza é inócua quando as restrições básicas e, conseqüentemente, os níveis de referência da grandeza são respeitados [12].

As Tabelas 5 e 6 apresentam os níveis de exposição segura a um campo magnético de baixa frequência conforme os tipos de exposição ocupacional (Tabela 5) ou para o público em geral (Tabela 6). A intensidade da grandeza é dividida conforme faixas de frequências e representada em valores médios quadráticos (*RMS*), conforme o conceito das grandezas intensidade de campo magnético e densidade de fluxo magnético representadas segundo o sistema internacional de grandezas e unidades (ISQ e SI).

Tabela 5– Limites de exposição ocupacional segura a campos magnéticos de baixa frequência [12]

| Faixa de Frequências | Grandeza Magnética (Valor RMS) | |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | H (A/m) | B (T) |
| [1 Hz — 8 Hz] | $\frac{1,63 \times 10^5}{f^2}$ | $\frac{0,2}{f^2}$ |
| [8 Hz — 25 Hz] | $\frac{2,0 \times 10^4}{f}$ | $\frac{2,5 \times 10^{-2}}{f}$ |
| [25 Hz — 300 Hz] | $8,0 \times 10^2$ | $1,0 \times 10^{-3}$ |
| [300 Hz — 3 kHz] | $\frac{2,4 \times 10^5}{f}$ | $\frac{0,3}{f}$ |
| [3 kHz — 10 MHz] | 80 | $1,0 \times 10^{-4}$ |

Tabela 6 – Limites de exposição segura a campos magnéticos de baixa frequência para o público em geral [12].

| Faixa de Frequências | Grandeza Magnética (Valor RMS) | |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| | H (A/m) | B (T) |
| [1 Hz — 8 Hz] | $\frac{3,2 \times 10^4}{f^2}$ | $\frac{4,0 \times 10^{-2}}{f^2}$ |
| [8 Hz — 25 Hz] | $\frac{4,0 \times 10^3}{f}$ | $\frac{5 \times 10^{-3}}{f}$ |
| [25 Hz — 50 Hz] | $1,6 \times 10^2$ | $2,0 \times 10^{-4}$ |
| [50 Hz — 400 kHz] | $1,6 \times 10^2$ | $2,0 \times 10^{-4}$ |
| [400 kHz — 3 kHz] | $\frac{6,4 \times 10^4}{f}$ | $\frac{8,0 \times 10^{-2}}{f}$ |
| [3 kHz — 10 MHz] | 21 | $2,7 \times 10^{-5}$ |

A Figura 6 apresenta os limites de exposição para ambas as situações de exposição (ocupacional e pública) por meio da relação logarítmica entre frequência e módulo da densidade do fluxo magnético [12].

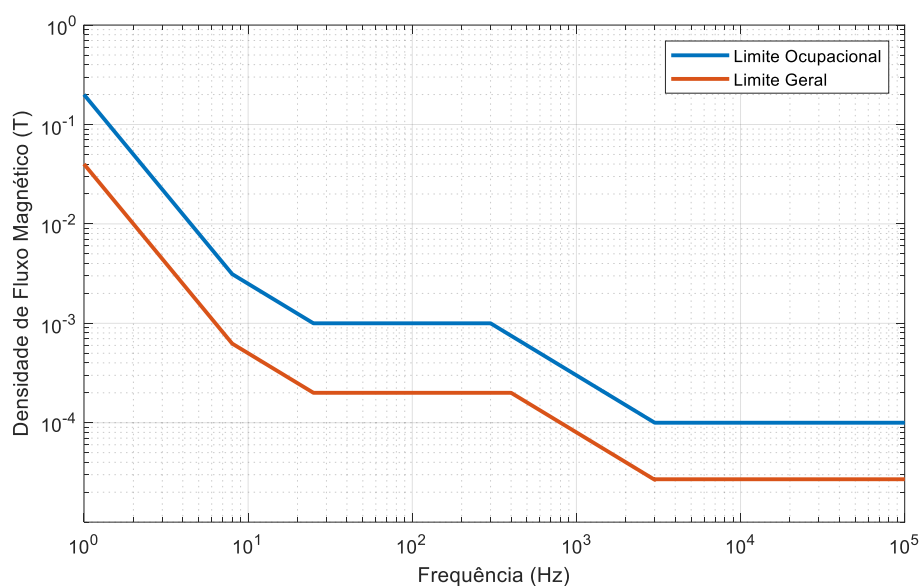


Figura 6 – Relação logarítmica entre módulo e frequência de campos magnéticos de baixa frequência para os limites de exposição [12].

De acordo com a faixa de operação dos magnetômetros GMI considerados para o instrumento proposto, modelo comercial AICHI (10 kHz) e fitas amorfas de material $C_oF_eS_iB$ (em torno de 100 kHz), estando o instrumento de medição rente ao plano da pele do paciente, o maior módulo possível para a densidade de fluxo magnético de excitação em relação à exposição ocupacional em valor médio quadrático (RMS) é de 100 μ T, enquanto que, em relação à exposição do público em geral, este valor é atenuado para 27 μ T.

3

Modelagem Computacional do Campo Primário

Este capítulo descreve a modelagem computacional implementada para simular o campo magnético primário gerado por condutores de geometria arbitrária, com correntes alternadas, com base na Lei de Biot-Savart. Apresenta ainda as diferentes alternativas de configurações de bobinas e solenoides que foram estudadas no decorrer da dissertação.

3.1

Lei de Biot-Savart

A Lei de Biot-Savart [27] é responsável pelo cálculo do vetor de indução magnética, ou densidade do fluxo magnético, em um ponto P do espaço devido à ação de uma corrente elétrica contínua que percorre um fio condutor C, como ilustrado na Figura 7.

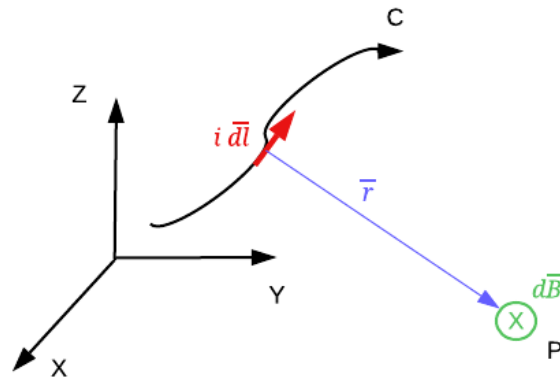


Figura 7 – Geometria para definição da Lei de Biot-Savart.

Considerando um elemento infinitesimal de corrente i na direção $d\vec{l}$, e o vetor \vec{r} que conecta este elemento ao ponto espacial de interesse P, o elemento infinitesimal de densidade de fluxo magnético é dado por

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3}, \quad (7)$$

onde μ_0 representa a permeabilidade magnética do meio.

Assim, integrando-se este elemento infinitesimal $d\vec{B}$ ao longo do condutor C que é percorrido pela corrente i , obtém-se a densidade de fluxo magnético total no ponto P, dada por

$$\vec{B} = \int_C \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3}, \quad (8)$$

Todas as simulações desta dissertação relativas à excitação do corpo estranho são implementadas conforme a Lei de Biot-Savart. A descrição de sua implementação computacional, assim como todas as distribuições espaciais da densidade de fluxo magnético relativas ao estágio de excitação, tanto na região do corpo estranho como na região do magnetômetro são demonstradas nas seções subsequentes deste capítulo.

3.2

Modelo Computacional para o Campo Magnético Primário

As simulações computacionais desta dissertação se destinam a demonstrar a distribuição espacial de ambas as grandezas físicas de interesse envolvidas no processo de medição (densidades de fluxo magnético primário e secundário), assim como a configuração das linhas magnéticas produzidas pelo estágio de excitação no ambiente de medição conforme seu campo vetorial. Esta seção descreve o modelo computacional para a densidade de fluxo magnético primário de acordo com a configuração do estágio de excitação. A modelagem do campo magnético secundário é descrita no Capítulo 4.

O software utilizado foi o Matlab, e desenvolveu-se um algoritmo baseado na descrição de intervalos numéricos fechados como uma sequência discreta de pontos uniformemente distribuídos. Desta forma, as informações sobre o processo de excitação são organizadas em formas de estruturas de dados numéricas matriciais bidimensionais e tridimensionais, em conformidade com a base de coordenadas cartesianas inerciais adotada para o sistema de medição, permitindo a produção de gráficos e tabelas de análise.

A análise destes dados permite modelar o processo de medição segundo a perspectiva da excitação do corpo estranho, o efeito da densidade de fluxo magnético primário na região do sensor e a respectiva densidade de fluxo magnético produzido pela indução de correntes parasitas no corpo estranho (descrita no Capítulo 4). Desta forma, é possível determinar a viabilidade do instrumento conforme sua proposição.

Para tal, aspectos construtivos e elétricos são levados em consideração nas simulações, assim como é correlacionada de forma comparativa a capacidade em medir corpos estranhos de configurações de instrumento distintas, provindas de combinações de parâmetros geométricos dos estágios de excitação e a direção do eixo de sensibilidade do sensor. As diretrizes metrológicas relativas à exposição segura de seres humanos à densidade de fluxo magnético também são consideradas nas rotinas de simulação.

A densidade de fluxo magnético primário emitido pelo estágio de excitação, quando percorrido por uma corrente elétrica, é calculada pela aplicação sucessiva da Lei de Biot-Savart em relação a uma determinada região espacial. Devido às pequenas dimensões das bobinas de excitação, na ordem de grandeza dos milímetros, e à baixa frequência de excitação do sistema (8 kHz), esta simulação não leva em conta os aspectos dinâmicos temporais da corrente de excitação alternada, modelando-a apenas pelo valor de sua amplitude.

Assim, a função responsável por calcular a distribuição unidimensional da densidade de fluxo magnético primário possui três termos de entrada, sendo estes descritos como estruturas de dados numéricos relativas ao par de bobinas de excitação, o módulo da corrente de excitação e a região onde se deseja obter o valor da densidade de fluxo magnético emitido pelo estágio de excitação. A resposta desta função é uma estrutura de dados descrita conforme uma matriz plana, contendo colunas que se referem ao valor da densidade de fluxo magnético primário segundo suas coordenadas espaciais e o seu módulo e linhas referentes a cada ponto espacial da região de interesse discretizada.

A fim de obter a matriz de resposta da função relativa ao cálculo da densidade do fluxo magnético emitido pelo estágio de excitação em uma região unidimensional do ambiente de medição, é necessário obter os pares de vetores relativos aos elementos de comprimento infinitesimais dos solenoides e seus respectivos raios em relação a todo o comprimento do espaço de monitoramento desejado, ou seja, os parâmetros vetoriais $d\vec{l}$ e \vec{r} que se combinam algebricamente como uma sucessão de produtos vetoriais ponderados e sintetizados segundo o processo de superposição descrito pela Lei de Biot-Savart. Estes parâmetros vetoriais provêm dos termos de entrada desta função.

O estágio de excitação é representado pelos seus condutores elétricos, dispostos em formatos de bobinas planares ou solenoides longos, como detalhado na seção 3.3. Visando à aproximação da integral descrita na equação (8) por um somatório discreto, estes condutores são descritos conforme uma distribuição discreta e uniforme de pontos espaciais representativos do espaço ocupado pelos solenoides no ambiente de medição em termos de suas coordenadas espaciais. Os valores destas coordenadas são obtidos segundo a combinação entre os parâmetros geométricos do estágio de excitação, como distância horizontal de separação entre os solenoides ou bobinas, número de espiras de cada solenoide ou bobina, assim como o tipo de enrolamento, espiral planar ou solenoide longo.

A fim de viabilizar uma distribuição de linhas de densidade de fluxo magnético primário quase circular, de forma a serem tênues na região do magnetômetro e elevadas na região do corpo estranho, como será demonstrado na seção 3.3, os enrolamentos das bobinas/solenoides devem ter sentidos opostos, portanto, os argumentos das funções trigonométricas que compõem as coordenadas do espaço ocupado pelo estágio de excitação devem possuir sinais distintos para cada solenoide ou bobina.

Caso o estágio de excitação seja composto por bobinas planares, as coordenadas espaciais do espaço ocupado pelas mesmas no ambiente de medição são descritas pela combinação entre raio interno e externo das bobinas e as funções trigonométricas relativas a cada coordenada, conforme a distribuição descrita por uma espiral de Arquimedes.

Já para o caso em que o estágio de excitação é composto por solenoides longos, as coordenadas espaciais são descritas em termos do raio constante dos solenoides e seus respectivos comprimentos, além das funções trigonométricas relativas às coordenadas espaciais.

Após todas as componentes estarem construídas conforme o sentido oposto de rolamento para cada solenoide, estas passam por uma transformação linear, sendo um processo de rotação em torno do eixo vertical do instrumento (eixo-z), com mesmo sentido da rotação de cada solenoide individual e em seguida por um processo de translação horizontal (em relação ao eixo-x), novamente em sentido oposto em relação a cada solenoide.

Esta sequência algébrica de processamento de coordenadas garante a simetria do instrumento de medição, sendo ambos os solenoides/bobinas simétricos em relação à origem do sistema de coordenadas. Considera-se também que o magnetômetro é configurado de forma simétrica em relação ao ambiente de medição, ou seja, suas coordenadas horizontais também são simétricas em módulo em relação à origem do sistema de coordenadas. Nas simulações abordadas, foram denominadas:

- Solenoide A: Sentido de rotação negativo, ou seja, horário e sentido de translação positivo, ou seja, à direita da origem do sistema, possui coordenadas relativas ao eixo horizontal (eixo-x) positivas
- Solenoide B: Sentido de rotação positivo, ou seja, anti-horário e sentido de translação negativo, ou seja, à esquerda da origem do sistema, possui coordenadas relativas ao eixo horizontal (eixo-x) negativos

A Figura 8 ilustra a discretização no caso dos solenoides longos.

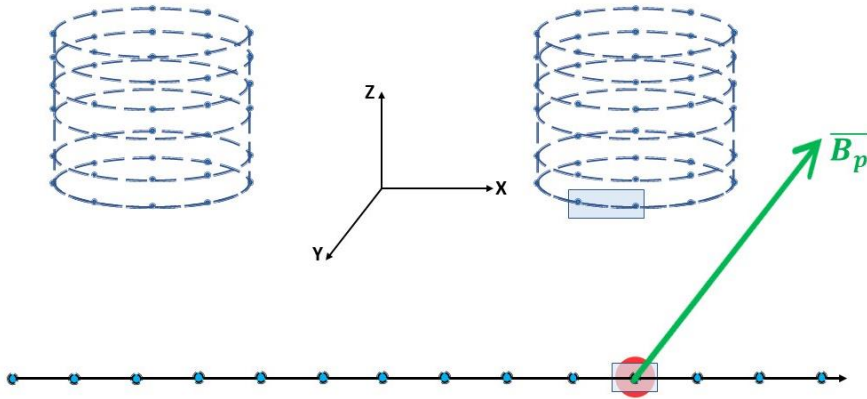


Figura 8 – Representação gráfica conceitual dos termos de entradas da função de cálculo da distribuição da densidade de fluxo magnético primário segundo a Lei de Biot-Savart. O eixo inercial de coordenadas espaciais é centrado na origem do sistema de medição, enquanto os solenoides são representações de pontos discretos, assim como o espaço de monitoramento. O vetor de cor verde é relativo ao vetor de indução magnética em um ponto onde se encontra o corpo estranho.

Tendo garantido a simetria espacial das coordenadas e consecutivamente a distribuição da densidade de fluxo magnético primário esperada pela concepção do instrumento, as coordenadas constituintes do espaço ocupado pelo estágio de excitação no ambiente de medição são dispostas conforme uma forma matricial plana, em que colunas são relativas às coordenadas espaciais e linhas as relativas aos pontos dos solenoides discretizado. A matriz representativa do estágio de excitação (L) é representada de forma sintetizada como

$$L = \left[\frac{L_B}{L_A} \right] = \frac{\begin{bmatrix} L_{B_1X} & L_{B_1Y} & L_{B_1Z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{B_mX} & L_{B_mY} & L_{B_mZ} \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} L_{A_1X} & L_{A_1Y} & L_{A_1Z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{A_mX} & L_{A_mY} & L_{A_mZ} \end{bmatrix}} \quad (9)$$

onde L_B refere-se ao solenoide B, L_A refere-se ao solenoide A e m é a quantidade de pontos discretizados em cada solenoide.

O parâmetro de entrada relativo à região de monitoramento unidimensional da densidade de fluxo magnético é descrito conforme em uma estrutura semelhante à matriz L , ou seja, as colunas são relativas às coordenadas espaciais enquanto as linhas correspondem a pontos discretizados de forma uniforme ao longo da região de monitoramento. A matriz representativa deste termo de entrada é apresentada de forma sintetizada como

$$E = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde n é a quantidade de pontos discretos compreendidos pelo intervalo fechado da região de monitoramento da distribuição da densidade de fluxo magnético primário. Por fim, o último termo de entrada desta função é uma constante representativa do valor da amplitude da corrente de alimentação dos solenoides, conforme seu valor em amperes (I).

3.3 Configurações de Excitação

Foram considerados, como estágio de excitação do sistema de localização de corpos estranhos metálicos, duas diferentes configurações, ilustradas na Figura 9, a saber:

- Configuração 1: um par de bobinas planares espirais, com raio interno de 5 mm e raio externo de 20 mm; e
- Configuração 2: um par de solenoides longas e verticais, com raio e comprimento de 20 mm.

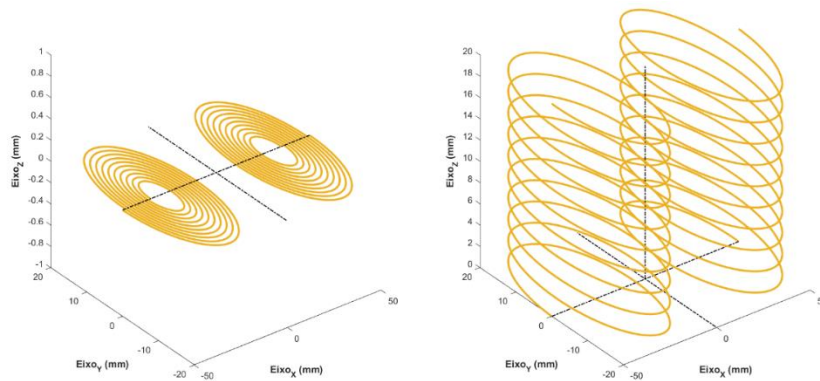


Figura 9 – (a) bobinas planares; (b) solenoides verticais

Estes parâmetros geométricos foram escolhidos por serem condizentes com as diretrizes biometrológicas de portabilidade e baixo custo consideradas na proposta de instrumento. Ambas as configurações contêm 10 espiras cada e estão horizontalmente espaçadas entre si por uma distância (DIH) de 20 mm, espaço suficiente para comportar o sensor GMI Aichi apresentado no Capítulo 2 (dimensões de 1,2 mm × 2 mm). Em ambos os casos, os sentidos dos enrolamentos das duas bobinas/solenoides são opostos, de modo a gerar um campo magnético quase horizontal na região do corpo estranho.

Os parâmetros geométricos semelhantes permitem comparar facilmente as densidades de fluxo magnético geradas pelas duas configurações. Considera-se

uma amplitude máxima para a corrente de excitação de 100 mA, compatível com as dimensões das bobinas (considerando que estas são constituídas por materiais condutores convencionais como o cobre).

A densidade de fluxo magnético primário gerada pelas duas configurações é analisada em termos de sua intensidade e distribuição espacial, considerando que o magnetômetro GMI estará localizado na posição $X=Y=Z=0$, em duas possíveis orientações, horizontal e vertical, sempre alinhado com a base das bobinas ou solenoides. O objetivo do projeto do estágio de excitação é maximizar o campo magnético primário na região do corpo estranho (localizado alguns centímetros abaixo do sensor) e minimizar o campo magnético na região e orientação do magnetômetro, evitando assim sua saturação.

A seguir, apresentam-se, conjuntamente para as duas configurações consideradas, de modo a facilitar a comparação, diversos aspectos relacionados ao campo magnético primário.

Inicialmente, considera-se como corpo estranho uma esfera metálica diamagnética com raio de 2,5 mm localizada a 50 mm de profundidade, disposta no eixo central longitudinal do instrumento (eixo-z), suposta região em que as linhas de campo magnético de excitação atingem o mensurando de forma horizontal. Por considerações de simetria, descartou-se a componente Y da densidade de fluxo magnético primário, e a Figura 10 apresenta o módulo desta densidade considerando somente as componentes no plano XZ.

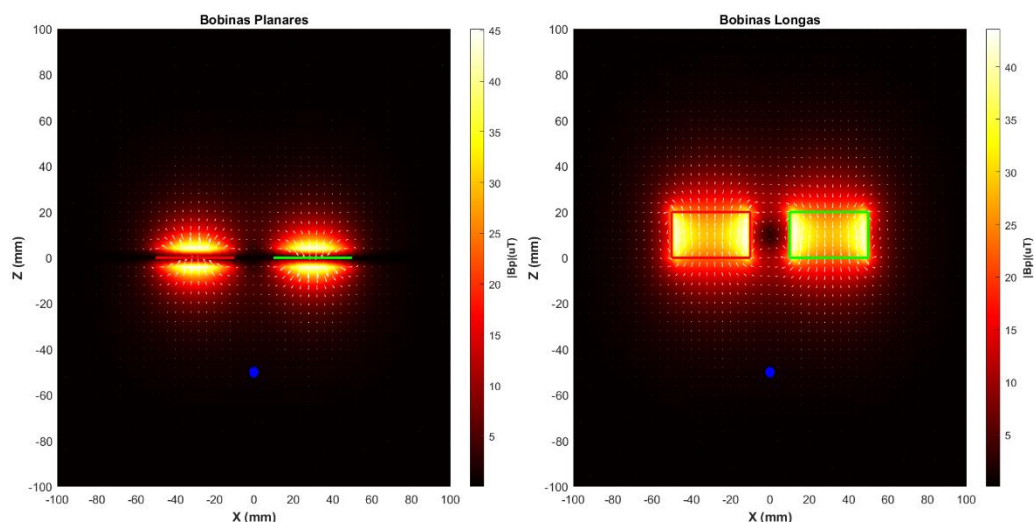


Figura 10 – Campo vetorial da densidade do fluxo magnético gerado pelos estágios de excitação e perfis dos elementos de atuação e do corpo estranho. O gráfico à esquerda é relativo à distribuição gerada pelo estágio que aborda bobinas planares, enquanto o gráfico da distribuição à direita é relativo ao estágio de excitação abordando bobinas longas

Os mapas do módulo da densidade de fluxo magnético primário no plano XZ demonstram que, como esperado, essa grandeza não é uniforme no espaço de medição. Constata-se que a densidade de fluxo magnético possui maior intensidade na proximidade das bobinas, cujas cores verde e vermelho distinguem o sentido da corrente.

Percebe-se que há uma grande atenuação da intensidade da densidade de fluxo magnético primário conforme o aumento da distância entre a região de medição de interesse e a região ocupada pelas bobinas. A intensidade do campo magnético primário decai menos com a profundidade para a Configuração 2 do que para a Configuração 1. Ambas as configurações são capazes de gerar densidade de fluxo magnético com intensidade maior do que $40 \mu\text{T}$ na proximidade ou interior das bobinas, porém, para a posição do corpo estranho em questão, este valor é reduzido para faixas de valores menores do que $5 \mu\text{T}$.

Para facilitar a visualização do campo vetorial, o mesmo foi normalizado em relação a sua intensidade, permitindo melhor distinguir o comportamento das linhas de fluxo magnético que se encontram em regiões distantes dos atuadores, conforme apresentado na Figura 11.

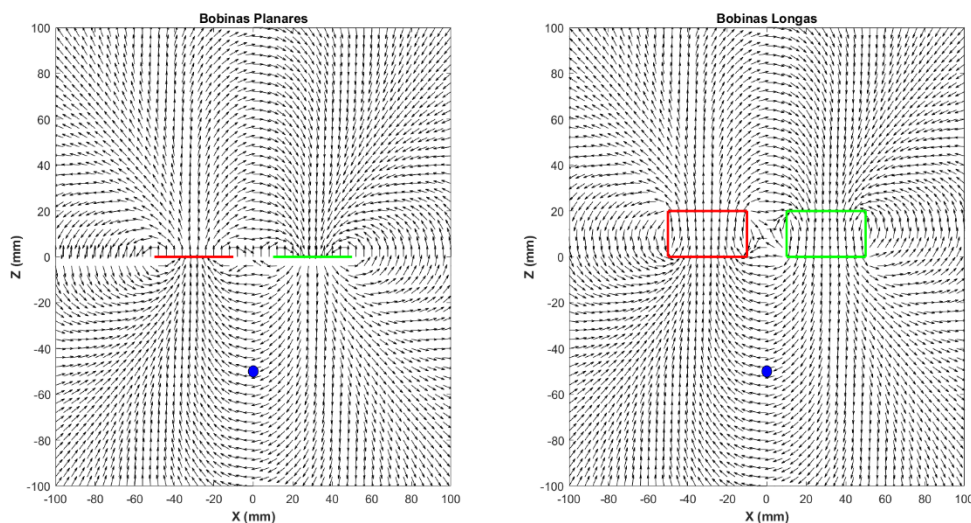


Figura 11 – Campo vetorial normalizado da densidade do fluxo magnético gerado pelos estágios de excitação. À esquerda, o gráfico é relativo ao estágio de excitação que aborda bobinas planares, enquanto à direita, o gráfico é relativo a estágio de excitação que aborda bobinas longas

Na Figura 11, pode-se constatar que as linhas de fluxo magnético são praticamente horizontais na região do eixo central longitudinal ($X=0$) do instrumento. Em relação à região ocupada pelo magnetômetro GMI, para a Configuração 1, as linhas de fluxo magnético praticamente se cancelam na região horizontal delimitada entre as bobinas, considerando ambas as componentes. Já para a Configuração 2, a componente Z da densidade de fluxo magnético primário

(B_{pz}) se cancela, mas o mesmo não ocorre para a componente X (B_{px}). No caso do sensor GMI também orientado na direção X, esta componente B_{px} deverá ser mantida com módulo sempre menor do que o valor máximo da faixa de operação linear do sensor GMI abordado, especificado pela sua folha de dados como $1 \mu\text{T}$.

Para efeito do cálculo do campo magnético secundário, gerado pelas *eddy currents* induzidas no corpo estranho, conforme será apresentado no Capítulo 4, considera-se somente a componente X do campo magnético primário. Assim, as análises aqui apresentadas também consideram somente esta componente.

3.3.1

Campo Magnético Primário na Região do Corpo Estranho

A fim de melhor analisar a intensidade da densidade de fluxo magnético primário na região do corpo estranho, foram feitas varreduras unidimensionais em retas paralelas ao eixo X e $Y=0$, para diversas profundidades em relação à base das bobinas de excitação. Três (3) profundidades distintas foram analisadas: 20 mm, 30 mm e 60 mm. A Figura 12 apresenta a componente B_{px} para estas três profundidades.

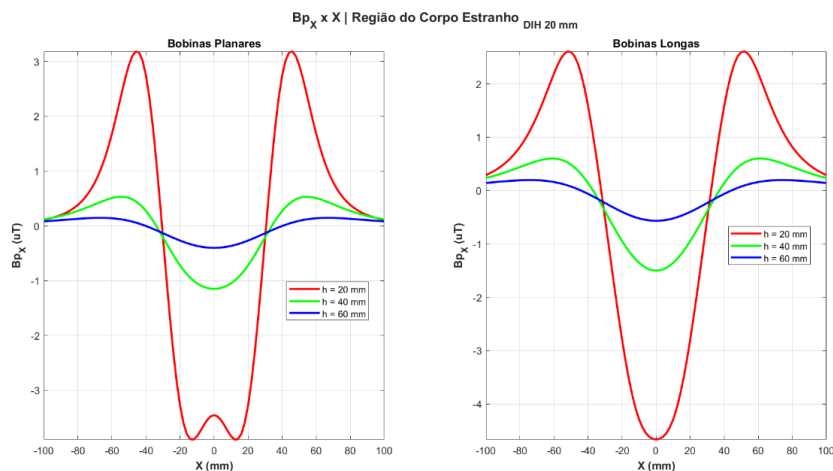


Figura 12 – Densidade de fluxo magnético primário ao longo do eixo-x para três profundidades distintas: $h = 20 \text{ mm}$ (curva vermelha), $h = 40 \text{ mm}$ (curva verde) e $h = 60 \text{ mm}$ (curva azul), as curvas à esquerda são relativas ao estágio de excitação que aborda bobinas planares, enquanto as curvas à direita são relativas ao estágio de excitação que aborda bobinas longas

Percebe-se um comportamento tripolar da densidade de fluxo magnético primário para quase todos os cenários de medição abordados, com simetria em relação à origem do eixo X. O sentido do fluxo magnético se alterna ao longo do eixo X, havendo dois picos simétricos positivos e um negativo mais acentuado, na região sob o eixo central longitudinal do instrumento, onde que se percebe que a componente considerada como termo de excitação possui maior intensidade, como esperado de acordo com a Figura 10.

Apenas para o caso da Configuração 1, com a profundidade de 20 mm, o acentuado pico negativo não é máximo na região central, possuindo valores máximos simétricos em sua vizinhança, porém seu valor central em módulo não se diferencia muito destes valores mencionados.

Para uma mesma profundidade e posição do mensurando percebe-se que os valores em módulo produzidos por estágios de excitação compostos por bobinas longas são maiores do que os valores em módulo produzidos por estágios de excitação envolvendo bobinas planares.

A Tabela 7 apresenta os valores centrais para a densidade do fluxo magnético nos cenários de medição abordados.

Tabela 7 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} ao longo do eixo central longitudinal para diferentes profundidades do corpo estranho em relação às bobinas de excitação.

| Profundidade h | Configuração 1 | Configuração 2 |
|----------------|--------------------|--------------------|
| 20 mm | 3,45 μT | 4,67 μT |
| 40 mm | 1,15 μT | 1,50 μT |
| 60 mm | 0,40 μT | 0,57 μT |

Com a corrente com amplitude de 100 mA, é possível se atingir um valor maior do que 4,5 μT em módulo para a densidade de fluxo magnético primário a 20 mm de profundidade com a Configuração 2 (solenoides verticais) e um valor próximo de 3,5 μT com a Configuração 1.

Em seguida, a Figura 13 apresenta o comportamento com a profundidade do valor máximo da densidade de fluxo magnético primário, para as duas configurações de excitação.

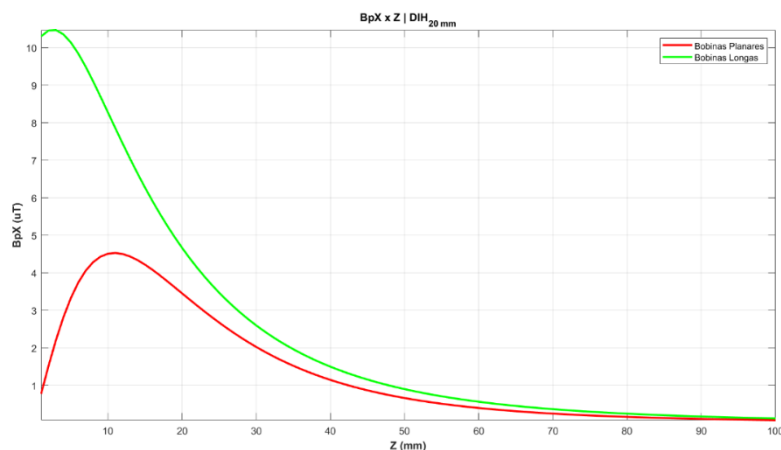


Figura 13 – Comportamento do valor máximo da densidade de fluxo magnético primário ao longo do eixo-z, a curva verde é relativa ao estágio de excitação que aborda bobinas longas, enquanto a curva vermelha é relativa ao estágio de excitação que aborda bobinas planares

Percebe-se valores mais acentuados para a Configuração 2 do que para a Configuração 1. Ainda, para a Configuração 1, há uma redução significativa do valor máximo para profundidades menores que 10 mm, devido ao comportamento das linhas de fluxo magnético na região próxima às bobinas planares mas entre as mesmas (onde o campo se anula). Esta redução não é observada para a Configuração 2, com os solenoides verticais, que geram linhas de fluxo mais uniformes. Para profundidades até 40 mm, ambas as configurações apresentam valores superiores a $1 \mu\text{T}$, que se atenua para a ordem de décimos de microtesla para profundidades entre 50 mm e 100 mm.

A fim de melhor caracterizar a distribuição espacial da densidade de fluxo magnético primário, uma simulação do comportamento desta grandeza sobre o plano horizontal XY foi realizada para três profundidades do corpo estranho: 20 mm, 40 mm e 60 mm, para ambas as configurações de excitação. Estas simulações são apresentadas nas Figuras 14 a 19, em três diferentes visualizações: tridimensional, vista lateral e vista superior.

As figuras 14 e 15 apresentam, respectivamente para as Configurações 1 e 2, os mapas bidimensionais da densidade de fluxo magnético primário B_{px} no plano XY para $Z = 20$ mm.

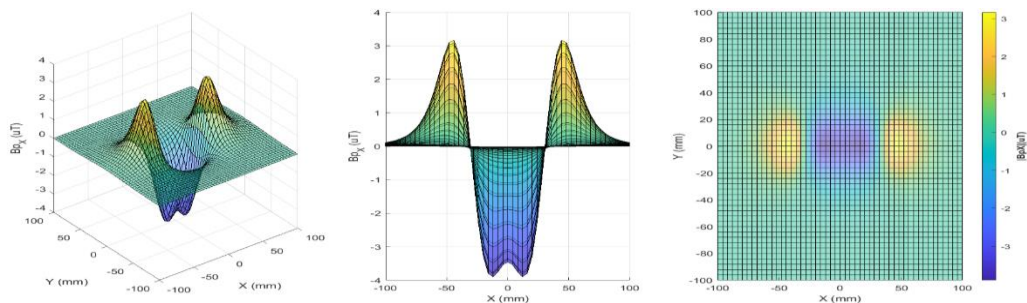


Figura 14 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 20 mm, gerada pela Configuração 1 (bobinas planares).

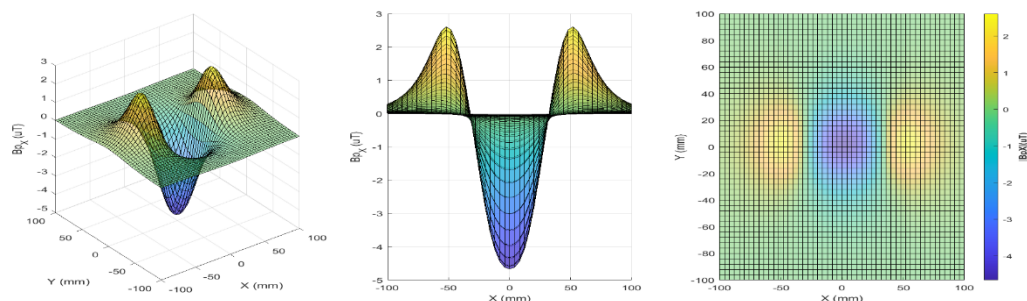


Figura 15 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 20 mm, gerada pela Configuração 2 (solenoides verticais).

Em seguida, as figuras 16 e 17 apresentam, respectivamente para as Configurações 1 e 2, os mapas bidimensionais da densidade de fluxo magnético primário B_{px} no plano XY para $Z = 40$ mm.

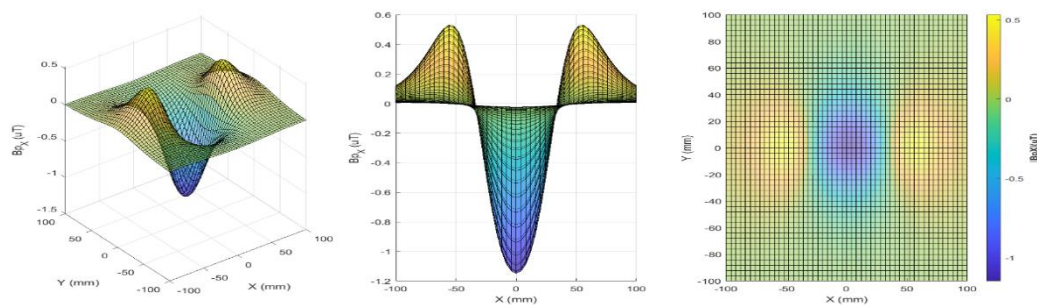


Figura 16 – Densidade de fluxo magnético primário B_{p_x} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 40 mm, gerada pela Configuração 1 (bobinas planares).

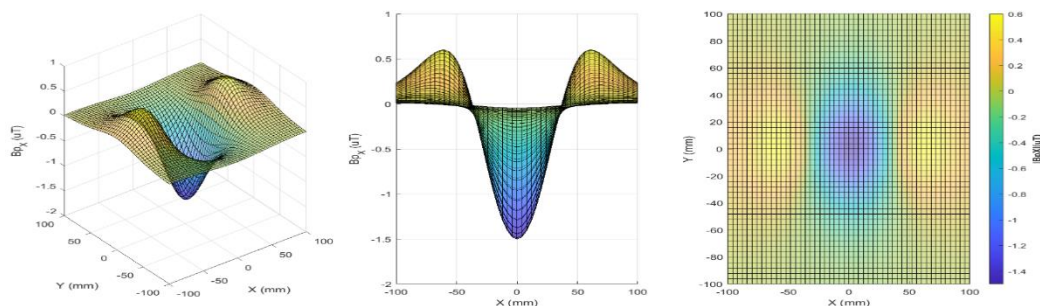


Figura 17 – Densidade de fluxo magnético primário B_{p_x} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 40 mm, gerada pela Configuração 2 (solenoides verticais).

Finalmente, as figuras 18 e 19 apresentam, respectivamente para as Configurações 1 e 2, os mapas bidimensionais da densidade de fluxo magnético primário B_{p_x} no plano XY para $Z = 60$ mm.

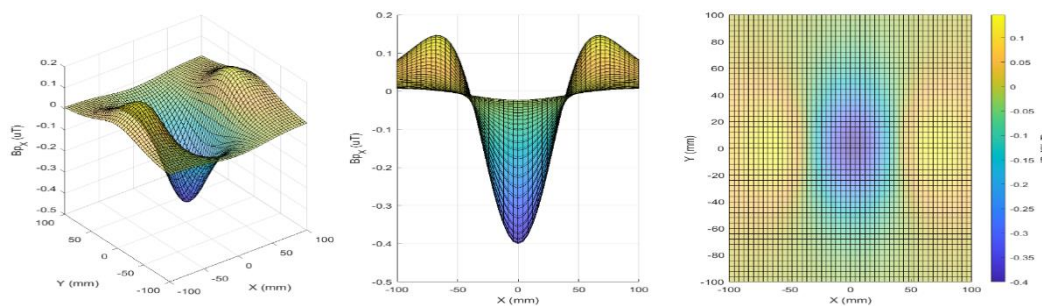


Figura 18 – Densidade de fluxo magnético primário B_{p_x} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 60 mm, gerada pela Configuração 1 (bobinas planares).

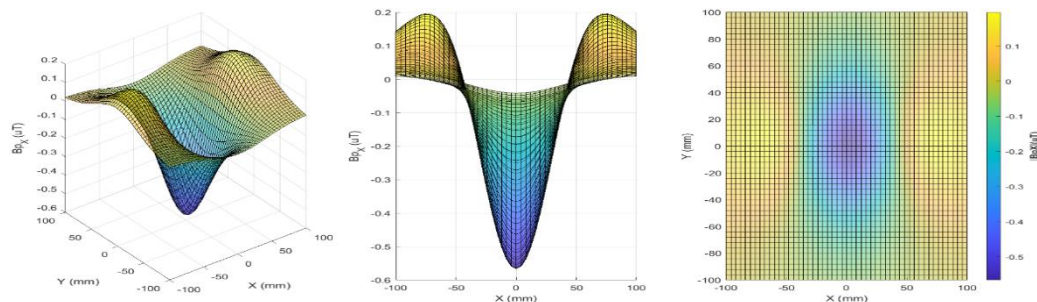


Figura 19 – Densidade de fluxo magnético primário B_{p_x} no plano horizontal (plano xy), a uma profundidade de 60 mm, gerada pela Configuração 2 (solenoides verticais).

Nas figuras 14 a 19, pode-se perceber que a densidade de fluxo magnético primário, empregado para excitação do corpo estranho, é simétrica tanto em relação quanto ao eixo X quanto ao eixo Y.

Percebe-se também que, quanto mais profunda a posição do corpo estranho em relação ao instrumento, maior é a razão entre os módulos do pico de valor negativo em relação aos picos de valor positivo adjacentes. ~~mais proeminente~~

3.3.2

Campo Magnético Primário na Região do Magnetômetro

Tendo avaliado o comportamento da densidade de fluxo magnético primário na região do corpo estranho para ambas as configurações de excitação (bobinas planares e solenoides verticais), é necessário também avaliar o comportamento deste campo primário na região do sensor, considerando as duas possíveis orientações para o eixo de sensibilidade do sensor: alinhada ao eixo X (sensor em posição horizontal, no plano XY) e alinhada ao eixo Z (sensor em posição vertical, no plano XZ).

A Figura 20 apresenta o sensor na posição horizontal, alinhado com o eixo X, e posicionado em relação a ambas as configurações de excitação.

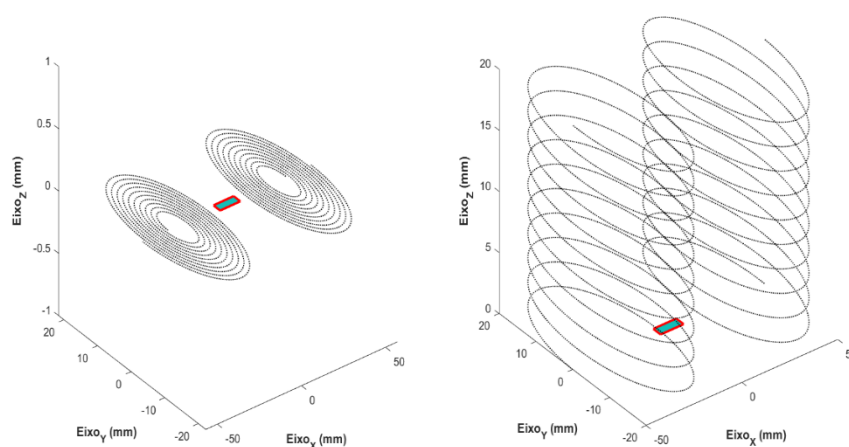


Figura 20 – Conceito de medição com sensor em posição horizontal, coplanar ao plano xy, para as Configurações 1 (esquerda) e 2 (direita).

Neste cenário, o magnetômetro está sensível à componente X do campo magnético primário (B_{px}). A Figura 21 apresenta os mapas bidimensionais deste campo na região do magnetômetro (cujo elemento sensor tem aproximadamente 13 mm de comprimento e 1 mm de largura), novamente considerando uma corrente de excitação de 100 mA para ambas as configurações.

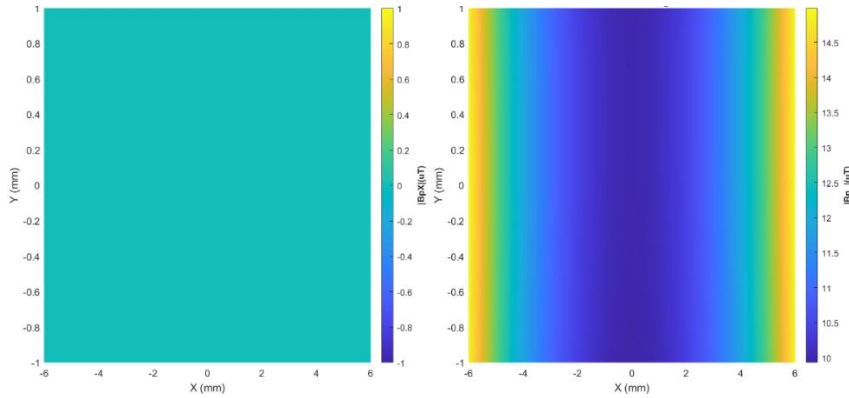


Figura 21 – Distribuição espacial da densidade de fluxo magnético primário na região do sensor, na posição horizontal e alinhado com o eixo X, para as Configurações 1 (esquerda) e 2 (direita).

Observa-se que, para este nível de corrente de alimentação (100 mA), configurações geométricas das bobinas de excitação e espaçamento horizontal (20 mm), o sistema baseado na Configuração 1 é capaz de manter o sensor GMI em sua faixa de operação linear, já que a densidade do fluxo magnético sobre toda a extensão da região do elemento sensor é nula, pela simetria da configuração.

Já no caso da Configuração 2 (solenoides verticais), há um valor residual desta componente B_{p_x} na região do sensor, como ilustrado na Figura 13. Percebe-se a simetria do campo magnético em relação à direção de sensibilidade do sensor (comprimento), sendo este mínimo na região central do sensor. Contudo, para este nível de corrente elétrica de alimentação dos solenoides (100 mA), os níveis da densidade de fluxo magnético incidente na região do sensor são maiores do que o valor de saturação do sensor GMI (1 μ T, conforme a folha de dados). Neste caso, mantendo-se as configurações geométricas do sistema de excitação, há a necessidade de diminuir a corrente de alimentação das bobinas para que o sensor opere em sua região linear.

Em seguida, a Figura 22 apresenta o sensor GMI em posição vertical, representado pela forma geométrica retangular cujas arestas são vermelhas.

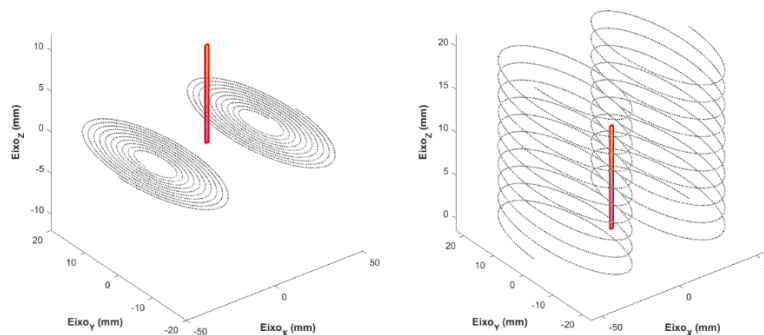


Figura 22 – Conceito de medição com sensor em posição vertical, coplanar ao plano x, para as Configurações 1 (esquerda) e 2 (direita).

Neste cenário, o magnetômetro está sensível à componente Z do campo magnético primário (B_{pz}). A Figura 23 apresenta os mapas bidimensionais deste campo na região do magnetômetro (cujo elemento sensor tem aproximadamente 13 mm de comprimento e 1 mm de largura), novamente considerando uma corrente de excitação de 100 mA para ambas as configurações.

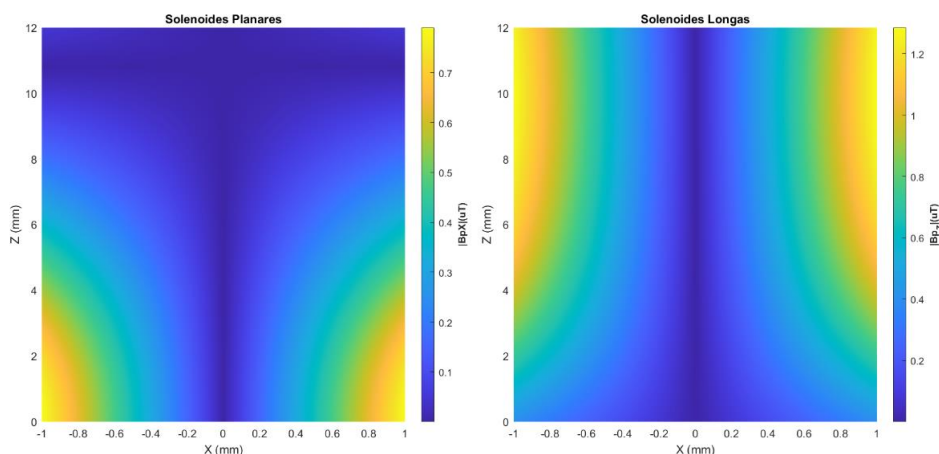


Figura 23 – Distribuição espacial da densidade de fluxo magnético primário na região do sensor, estando este na posição vertical e alinhado com o eixo Z nas duas configurações de excitação.

Observa-se que, para este nível de corrente de alimentação (100 mA), configurações geométricas das bobinas de excitação e espaçamento horizontal (20 mm), o sistema baseado na Configuração 1 é capaz de manter o sensor GMI em sua faixa de operação linear, já que a densidade de fluxo magnético sobre toda a extensão fica sempre dentro da faixa de operação linear do sensor ($\pm 1 \mu\text{T}$).

Já em relação à Configuração 2 (solenoides verticais), o valor máximo da densidade de fluxo magnético primário excede ligeiramente os limites da faixa de operação linear do sensor GMI abordado. Neste caso, mantendo-se a configuração geométrica e espacial dos atuadores, há a necessidade de se diminuir o nível da corrente de alimentação para que o instrumento de medição opere de forma linear.

A tabela 8 apresenta os valores máximos da densidade de fluxo magnético na região do elemento sensor em cada cenário de medição analisado.

Tabela 8 – Densidade de fluxo magnético primário B_{p_x} máximo na região do sensor GMI para ambas as Configurações de excitação e ambas as orientações do sensor.

| Orientação do Sensor GMI | Configuração 1 (Bobinas Planares) | Configuração 2 (Solenoides Verticais) |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Horizontal (eixo X) | 0 μT (100 mA) | 14,99 μT (100 mA) |
| Vertical (eixo y) | 0,79 μT (100 mA) | 1,28 μT (100 mA) |

A fim de levar o instrumento com a Configuração 2 de excitação a operar na região de operação linear, mantendo os parâmetros geométricos e disposição

espacial, atenua-se a corrente de alimentação de acordo com a orientação do sensor GMI, horizontal ou vertical. Ou seja, para o sensor horizontal (orientação na qual a componente da densidade de fluxo magnético primário possui maior intensidade), a corrente elétrica de 100 mA precisa ser atenuada em 15 vezes, para 6,7 mA, enquanto que para o sensor vertical, a corrente deve ser atenuada em 30 %, para 70 mA.

A Tabela 9 apresenta, assim, novo cenário de valores máximos de densidade de fluxo magnético para os diversos casos considerados.

Tabela 9 – Densidade de fluxo magnético primário B_{px} máximo na região do sensor GMI para ambas as Configurações de excitação e ambas as orientações do sensor, após o ajuste das correntes de excitação.

| Orientação do Sensor GMI | Configuração 1 (Bobinas Planares) | Configuração 2 (Solenoides Verticais) |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Horizontal (eixo X) | 0 μ T (100 mA) | 0,99 μ T (6,7 mA) |
| Vertical (eixo Z) | 0,79 μ T (100 mA) | 0,90 μ T (70 mA) |

Contudo, apesar da atenuação da corrente para a Configuração 2 garantir que o sensor GMI trabalhe na região linear, a densidade de fluxo magnético primário incidente no corpo estranho também é atenuada, reduzindo por sua vez o campo magnético secundário a ser medido pelos magnetômetros.

A Figura 24 é similar à Figura 13, apresentando o comportamento com a profundidade do valor máximo da densidade de fluxo magnético primário, para as duas Configurações de excitação e, para a Configuração 2, considerando as duas possíveis orientações do sensor GMI.

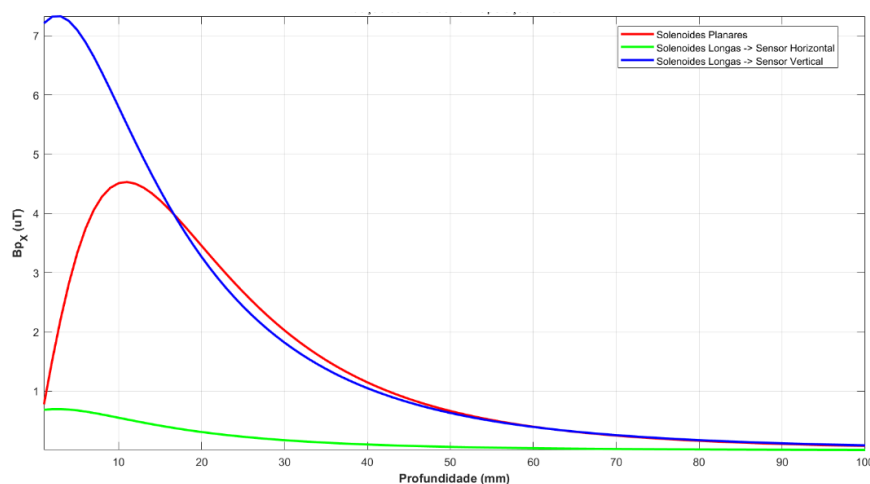


Figura 24 – Comportamento do valor máximo da densidade de fluxo magnético primário ao longo do eixo-z. A curva vermelha corresponde à Configuração 1 (corrente de 100 mA); a curva azul corresponde à Configuração 2 com o sensor GMI vertical (corrente de 70 mA); a curva verde corresponde à Configuração 2 com o sensor GMI horizontal (corrente de 6,7 mA)

Percebe-se que a redução na densidade de fluxo magnético primário na região do corpo estranho é proporcional à atenuação da corrente elétrica, para o caso da Configuração 2. Ou seja, devido à menor atenuação (30 %, corrente de 70 mA), a situação com o sensor alinhado com o eixo Z proporciona maior capacidade de medição do que a situação com o sensor alinhado com o eixo X (corrente de 6,7 mA), pois a intensidade do campo magnético secundário gerado pelas *eddy currents* é diretamente proporcional à intensidade do campo magnético primário, e esta é diretamente proporcional à intensidade da corrente de excitação. No caso da Configuração 1, apesar da corrente ser de 100 mA, o campo primário de excitação é menor que o caso da Configuração 2 com corrente de 70 mA, devido ao cancelamento do campo na região próxima às bobinas planares, mas ambas as Configurações têm um campo primário muito similar para profundidades acima de aproximadamente 20 mm.

Para profundidades menores que aproximadamente 20 mm, a Configuração 2 (solenoides longos) com o sensor vertical é a alternativa mais apta a implementar maiores níveis de excitação para o corpo estranho. A partir desta profundidade, a Configuração 1 (bobinas planares) é a alternativa capaz de aplicar a maior excitação ao corpo estranho, com intensidades ligeiramente maiores do que os produzidos pelo anterior. Esta tendência perdura até uma profundidade de cerca de 70 mm. A partir desta profundidade, até a máxima profundidade analisada para a disposição do corpo estranho (100 mm), a Configuração 2 com sensor vertical possui maior capacidade de produzir densidade de fluxo magnético primário na região do corpo estranho, porém a diferença para a Configuração 1 fica na ordem dos centésimos de microteslas. Esta diferença pode ser considerada irrelevante em vista do modelo de campo magnético gerado por indução de correntes parasitas no corpo estranho, de forma que se conclui que, em vista da relação entre capacidade de excitação e capacidade do sensor em operar de forma linear, a Configuração 1 (bobinas planares) é a mais adequada como estágio de excitação dos corpos estranhos metálicos.

Percebe-se também a suplantação da limitação relativa ao conceito de medição previamente desenvolvido anteriormente pela equipe do Laboratório de Biometrologia da PUC-RIO [9]. Naquele projeto anterior, pela configuração do instrumento, os estágios de excitação e medição eram acoplados, fazendo que o maior módulo de densidade de fluxo magnético de excitação do corpo estranho fosse limitado pelo valor limítrofe da região de operação linear do sensor GMI (1 μ T). Neste quesito, a Configuração 1, com bobinas planares, para qualquer

orientação do sensor GMI, produz valores de excitação do mensurando maiores do que $1 \mu\text{T}$ para todas as profundidades menores que aproximadamente 40 mm, enquanto a densidade de fluxo magnético primário na região do sensor GMI permanece dentro da faixa de medição linear. Este fato caracteriza a viabilidade do novo conceito de medição apresentado, obtendo-se maiores níveis de correntes parasitas no corpo estranho, que conseqüentemente tendem a produzir níveis de campo magnético secundário maiores do que os obtidos pela arquitetura de medição desenvolvida previamente abordando sensores GMI, para qualquer profundidade do corpo estranho em relação às bobinas de excitação.

3.3.3

Otimização da Configuração de Excitação 1 com Sensor GMI Horizontal

No caso da Configuração 1 (bobinas planares) com o sensor GMI horizontal, verificou-se que não há limite para a intensidade de corrente elétrica, pois a densidade de fluxo magnético primário B_{px} na região do sensor é sempre nula, pela simetria da configuração. Neste caso, os limites físicos e elétricos desta configuração de excitação dependem dos diâmetros não negligenciáveis dos fios condutores dos solenoides, da capacidade de fornecimento de corrente elétrica do circuito de alimentação dos solenoides (a ser composto por uma fonte de tensão ou corrente conectada em série com um resistor), da capacidade de corrente do condutor, dependendo do diâmetro deste em acordo com a tabela AWG (*American Wire Gauge*), além dos limites de exposição à radiação magnética não ionizante definidos pela ICNIRP.

Considerando inicialmente este último aspecto, de acordo com a seção 2.3 desta dissertação, foi constatado que o limite de exposição ocupacional para o módulo da densidade de fluxo magnético alternado na faixa de frequência de excitação do sistema (8 kHz), é de $100 \mu\text{T}$ RMS, o que corresponde a um valor aproximado de $140 \mu\text{T}$ de amplitude. Adotando uma margem de segurança de 50 % em relação a este valor, a máxima amplitude da densidade de fluxo magnético primário será considerada como $70 \mu\text{T}$.

O transdutor magnético destina-se a ser usado pelo corpo clínico de forma a mapear um plano horizontal a uma distância de cerca de 10 mm da pele do paciente e, portanto, o nível de exposição precisa estar de acordo com os limites de segurança definidos pela ICNIRP.

De acordo com o campo vetorial da densidade de fluxo magnético primário, mostrado na Figura 11, sua intensidade é acentuada na região no entorno dos solenoides, sendo máxima no eixo longitudinal de cada bobina. Percebe-se que, nesta região, o valor absoluto da densidade de fluxo magnético primário é praticamente concentrado em sua totalidade na componente B_{pz} . Assim, será considerado o limite de $B_{pz,max} = 70 \mu\text{T}$ nas posições $P_1 = (30 \text{ mm}, 0, -10 \text{ mm})$ e $P_2 = (-30 \text{ mm}, 0, -10 \text{ mm})$, correspondendo às posições na superfície da pele mais próximas às bobinas de excitação, como ilustrado na Figura 25.

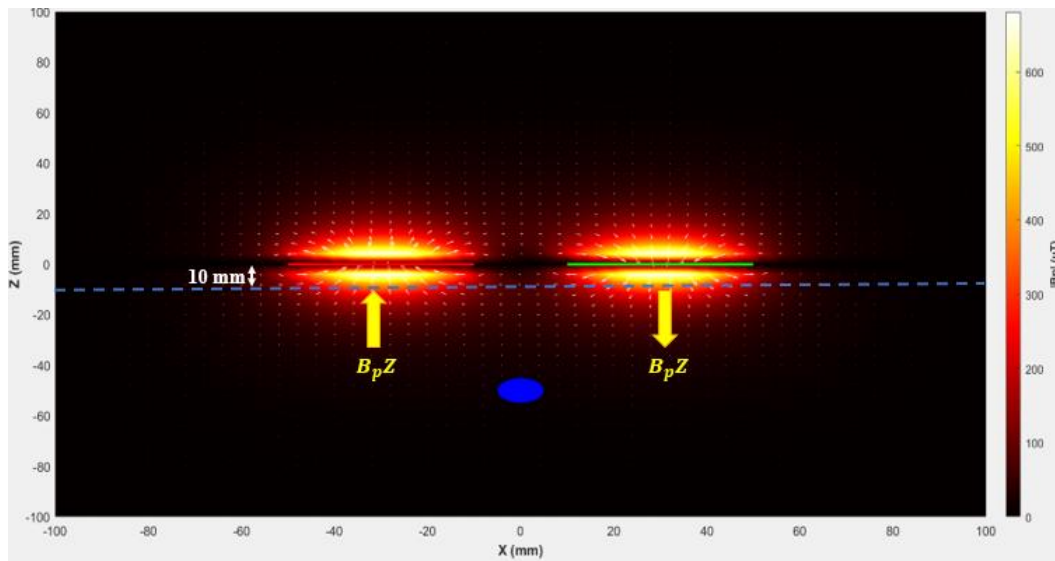


Figura 25 – Representação das variáveis que devem corresponder as diretrizes do ICNIRP em relação a exposição humana a radiação magnética não ionizante. As setas são representativas das componentes de interesse B_{pz} (amarela) e B_{px} (verde) condensadas na região em que ambas devem possuir intensidade máxima de $70 \mu\text{T}$

Assim, inicialmente calculou-se a densidade de fluxo magnético primário nas posições P_1 e P_2 , $B_{pz,max}$, correspondente ao cenário simulado com $N = 10$ espiras e $I = 100 \text{ mA}$ (conforme ilustrado na Figura 20), obtendo $|B_{pz,max}| = 21,82 \mu\text{T}$, abaixo portando do limite de $70 \mu\text{T}$, o que indica ser possível aumentar o número de espiras, ou a corrente de excitação, ou ambos.

Deve-se notar, ainda, que a densidade de fluxo magnético primário varia de forma linear com o produto $N \times I$. Para uma determinada combinação (N, I) , pode-se recalcular o valor da densidade de fluxo magnético primário máximo ($B_{pz,max}$) pela expressão

$$|B_{pz,max}| = \frac{21,82 \mu\text{T}}{10 \times 100 \text{ mA}} \times N \times I \quad (11)$$

Tem-se, portanto, um valor máximo para o produto $N \times I = 3,21$ A, indicando ser possível aumentar o campo magnético primário em 3,21 vezes antes de exceder o limite de exposição definido pela ICNIRP.

Já a densidade de fluxo magnético primário que incide no corpo estranho (B_{px}), que é responsável pela indução de *eddy currents*, pode ser calculada para cada combinação (N, I) multiplicando a curva vermelha da Figura 24 pelo fator

$$K = \frac{N \times I}{10 \times 100 \text{ mA}} \quad (12)$$

Considerando agora os aspectos geométricos das bobinas planares, com raio interno de 5 mm e raio externo de 20 mm, pode-se determinar o número máximo de espiras N_{max} de acordo com o diâmetro dos fios condutores de cobre. A partir deste valor de N_{max} , e do limite de 3,21 A para o produto $N \times I$, pode-se encontrar a corrente de excitação máxima para cada diâmetro dos fios condutores de cobre.

Finalmente, em relação aos aspectos elétricos das bobinas de excitação, cada configuração geométrica (definida pelos raios interno e externo e pelo número de espiras) terá uma indutância própria L distinta. Esta indutância pode ser calculada de forma aproximada segundo descrito em [28] e, considerando a frequência e amplitude da corrente elétrica de excitação, pode-se calcular a amplitude da tensão induzida nos terminais da fonte de alimentação por

$$V_0 = 2\pi \cdot f \cdot L \cdot I \quad (13)$$

Tomando por base a tabela AWG (*American Wire Gauge*), que relaciona o diâmetro dos condutores de cobre com a capacidade máxima de corrente elétrica [29], construiu-se a tabela 10, que indica, para cada AWG, a corrente máxima suportável, o número máximo de espiras para a geometria de bobina planar considerada, a corrente máxima que permite atender às restrições de exposição estabelecidas pelas diretrizes ICNIRP (considerando o limite $N \times I = 3,21$ A, a indutância de cada bobina planar e a tensão total induzida pelas duas bobinas.

Na Tabela 10, a primeira coluna é referente ao número AWG do condutor, a segunda coluna é relativa ao diâmetro do condutor, enquanto a terceira coluna indica a corrente máxima segura suportada pelo condutor. A quarta coluna determina a quantidade de espiras que cada bobina planar do estágio de excitação terá, considerando a geometria de referência. A quinta coluna indica a corrente máxima de alimentação das bobinas para respeitar o limite de exposição $|B_{pz,max}| = 70 \mu T$, enquanto a penúltima coluna indica os valores da indutância das bobinas planares e a última refere-se à tensão autoinduzida sobre cada bobina.

Tabela 10 – Quantidade de espiras, corrente máxima, indutância e tensão induzida pelas bobinas planares para os diversos diâmetros de fios condutores, de acordo com o padrão AWG.

| Número AWG | Diâmetro (mm) | Corrente Máxima suportável (A) | Quantidade de Espiras | Corrente Máxima ICNIRP (A) | Indutância (H) | Tensão (V) |
|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------|------------|
| 18 | 1,0236 | 2,300 | 15 | 0,214 | 3,4 | 0,036 |
| 19 | 0,9119 | 1,800 | 16 | 0,201 | 3,8 | 0,039 |
| 20 | 0,8128 | 1,500 | 18 | 0,178 | 4,9 | 0,044 |
| 21 | 0,7239 | 1,200 | 21 | 0,153 | 6,6 | 0,051 |
| 22 | 0,6452 | 0,920 | 23 | 0,139 | 7,9 | 0,056 |
| 23 | 0,5740 | 0,729 | 26 | 0,123 | 10,1 | 0,063 |
| 24 | 0,5105 | 0,577 | 29 | 0,111 | 12,6 | 0,070 |
| 25 | 0,4547 | 0,457 | 33 | 0,097 | 16,3 | 0,080 |
| 26 | 0,4039 | 0,361 | 37 | 0,087 | 20,5 | 0,090 |
| 27 | 0,3607 | 0,288 | 42 | 0,076 | 26,5 | 0,102 |
| 28 | 0,3200 | 0,226 | 47 | 0,068 | 33,1 | 0,114 |
| 29 | 0,2870 | 0,182 | 52 | 0,062 | 40,6 | 0,126 |
| 30 | 0,2540 | 0,142 | 59 | 0,054 | 52,2 | 0,143 |
| 31 | 0,2261 | 0,113 | 66 | 0,049 | 65,3 | 0,160 |
| 32 | 0,2032 | 0,091 | 74 | 0,043 | 82,1 | 0,179 |
| 33 | 0,1803 | 0,072 | 83 | 0,039 | 103,3 | 0,201 |
| 34 | 0,1600 | 0,056 | 94 | 0,034 | 132,5 | 0,227 |
| 35 | 0,1422 | 0,044 | 105 | 0,031 | 165,4 | 0,254 |
| 36 | 0,1270 | 0,035 | 118 | 0,027 | 208,9 | 0,285 |
| 37 | 0,1143 | 0,029 | 131 | 0,024 | 257,4 | 0,317 |
| 38 | 0,1016 | 0,023 | 148 | 0,022 | 328,6 | 0,358 |

Analisando a Tabela 10, percebe-se que, adotando a quantidade máxima de espiras para a bobina planar, todas as configurações possibilitam que se atinja o limite de exposição $|B_{p_z, max}| = 70 \mu T$ com uma corrente elétrica menor do que o valor máximo suportado pelos condutores. Em especial para diâmetros mais robustos, verifica-se que as intensidades das correntes elétricas que satisfazem às diretrizes da ICNIRP são cerca de 10 vezes menores do que a corrente máxima suportada por estes condutores de forma segura em conformidade com a tabela AWG. Já a indutância das bobinas são todas abaixo de $100 \mu H$, o que gera tensões autoinduzidas entre 36 mV e 360 mV.

Assim, pode-se selecionar o diâmetro de condutor bom base em aspectos de praticidade de construção. Por exemplo, o condutor AWG 21 permite a utilização de 21 espiras em cada bobina planar, sendo esta uma quantidade razoável para a construção do estágio de excitação para as dimensões compactas consideradas do transdutor (raio interno de 5 mm e raio externo de 20 mm), enquanto a corrente de excitação permanece baixa (em torno de 150 mA, 10 vezes menor do que a corrente máxima segura suportada por este condutor). Tais bobinas possuem indutância aproximada de $6,5 \mu H$ e tensão autoinduzida de somente 50,7 mV. Estas especificações simplificam o circuito elétrico de

alimentação, reduzindo o custo do projeto, e aumentando a segurança elétrica e portabilidade do instrumento.

Uma simulação do módulo da densidade de fluxo magnético primário de excitação em relação ao eixo longitudinal do transdutor em vista da distância do instrumento ao plano da superfície da pele é apresentada na Figura 26, tendo em vista a configuração 1 do instrumento, ou seja, estágio de excitação composto por bobinas planares e sensor em posição horizontal.

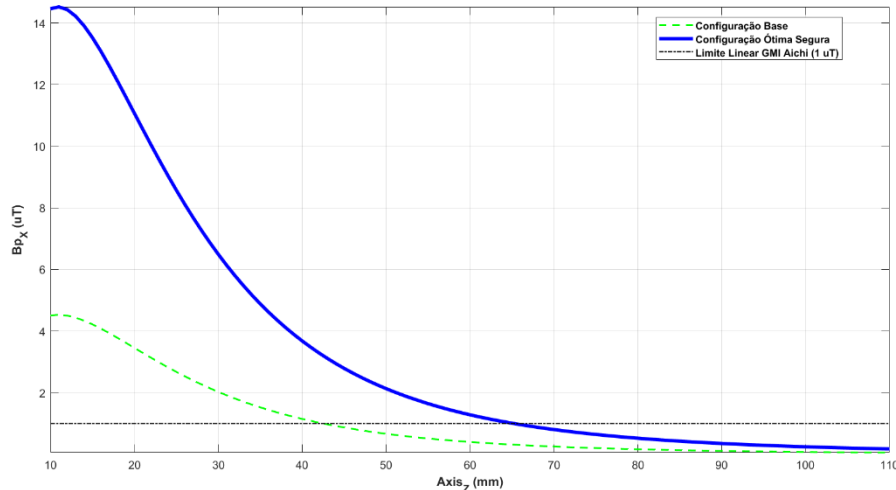


Figura 26 – Densidade de fluxo magnético primário horizontal no corpo estranho na Configuração 1 (bobinas planares e sensor em posição horizontal) para diferentes profundidades. A linha tracejada verde é relativa à configuração base apresentada na Figura 22 (10 espiras e corrente elétrica de 100 mA), enquanto a linha sólida azul é relativa à configuração otimizada. A reta tracejada preta representa o limite do módulo de medição linear do sensor GMI Aichi abordado que é de 1 μ T

Analisando a Figura 26, percebe-se que esta configuração de excitação gera um campo primário no corpo estranho maior que a configuração descrita na seção 2.2. A 10 mm de profundidade, o instrumento é capaz de produzir uma excitação no corpo estranho maior do que 14 μ T e mantém níveis de excitação maiores do que 1 μ T (limitação da configuração previamente implementada [8,9]) para profundidades até cerca de 65 mm em relação à base das bobinas, ou seja, a excitação para um projétil localizado a cerca de 55 mm de profundidade em relação à pele do paciente é mantida acima de 1 μ T.

A Tabela 11 apresenta de forma resumida, para a Configuração 1 e ambas as orientações do sensor GMI, as densidades de fluxo magnético primário na região do sensor (que devem estar sempre abaixo de 1 μ T), e no corpo estranho, considerando uma profundidade de 20 mm em relação à base das bobinas de excitação. Passar-se-á a denominar as configurações de excitação ótimas para cada orientação do sensor (horizontal e vertical) como Configuração 1A e Configuração 1B, respectivamente.

Tabela 11 – Densidades de fluxo magnético primário B_p máximo na região do sensor GMI, na superfície da pele (a 10 mm de distância da base das bobinas) e no corpo estranho, para as duas orientações do sensor.

| Configuração de Excitação | # de espiras | Corrente de excitação | Orientação do Sensor GMI | Região do Sensor GMI | Superfície da Pele | Corpo Estranho |
|---------------------------|--------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1A | 21 | 150 mA | Horizontal (X) | $B_{p_x} = 0 \mu\text{T}$ | $B_{p_z} = 70 \mu\text{T}$ | $B_{p_x} = 11,0 \mu\text{T}$ |
| 1B | 10 | 100 mA | Vertical (Z) | $B_{p_z} = 0,79 \mu\text{T}$ | $B_{p_z} = 21,82 \mu\text{T}$ | $B_{p_x} = 3,5 \mu\text{T}$ |

Ambas as configurações da Tabela 11 respeitam o limite de saturação do sensor GMI e o limite de exposição definido pelas diretrizes da ICNIRP, e serão analisadas no Capítulo 4 em relação ao campo magnético secundário gerado pelas *eddy currents*, permitindo assim definir qual configuração (com o sensor GMI horizontal ou vertical) tem melhor capacidade de medição dos corpos estranhos metálicos.

4

Modelagem Teórica e Computacional do Campo Magnético Secundário

Este capítulo apresenta a modelagem teórica e a implementação computacional do campo magnético secundário gerado pelas *eddy currents*, que são induzidas em corpos estranhos metálicos não-magnéticos pelo campo magnético primário alternado, considerando somente a Configuração 1 de excitação descrita do Capítulo 3, e as duas orientações do sensor GMI também descritas no Capítulo, denominadas Configuração 1A (sensor horizontal) e Configuração 1B (sensor vertical).

Inicialmente, apresenta-se a modelagem das *eddy currents* induzidas em um corpo estranho metálico não-magnético de formato esférico, considerando os campos magnéticos primários descritos no Capítulo 3, e do campo magnético secundário gerado por tais *eddy currents*. Em seguida, apresentam-se os mapas de campo magnético secundário simulados para estes dois diferentes cenários.

4.1

Eddy Currents

O modelo matemático da densidade de fluxo magnético secundário (\mathbf{B}_s) produzido pelas correntes parasitas induzidas em um corpo com simetria esférica foi desenvolvido em trabalhos anteriores [8,9,11]. Estes trabalhos demonstraram que esta grandeza é dependente das características geométricas do corpo estranho que sofre a indução das correntes parasitas, como raio (a) e posição espacial, e também das propriedades eletromagnéticas do material componente do corpo estranho (tipicamente, chumbo), como permeabilidade magnética (μ) e condutividade elétrica (σ). Obviamente, a intensidade das correntes parasitas, e portanto do campo magnético secundário, também é dependente da intensidade ($|\mathbf{B}_0|$) e frequência (f_0) da densidade de fluxo magnético de excitação (primário) incidente no corpo estranho. Logo, pode-se escrever

$$\mathbf{B}_s = f(a, \mu, \sigma, \mathbf{B}_0, f_0). \quad (14)$$

A densidade de fluxo magnético secundário produzido por correntes parasitas é modelada pelas leis da eletrodinâmica clássica conforme o conceito de divergente do vetor potencial magnético, sendo descrita a seguir em coordenadas esféricas, por motivos de simetria:

$$\mathbf{B}_s(r, \theta, \phi) = \nabla \times \mathbf{A}(r, \theta, \phi) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_s(r, \theta, \phi) = & \frac{1}{r \cdot \sin(\theta)} \cdot \frac{1}{\partial \theta} \left(\frac{\partial A_\phi}{\partial \theta} \cdot \sin(\theta) + \frac{\partial A_\theta}{\partial \phi} \right) \hat{r} \\ & + \frac{1}{r} \left(\frac{1}{\sin(\theta)} \cdot \frac{\partial A_r}{\partial \phi} - \frac{\partial A_\phi}{\partial r} \cdot r \right) \hat{\theta} \\ & + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial r} \cdot r - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right) \hat{\phi} \end{aligned} \quad (16)$$

Em seu trabalho sobre detecção de minas terrestres, Silvester [30] demonstrou que, para um campo magnético primário de excitação paralelo ao eixo z, o vetor de indução magnética possui apenas a componente A_ϕ não nula:

$$A(r, \theta, \phi) = (0, 0, A_\phi) \quad (17)$$

Logo, a equação da densidade do fluxo magnético em coordenadas esféricas se reduz às componentes nas direções \hat{r} e $\hat{\theta}$:

$$\mathbf{B}_s(r, \theta, \phi) = \frac{1}{r \cdot \sin(\theta)} \cdot \frac{1}{\partial \theta} \left(\frac{\partial A_\phi}{\partial \theta} \cdot \sin(\theta) \right) \hat{r} + \frac{1}{r} \left(-\frac{\partial A_\phi}{\partial r} \cdot r \right) \hat{\theta} = (B_r, B_\theta, 0) \quad (18)$$

O modelo analítico da componente não nula do vetor potencial magnético, sendo esta dependente da densidade de fluxo magnético de excitação, é [23]

$$A_\phi(r, \theta, \phi) = \frac{4\pi \cdot a^3}{3} \cdot \frac{3}{8\pi} \cdot B_0 \cdot V'(a, f) \cdot \frac{\sin(\theta)}{r^2} \quad (19)$$

onde B_0 é o módulo da densidade de fluxo magnético primário na direção Z. O termo complexo, $V(a, f) = a^3 \cdot V'(a, f)$ é composto por uma combinação entre os parâmetros geométricos, magnéticos e elétricos intrínsecos do corpo estranho, além da frequência da densidade de fluxo magnético primário, ou seja,

$$V(a, f) = a^3 \cdot \frac{(2\mu_r + 1) - (2\mu_r + v^2(a, f) + 1) \cdot \frac{\tanh(v(a, f))}{v(a, f)}}{(\mu_r - 1) - (\mu_r - v^2(a, f) + 1) \cdot \frac{\tanh(v(a, f))}{v(a, f)}} \quad (20)$$

O termo μ_r é a permeabilidade magnética relativa entre o material do corpo estranho (μ), composto tipicamente por chumbo, e a permeabilidade magnética do meio de medição (μ_0), considerado o ar, tendo ambas valores semelhantes. Logo, a grandeza μ_r , além de ser adimensional, possui valor próximo à unidade, $\mu_r = 1 - 1,7 \cdot 10^{-5}$.

Já o termo $v(a, f)$ aborda a relação entre o raio do corpo estranho e a profundidade de corrente que o percorre, além de embutir uma característica fasorial ao mensurando, configurando uma diferença de fase entre as densidades de fluxo magnético primário e secundário, além de relações entre proporção de módulos entre estas grandezas. Tem-se, então

$$v(a, f) = (1 + i) \cdot \frac{a}{\delta} \quad (21)$$

Finalmente, o termo δ é a profundidade de corrente do mensurando, ou seja, a profundidade atingida pelas correntes parasitas a partir da superfície externa do corpo estranho em relação ao seu centro geométrico. Esta grandeza é inversamente proporcional à frequência de excitação do mensurando, logo, o termo $v(a, f)$, por sua vez, é diretamente proporcional tanto ao raio quanto à frequência de excitação do mensurando:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma \cdot \mu \cdot \mu_r \cdot \pi \cdot f}} \quad (22)$$

Assim, o vetor potencial magnético pode ser escrito de forma simplificada como

$$A_\phi(r, \theta, \phi) = \frac{B_0}{2} \cdot V(a, f) \cdot \frac{\sin(\theta)}{r^2} \quad (23)$$

Combinando então a equação (23) com a equação (18), obtêm-se as duas componentes não nulas da densidade de fluxo magnético secundário, ainda em coordenadas esféricas

$$B_r(r, \theta, \phi) = \frac{1}{2} \cdot B_0 \cdot V(a, f) \cdot \frac{\cos(\theta)}{r^3} \quad (24)$$

$$B_\theta(r, \theta, \phi) = B_0 \cdot V(a, f) \cdot \frac{\sin(\theta)}{r^3} \quad (25)$$

Deve-se notar, contudo, que a formulação acima considerou um campo magnético primário paralelo ao eixo Z, como ilustrado na Figura 27.

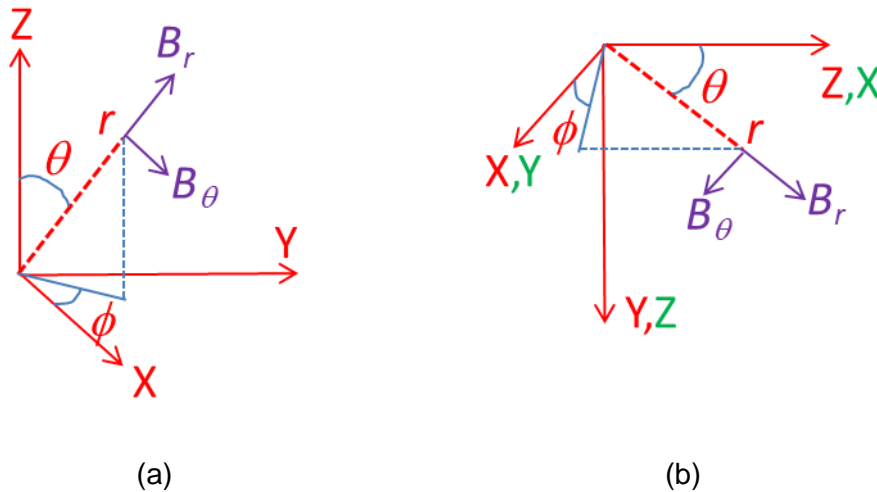


Figura 27 – (a) Sistema de coordenadas utilizado na formulação original do campo magnético secundário; (b) Sistema de coordenadas alinhado com o campo magnético primário de excitação (na direção horizontal, B_{p_x} , conforme descrito no Capítulo 3). As letras em vermelho (e roxo) indicam o sistema de coordenadas utilizado na formulação apresentada anteriormente, e as letras em verde indicam o sistema de coordenadas inercial utilizado no Capítulo 3.

Assim, pode-se considerar que $B_0 = |B_{p_x}|$ e que o campo magnético secundário B_s pode ser calculado a partir da combinação vetorial das componentes esféricas dadas pelas equações (24) e (25), ou seja,

$$B_{s_x}(r, \theta, \phi) = B_r(r, \theta, \phi) \cdot \cos(\theta) - B_\theta(r, \theta, \phi) \cdot \sin(\theta) \quad (26)$$

$$B_{s_z}(r, \theta, \phi) = B_r(r, \theta, \phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + B_\theta(r, \theta, \phi) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\phi) \quad (27)$$

Finalmente, chega-se às seguintes expressões para as duas componentes de interesse da densidade de fluxo magnético secundário:

$$B_{s_x}(x, y, z) = \frac{B_0}{2} \cdot V(a, f) \cdot (x^2 + y^2 + z^2)^{-\frac{5}{2}} \cdot [2x^2 - (y^2 + z^2)] \quad (28)$$

$$B_{s_z}(x, y, z) = \frac{3B_0}{2} \cdot V(a, f) \cdot (x^2 + y^2 + z^2)^{-\frac{5}{2}} \cdot (y^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot (z^2 \cdot x) \quad (29)$$

4.2 Simulação Computacional

Tendo a descrição matemática em função das coordenadas cartesianas das componentes de interesse da densidade de fluxo magnético secundário segundo as orientações consideradas para o eixo de sensibilidade do sensor, implementou-se a simulação computacional do processo de medição, na plataforma de desenvolvimento Matlab®.

Conforme a análise da densidade de fluxo magnético primário realizada no capítulo 3, foi possível concluir que, em relação ao magnetômetro GMI abordado nesta dissertação (características de sensibilidade e resolução), o estágio de excitação que melhor condiz com a operação satisfatória do instrumento de medição é aquele cujos elementos primários são constituídos por solenoides planares (Configuração 1). Esta conclusão foi justificada pela propriedade destes estágios em produzir uma excitação satisfatória e alta na região do corpo estranho enquanto baixa na região do sensor, levando este a operar de forma linear, ao mesmo tempo em que a vertente de inocuidade do instrumento de medição é preservada. Também foi comprovado, por meio da tabela de bitolas AWG e de dados bibliográficos, que a indutância dos solenoides permanece baixa, levando a níveis brandos da tensão autoinduzida sobre estes atuadores, convergindo em sistemas de alimentação simples, seguros e de baixo custo.

Por simplicidade, considerou-se que, para fins de excitação do corpo estranho, somente a componente horizontal (B_{p_x}) da densidade de fluxo magnético primário. Logo, todas as simulações apresentadas a seguir, relativas à densidade de fluxo magnético secundário, seguem esta aproximação.

4.2.1

Simulações Unidimensionais

Apresenta-se nesta subseção a análise unidimensional das densidades de fluxo magnético primário e secundário, para diversas profundidades e raios do corpo estranho, na qual uma única coordenada espacial é variada enquanto as demais permanecem com valor fixo.

Assim, para cada orientação do sensor GMI, apresentam-se varreduras ao longo do eixo X (horizontal), com a coordenada Y permanecendo nula, para três valores de profundidade Z (20 mm, 40 mm e 60 mm) em relação ao plano horizontal que contém o estágio de excitação. Este cenário analisa a distribuição espacial do mensurando percebida pelo sensor quando este é percorrido de forma unidimensional e horizontal em relação ao plano fisiológico em que se encontra o corpo estranho.

Em seguida, apresentam-se varreduras ao longo do eixo vertical (z), para diferentes raios do corpo estranho, de modo a observar o decaimento do campo magnético secundário com a profundidade.

4.2.1.1

Sensor GMI Horizontal

Inicialmente, apresenta-se o cenário em que o sensor está posicionado de forma horizontal, de acordo com a Configuração 1A de excitação, previamente apresentada na Tabela 11 do Capítulo 3 ($N = 21$, $I = 150$ mA). Considerando as três profundidades aqui analisadas (a Tabela 11 apresentou o valor máximo de B_{p_x} , à profundidade de 10 mm), a Figura 28 apresenta o mapeamento linear da densidade de fluxo magnético primário na região do corpo estranho.

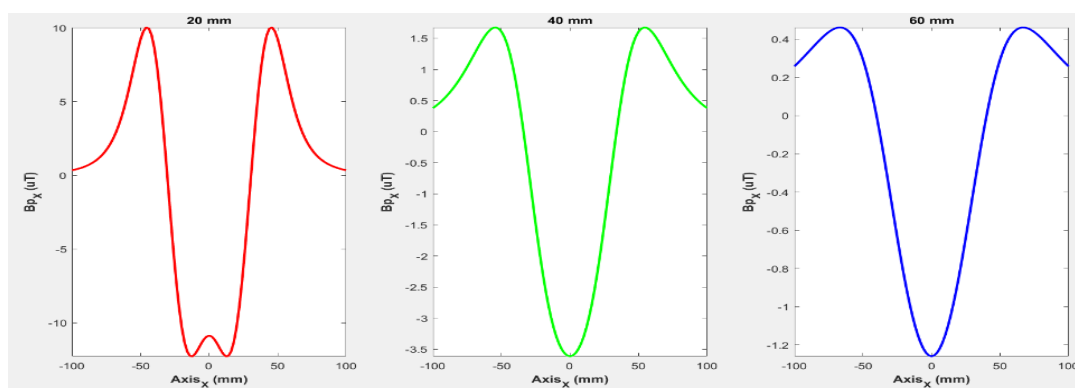


Figura 28 – Distribuição unidimensional da densidade de fluxo magnético primário B_{p_x} (excitação) produzido pela Configuração 1A na região do corpo estranho, considerando três níveis de profundidade.

Considerando então os três cenários de excitação apresentados na Figura 28, e raios do corpo estranho variando entre 0,5 mm e 5 mm, aplicou-se a formulação para o campo magnético secundária descrita na seção 4.1, simulando a densidade de fluxo magnético secundário percebida pelo sensor (B_{sx}) ao varrer-se o instrumento de medição (bobinas de excitação + sensor GMI horizontal) ao longo de uma reta paralela ao eixo X, em $Z = 0$, como mostrado na Figura 29.

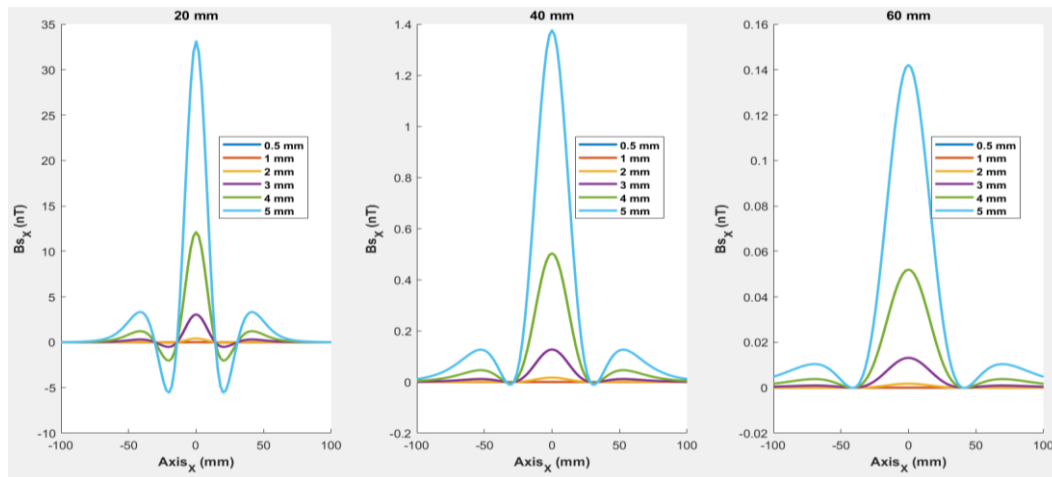


Figura 29 – Distribuição unidimensional da densidade de fluxo magnético secundário na região do corpo estranho segundo as excitações representadas pela Figura 28.

A distribuição espacial da densidade de fluxo magnético secundário em relação à variação unidimensional da coordenada X (variação horizontal da posição do sensor em relação ao corpo estranho) apresenta uma configuração tripolar e simétrica em relação ao eixo longitudinal, possuindo seu valor máximo sobre a posição horizontal do corpo estranho ($X = 0$ mm). Percebe-se que, para pequenas profundidades (20 mm), as amplitudes simétricas menores adjacentes ao eixo longitudinal possuem valores negativos, enquanto se tornam positivos à medida que a profundidade em relação ao elemento de detecção aumenta. Ainda em relação à profundidade do corpo estranho, percebe-se que as amplitudes da densidade de fluxo magnético secundário se agrupam mais nas proximidades do eixo longitudinal conforme a distância entre o elemento sensor e o corpo estranho diminui.

Para um mesmo corpo estranho, ou seja, raios iguais, percebe-se a forte influência da profundidade na magnitude do mensurando. Para um mensurando de 5 mm de diâmetro, a grandeza de interesse decai em valor por cerca de vinte vezes em relação às profundidades de 20 mm e 40 mm e continua o decaimento de valor em cerca de 10 vezes em relação à profundidade de 40 mm até 60 mm.

No mesmo cenário de medição, em relação ao raio do mensurando, têm-se que, quanto maior é esta dimensão, maior são os módulos das amplitudes e as variações da densidade de fluxo magnético secundário, diminuindo de cerca de três a quatro vezes de valor em módulo a cada decaimento de 5 mm no valor do raio para um mesmo cenário de medição.

Em seguida, a Figura 30 apresenta o decaimento com a profundidade Z do valor máximo da densidade de fluxo magnético secundário, para diferentes raios do corpo estranho.

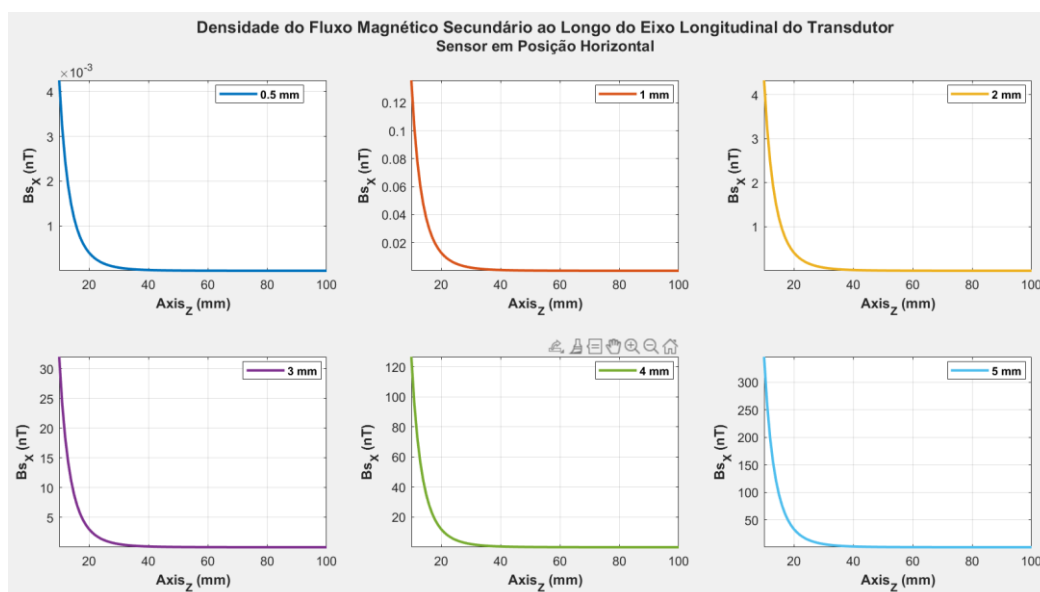


Figura 30 – Variação unidimensional, com a profundidade Z, da componente horizontal da densidade de fluxo magnético secundário medida pelo sensor GMI, para diferentes raios do corpo estranho.

A tabela 12 apresenta alguns pontos discretos extraídos da Figura 30, facilitando a análise.

Tabela 12 – Variação da intensidade máxima da densidade de fluxo magnético secundário em relação à variação de profundidade e raio do corpo estranho

| z (mm) | B_{0x} (μT) | B_{sx} (nT) a = 0,5 mm | B_{sx} (nT) a = 1 mm | B_{sx} (nT) a = 2 mm | B_{sx} (nT) a = 3 mm | B_{sx} (nT) a = 4 mm | B_{sx} (nT) a = 5 mm |
|--------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 10 | 14,200 | 0,00425 | 0,136 | 4,325 | 32,007 | 126,648 | 346,163 |
| 20 | 10,871 | 0,000407 | 0,013 | 0,414 | 3,063 | 12,119 | 33,126 |
| 30 | 6,376 | 0,0000707 | 0,00226 | 0,0719 | 0,532 | 2,106 | 5,757 |
| 40 | 3,613 | 0,0000169 | 0,000541 | 0,0172 | 0,127 | 0,504 | 1,376 |
| 50 | 2,093 | 0,00000501 | 0,000160 | 0,00510 | 0,0377 | 0,149 | 0,408 |
| 60 | 1,259 | 0,00000174 | 0,000056 | 0,00178 | 0,0131 | 0,0520 | 0,142 |
| 70 | 0,788 | 0,00000069 | 0,000022 | 0,00070 | 0,0052 | 0,0205 | 0,0560 |
| 80 | 0,5125 | 0,00000030 | 0,000010 | 0,00030 | 0,0023 | 0,0089 | 0,0244 |
| 90 | 0,345 | 0,00000014 | 0,000005 | 0,00014 | 0,0011 | 0,0042 | 0,0115 |
| 100 | 0,239 | 0,00000007 | 0,000002 | 0,00007 | 0,0005 | 0,0021 | 0,0058 |

É evidente a pequena proporção entre a mensurando e a excitação, $\frac{B_{sx}}{B_{0x}}$.

Tem-se que, enquanto o módulo do campo magnético primário (excitação) está na ordem de grandeza de alguns microteslas, a ordem de grandeza do

mensurando está na casa dos nanoteslas. Este fato justifica o emprego do sensor GMI abordado, sendo este um magnetômetro comercial que realiza medições de densidade de fluxo magnético nesta magnitude, devido a sua resolução de 25 pT.

Como era de se esperar, quanto maior o raio do corpo estranho, maior é a intensidade da densidade de fluxo magnético secundário para uma mesma profundidade. A Tabela 13 destaca este comportamento, que mantém uma proporção constante em relação ao aumento de profundidade.

Tabela 13 – Proporção crescente entre o mensurando segundo a variação crescente do raio do corpo estranho

| $B_{S_{X_{0.5\text{ mm}}}}/B_{S_{X_{5\text{ mm}}}}$ | $B_{S_{X_{1\text{ mm}}}}/B_{S_{X_{5\text{ mm}}}}$ | $B_{S_{X_{2\text{ mm}}}}/B_{S_{X_{5\text{ mm}}}}$ | $B_{S_{X_{3\text{ mm}}}}/B_{S_{X_{5\text{ mm}}}}$ | $B_{S_{X_{4\text{ mm}}}}/B_{S_{X_{5\text{ mm}}}}$ |
|---|---|---|---|---|
| $1,23 \times 10^{-5}$ | $3,93 \times 10^{-4}$ | $1,25 \times 10^{-2}$ | $9,25 \times 10^{-2}$ | 0,366 |

Pela tabela 13, pode-se perceber que, em relação à redução do raio do mensurando, o valor decresce em cerca de 75 % de valor quando se comparam os corpos estranhos de 5 mm e 4 mm. Esta tendência no decaimento do módulo da amplitude máxima do mensurando conforme o decaimento do raio do corpo estranho é intensificada à medida que o raio do corpo estranho diminui.

4.2.1.2 Sensor GMI Vertical

Agora, apresenta-se o cenário em que o sensor está posicionado de forma vertical, de acordo com a Configuração 1B de excitação, previamente apresentada na Tabela 11 do Capítulo 3 ($N = 10$, $I = 100$ mA). Considerando as três profundidades aqui analisadas (a Tabela 11 apresentou o valor máximo de B_{p_x} , à profundidade de 10 mm), a Figura 31 apresenta o mapeamento linear da densidade de fluxo magnético primário na região do corpo estranho.

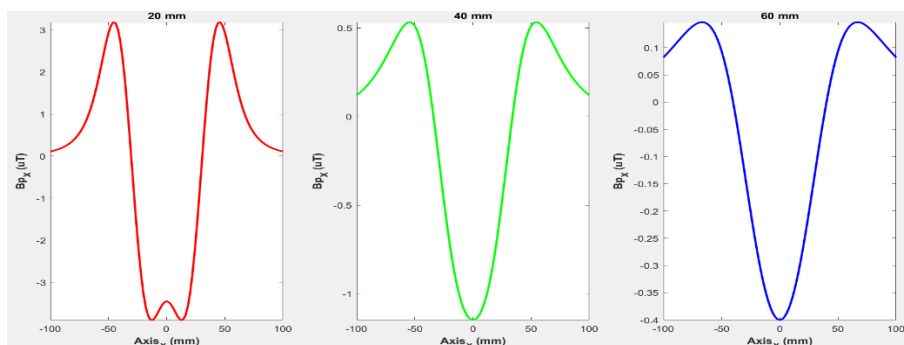


Figura 31 – Distribuição unidimensional da densidade de fluxo magnético primário B_{p_x} (excitação) produzido pela Configuração 1B na região do corpo estranho, considerando três níveis de profundidade.

Novamente, considerando os três cenários de excitação apresentados na Figura 31, e raios do corpo estranho variando entre 0,5 mm e 5 mm, aplicou-se a

formulação para o campo magnético secundária descrita na seção 4.1, simulando a densidade de fluxo magnético secundário percebida pelo sensor (B_{sz}) ao varrer-se o instrumento de medição (bobinas de excitação + sensor GMI vertical) ao longo de uma reta paralela ao eixo X, em $Z = 0$, como mostrado na Figura 32.

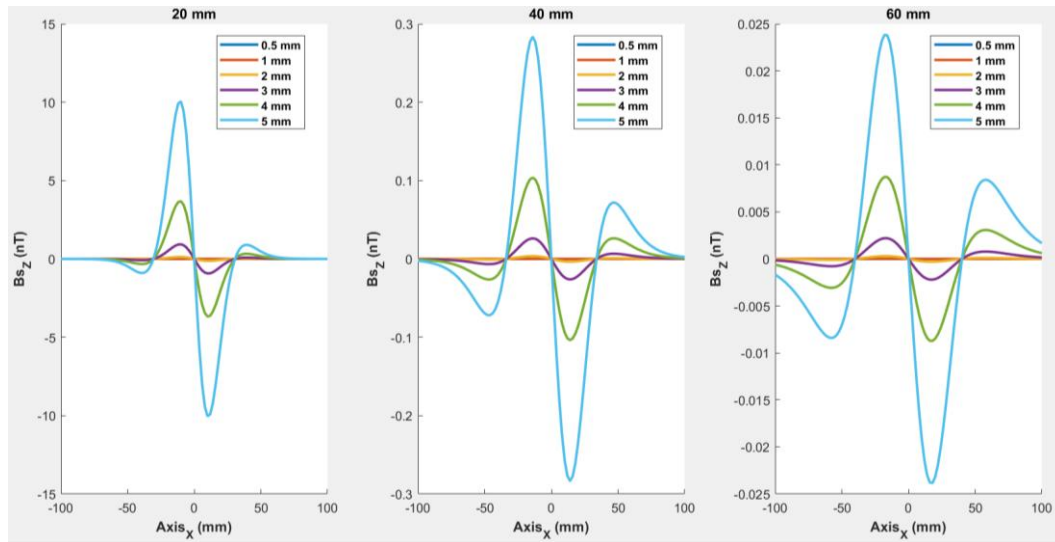


Figura 32 – Distribuição unidimensional da densidade de fluxo magnético secundário na região do corpo estranho segundo as excitações representadas pela Figura 31.

Com esta orientação do sensor GMI, que mede a componente vertical da densidade de fluxo magnético secundário, tem-se uma configuração quadripolar e antissimétrica em relação ao eixo longitudinal do instrumento de medição. Esta configuração, na verdade, pode ser aproximada como quase dipolar, como uma superposição de dois dipolos, especialmente para pequenas profundidades em relação à base inferior do instrumento pois, neste caso, as amplitudes menores e antissimétricas mais afastadas da origem do instrumento possuem baixa intensidade em relação ao dipolo de maior intensidade localizado nas proximidades do eixo longitudinal.

Devido ao comportamento dipolar da componente vertical da densidade de fluxo magnético secundário, seu valor máximo não está sobre o eixo central, porém em suas adjacências. Neste caso, observa-se que, além da diminuição da amplitude destes dipolos conforme o aumento da profundidade do corpo estranho, também um afastamento em relação à origem do sistema. Este fato é devido à menor intensidade e variação da intensidade em regiões do corpo estranho mais afastadas dos atuadores.

Em relação à variação do raio do corpo estranho, é notado um comportamento similar desta componente (B_{sz}) em relação à componente

analisada anteriormente (B_{Sx}), ou seja, para um mesmo cenário de medição, a densidade de fluxo magnético secundário de valor por aproximadamente três a quatro vezes conforme o aumento do raio do corpo estranho a cada passo discreto e sucessivo de 5 mm.

Em relação ao impacto da variação de profundidade em relação ao mensurando, observa-se para esta componente (B_{Sz}) o mesmo comportamento em relação à componente horizontal (B_{Sx}), ou seja, o valor da intensidade da densidade de fluxo magnético secundário decai de forma intensa conforme o aumento da profundidade do mensurando em relação à superfície inferior do instrumento de medição.

Em seguida, a Figura 33 apresenta o decaimento com a profundidade Z do valor máximo da densidade de fluxo magnético secundário, para diferentes raios do corpo estranho.

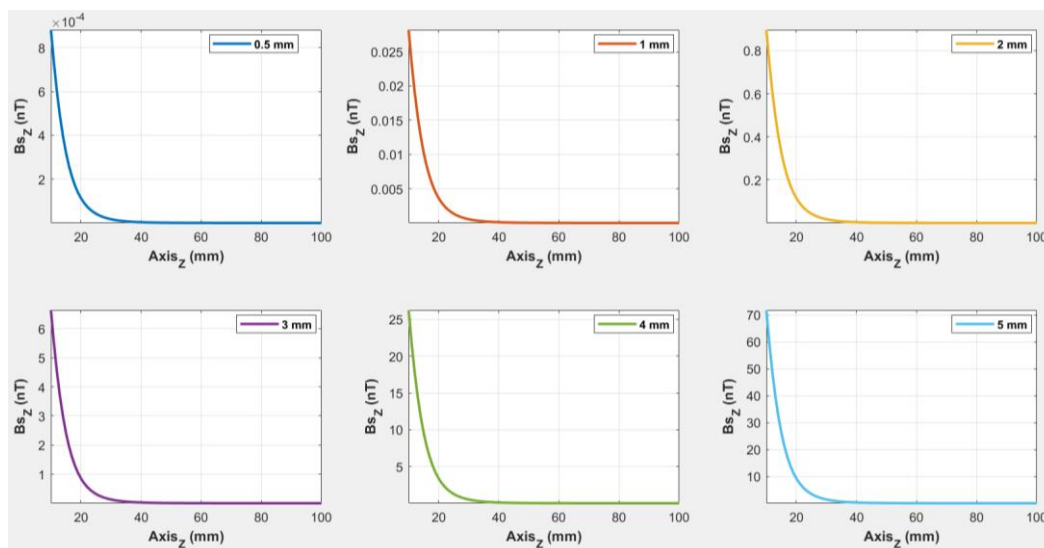


Figura 33 – Variação unidimensional, com a profundidade Z, da componente vertical da densidade de fluxo magnético secundário medida pelo sensor GMI, para diferentes raios do corpo estranho.

Como era de se esperar, a proporção entre as densidades de fluxo magnético secundário e primário, $\frac{B_{sz}}{B_{0x}}$, permanece pequena, tendo em vista que o módulo da excitação permanece na ordem dos microteslas enquanto a ordem de grandeza do mensurando permanece na ordem dos nanoteslas. Novamente, a tabela 14 apresenta alguns pontos discretos extraídos da Figura 33, facilitando a análise.

Tabela 14 – Variação da intensidade máxima da densidade de fluxo magnético secundário em relação à variação de profundidade e raio do corpo estranho

| z (mm) | B_{0x} (μT) | B_{Sz} (nT) a = 0.5 mm | B_{Sz} (nT) a = 1 mm | B_{Sz} (nT) a = 2 mm | B_{Sz} (nT) a = 3 mm | B_{Sz} (nT) a = 4 mm | B_{Sz} (nT) a = 5 mm |
|-----------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 10 | 10,566 | 0,000881 | 0,0282 | 0,897 | 6,636 | 26,256 | 71,764 |
| 20 | 3,893 | 0,000113 | 0,00361 | 0,115 | 0,850 | 3,364 | 9,194 |
| 30 | 1,792 | 0,0000170 | 0,000544 | 0,0173 | 0,128 | 0,506 | 1,384 |
| 40 | 0,946 | 0,00000348 | 0,000111 | 0,00354 | 0,0262 | 0,104 | 0,283 |
| 50 | 0,544 | 0,00000091 | 0,0000290 | 0,000922 | 0,00682 | 0,0270 | 0,0738 |
| 60 | 0,333 | 0,00000028 | 0,0000090 | 0,000287 | 0,00213 | 0,00842 | 0,0230 |
| 70 | 0,213 | 0,00000010 | 0,0000032 | 0,000103 | 0,000760 | 0,00301 | 0,00822 |
| 80 | 0,141 | 0,00000004 | 0,0000013 | 0,000041 | 0,000303 | 0,00120 | 0,00328 |
| 90 | 0,0970 | 0,00000002 | 0,0000006 | 0,000018 | 0,000132 | 0,00052 | 0,00143 |
| 100 | 0,0684 | 0,00000001 | 0,0000003 | 0,000008 | 0,000062 | 0,00024 | 0,00067 |

Em relação ao raio do corpo estranho, a tendência citada na análise da componente horizontal do mensurando continua em vigor. O decaimento do módulo máximo da componente vertical do mensurando conforme a diminuição do raio é exemplificada na tabela 15 conforme a taxa entre as proporções.

Tabela 15 – Proporção crescente entre o mensurando segundo a variação crescente do raio do corpo estranho

| $B_{Sz_{0.5\text{ mm}}}/B_{Sz_{5\text{ mm}}}$ | $B_{Sz_{1\text{ mm}}}/B_{Sz_{5\text{ mm}}}$ | $B_{Sz_{2\text{ mm}}}/B_{Sz_{5\text{ mm}}}$ | $B_{Sz_{3\text{ mm}}}/B_{Sz_{5\text{ mm}}}$ | $B_{Sz_{4\text{ mm}}}/B_{Sz_{5\text{ mm}}}$ |
|---|---|---|---|---|
| $1,2 \times 10^{-5}$ | 4×10^{-4} | 0,0125 | 0,092 | 0,366 |

A reduzida razão entre as densidades de fluxo magnético secundário do corpo estranho de maior raio e os corpos estranhos de raios menores seguem um comportamento similar para ambas as componentes de interesse do mensurando, possuindo taxas aproximadamente idênticas para as mesmas proporções entre raios de corpo estranho.

4.2.1.3 Comparação entre Orientações do Sensor GMI

Considerando um corpo estranho com determinado raio situado a determinada profundidade, percebe-se que a amplitude máxima da componente horizontal do mensurando (B_{Sx}) é mais intensa do que a sua componente vertical (B_{Sz}). A tabela 16 ilustra a proporção entre $\frac{|B_{Sx}|}{|B_{Sz}|}$ para a sequência discreta e decrescente para os diversos valores considerados para o raio do corpo estranho, para uma profundidade de 50 mm.

Tabela 16 – Razão entre a componente horizontal e vertical da densidade de fluxo magnético secundário B_{Sx}/B_{Sz}

| Raio (mm) | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
|-----------------|-----------|----------|----------|----------|---------|----------|
| B_{Sx} (nT) | 0,0000050 | 0,000160 | 0,005100 | 0,037700 | 0,14930 | 0,40820 |
| B_{Sz} (nT) | 0,0000009 | 0,000029 | 0,000922 | 0,006824 | 0,0270 | 0,073810 |
| B_{Sx}/B_{Sz} | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 |

A tabela 16 demonstra que, para uma mesma região de monitoramento, a amplitude máxima da componente horizontal da densidade de fluxo magnético secundário (B_{Sx}) é cerca de 5,5 vezes maior do que a sua componente vertical (B_{Sz}). Este fato já era de se esperar, já que a Configuração 1A possui níveis de excitação consideravelmente maiores do que a Configuração 1B. Logo, em relação à intensidade do mensurando, a Configuração 1A é a que melhor se adequa ao propósito do projeto no quesito do magnetômetro GMI abordado operar de forma linear enquanto o mensurando é intensificado pelo aumento da excitação.

Concluem-se desta forma as análises unidimensionais da densidade de fluxo magnético secundário:

- A componente horizontal da densidade de fluxo magnético secundário tem um comportamento aproximadamente unipolar e simétrico em relação à origem do instrumento de medição;
- A componente vertical da densidade de fluxo magnético secundário tem um comportamento aproximadamente dipolar e antissimétrico em relação à origem do instrumento de medição;
- A intensidade do mensurando decai conforme a profundidade em relação ao plano dos solenoides aumenta;
- A intensidade do mensurando aumenta conforme o raio do corpo estranho aumenta;
- Devido à maior intensidade da excitação, a componente da densidade de fluxo magnético medida pela Configuração 1A é consideravelmente superior à componente medida pela Configuração 1B; e
- A Configuração 1A (solenoides planares e sensor em posição horizontal) é a mais apta a satisfazer os propósitos do instrumento, ou seja, elevar o módulo da densidade de fluxo magnético produzido por indução de correntes parasitas no mensurando através do aumento da intensidade da excitação de forma que o sensor opere na região linear, de maneira inócua e com características construtivas e elétricas satisfatórias.

4.2.2

Simulações Bidimensionais

Apresenta-se nesta subseção a análise bidimensional das densidades de fluxo magnético secundário, considerando um corpo estranho com raio de 5 mm e as duas configurações (1A e 1B) descritas na seção 3.2.

Assim, para cada orientação do sensor GMI, apresentam-se varreduras bidimensionais no plano XY, para três valores de profundidade Z (20 mm, 40 mm e 60 mm) em relação ao plano horizontal que contém o estágio de excitação. Este cenário analisa a distribuição espacial do mensurando percebida pelo sensor quando este é percorrido de forma bidimensional e horizontal em relação ao plano fisiológico em que se encontra o corpo estranho. A tabela 17 sintetiza a sequência de simulações bidimensionais implementadas.

Tabela 17 – Tabela da sequência de simulações bidimensionais da densidade do fluxo magnético secundário gerado por indução de Correntes Parasitas no corpo estranho

| Profundidade | Raio | Configurações | Componente Medida |
|-----------------------|------|---------------|-------------------|
| $h_1 = 20 \text{ mm}$ | 5 mm | 1A | B_{sX} |
| $h_2 = 40 \text{ mm}$ | | | |
| $h_3 = 60 \text{ mm}$ | | 1B | B_{sZ} |

4.2.2.1

Sensor GMI Horizontal

Inicialmente, apresenta-se o cenário em que o sensor está posicionado de forma horizontal, de acordo com a Configuração 1A de excitação, previamente apresentada na Tabela 11 ($N = 21$, $I = 150 \text{ mA}$). As Figuras 34, 35 e 36 apresentam o mapeamento bidimensional da densidade de fluxo magnético secundário medido por um sensor GMI orientado na direção horizontal (alinhado com o eixo X) considerando as três profundidades aqui analisadas (20 mm, 40 mm e 60 mm).

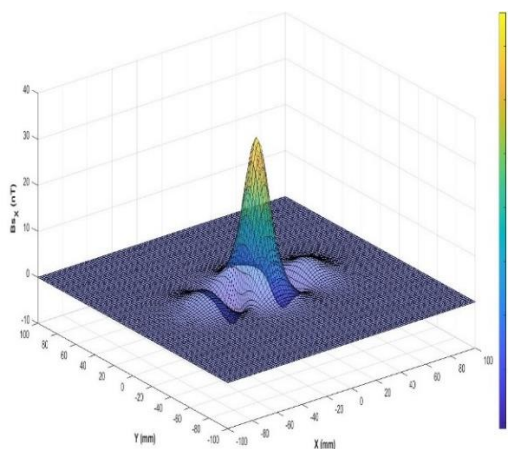


Figura 34 – Distribuição da componente horizontal da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 20 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição

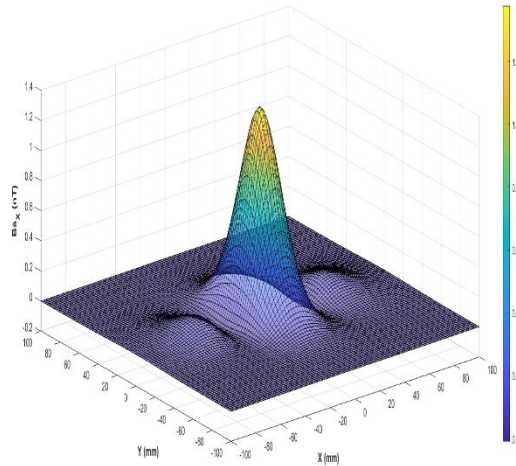


Figura 35 – Distribuição da componente horizontal da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 40 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição

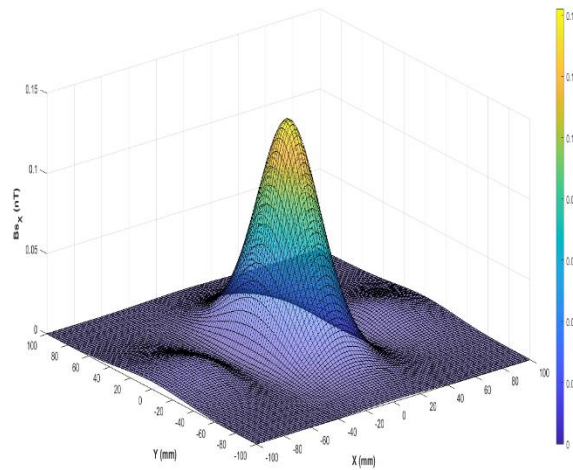


Figura 36 – Distribuição da componente horizontal da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 60 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição

Para todas as profundidades analisadas, fica evidente o comportamento monopolar desta componente em relação à variação da componente espacial horizontal (coordenada X). Também é possível concluir que esta componente do mensurando não é somente simétrica em relação ao eixo X, mas também em relação ao eixo Y. Observa-se, ainda, uma região central com valores elevados circularmente distribuídos ao redor do eixo longitudinal do instrumento.

4.2.2.2 Sensor GMI Vertical

Agora, apresenta-se o cenário em que o sensor está posicionado de forma vertical, de acordo com a Configuração 1B de excitação, previamente apresentada na Tabela 11 do Capítulo 3 ($N = 10$, $I = 100$ mA). As Figuras 37, 38 e 39 apresentam o mapeamento bidimensional da densidade de fluxo magnético secundário medido por um sensor GMI orientado na direção vertical (alinhado com o eixo Z) considerando as três profundidades aqui analisadas (20 mm, 40 mm e 60 mm).

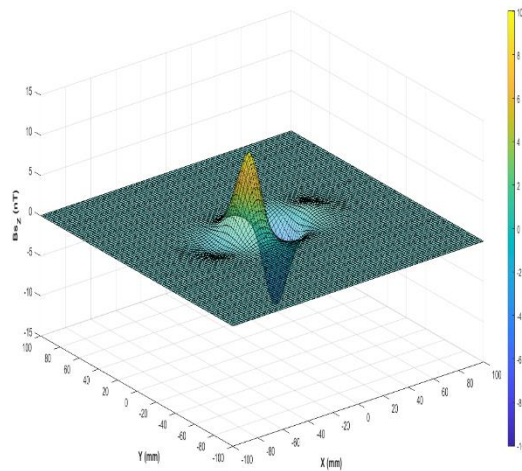


Figura 37 – Distribuição da componente vertical da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 20 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição

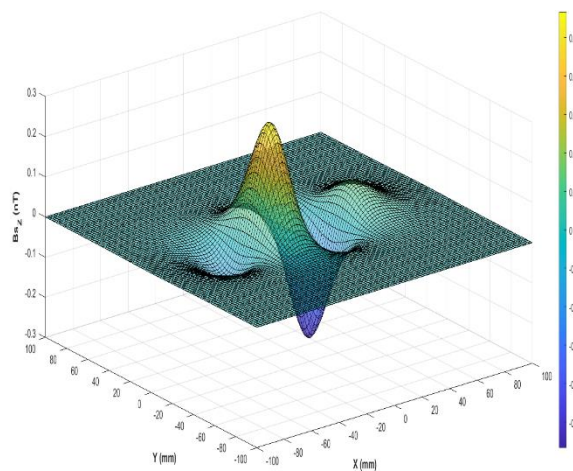


Figura 38 – Distribuição da componente vertical da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 40 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição

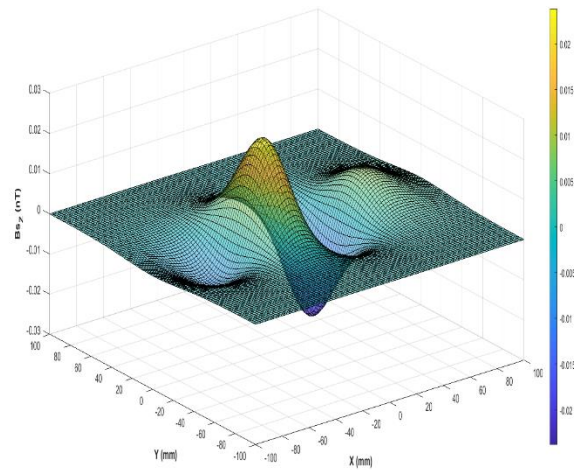


Figura 39 – Distribuição da componente vertical da densidade do fluxo magnético secundário sobre uma superfície considerando um mensurando de 5 mm de raio situado a 60 mm de profundidade em relação a origem do instrumento de medição

Para todos os níveis de profundidades analisados, fica evidente o comportamento dipolar desta componente em relação à variação da componente espacial horizontal (coordenada X). Também é possível concluir que esta componente do mensurando não é somente antissimétrica em relação a coordenada X , mas também é simétrica em relação à coordenada Y . Conforme a distribuição dipolar, observa-se uma região antissimétrica de valores elevados circularmente distribuídos nas proximidades horizontais do eixo longitudinal do instrumento.

5 Análise da Capacidade de Medição do Instrumento Proposto

Este capítulo apresenta uma análise sistemática da capacidade de medição das duas configurações propostas para o sistema de localização de corpos estranhos metálicos não-ferromagnéticos projetado nesta dissertação de mestrado (Configuração 1A, com o sensor horizontal, e Configuração 1B, com o sensor vertical, conforme definido na Tabela 11 do Capítulo 3).

As simulações da distribuição espacial da densidade de fluxo magnético secundário produzido por indução de correntes parasitas em um corpo estranho metálico não ferromagnético com geometria esférica, quando excitado pelas duas configurações consideradas mais promissoras em relação a sua operacionalidade, apresentadas no Capítulo 3, demonstraram que as amplitudes do mensurando estão distribuídas ao longo de um eixo longitudinal (conforme Figuras 29 e 32).

Em relação à Configuração 1A, cuja componente de campo magnético medida pelo magnetômetro é horizontal, e paralela à excitação, a distribuição espacial do mensurando apresenta uma característica monopolar e simétrica (conforme Figura 29). Desta forma, seu eixo de amplitudes é solidário ao eixo longitudinal central do instrumento de medição.

Já em relação à configuração 1B, cuja componente de campo magnético medida pelo magnetômetro é vertical e, portanto, perpendicular à excitação, a distribuição espacial do mensurando apresenta uma característica dipolar e antissimétrica (conforme figura 32). Portanto, nesta configuração, há dois picos com amplitudes idênticas, ambos alinhados com o eixo longitudinal central dos solenoides do estágio de excitação.

Assim, considerando corpos estranhos posicionados no plano vertical que passa pelo centro das bobinas/solenoides de excitação, pode-se determinar qual é o valor máximo absoluto da densidade de fluxo magnético secundário e, comparando com a resolução do magnetômetro, determinar a capacidade de medição do instrumento, verificando qual das configurações é considerada ótima em detectar corpos estranhos. Para tal, considera-se duas linhas de investigação, para cada uma das duas configurações:

- Qual é a maior profundidade em que um corpo estranho de determinado raio pode ser detectado pelo instrumento de medição?

- Qual é o menor corpo estranho detectável pelo instrumento de medição considerando uma determinada profundidade?

Como descrito na seção 2.2.2, considera-se, para fins de detectabilidade pelo sensor GMI da Aichi, uma resolução de 25 pT. Ou seja, considera-se que campos magnéticos secundários maiores que 25 pT são mensuráveis. Este liminar foi utilizado para as duas análises descritas a seguir.

5.1

Capacidade de Medição de Corpos Estranhos a Grandes Profundidades

Considerando um corpo estranho com determinado raio r posicionado no plano de simetria do instrumento de medição, é possível, a partir da menor distância possível entre o instrumento e o corpo estranho (interface entre a superfície do instrumento e do raio externo do corpo estranho), aumentar a profundidade do corpo estranho até que este não seja mais percebido pelo sistema de medição. Esta profundidade então seria considerada como a maior distância na qual o sistema de medição consegue detectar este corpo estranho de raio r . Considerando a resolução obtida previamente pela Equipe de Biometrologia da PUC-RIO [23], é possível aplicar esta análise de forma sistemática para corpos estranhos de diversos raios. Esta sequência analítica possibilita caracterizar o sistema de medição proposto no quesito raio do corpo estranho e profundidade máxima de detecção.

Assim, a Figura 40 apresenta a relação entre o raio do corpo estranho e sua profundidade máxima de detecção para ambas as configurações consideradas na presente dissertação. Esta simulação foi implementada segundo uma variação sistemática do raio do corpo estranho.

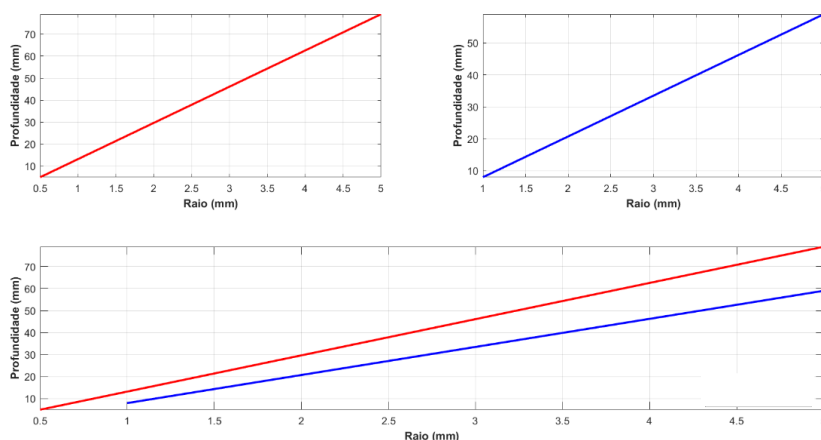


Figura 40 – Profundidade máxima de detecção de corpos estranhos. Gráficos na parte superior da Figura são relativos às configurações em particular, sendo o de cor vermelha relativo à Configuração 1A enquanto o de cor azul é relativo à Configuração 1B. O gráfico inferior da Figura é o comparativo entre as duas configurações.

A tabela 18 expressa as informações dos gráficos acima de forma quantitativa e discreta.

Tabela 18 – Profundidade máxima de detecção de corpos estranhos para as duas Configurações do instrumento de medição.

| Configuração 1A | | Configuração 1B | |
|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| Raio (mm) | Profundidade Máxima (mm) | Raio (mm) | Profundidade Máxima (mm) |
| 0,5 | 5,0 | 1,0 | 8,0 |
| 1,0 | 13,2 | 1,4 | 13,7 |
| 1,5 | 21,4 | 1,9 | 19,3 |
| 2,0 | 29,7 | 2,3 | 25,0 |
| 2,5 | 37,9 | 2,8 | 30,7 |
| 3,0 | 46,1 | 3,2 | 36,3 |
| 3,5 | 54,3 | 3,7 | 42,0 |
| 4,0 | 62,6 | 4,1 | 47,7 |
| 4,5 | 70,8 | 4,6 | 53,3 |
| 5,0 | 79,0 | 5,0 | 59,0 |

Conforme os dados apresentados na tabela 18, como esperado, quanto menor o raio do corpo estranho, menor é a profundidade máxima em que o instrumento de medição consegue detectá-lo.

O instrumento com Configuração 1A (componente do campo magnético medida pelo magnetômetro paralela à excitação) apresenta a capacidade de detectar corpos estranhos esféricos com 0,5 mm de raio a uma profundidade de até 5 mm; corpos estranhos com 2,0 mm de raio a uma profundidade de até aproximadamente 30 mm; corpos estranhos com 4,0 mm de raio a uma profundidade superior a 60 mm; e corpos estranhos com 5,0 mm de raio a uma distância aproximada de até 80 mm.

O instrumento com Configuração 1B (componente do campo magnético medida pelo magnetômetro ortogonal à excitação) apresenta a capacidade de detectar corpos estranhos esféricos de 1,0 mm de raio a uma profundidade de até 8 mm; corpos estranhos com mais de 2,0 mm de raio a uma profundidade aproximada de 25 mm; corpos estranhos com 4 mm de raio a uma profundidade máxima aproximada de 45 mm; e corpos estranhos com 5 mm de raio a uma profundidade de aproximadamente 60 mm.

Pela Figura 40, para ambas as configurações de instrumento propostas, observa-se que a profundidade máxima de detecção de corpos estranhos possui um comportamento fortemente linear com a variação de seu raio. O sistema de medição com a Configuração 1A consegue detectar corpos estranhos de até 0,5 mm de raio, enquanto que o menor corpo estranho que o sistema com a Configuração 1B consegue perceber possui 1 mm de diâmetro, ou seja, o dobro do menor corpo estranho percebido pelo instrumento da Configuração 1A.

Também pela análise da Figura 40, tem-se que, para um corpo estranho de determinado raio, o sistema com a Configuração 1A consegue detectá-lo a uma profundidade maior do que o sistema com a Configuração 1B. Por exemplo, para o corpo estranho de maior raio considerado na simulação, 5 mm, a Configuração 1A é capaz de detectá-lo a uma profundidade 20 mm maior do que a profundidade máxima de detecção do instrumento com a Configuração 1B.

Assim, neste aspecto da análise, a Configuração 1A possui maior capacidade de medição do que a Configuração 1B, sendo a mais recomendada quando se trabalha com cenários de medição envolvendo corpos estranhos pequenos (raios menores que 1 mm) ou em que há uma grande distância entre o instrumento de medição e o corpo estranho.

5.2 Capacidade de Medição de Pequenos Corpos Estranhos

Considerando um corpo estranho localizado a uma determinada profundidade do instrumento, é possível, a partir de um valor mínimo de raio, aumentar o raio até que o corpo estranho seja percebido pelo sistema de medição. Este valor de raio definiria o menor corpo estranho que o instrumento consegue detectar a esta profundidade. Considerando a resolução obtida previamente pela Equipe de Biometrologia da PUC-RIO [23], é possível aplicar esta análise de forma sistemática para corpos estranhos localizados a diversas profundidades em relação ao instrumento de medição. Esta sequência analítica possibilita caracterizar o sistema de medição proposto no quesito menor corpo estranho possível de ser detectado a uma dada profundidade. A Tabela 19 apresenta a relação entre a profundidade do corpo estranho e o menor raio detectável.

Tabela 19 – Menor corpo estranho detectável a uma determinada profundidade.

| Profundidade (mm) | Raio Mínimo Detectável (mm) | | |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| | Configuração Prévia [23] | Configuração 1A | Configuração 1B |
| 10 | 1,25 | 0,80 | 1,10 |
| 20 | 1,75 | 1,20 | 1,60 |
| 30 | 2,25 | 1,70 | 2,20 |
| 40 | 3,25 | 2,20 | 3,00 |
| 50 | 4,75 | 2,80 | 4,00 |
| 60 | 7,00 | 3,50 | 5,10 |
| 70 | 10,00 | 4,20 | 6,50 |
| 80 | - | 5,10 | 8,30 |
| 90 | - | 6,10 | - |
| 100 | - | 7,20 | - |

O instrumento previamente desenvolvido [23] é capaz de detectar um corpo estranho com 1,25 mm de raio a uma profundidade de 10 mm; corpos estranhos com raio de 3,25 mm a profundidades de até 40 mm; corpos estranhos com 4,75

mm de raio a 50 mm de profundidade; e daí por diante. A partir dos 70 mm de profundidade, esta configuração somente consegue perceber corpos estranhos com raios superiores a 20 mm.

Em relação ao instrumento proposto nesta dissertação, a Configuração 1A é capaz de perceber um corpo estranho com 0,8 mm de raio a uma profundidade de 10 mm; corpos estranhos com 2,2 mm de raio a uma profundidade de 40 mm; corpos estranhos de aproximadamente 2,8 mm de raio a uma profundidade de 50 mm; e daí por diante, até um corpo estranho de 7,2 mm de raio a uma profundidade de 100 mm.

Já a Configuração 1B somente é capaz de detectar um corpo estranho com 1,1 mm de raio a uma profundidade de 10 mm; um corpo estranho com 3 mm de raio a uma profundidade de 40 mm; e daí por diante, até um corpo estranho de 8,3 mm de raio a uma profundidade de 80 mm. A partir dos 80 mm de profundidade, esta configuração somente consegue perceber corpos estranhos com raios superiores a 10 mm.

Os dados da Tabela 19 mostram que ambas as configurações de instrumento proposto são capazes de detectar corpos estranhos menores do que o instrumento previamente desenvolvido para a mesma profundidade. Esta conclusão vem ao encontro do fato no qual o instrumento prévio possui uma configuração na qual o sistema de excitação e o sensor são fortemente acoplados, levando o magnetômetro a perceber fortemente a excitação. Com isso, a excitação deve ser limitada à faixa de medição linear do sensor GMI para a operação condizente do instrumento [22].

No caso da configuração proposta nesta dissertação, em que os elementos de excitação e medição são desacoplados, a densidade de fluxo magnético primário percebida pelo magnetômetro é de baixa intensidade, conforme demonstrado pela distribuição de seu campo magnético no espaço de medição. Desta forma, na configuração proposta, a excitação não é restrita pelo magnetômetro, permitindo assim uma maior intensidade de densidade de fluxo magnético gerado por indução de correntes parasitas no corpo estranho.

Concluindo, também neste aspecto de análise, a Configuração 1A possui maior capacidade de medição do que a Configuração 1B. Isto decorre, em parte, da maior excitação que esta configuração permite, sendo limitada somente por suas características construtivas e pelas diretrizes de inocuidade do ICNIRP, conforme previsto no Capítulo 3. Portanto, o sistema que adota a Configuração

1A é o mais recomendado quando se trabalha com cenários de medição envolvendo corpos estranhos de pequenas dimensões.

6 Conclusão

Na pesquisa desenvolvida nesta dissertação de mestrado realizou-se o projeto e validação computacional de uma nova configuração de sistema de medição destinado à localização de corpos estranhos metálicos não-magnéticos no corpo humano, com base na geração de *eddy currents* e mapeamento do campo magnético secundário por sensor GMI.

A abordagem desenvolvida dissocia as fases de excitação e de medição buscando superar limitações à capacidade de medição do transdutor magnético observada em uma configuração desenvolvida anteriormente no LaBioMet/PUC-Rio [8,9], associadas à interferência do campo magnético primário de excitação sobre a operação dos elementos sensores [8,9]. Nesse projeto anterior, os estágios de excitação e medição eram acoplados, limitando o valor máximo de densidade de fluxo magnético de excitação do corpo estranho ao valor limítrofe da faixa de operação linear do sensor GMI [22].

As configurações alternativas propostas no presente trabalho para o sistema de medição empregam um novo conceito para a configuração do sistema de excitação, constituído por pares de bobinas planares espirais (Configuração 1) ou solenoides longas e verticais (Configuração 2), ambos com enrolamentos em sentidos opostos; também variou-se a direção do eixo de sensibilidade do sensor GMI nas posições horizontal (Configuração A) ou vertical (Configuração B).

Na análise implementada para avaliação de desempenho associada à relação entre a capacidade de excitar o corpo estranho com maiores valores de campo e a capacidade de o sensor permanecer dentro da faixa de medição linear, a Configuração 1 do sistema de excitação apresentou os melhores resultados para qualquer orientação do sensor GMI (1A ou 1B) do que a Configuração 2.

Para essas duas configurações (1A e 1B), o campo magnético secundário gerado pelas *eddy currents* induzidas em corpos estranhos metálicos não-magnéticos foi avaliado por meio de sua modelagem teórica e implementação computacional. Os mapas de campo magnético secundário para diferentes profundidades do corpo estranho apresentaram um comportamento monopolar, para o sensor GMI na posição horizontal (Configuração 1A), e dipolar, para o sensor posicionado na vertical (Configuração 1B).

Avaliando-se a capacidade de medição do instrumento para essas duas configurações (1A e 1B) por meio da análise do valor máximo absoluto da densidade de fluxo magnético secundário comparado à resolução do magnetômetro observou-se que, para ambas as configurações, a profundidade máxima de detecção de corpos estranhos em função da variação de seu raio possui um comportamento fortemente linear.

Ambas as configurações (1A e 1B) do instrumento proposto se mostraram capazes de detectar corpos estranhos menores (para uma mesma profundidade) do que o instrumento desenvolvido anteriormente no LaBioMet [8,9].

Estes resultados bem-sucedidos da configuração proposta decorrem do fato de que os elementos de excitação e medição são desacoplados, evitando limitações da excitação pelo magnetômetro. A baixa intensidade da densidade de fluxo magnético primário percebida pelo magnetômetro possibilita aumentar os níveis da densidade de fluxo magnético secundário gerado pelas correntes parasitas induzidas no corpo estranho.

A Configuração 1A, por sua vez, caracterizou-se pela maior capacidade de medição do que a Configuração 1B, sendo possível amplificar ainda mais o campo magnético secundário produzido pelas *eddy currents* induzidas no objeto metálico com maior aumento da intensidade da excitação, ainda preservando a inocuidade do sistema baseada nos limites de exposição da ICNIRP, e mantendo a operação do sensor na região linear. Assim, essa configuração constituída por um sistema de excitação utilizando solenoides planares e com sensor GMI posicionado horizontalmente mostra-se mais adequada para cenários de medição mais críticos, envolvendo corpos estranhos de muito reduzida dimensão, posicionados a uma maior profundidade.

O sistema proposto, adotando a configuração alternativa do estágio de excitação com solenoides planares e do estágio de medição com sensor GMI posicionado horizontalmente, permite superar as limitações da abordagem desenvolvida anteriormente e amplificar a densidade do fluxo magnético secundário gerado pelas correntes parasitas induzidas no corpo estranho, assim possibilitando a detecção não-invasiva e inócua de pequenos fragmentos de projéteis localizados mais profundamente na pele.

Essas características, associadas ao baixo custo relativo do sistema de medição, atendendo aos princípios biometrológicos, viabilizariam a adoção clínica em larga escala do dispositivo portátil para localização não-invasiva e inócua de corpos estranhos metálicos não-ferromagnéticos em pacientes [3,9].

Como propostas de trabalhos futuros em continuidade à presente dissertação, pode-se citar:

- Implementação de protótipo do sistema de medição para localização de corpos estranhos metálicos não-magnéticos em pacientes, com base no projeto desenvolvido e validado computacionalmente; e
- Estudos experimentais para determinação da localização de objetos metálicos não-magnéticos como projéteis de arma de fogo.

Referências bibliográficas

- [1] Costa Monteiro E., Kelber C., Lima E.A., Ribeiro P.C., Bruno A.C., Barbosa C.R.H., Ribeiro E.P., Boechat P. “Magnetic Measurement Techniques for Locating Foreign Bodies in Humans”, in Biomag 96, C. J. Aine, G. Stroink, C. C. Wood, Y. Okada, e S. J. Swithenby, Orgs. New York, NY: Springer New York, 2000, p. 28–31.
- [2] E. C. MONTEIRO, C. H. BARBOSA, E. A. LIMA, P. C. RIBEIRO, E P. BOECHAT. “Locating steel needles in the human body using a SQUID magnetometer”, Phys. Med. Biol., vol. 45, no 8, p. 2389–2402, ago. 2000.
- [3] E. C. MONTEIRO E L. F. LEON. “Metrological Reliability of Medical Devices”, J. Phys.: Conf. Ser., vol. 588, p. 012032, fev. 2015.
- [4] C. H. BARBOSA, E. C. MONTEIRO, E. A. LIMA, S. F. SANTOS, E. G. CAVALCANTI, E P. C. RIBEIRO. “Improvement of a technique for localization of steel needles in humans using a SQUID magnetometer”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 11, no 1, p. 677–680, mar. 2001.
- [5] F. POMPEIA, L. A. P. GUSMÃO, C. R. H. BARBOSA, E. C. MONTEIRO, L. A. P. GONÇALVES, E F. L. A. MACHADO. “Ring shaped magnetic field transducer based on the GMI effect”, Meas. Sci. Technol., vol. 19, no 2, p. 025801, fev. 2008.
- [6] E.C. SILVA, L.A.P. GUSMÃO, C.R.H. BARBOSA, E. COSTA MONTEIRO, F. MACHADO, “High sensitivity giant magneto-impedance (GMI) magnetic transducer: Magnitude versus phase sensing”, Meas. Sci. Technol., v. 29, pp. 035106, 2011.
- [7] E. SILVA, L. GUSMÃO, C.R.H. BARBOSA, E. COSTA MONTEIRO, “An enhanced electronic topology aimed at improving the phase sensitivity of GMI sensors”, Meas. Sci. Technol., v. 25, pp. 115010, 2014.
- [8] L.G.S. FORTALEZA, C.R.H. BARBOSA, E. COSTA MONTEIRO, E.C. SILVA, L.A.P. GUSMÃO, “Detecting non-magnetic metallic foreign bodies by GMR sensors through the use of eddy currents”, XI International Congress on Electrical Metrology (SEMETRO), pp.1-4, 2015.
- [9] L. G. S. FORTALEZA, E. C. MONTEIRO, C. R. H. BARBOSA, E. C. SILVA, L.A. P. GUSMÃO, “Biomedical comparison of magnetometers for non-ferromagnetic metallic foreign body detection”, J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1044, p. 012013, jun. 2018.
- [10] B.R.C. OLIVEIRA, D. LOUZADA, E. COSTA MONTEIRO, C.R.H. BARBOSA, “Automatic system for locating magnetic foreign bodies using GMI magnetometer”, Journal of Physics: Conf. Series, v. 1826, pp. 012085, 2021.

- [11] C. R. H. BARBOSA. “Localization of firearm projectiles in the human body using a superconducting quantum interference device magnetometer: A theoretical study”, *Review of Scientific Instruments*, vol. 75, no 6, p. 2098–2106, jun. 2004.
- [12] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz). *Health Physics* 99(6):818-836; 2010
- [13] JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd Edition. ed. [S.l.]: [s.n.], 2012
- [14] BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (BIPM). *Le Système international d’unités (SI)*. 8. ed. Paris: STEDI MEDIA, v. 1, 2006
- [15] IEC 60050 Series IEV (International Electrotechnical Vocabulary)
- [16] JAMES, C. ; KARACIOZOFF, ; SHELLOCK, G. Undisclosed and undetected foreign bodies during MRI screening resulting in a potentially serious outcome. *Magnetic Resonance Imaging*, 31, 2013. 630-633.
- [17] Mahdi D, Panina A E, Mapps L 2003 et. al. Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials *Sensors Actuators A* 105(3) 271–85.
- [18] F.L.A. MACHADO; B.L. DA SILVA; S.M. REZENDE; C.S. MARTINS, Giant ac magnetoresistance in the soft ferromagnet Co 70.4 Fe 4.6 Si 15 B 10. in: *J. Appl. Phys.*, 1994: pp. 6563–6565. doi:10.1063/1.356919.
- [19] F.L.A. MACHADO; C.S. MARTINS; S.M. REZENDE, Giant magnetoimpedance in the ferromagnetic alloy Co75-xFexSi15B10. in: *Phys. Rev. B*, 1995: pp. 3926–3929. doi:0163122995.
- [20] F.L.A. MACHADO; S.M. REZENDE, A theoretical model for the giant magnetoimpedance in ribbons of amorphous soft-ferromagnetic alloys. in: *J. Appl. Phys.*, 1996: p. 6558. doi:10.1063/1.361945.
- [21] C.G. KIM; K.J. JANG; H.C. KIM, Asymmetric giant magnetoimpedance in field-annealed Co-based amorphous ribbon. in: *J. Appl. Phys.*, 1999: pp. 5447–5449.
- [22] Datasheet Multi-type Nano-tesla Sensor (MI-CB-1DJM) Aichi Micro Intelligent Corporation.
- [23] Fortaleza, L. G. C. Non-ferromagnetic metallic foreign body detection by eddy currents. 2016. MSc Thesis Metrology Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- [24] L.S. BENAVIDES; E.C. SILVA; E. COSTA MONTEIRO. Pressure transducer based on the phase characteristics of GMI effect for measuring the arterial pulse wave. *JOURNAL OF PHYSICS. CONFERENCE SERIES (ONLINE)*, v. 1065, p. 072039, 2018.

- [25] L.S. BENAVIDES; E.C. SILVA; E. COSTA MONTEIRO; C. R. HALL BARBOSA. High sensitivity pressure transducer based on the phase characteristics of GMI magnetic sensors. *Measurement Science and Technology*, v. 29, p. 035106, 2018.
- [26] S. PACHECO, L.S.B. CABRERA, E.C. SILVA, E. COSTA MONTEIRO. Design and evaluation of closed-loop GMI magnetometer for biomedical applications. *Measurement: Sensors*, v. 18, p. 100297, 2021
- [27] M.H. OLIVEIRA, J.A. MIRANDA, Biot-Savart-like law in electrostatics, *European Journal of Physics*, v. 22, nr. 1, pp. 31-38, 2001
- [28] S. PICHORIM. Review, Study, and Research of Coils for Sensors and Telemetry, 2011. DOI: 10.13140/2.1.3265.9200
- [29] ASTM International, Standard Specification for Standard Nominal Diameters and Cross-Sectional Areas of AWG Sizes of Solid Round Wires Used as Electrical Conductors, 2018, DOI: 10.1520/B0258-18
- [30] SILVESTER, P. P.; OMERAGIC, D. Sensitivity Maps for Metal Detector Design. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, n. 3, May 1999. 788-792.