

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

Dentre todas as tecnologias de medição de campo magnético existentes, a baseada em sensores GMI é uma das mais recentes. Esta tecnologia tem potencial para o desenvolvimento de magnetômetros altamente sensíveis e de baixo custo. Atualmente diversos centros de pesquisa têm realizado estudos objetivando a utilização de tais magnetômetros nas mais diversas aplicações.

As pesquisas teórico-experimentais realizadas nesta Tese possibilitaram o desenvolvimento de um magnetômetro GMI portátil e altamente sensível, baseado em uma nova abordagem do processo de transdução de campo magnético em tensão elétrica. Ao invés da abordagem convencional, baseada na leitura do módulo das amostras, desenvolveu-se um circuito de transdução sensível à variação de fase das amostras em função do campo magnético. A esta alteração na cadeia de processamento do sinal, adicionou-se uma nova configuração eletrônica, também fruto dos trabalhos da presente Tese, capaz de aumentar significativamente a sensibilidade de fase das amostras GMI.

Os trabalhos realizados, descritos nos capítulos desta Tese, conduziram a diversas publicações [79-84, 101-117] e ao depósito de patentes nacionais e internacionais [85-86, 118-119]. O nível de sensibilidade alcançado permite vislumbrar a aplicação de magnetômetros GMI na medição de campos magnéticos ultra-fracos.

A caracterização experimental das amostras GMI, apresentada no capítulo 2, possibilitou a definição do conjunto ótimo de parâmetros de condicionamento, responsável pela maximização da sensibilidade das amostras. As análises das caracterizações dos sensores GMI permitiram observar que a sensibilidade de módulo aumenta com a frequência da corrente de excitação das amostras. Porém, a partir de um dado valor de frequência, suficientemente alto, passa-se a não se

notarem ganhos significativos na sensibilidade advindos de aumentos na frequência.

Por outro lado, ao se analisar a sensibilidade de fase, observa-se um comportamento cíclico que permite que se obtenham sensibilidades máximas tanto em baixas frequências quanto em altas frequências. Dessa forma, pode-se, por exemplo, implementar um circuito de transdução, baseado na leitura de fase, que apresente sensibilidades similares para dois valores distintos da frequência da corrente de excitação das amostras. Ao se selecionar operá-lo com uma frequência mais baixa, simplifica-se a implementação eletrônica e se reduz o custo, enquanto que, ao se optar por operá-lo com uma frequência mais alta, permite-se que o transdutor tenha uma banda de passagem maior, conseguindo medir campos com frequências mais altas.

O circuito eletrônico desenvolvido para amplificação da sensibilidade de fase, apresentado no capítulo 3, possibilitou um aumento significativo da sensibilidade de fase das amostras GMI. Os resultados experimentais obtidos indicaram ganhos de sensibilidade superiores a 100 vezes.

É importante ressaltar que o circuito proposto não é específico para elementos sensores GMI, sendo útil para aprimorar a sensibilidade de quaisquer sensores que apresentem dependência das componentes resistivas e reativas de suas impedâncias em função de uma dada grandeza. Caso a impedância desse novo elemento sensor possa ser modelada de forma equivalente às amostras GMI, ou seja, por uma resistência em série com uma indutância, basta substituir a amostra GMI pelo novo elemento sensor, no circuito apresentado na Figura 29. Obviamente, mesmo nessa situação, serão necessários ajustes nos valores arbitrados para as demais impedâncias presentes no circuito, os quais podem ser obtidos pela aplicação do método de amplificação descrito no capítulo 3, tendo em vista as características de impedância do novo sensor.

Por outro lado, caso a impedância equivalente do novo sensor seja dada por uma resistência em série com uma capacitância, apesar do conceito do método de amplificação continuar sendo válido, serão necessários ajustes mais drásticos no circuito. Nessa situação, não bastará que se redefinam os valores arbitrados para as demais impedâncias presentes no circuito, sendo necessárias alterações na disposição das impedâncias internas utilizadas para implementar Z_{GIC} (Figura 29).

O magnetômetro GMI desenvolvido, cujo circuito eletrônico é apresentado no capítulo 4, apresenta uma sensibilidade da ordem de 5 mV/nT, fundo de escala de $\pm 10 \mu\text{T}$, banda passante de 1,5 kHz e densidade espectral de ruído igual a $40 \text{ nT Hz}^{-1/2}$, em 1 Hz, conforme apresentado na seção 4.2.6. As figuras de mérito obtidas indicam que o magnetômetro desenvolvido possui desempenho comparável ou mesmo superior, em certos aspectos, a alguns dos melhores magnetômetros GMI identificados na literatura, apresentados na Tabela 2. Destaca-se que, ao contrário dos magnetômetros apresentados na Tabela 2, as figuras de mérito do magnetômetro GMI desenvolvido não foram medidas dentro de câmaras magneticamente blindadas, que tipicamente permitem reduções da ordem de 1000 vezes no ruído eletromagnético ambiental [95-97].

Os ensaios experimentais, apresentados no capítulo 5, realizados utilizando-se o magnetômetro desenvolvido, indicaram seu adequado funcionamento. Ele conseguiu medir satisfatoriamente a velocidade de rotação dos ponteiros de um relógio analógico. O magnetômetro também foi eficaz no teste realizado a fim de avaliar a dependência da velocidade de rotação de motores *brushless* CC em função da tensão CC aplicada a seus terminais de alimentação. Os resultados obtidos foram coerentes com a especificação nominal do motor. Destaca-se que o magnetômetro conseguiu realizar tais medições com elevada relação sinal/ruído, mesmo tendo sido disposto significativamente afastado do motor.

No teste para o qual o elemento sensor GMI foi excitado por um sinal cardíaco, artificialmente gerado por uma Bobina de Helmholtz, também verificou-se a adequação entre o sinal artificialmente gerado e o sinal de saída do transdutor. Por fim, o emprego do transdutor desenvolvido na medição magnética da onda de pulso arterial de um voluntário possibilitou a medição deste sinal mesmo sem qualquer auxílio de amplificação mecânica.

6.2. **Trabalhos Futuros**

6.2.1. **Transdutor Magnético**

Ao se projetarem transdutores de alta sensibilidade deve-se buscar que a resolução do sistema seja limitada pelo ruído intrínseco do elemento sensor e não

pelo ruído eletrônico [87, 131-133], a fim de se efetivamente tirar proveito de todo o potencial do elemento sensor. O magnetômetro desenvolvido possui alta sensibilidade e grande potencial para detecção de campos magnéticos ultra fracos. Dessa forma, em trabalhos futuros, sugere-se avaliar matematicamente o ruído eletrônico na saída do magnetômetro, a fim de se identificarem eventuais fontes de ruído críticas e, conseqüentemente, otimizar seu desempenho.

Também, sugere-se refazer a caracterização do magnetômetro GMI dentro de uma câmara blindada, a fim de se obterem figuras de mérito mais confiáveis, em especial a curva de ruído $1/f$. Destaca-se que, apesar de serem extremamente úteis na caracterização de transdutores magnéticos ultrasensíveis, por propiciarem expressiva atenuação das interferências magnéticas ambientais, os custos associados à fabricação/instalação de câmaras magnéticas são proibitivos para o uso em larga escala.

Conseqüentemente, para medições em ambientes desprovidos de blindagem magnética, por mais sensível que um transdutor magnético seja, ele terá dificuldades para detectar campos magnéticos ultra-fracos cujas intensidades estejam abaixo dos níveis de ruído/interferência magnética ambiental gerada pelas mais diversas fontes – incluindo a rede elétrica, que produz grande interferência em 60 Hz.

No entanto, nos casos em que se pode admitir que a fonte de campo esteja muito mais próxima do sensor do que as fontes de ruído/interferência, destaca-se que existe um artifício útil para medição de campos magnéticos ultra-fracos em ambientes sem blindagem magnética. Por meio da implementação das chamadas configurações gradiométricas, pode-se aprimorar significativamente a relação sinal/ruído, sem as desvantagens de custo apresentadas pelas câmaras blindadas.

Em um gradiômetro é realizada uma leitura diferencial entre, pelo menos, dois sensores de comportamento idêntico, um próximo à fonte de interesse e outro a uma distância suficiente para que este não seja significativamente sensibilizado pela fonte de sinal. O sinal resultante é o sinal de interesse, livre de ruído proveniente de fontes distantes, o qual é suposto comum a ambos os sensores [4, 7]. Destaca-se que o desempenho dos gradiômetros está fortemente atrelado à homogeneidade dos sensores [4, 7, 109-111, 117].

Dependendo da configuração podem-se implementar gradiômetros de diversas ordens, sendo que, em geral, o fator de atenuação da interferência

magnética, proveniente de fontes distantes, aumenta ao se elevar a ordem. A Figura 86 permite visualizar, para magnetômetros SQUID, as configurações das bobinas sensoras que permitem a implementação de gradiômetros de primeira e segunda ordem. Também observa-se o denominado gradiômetro de ordem zero, que nada mais é do que um magnetômetro, o qual não oferece atenuação de ruído [4, 7-8].

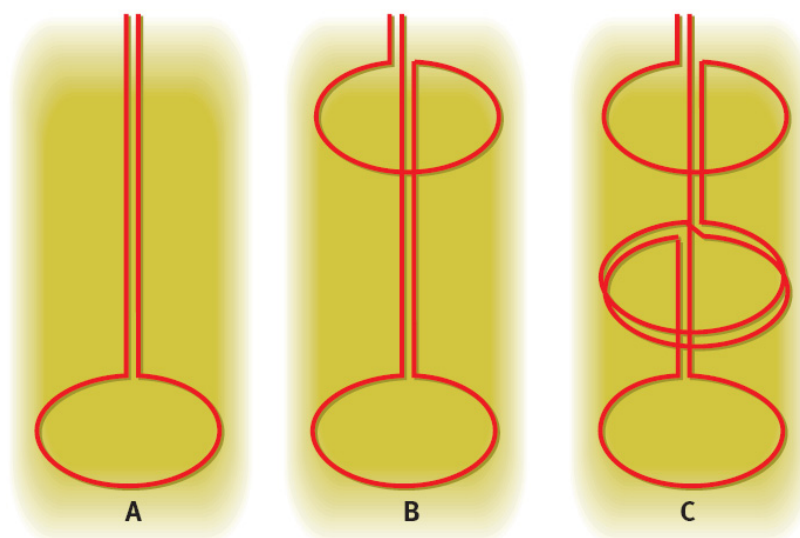


Figura 86 – Configurações gradiométricas (SQUID): (A) ordem zero – detecta todas as linhas de campo que atravessam a bobina, (B) 1ª ordem e (C) 2ª ordem.

Tipicamente, os gradiômetros de primeira ordem atenuam de 10 a 100 vezes a interferência magnética proveniente de fontes distantes, os de 2ª ordem exibem atenuações entre 100 e 1000 vezes, e extraem-se da literatura estruturas gradiométricas de 3ª ordem capazes de reduzir o ruído em cerca de 10000 vezes [4, 7-8].

Tendo em vista as características do magnetômetro GMI desenvolvido, pode-se inferir que a implementação de um gradiômetro GMI possibilitará o aprimoramento da resolução, advindo de uma melhoria na relação sinal/ruído. Dessa forma, poder-se-á expandir o leque de aplicações nas quais ele poderá ser empregado, passando-se a abranger aplicações críticas como a medição de campos biomagnéticos, que são campos magnéticos ultra-fracos gerados pela atividade bioelétrica de tecidos excitáveis [7].

Em paralelo aos trabalhos centrais desta Tese, tendo em vista a implementação de configurações gradiométricas, desenvolveu-se um método de homogeneização das características de fase de amostras GMI heterogêneas [109-

111, 117, 118-119], com base em princípios similares aos do método de amplificação da sensibilidade de fase. Destaca-se, da mesma forma que para o método da amplificação da sensibilidade de fase, que este método não é aplicável somente a sensores GMI, mas a quaisquer elementos sensores que apresentem impedâncias cujas componentes resistivas e reativas dependam de uma dada grandeza, abrindo o leque para outras possíveis aplicações.

Para fins de implementação da topologia gradiométrica, existe, ainda, a possibilidade de se substituir as amostras GMI atuais por outros tipos de amostras, como as baseadas em filmes finos, que apresentam uma homogeneidade intrínseca muito superior, possivelmente descartando a necessidade da homogeneização eletrônica dos sensores. Caso esses novos elementos sensores sejam suficientemente homogêneos, poder-se-ia inclusive implementar gradiômetros intrínsecos, similares às bobinas sensoras utilizadas pelos SQUIDS, ao invés de se utilizar um gradiômetro eletrônico, que é baseado na subtração de sinais elétricos gerados por dois circuitos independentes. Neste caso, espera-se que a rejeição de ruído seja mais eficiente, pois este será cancelado ainda no estágio do sensor, não chegando ao estágio de processamento eletrônico.

6.2.2. Novos Estudos e Novas Técnicas de Transdução

O circuito eletrônico de amplificação da sensibilidade de fase, apresentado no capítulo 3, continuará a ser investigado tanto sob o ponto de vista teórico quanto prático. Em especial, no que tange à análise teórica, aprimorar-se-á o modelo matemático aqui desenvolvido, incorporando os aspectos não ideais dos componentes do circuito eletrônico, destacados na seção 3.2.2. Dessa forma, o modelo será capaz de retratar mais fielmente o comportamento experimental e propiciará que se identifiquem novos pontos passíveis de otimização. Em relação às análises experimentais, em trabalhos futuros, avaliar-se-á em detalhes o desempenho do circuito na região estável, além de se inspecionarem novas possibilidades de ajustes do circuito para operação na região instável, que possam propiciar sensibilidades ainda mais elevadas.

Destaca-se que, para o circuito operando na região instável, a qual foi a região de operação utilizada no presente trabalho, variações do campo magnético

implicam em variações na impedância da amostra GMI, as quais podem alterar a frequência de oscilação. Porém, conforme apresentado no capítulo 2, sabe-se que mudanças na frequência de oscilação também alteram a impedância das amostras. Esta interdependência deve ser melhor investigada a fim de se modelar mais fidedignamente o comportamento do circuito na região instável. Para tal fim, a dependência das componentes resistiva e reativa da amostra GMI, em função da frequência da corrente, deve ser experimentalmente avaliada, para frequências em torno da frequência de oscilação. Dessa forma, poder-se-á determinar uma expressão analítica que modele tal comportamento, possibilitando incorporá-lo ao modelo original apresentado no capítulo 3.

Destaca-se ainda que, conforme descrito no Apêndice A, já foram iniciados estudos com Redes Neurais artificiais para modelagem computacional do comportamento das características de impedância das amostras sensoras GMI em relação aos diversos parâmetros que as afetam [113], sendo que sugere-se a continuidade e expansão destes trabalhos.

A caracterização do magnetômetro GMI, apresentada no capítulo 4, mais especificamente na seção 4.2.2, permite verificar que é possível operá-lo como transdutor de campo magnético em frequência. Tal possibilidade será futuramente investigada a fim de se poder analisar eventuais vantagens e desvantagens desta alteração no processo de transdução. Lembra-se que este comportamento também é fruto do circuito eletrônico desenvolvido, apresentado no capítulo 3. No entanto, para esse novo processo de transdução deve-se revisitar a análise matemática realizada sob um novo ponto de vista, o da maximização da variação da frequência de oscilação com o campo magnético.