

**Eduardo Costa da Silva**

## **Magnetômetro GMI de Alta Sensibilidade para Medição de Campos Magnéticos Ultra-fracos**

### **Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Guilherme Penello Temporão  
Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Elisabeth Costa Monteiro  
Co-Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro  
Outubro de 2013



**Eduardo Costa da Silva**

## **Magnetômetro GMI de Alta Sensibilidade para Medição de Campos Magnéticos Ultra-fracos**

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

**Prof. Guilherme Penello Temporão**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Elisabeth Costa Monteiro**

Co-Orientadora

Programa de Pós Graduação em Metrologia - PUC-Rio

**Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa**

Co-Orientador

Programa de Pós Graduação em Metrologia - PUC-Rio

**Prof. Fernando Luis de Araujo Machado**

Departamento de Física - UFPE

**Prof. Helio Ricardo Carvalho**

Divisão de Metrologia Elétrica - INMETRO

**Prof. Marcelo Martins Werneck**

Programa de Engenharia Elétrica - UFRJ

**Prof. Marcio Nogueira de Souza**

Programa de Engenharia Biomédica - UFRJ

**Prof. José Franco Machado do Amaral**

Departamento de Eletrônica e Telecomunicações - UERJ

**Prof. Miguel de Andrade Freitas**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Rubem Luis Sommer**

Programa de Pós Graduação em Física - CBPF

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 3 de outubro de 2013

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

### **Eduardo Costa da Silva**

Graduado em Engenharia Elétrica e em Engenharia de Controle e Automação pela PUC-Rio em 2008. Mestre em Metrologia pela PUC-Rio em 2010. Atualmente, é doutorando em Engenharia Elétrica (Eletromagnetismo Aplicado). Publicou 7 artigos em periódicos e 21 trabalhos em anais de eventos. Possui 4 patentes e 3 softwares. Tem atuado no desenvolvimento de circuitos eletrônicos, instrumentação eletrônica, transdutores magnéticos e engenharia biomédica.

#### Ficha Catalográfica

Silva, Eduardo Costa da

Magnetômetro GMI de alta sensibilidade para medição de campos magnéticos ultra-fracos / Eduardo Costa da Silva; orientador: Guilherme Penello Temporão; co-orientadora: Elisabeth Costa Monteiro; co-orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa. – 2013.

219 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Instrumentação eletrônica. 3. Magnetômetro. 4. Magnetoimpedância gigante. 5. Sensores magnéticos. 6. Alta sensibilidade. I. Temporão, Guilherme Penello. II. Monteiro, Elisabeth Costa. III. Barbosa, Carlos Roberto Hall. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. V. Título.

CDD: 621.3

Dedico este trabalho a Nossa Senhora de Fátima, por guiar meus passos, a meus pais, Eduardo e Beatriz, e avó, Maria, por apoiarem e incentivarem minha formação acadêmica, e pela paciência e compreensão nos momentos difíceis.

## Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Guilherme Penello Temporão por acreditar neste trabalho, por toda confiança e pelas enriquecedoras contribuições, revisões e sugestões. Tenho certeza de que estes foram apenas os primeiros passos de uma longa e profícua colaboração.

Ao meu co-orientador Professor Carlos Roberto Hall Barbosa pelos ensinamentos, auxílios, presteza, amizade e dedicação; por me tornar célere nos momentos necessários, por ter acreditado e contribuído enormemente para os objetivos deste trabalho. Espero que possamos continuar a navegar por mares nunca dantes navegados, por muitos anos!

À minha co-orientadora Professora Elisabeth Costa Monteiro pela confiança, dedicação e amizade; por acreditar na minha capacidade criativa, por fomentar e auxiliar todas as novas pesquisas propostas, pelo apoio incondicional e por ser a definição viva do termo *multitasking*. Sua contribuição foi, é e será fundamental para o sucesso desta e das novas aventuras que se apresentam!

Ao oráculo, Professor Luiz Antônio Pereira de Gusmão, por ser uma inesgotável fonte de saber, por ter sido um companheiro inestimável nesta jornada, por ter iluminado as trevas do caminho e por ter se mostrado sempre tão solícito. Nunca terei como agradecer o suficiente! Afinal, determinadas coisas não têm preço!

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

Em especial ao Professor Fernando Luiz de Araújo Machado, pela acolhida em minha visita ao Departamento de Física da UFPE, pelos esclarecimentos e por fornecer as amostras GMI utilizadas nesta pesquisa.

Aos Professores da PUC-Rio, dos Departamentos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação, CETUC e Metrologia, pela sólida formação acadêmica.

À equipe de suporte técnico do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, em especial aos técnicos Manuel Ramos Martins, Isnarde Antonio Ernesto e Evandro Costa dos Reis, por permitirem meu acesso à oficina e por terem um estoque de componentes eletrônicos superior ao da Farnell.

Aos alunos Rodrigo Gonçalves Novais, Leonardo Gouvea e Silva Fortaleza, Daniela de Mattos Szwarcman, Gabriel Drummond de Mendonça Simonsen, João Henrique Costa Carvalho Carneiro, João Ricardo Cortes Nunes, Lucas Castro Faria e Yuri Leipner, que desenvolveram ou estão desenvolvendo iniciações científicas, trabalhos de conclusão de cursos de graduação e mestrados, relacionados ao tema desta Tese. Suas contribuições ao trabalho aqui apresentado foram inestimáveis! A curiosidade é a mola propulsora da ciência, nunca parem de se questionar sobre o funcionamento das coisas!

À equipe da Agência PUC-Rio de Inovação, em especial Shirley Coutinho, Taís e Márcio, por acreditarem e estimularem a integração universidade-empresa, por promoverem cursos e palestras sobre propriedade intelectual no ambiente da PUC-Rio, por permitirem que pesquisadores da universidade informem-se sobre aspectos relativos à propriedade intelectual, e por serem um instrumento de transformação de invenções em inovações.

À PUC-Rio, por acreditar na pesquisa científica como instrumento de desenvolvimento social e evolução humana.

Ao CNPq, pelos auxílios financeiros concedidos.

## Resumo

Costa da Silva, Eduardo; Temporão, Guilherme Penello (Orientador); Monteiro, Elisabeth Costa (Co-orientadora); Barbosa, Carlos Roberto Hall (Co-orientador). **Magnetômetro GMI de Alta Sensibilidade para Medição de Campos Magnéticos Ultra-fracos**. Rio de Janeiro, 2013. 219 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta Tese teve por objetivo desenvolver um magnetômetro de alta sensibilidade, baseado nas características de fase do efeito da Magnetoimpedância Gigante (GMI – *Giant Magnetoimpedance*), para medição de campos magnéticos ultra-fracos. Elementos sensores GMI apresentam grande potencial na fabricação de magnetômetros que conciliem alta sensibilidade e elevada resolução espacial com baixo custo. A otimização da sensibilidade do transdutor magnético é diretamente afetada pela sensibilidade de seus elementos sensores GMI, cuja maximização é um processo intrinsecamente multivariável. Consequentemente, a metodologia experimental empregada iniciou-se pelo desenvolvimento de um sistema automático de caracterização das amostras GMI, de modo a se garantir a agilidade do processo de caracterização, possibilitando a obtenção de um volume significativo de informações experimentais. A análise minuciosa dos dados provenientes das medições experimentais permitiu a definição do ponto ótimo de operação das amostras GMI estudadas. Em todas as medições experimentais realizadas foram obtidas e avaliadas as curvas de histerese das amostras GMI. Na sequência, foram idealizados circuitos eletrônicos para condicionamento das amostras GMI e leitura das características de fase de sua impedância, destacando-se a configuração eletrônica desenvolvida para a amplificação da sensibilidade de fase. Foram, inclusive, depositadas patentes nacionais e internacionais referentes ao método proposto e ao novo transdutor magnético GMI (PI 0902770-0; PI 1004686-0; WO/2010/094096 e WO/2012/048395). As caracterizações e ensaios experimentais realizados indicaram a eficácia da abordagem proposta, evidenciando o grande potencial do magnetômetro GMI desenvolvido, o qual apresentou uma elevada sensibilidade de 5 mV/nT. A resolução do magnetômetro foi limitada pelo ruído magnético ambiental, indicando que sua capacidade de medição de campos inferiores aos níveis de ruído poderá ser claramente evidenciada quando for avaliada em ambiente magneticamente blindado. Os estudos teórico-experimentais realizados indicam o potencial do transdutor

magnético GMI desenvolvido, caracterizado por seu baixo custo e elevada sensibilidade, para aplicação na medição de campos magnéticos ultra-fracos.

### **Palavras-chave**

Instrumentação Eletrônica; Magnetômetro; Magnetoimpedância Gigante; Sensores Magnéticos; Alta Sensibilidade.

## Abstract

Costa da Silva, Eduardo; Temporão, Guilherme Penello (Advisor); Monteiro, Elisabeth Costa (Co-Advisor); Barbosa, Carlos Roberto Hall (Co-Advisor). **High Sensitivity GMI Magnetometer for the Measurement of Ultra-Weak Magnetic Fields**. Rio de Janeiro, 2013. 219 p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This Thesis aimed at developing a high sensitivity magnetometer, based on the phase characteristics of the Giant Magnetoimpedance effect (GMI), for measuring ultra-weak magnetic fields. GMI sensor elements have great potential to implement magnetometers that combine high sensitivity and high spatial resolution with low cost. The optimization of the magnetic transducer sensitivity is directly affected by the sensitivity of its GMI sensor elements, whose maximization is inherently multivariate. Consequently, the first step of the experimental methodology employed was to develop an automatic system for the characterization of GMI samples, so as to ensure the agility of the characterization process, allowing the gathering of a significant amount of experimental data. A thorough analysis of the experimental data led to the definition of the optimal operation point of the analyzed GMI samples. The hysteresis curves of the GMI samples were obtained and evaluated, in all of the performed experimental measurements. Based on the characterization studies results, electronic circuits were designed for conditioning the GMI samples and reading their impedance phase characteristics, highlighting the new electronic configuration developed for enhancing the phase sensitivity. National and international patents were filed, related to the proposed method, for sensitivity enhancement, and to the new GMI magnetometer (PI 0902770-0; PI 1004686-0; WO/2010/094096 e WO/2012/048395). The performed experimental characterizations and assays indicated the effectiveness of the proposed approach, showing the great potential of the developed GMI magnetometer, which presents a high sensitivity of 5 mV/nT. The magnetometer resolution was limited by the environmental magnetic noise, pointing out their capability in measuring fields below the environmental noise level, which can be clearly evidenced only when evaluated in a magnetically shielded room. The theoretical and experimental studies carried out indicate the potential of the developed GMI magnetic transducer, characterized by

its low cost and high sensitivity, for applications involving the measurement of ultra-weak magnetic fields.

## **Keywords**

Electronic Instrumentation; Magnetometer; Giant Magnetoimpedance; Magnetic Sensors; High Sensitivity.

## Sumário

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 1          | Introdução  | 25 |
| 1.1.       | Transdutores Magnéticos                                     | 25 |
| 1.1.1.     | <i>Superconducting Quantum Interference Device</i> (SQUID)  | 27 |
| 1.1.2.     | Bobinas Sensoras  | 29 |
| 1.1.3.     | <i>Fluxgates</i>  | 30 |
| 1.1.4.     | Fibra-óptica  | 32 |
| 1.1.5.     | GMR   | 33 |
| 1.1.6.     | GMI   | 35 |
| 1.1.6.1.   | Aspectos Teóricos   | 35 |
| 1.1.6.2.   | GMI Assimétrica   | 40 |
| 1.1.6.3.   | Técnicas de Transdução                                      | 41 |
| 1.1.6.3.1. | Leitura Direta do Módulo                                    | 41 |
| 1.1.6.3.2. | Leitura em Meia Ponte                                       | 42 |
| 1.1.6.3.3. | Rede de Duas Portas   | 43 |
| 1.1.6.3.4. | Leitura de Frequência                                       | 45 |
| 1.1.6.4.   | Comparação de Figuras de Mérito                             | 48 |
| 1.2.       | Relevância e Objetivos                                      | 49 |
| 1.3.       | Estrutura da Tese   | 50 |
| 2          | Caracterização das Amostras GMI                             | 52 |
| 2.1.       | Caracterização Experimental: Metodologia                    | 52 |
| 2.1.1.     | Caracterização Experimental do Módulo da Impedância         | 56 |
| 2.1.2.     | Caracterização Experimental da Fase da Impedância           | 58 |
| 2.1.3.     | Análise dos Resultados Experimentais                        | 59 |
| 2.1.4.     | Otimização da Sensibilidade das Amostras GMI                | 61 |
| 2.2.       | Características da Amostra GMI Seleccionada                 | 62 |
| 2.2.1.     | Modelo elétrico da amostra GMI seleccionada                 | 64 |
| 2.2.2.     | Sensibilidade aos parâmetros da corrente de condicionamento | 66 |
| 3          | Amplificação da Sensibilidade de Fase                       | 70 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.1. Método de Amplificação  | 70  |
| 3.2. Método de Amplificação Aprimorado                             | 76  |
| 3.2.1. Exemplo de Aplicação do Método                              | 86  |
| 3.2.2. Simulações SPICE  | 92  |
| 3.2.2.1. Simulações SPICE 1 – Elementos Ideais                     | 93  |
| 3.2.2.2. Simulações SPICE 2 – Influência dos AmpOps Reais          | 95  |
| 3.2.2.3. Simulações SPICE 3 – Influência da Fonte de Corrente Real | 98  |
| 3.2.2.4. Simulações SPICE 4 – Influência das Resistências Espúrias | 109 |
| 3.2.2.5. Simulações SPICE – Considerações Finais                   | 112 |
| 3.2.3. Estabilidade do Circuito                                    | 112 |
| 3.2.3.1. Limitação da Amplitude                                    | 116 |
| <br>   |     |
| 4 Magnetômetro GMI   | 120 |
| 4.1. Circuito Eletrônico de Transdução                             | 122 |
| 4.2. Caracterização Experimental                                   | 138 |
| 4.2.1. Considerações sobre a Operação do Circuito                  | 138 |
| 4.2.2. Estabilidade da frequência de oscilação                     | 140 |
| 4.2.3. Amplificação da Sensibilidade de Fase                       | 144 |
| 4.2.4. Análise do Estágio de Filtragem                             | 147 |
| 4.2.5. Análise da Sensibilidade                                    | 148 |
| 4.2.6. Análise da Figura de Ruído $1/f$                            | 157 |
| <br>   |     |
| 5 Ensaio Experimentais com o Magnetômetro GMI                      | 161 |
| 5.1. Bobina de Excitação de Relógio de Cristal de Quartz           | 161 |
| 5.2. Motor <i>Brushless</i> CC                                     | 168 |
| 5.3. Sinal Cardíaco Sintetizado                                    | 171 |
| 5.4. Onda de Pulso Arterial Carotídeo                              | 176 |
| <br>   |     |
| 6 Conclusões e Trabalhos Futuros                                   | 181 |
| 6.1. Conclusões  | 181 |
| 6.2. Trabalhos Futuros   | 183 |
| 6.2.1. Transdutor Magnético  | 183 |
| 6.2.2. Novos Estudos e Novas Técnicas de Transdução                | 186 |

|   |     |
|---|-----|
| Referências Bibliográficas  | 188 |
| Apêndice A Modelagem dos Sensores GMI por Redes Neurais             | 203 |
| A.1. Sensibilidade das Amostras GMI                                 | 204 |
| A.2. Redes Neurais  | 207 |
| A.2.1. Normalização   | 207 |
| A.2.2. Topologia  | 209 |
| A.2.3. Resultados   | 210 |
| Apêndice B Características do Circuito Eletrônico do Transdutor GMI | 214 |
| B.1. Configuração Mecânica da PCB                                   | 214 |
| B.2. Lista de Componentes   | 215 |
| B.2.1. Módulo I   | 215 |
| B.2.2. Módulo II  | 218 |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Representação esquemática do SQUID.  | 28 |
| Figura 2 – Configuração esquemática de um transdutor magnético do tipo <i>Fluxgate</i> .  | 31 |
| Figura 3 – Curva de magnetização com Histerese.   | 31 |
| Figura 4 – Princípio de funcionamento de um <i>Fluxgate</i> .   | 32 |
| Figura 5 – Configuração esquemática de um transdutor magnético a Fibra-óptica.  | 33 |
| Figura 6 – Medição Típica do efeito LMI.  | 36 |
| Figura 7 – Magnetômetro GMI baseado na leitura do módulo da impedância [87].  | 41 |
| Figura 8 – Magnetômetro GMI baseado na leitura em meia ponte [54].  | 42 |
| Figura 9 – (a) Representação esquemática do elemento sensor e (b) Modelo da rede de duas portas associada.  | 43 |
| Figura 10 – Magnetômetro GMI baseado na configuração do elemento sensor como uma rede de duas portas, composta pela associação da amostra GMI a uma bobina de leitura [88].   | 44 |
| Figura 11 – Magnetômetro GMI baseado na variação da frequência de oscilação com o campo magnético [89].   | 45 |
| Figura 12 – Níveis de tensão nas entradas e saídas do comparador: (a) saída $v_o$ , (b) entrada inversora $v_-$ e (c) entrada não-inversora $v_+$ .   | 46 |
| Figura 13 – Diagrama de Blocos do sistema utilizado na caracterização das fitas GMI.  | 53 |
| Figura 14 – Bobina de Helmholtz com a fita GMI posicionada em seu centro.   | 55 |
| Figura 15 – Módulo da impedância de amostras GMI, em forma de fita, em função do campo magnético, submetidas a $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi f t)]$ mA, com os seguintes comprimentos: (a) 1 cm, (b) 3 cm, (c) 5 cm e (d) 15 cm. | 57 |
| Figura 16 – Módulo da impedância de amostras GMI, em forma de fita, em função do campo magnético; para amostras   |    |

com diversos comprimentos: (a) 1 cm, excitada por  $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$  mA, (b) 3 cm, excitada por  $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 5 \cdot 10^6 t)]$  mA, (c) 5 cm, excitada por  $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$  mA e (d) 15 cm, excitada por  $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 10 \cdot 10^6 t)]$  mA. 57

Figura 17 – Fase da impedância de amostras GMI, em forma de fita, em função do campo magnético, submetidas a  $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi f t)]$  mA, com os seguintes comprimentos: (a) 1 cm, (b) 3 cm, (c) 5 cm e (d) 15 cm. 58

Figura 18 – Fase da impedância de amostras GMI, em forma de fita, em função do campo magnético; para amostras com diversos comprimentos: (a) 1 cm, excitada por  $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$  mA, (b) 3 cm, excitada por  $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 2 \cdot 10^6 t)]$  mA, (c) 5 cm, excitada por  $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$  mA e (d) 15 cm, excitada por  $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 10 \cdot 10^6 t)]$  mA. 59

Figura 19 – Curvas de Histerese de Módulo e Fase da amostra GMI com 3 cm de comprimento, excitada por  $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$  mA. (a) Módulo da Impedância em função do campo magnético; e (b) Fase da impedância em função do campo magnético. 63

Figura 20 – Curvas Médias de Módulo e Fase da amostra GMI com 3 cm de comprimento, excitada por  $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$  mA. (a) Módulo da Impedância em função do campo magnético; e (b) Fase da impedância em função do campo magnético. 63

Figura 21 – Curvas Médias de Resistência e Indutância da amostra GMI com 3 cm de comprimento, excitada por  $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$  mA. (a) Resistência em função do campo magnético; e (b) Indutância em função do campo magnético. 65

Figura 22 – (a) Curvas de fase da impedância e (b) Curvas de variação de fase  $\Delta\theta_{I_{ca}}$  em função do campo magnético, para diferentes valores de amplitude  $I_{ca}$  da corrente de excitação

|  |    |
|--|----|
| (10 mA, 12,5 mA, 15 mA, 17,5 mA e 20 mA).  | 66 |
| Figura 23 – (a) Curvas de fase da impedância e (b) Curvas de variação de fase $\Delta\theta_{lca}$ em função do campo magnético, para diferentes valores de frequência $f$ da corrente de excitação (95 kHz a 105 kHz, em passos de 1 kHz).                                | 67 |
| Figura 24 – Curvas de fase da impedância em função do campo magnético, para diferentes níveis CC $I_{CC}$ da corrente de excitação (0 mA a 100 mA, em passos de 20 mA).  | 68 |
| Figura 25 – Configuração eletrônica idealizada para implementação do método de amplificação da sensibilidade de fase.  | 71 |
| Figura 26 – <i>Generalized Immittance Converter</i> (GIC).   | 72 |
| Figura 27 – Representação esquemática do circuito eletrônico desenvolvido para a amplificação da sensibilidade de fase das amostras GMI.   | 72 |
| Figura 28 – Sensibilidade de fase das amostras GMI em função de $C_{aj}$ e $Z_{FDNR}$ .  | 75 |
| Figura 29 – Representação esquemática da configuração aprimorada do circuito para amplificação da sensibilidade de fase.   | 77 |
| Figura 30 – Função arco-tangente.  | 78 |
| Figura 31 – Representação fasorial das impedâncias $Z_{eq2}$ e $Z_{gic}$ , ajustando-se $R_{AJ}$ de modo a garantir que o denominador do argumento da função arco tangente, eq. (53), seja uma constante negativa, para (a) $H = H_{pol}$ e (b) $H = H_{pol} + \Delta H$ . | 84 |
| Figura 32 – Representação fasorial das impedâncias $Z_{eq2}$ e $Z_{gic}$ , ajustando-se $R_{AJ}$ de modo a garantir que o denominador do argumento da função arco tangente, eq. (53), seja uma constante positiva, para (a) $H = H_{pol}$ e (b) $H = H_{pol} + \Delta H$ . | 84 |
| Figura 33 – Curvas teóricas de fase $\theta_{eq2}$ em função do campo magnético $H$ , obtidas ao se variar $R_{AJ}$ .  | 90 |
| Figura 34 – Curvas das componentes da impedância $Z_{eq2}(H)$ em função do campo magnético $H$ . (a) componente resistiva $R_{eq2}(H)$ e (b) componente reativa $X_{eq2}(H)$ .   | 91 |
| Figura 35 – SPICE 1: Comportamento das componentes resistiva   |    |

|  |     |
|--|-----|
| $R_{eq2}$ e reativa $X_{eq2}$ da impedância equivalente $Z_{eq2}$ ,<br>em função da frequência da corrente de excitação.   | 94  |
| Figura 36 – SPICE 2: Comportamento das componentes resistiva<br>$R_{eq2}$ e reativa $X_{eq2}$ da impedância equivalente $Z_{eq2}$ ,<br>em função da frequência da corrente de excitação.   | 96  |
| Figura 37 – SPICE 2: Curva de fase $\theta_{eq2}$ em função do<br>campo magnético $H$ .  | 97  |
| Figura 38 – Representação esquemática do circuito<br>eletrônico de amplificação da sensibilidade de fase, com a<br>fonte de corrente ideal $I_{CC}$ substituída por uma implementação real.  | 99  |
| Figura 39 – Curva $i_D \times V_{SD}$ típica de um transistor<br>PMOS tipo enriquecimento.   | 100 |
| Figura 40 – Curva característica $i_D \times V_{DS}$ do transistor<br>PMOS tipo enriquecimento FDC6304P, utilizado na<br>implementação da fonte de corrente real $I_{CC}$ .  | 101 |
| Figura 41 – Estruturas para implementação da fonte de<br>corrente CC: (a) conexão direta entre $V_{CC} = 6\text{ V}$ e o <i>source</i><br>de Q1 e (b) conexão entre $V_{CC} = 6\text{ V}$ e o <i>source</i> de Q1<br>por meio de uma resistência $R_{S1A}$ . | 103 |
| Figura 42 – Dependência da corrente $i_D$ com a temperatura,<br>entre 15 °C e 35 °C, para: (a) a topologia apresentada<br>na Figura 41(a); e (b) a topologia apresentada na Figura 41(b).  | 105 |
| Figura 43 – SPICE 3: Comportamento das componentes resistiva<br>$R_{eq2}$ e reativa $X_{eq2}$ da impedância equivalente $Z_{eq2}$ ,<br>em função da frequência da corrente de excitação.   | 108 |
| Figura 44 – SPICE 4: Comportamento das componentes resistiva<br>$R_{eq2}$ e reativa $X_{eq2}$ da impedância equivalente $Z_{eq2}$ ,<br>em função da frequência da corrente de excitação.   | 111 |
| Figura 45 – Comportamento dos polos e zeros do sistema, para<br>$R_{AJ} = 217\ \Omega$ , em função do campo magnético, $-1,0\text{ Oe} < H < -0,4\text{ Oe}$ .   | 115 |
| Figura 46 – Tensão $v_{out}(t)$ , medida no terminal de leitura<br>do circuito apresentado na Figura 38, com o circuito ajustado<br>para operar na região instável.  | 117 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 47 – Tensões no dreno $v_D$ , <i>source</i> $v_S$ e <i>gate</i> $v_G$ do MOSFET Q1, utilizado para implementar a fonte de corrente $I_{CC}$ do circuito apresentado na Figura 38.   | 119 |
| Figura 48 – Diagrama de blocos do circuito eletrônico do Magnetômetro GMI.   | 120 |
| Figura 49 – Representação esquemática do circuito eletrônico completo desenvolvido para o magnetômetro GMI.  | 122 |
| Figura 50 – Representação esquemática do <i>módulo II</i> do circuito eletrônico desenvolvido para o magnetômetro GMI.   | 123 |
| Figura 51 – Representação esquemática do <i>módulo I</i> do circuito eletrônico desenvolvido para o magnetômetro GMI.  | 124 |
| Figura 52 – (a) Tensões nos terminais de entrada do XOR, $V_{U4\_OUT}$ e $V_{U5\_OUT}$ , e (b) a respectiva tensão no terminal de saída, $V_{XOR\_OUT}$ .  | 133 |
| Figura 53 – Curva característica do filtro <i>notch</i> , em função da variação de $P_7$ .   | 135 |
| Figura 54 – Diagrama de Bode simulado do estágio de filtragem completo.  | 136 |
| Figura 55 – (a) Sinais de tensão medidos nos pontos de teste T2 e T3 do circuito apresentado na Figura 51, e (b) as respectivas saídas dos comparadores U4 e U5.   | 139 |
| Figura 56 – Tensão medida no ponto de teste TPB (Figura 51) ao se fazer $f_{REF} = 100$ kHz e $f_{osc}$ igual a 100,1 kHz, 100,5 kHz e 101,0 kHz.  | 141 |
| Figura 57 – Sinal de saída do filtro passa baixa, no ponto TPB (Figura 51), em função de variações no campo magnético ( $\Delta H = H - H_{pol}$ ), para (a) $\Delta H = 0,5$ Oe, (b) $\Delta H = 1,0$ Oe e (c) $\Delta H = 1,5$ Oe. | 142 |
| Figura 58 – Curva experimental de $ \Delta f_{osc} $ em função das variações $\Delta H$ , em torno do campo magnético de polarização $H_{pol} = -0,7$ Oe.  | 144 |
| Figura 59 – Variação da diferença de fase entre os sinais de saída dos comparadores (U4 e U5) e a conseqüente variação   |     |

|  |     |
|--|-----|
| no <i>duty cycle</i> da tensão de saída do XOR (U6), em função do campo magnético $H$ . O campo magnético cresce gradualmente, em passos de 28,77 mOe, de (a) $H = 642,46$ mOe a (e) $H = 757,54$ mOe. | 145 |
| Figura 60 – Diagrama de Bode experimental do estágio de filtragem completo.  | 147 |
| Figura 61 – Arranjo experimental implementado para avaliação da sensibilidade do magnetômetro GMI: (a) vista superior e (b) vista em perspectiva.  | 148 |
| Figura 62 – Representação esquemática da configuração utilizada para excitação da Bobina de Helmholtz.   | 149 |
| Figura 63 – Curva experimental do módulo da impedância da Bobina de Helmholtz $ Z_H $ em função da frequência da corrente de excitação.  | 151 |
| Figura 64 – Dependência da amplitude da tensão do gerador $V_{GER}$ em função da frequência do sinal gerado, a fim de se manter a amplitude da densidade de fluxo magnético fixa em 560 nT.            | 152 |
| Figura 65 – Tensão de saída do magnetômetro GMI desenvolvido para campos magnéticos senoidais de mesma amplitude (560 nT) e frequências variáveis: (a) 1 Hz, (b) 10 Hz, (c) 50 Hz e (d) 250 Hz.        | 153 |
| Figura 66 – Dependência da sensibilidade do magnetômetro GMI em função da frequência do campo magnético de excitação: (a) sensibilidade em mV/nT e (b) sensibilidade em dB.                            | 155 |
| Figura 67 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal de saída do magnetômetro GMI, em ambiente desprovido de blindagem magnética.   | 158 |
| Figura 68 – Densidade espectral de ruído da tensão de saída do magnetômetro GMI desenvolvido, em ambiente desprovido de blindagem.   | 159 |
| Figura 69 – Mecanismo interno de um relógio de quartzo típico, destacando-se sua bobina de excitação.  | 162 |
| Figura 70 – Configuração experimental implementada para medição, com um magnetômetro <i>fluxgate</i> , do sinal gerado pela  |     |

|  |     |
|--|-----|
| bobina de excitação do relógio.  | 162 |
| Figura 71 – Resultados das medições experimentais realizadas com o <i>fluxgate</i> ( <i>saída bruta</i> ): (a) tensão de saída em função do tempo, (b) FFT da tensão de saída, de 0 Hz a 10 Hz, e (c) FFT da tensão de saída, de 0 Hz a 100 Hz.  | 163 |
| Figura 72 – Resultados das medições experimentais realizadas com o <i>fluxgate</i> , advindos da saída digitalmente processada com ganho máximo (128 vezes).   | 165 |
| Figura 73 – Configuração experimental implementada para medição, com o magnetômetro GMI, do sinal gerado pela bobina de excitação do relógio.  | 166 |
| Figura 74 – Resultados das medições experimentais realizadas com o magnetômetro GMI: (a) tensão de saída em função do tempo e (b) FFT da tensão de saída, de 0 Hz a 10 Hz.   | 166 |
| Figura 75 – Arranjo experimental implementado para medição da velocidade de rotação de um <i>cooler brushless</i> CC, com o magnetômetro GMI desenvolvido. (a) vista superior, (b) vista lateral e (c) detalhes do estator do motor do <i>cooler</i> .   | 168 |
| Figura 76 – Forma de onda obtida, na saída do magnetômetro GMI desenvolvido, ao se excitarem os terminais de alimentação do <i>cooler</i> com uma tensão $V_{cooler} = 12$ V. (a) sinal não processado via <i>software</i> e (b) sinal processado via <i>software</i> por um filtro passa-banda (1 Hz a 100 Hz). | 169 |
| Figura 77 – FFT do sinal filtrado apresentado na Figura 76(b); (a) de 0 Hz a 200 Hz e (b) de 20 Hz a 80 Hz.  | 169 |
| Figura 78 – Velocidade de rotação do <i>cooler</i> $v_{rot}$ em função de sua tensão de alimentação $V_{cooler}$ .   | 171 |
| Figura 79 – Resultados experimentais da medição de um sinal cardíaco sintetizado por meio do magnetômetro GMI desenvolvido. (a) Sinal cardíaco sintetizado, (b) tensão de saída do magnetômetro e (c) tensão de saída filtrada digitalmente.   | 172 |
| Figura 80 – Resultados experimentais da medição por meio de um magnetômetro <i>fluxgate</i> comercial ( <i>saída bruta</i> ). (a) Sinal  |     |

|   |     |
|---|-----|
| cardíaco sintetizado, (b) tensão de saída do magnetômetro e (c) tensão de saída filtrada digitalmente.  | 174 |
| Figura 81 – Resultados experimentais da medição de um sinal cardíaco sintetizado (a) por meio de um magnetômetro <i>fluxgate</i> comercial utilizando-se sua saída com ganho máximo (128 vezes), a qual restringe a banda de passagem em até 10 Hz (b).   | 175 |
| Figura 82 – Onda de pulso carotídeo normal.   | 176 |
| Figura 83 – Configuração do transdutor de pressão GMI anteriormente desenvolvido no LaBioMet [53], capaz de registrar a onda de pulso carotídeo.  | 177 |
| Figura 84 – Arranjo experimental implementado para a medição direta da onda de pulso arterial carotídeo, com o magnetômetro GMI aqui desenvolvido.  | 178 |
| Figura 85 – Resultados experimentais das medições da onda de pulso arterial, realizadas com o magnetômetro GMI. (a) Sinal de saída do magnetômetro entre 1 s e 10 s, (b) sinal de saída do magnetômetro, entre 1 s e 10 s, processado digitalmente, (c) sinal de saída do magnetômetro entre 6,2 s e 7,5 s, e (d) sinal de saída do magnetômetro, entre 6,2 s e 7,5 s, processado digitalmente. | 179 |
| 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.   | 185 |
| Figura 87 – Módulo da impedância em função do campo magnético, para uma fita GMI de 3 cm submetida a uma corrente $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$ mA.  | 204 |
| Figura 88 – Fase da impedância em função do campo magnético, para uma fita GMI de 3 cm submetida a uma corrente $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$ mA.  | 204 |
| Figura 89 – Diagrama esquemático do método computacional de ajuste proposto.  | 206 |
| Figura 90 – Fita GMI de 15 cm submetida a uma corrente $i_C = [100 + 15 \text{ sen}(2\pi 10^7 t)]$ mA - (a) Polinômio de ajuste   |     |

|  |     |
|--|-----|
| $ Z_{sens}  \times H$ , (b) Sensibilidade de módulo $S_{mod} \times H$ ,   |     |
| (c) Polinômio de ajuste $\theta_{sens} \times H$ , (d) Sensibilidade de fase $S_{fas} \times H$ .  | 206 |
| Figura 91 – Diagrama de blocos das duas Redes Neurais desenvolvidas - (a) Módulo e (b) Fase.   | 208 |
| Figura 92 – Análise do desempenho da rede, que modela a sensibilidade de módulo do efeito GMI, em relação aos pontos do conjunto de teste - (a) RMSE ótimo, (b) MAPE ótimo, (c) RMSE Médio e (d) MAPE Médio. | 210 |
| Figura 93 – Análise do desempenho da rede, que modela a sensibilidade de fase do efeito GMI, em relação aos pontos do conjunto de teste - (a) RMSE ótimo, (b) MAPE ótimo, (c) RMSE Médio e (d) MAPE Médio.   | 211 |
| Figura 94 – Diagrama das Redes Neurais selecionadas para modelar $S_{mod}$ e $S_{fas}$ .   | 212 |
| Figura 95 – Comparativo entre a saída da rede ( $S_{mod}$ ) e os dados experimentais (alvos) pertencentes ao conjunto de teste.  | 212 |
| Figura 96 – Comparativo entre a saída da rede ( $S_{fas}$ ) e os dados experimentais (alvos) pertencentes ao conjunto de teste.  | 213 |
| Figura 97 – Configuração mecânica da PCB desenvolvida para montagem do circuito eletrônico do magnetômetro GMI.  | 214 |

## Lista de tabelas

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 - Comparação do desempenho de Magnetômetros [1].   | 26  |
| Tabela 2 – Comparação de figuras de mérito de magnetômetros GMI.  | 48  |
| Tabela 3 – Sensibilidade ótima de módulo e fase das amostras GMI, em função do comprimento e da corrente de excitação.                | 60  |
| Tabela 4 – Comparação quantitativa da dependência da sensibilidade de fase e do fundo de escala com o valor arbitrado para $R_{AJ}$ . | 91  |
| Tabela 5 – Definição dos aspectos não-ideais considerados em cada uma das quatro simulações SPICE realizadas.                         | 93  |
| Tabela 6 – Caracterização experimental da impedância da Bobina de Helmholtz $Z_H$ em função da frequência.                            | 150 |
| Tabela 7 – Relação entre a tensão de alimentação do <i>cooler</i> e sua velocidade de rotação.  | 170 |
| Tabela 8 – Normalização dos parâmetros de interesse.  | 208 |
| Tabela 9 – Lista dos componentes ativos empregados no circuito eletrônico do <i>módulo I</i> , apresentado na Figura 51.              | 215 |
| Tabela 10 – Lista dos componentes passivos empregados no circuito do <i>módulo I</i> , apresentado na Figura 51.                      | 215 |
| Tabela 11 – Lista dos componentes ativos empregados no circuito eletrônico do <i>módulo II</i> , apresentado na Figura 50.            | 218 |
| Tabela 12 – Lista dos componentes passivos empregados no circuito do <i>módulo II</i> , apresentado na Figura 50.                     | 218 |

*The scientific man does not aim at an immediate result. He does not expect that his advanced ideas will be readily taken up. His work is like that of the planter — for the future. His duty is to lay the foundation for those who are to come, and point the way. He lives and labors and hopes.*

Nikola Tesla