

Jairo Daniel Benavides Mora

**Desenvolvimento de um sistema automatizado, baseado no
conceito de hardware evolucionário, para determinação do
ponto ótimo de operação de sensores GMI**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Eduardo Costa da Silva

Rio de Janeiro
Maio de 2017



Jairo Daniel Benavides Mora

**Desenvolvimento de um sistema automatizado, baseado no
conceito de hardware evolucionário, para determinação do
ponto ótimo de operação de sensores GMI**

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

Prof. Eduardo Costa da Silva

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof^a. Elisabeth Costa Monteiro

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Leonardo Alfredo Forero Mendoza

UERJ

Prof. Jorge Luís Machado do Amaral

UERJ

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de maio de 2017

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

Jairo Daniel Benavides Mora

Graduou-se em Engenharia Eletrônica pela Universidade de Nariño - Colômbia 2014.

Ficha Catalográfica

Benavides Mora, Jairo Daniel

Desenvolvimento de um sistema automatizado, baseado no conceito de hardware evolucionário, para determinação do ponto ótimo de operação de sensores GMI / Jairo Daniel Benavides Mora ; orientador: Eduardo Costa da Silva. – 2017.

125 f. : il. color. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Magnetoimpedância gigante. 3. Algoritmos genéticos. 4. Hardware evolucionário. 5. Fase da impedância. 6. Sensores magnéticos. I. Silva, Eduardo Costa da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

A Deus, que me acompanha em cada momento de minha vida, a minha mãe, por seu esforço e motivação para poder seguir adiante, a minha querida avó e meus familiares pelo apoio e por depositar sua confiança em mim.

Agradecimentos

A Deus, por ser minha companhia em cada momento, iluminar meus pensamentos e guiar cada um dos meus passos.

Ao meu orientador professor Eduardo Costa da Silva, pela orientação, compreensão e toda a ajuda e colaboração neste trabalho. A realização desta dissertação não teria sido possível sem sua valiosa assessoria. Expresso aqui minha admiração, gratidão e respeito para este grande profissional e ser humano.

À minha mãe, pelo amor, carinho e confiança, pela sua ajuda apesar da distância com suas palavras e sábios conselhos.

À minha família por todo o apoio e motivação para terminar este projeto de vida.

À PUC-Rio e seus professores, que me brindaram com o conhecimento necessário para o desenvolvimento deste projeto, por acreditar na pesquisa científica como instrumento de desenvolvimento social e evolução humana.

À CAPES, pelos auxílios financeiros concedidos.

Aos meus amigos e novas pessoas que conheci durante este tempo, que me ajudaram e brindaram com toda sua colaboração.

Resumo

Benavides Mora, Jairo Daniel; Costa da Silva, Eduardo (Orientador). **Desenvolvimento de um sistema automatizado, baseado no conceito de hardware evolucionário, para determinação do ponto ótimo de operação de sensores GMI.** Rio de Janeiro, 2017. 125p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Elementos sensores baseados no efeito GMI são uma nova família de sensores magnéticos que apresentam grande quando submetidos a campos magnéticos externos. Estes sensores têm sido utilizados no desenvolvimento de magnetômetros de alta sensibilidade, destinados à medição de campos ultra fracos. Por sua vez, a sensibilidade de um magnetômetro está diretamente associada à sensibilidade de seus elementos sensores. No caso de amostras GMI, esta sensibilidade é otimizada buscando-se a maximização da variação do módulo ou da fase da impedância em função do campo magnético ao qual a amostra é submetida. Estudos recentes mostram que transdutores GMI baseados na variação de fase podem exibir sensibilidades até 100 vezes superiores às apresentadas por transdutores baseados na leitura do módulo do elemento sensor, o que fez com que os trabalhos conduzidos nesta dissertação focassem na maximização da sensibilidade de fase, a qual é majoritariamente dependente de quatro fatores: o comprimento da amostra, o campo magnético externo, o nível DC e a frequência da corrente de excitação. Contudo, a busca do conjunto de parâmetros que otimiza a sensibilidade das amostras é geralmente empírica e muito demorada. Esta dissertação propõe uma nova técnica de otimização da sensibilidade, baseada no uso de algoritmos genéticos evoluindo em *hardware*, a fim de se definir qual o conjunto de parâmetros responsável pela maximização da sensibilidade das amostras. Ressalta-se que, além dos parâmetros de otimização anteriormente explicitados, também foram realizados testes considerando a amplitude da corrente de excitação como uma variável livre, sendo que os resultados obtidos são apresentados e discutidos. Foi implementada uma bancada de testes e desenvolvida uma interface gráfica em LabVIEW, para monitorar e medir o comportamento da impedância de amostras GMI em função de variações nos parâmetros de interesse. Por sua vez, implementou-se um módulo de otimização em Matlab, baseado em algoritmos genéticos, responsável por encontrar

a combinação de parâmetros que maximiza a sensibilidade dos sensores GMI avaliados (ponto ótimo de operação).

Palavras-chave

Magnetoimpedância Gigante; Algoritmos Genéticos; Hardware Evolucionário; Fase da Impedância; Sensores Magnéticos.

Abstract

Benavides Mora, Jairo Daniel; Costa da Silva, Eduardo (Advisor). **Development of an automated system, based on the concept of evolutionary hardware, aimed at determining the optimal operating point of GMI sensors.** Rio de Janeiro, 2017. 125p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

GMI sensors are a new family of magnetic sensors that exhibit a huge variation of their impedance when subjected to external magnetic fields. These sensors have been used in the development of high sensitivity magnetometers, aimed at measuring ultra-weak magnetic fields. In turn, the sensitivity of a magnetometer is directly associated with the sensitivity of their sensor elements. In the case of GMI samples, this sensitivity is optimized by maximizing the variation of the impedance magnitude or phase as a function of the magnetic field applied to the sample. Recent studies show that GMI transducers based on phase variation can exhibit sensitivities up to 100 times higher than those presented by transducers based on impedance magnitude readings. The results obtained in these previous studies made the current work focusing on the maximization of phase sensitivity, which is mostly dependent on four factors: sample length, external magnetic field, DC level and frequency of the excitation current. However, the search for the set of parameters that optimizes the sensitivity of the samples is usually empirical and very time consuming. Thus, this dissertation proposes a new optimization technique, based on the use of genetic algorithms evolving on hardware, in order to define which set of parameters is responsible for maximizing the sensitivity of the samples. It should be noted that in addition to the optimization parameters previously described, this work also carried out tests considering the amplitude of the excitation current as a free variable, and the results obtained are presented and discussed. A test bench was implemented and a graphical interface was developed in LabVIEW to monitor and measure the impedance behavior of GMI samples due to variations in the parameters of interest. In turn, a Matlab optimization module based on genetic algorithms was implemented, in order to find the combination of parameters that maximizes the impedance phase sensitivity of the evaluated GMI sensors (optimum operating point).

Keywords

Giant Magnetoimpedance; Genetic Algorithms; Evolutionary Hardware; Impedance Phase; Magnetic Sensors.

Sumário

1 . Introdução	19
1.1. Contextualização	19
1.2. Relevância e Justificativa	23
1.3. Estrutura da Dissertação	25
2 . Fundamentação	27
2.1. Sensores Magnéticos	27
2.2. Magnetoimpedância Gigante	33
2.2.1. Efeito GMI por Faixa de Frequências	34
2.2.2. Magnetoimpedância longitudinal (LMI)	35
2.2.3. Estrutura dos Domínios Magnéticos em Amostras GMI	37
2.2.4. GMI Assimétrica	38
2.2.4.1. GMI Assimétrica causada por Corrente CC	38
2.3. Algoritmos Genéticos	39
2.3.1. Representação Genética (Codificação)	41
2.3.2. População Inicial	42
2.3.3. Avaliação	42
2.3.4. Seleção	43
2.3.5. Operadores Genéticos	44
2.3.6. Parâmetros da evolução	47
3 . Sistema Automático de Otimização	49
3.1. Hardware do Sistema	52
3.2. Módulo de Controle e Medição	56
3.2.1. Software no LabVIEW	56
3.2.2. Descrição detalhada do processo de caracterização das amostras GMI	61
3.3. Módulo de Otimização	64
3.3.1. Codificação	65
3.3.2. Normalização	70

3.3.3. Configuração do Algoritmo Genético desenvolvido	71
3.4. Interface de Comunicação	74
3.5. Dinâmica de Funcionamento do Sistema	75
 4 . Resultados Experimentais e Discussão	 78
4.1. Codificação Real	78
4.1.1. Sem Normalização da Frequência	79
4.1.1.1. Amplitude da Corrente Fixa	80
4.1.1.2. Amplitude da Corrente Variável	84
4.1.2. Com Normalização da Frequência	87
4.1.2.1. Amplitude da Corrente Fixa	87
4.1.2.2. Amplitude da Corrente Variável	93
4.2. Codificação Inteira	96
4.2.1. Sem Normalização da Frequência	97
4.2.2. Com Normalização da Frequência	101
4.3. Comparação e Discussão	107
4.3.1. Influência da Amplitude da Corrente de Excitação	111
 5 . Conclusões e Trabalhos Futuros	 113
 Referências bibliográficas	 119

Lista de figuras

Figura 1 – Classificação de sensores magnéticos.	28
Figura 2 – Bobina de indução baseada na lei de indução de Faraday [33].	30
Figura 3 – Estrutura típica de um magnetômetro tipo Fluxgate.....	31
Figura 4 – Configuração esquemática de um transdutor magnético de Fibra-óptica.	32
Figura 5 – Arranjo para medição do efeito GMI em amostras GMI excitadas por corrente alternada, na presença de um campo magnético externo [5]......	36
Figura 6 – Configuração dos domínios magnéticos de (a) amostras amorfas com magnetostricção positiva, (b) amostras amorfas com magnetostricção negativa.	38
Figura 7 – Configuração experimental para medição do efeito AGMI causado por corrente CC [51].	39
Figura 9 – Representação esquemática do funcionamento de um AG.	40
Figura 10 – Representação de um cromossoma em AGs.....	41
Figura 11 – Método de seleção por roleta.	43
Figura 12 – Crossover de um ponto [80].	45
Figura 13 – Crossover de dois pontos [80]......	45
Figura 14 – <i>Crossover</i> Uniforme [80].	46
Figura 15 – Operador Mutação.	47
Figura 16 – Diagrama de blocos do circuito eletrônico de um magnetômetro GMI.	49
Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema automático de caracterização.	51
Figura 18 – Foto da bancada de testes, destacando os equipamento utilizados no sistema automático de otimização.....	51
Figura 19 – Parte frontal do medidor RLC 4285A da Agilent™.	53

Figura 20 – Representação esquemática da estrutura de uma bobina de Helmholtz.	54
Figura 21 – Representação esquemática do circuito de inversão de polaridade.	56
Figura 22 – Tela principal da interface com o usuário do <i>software</i> desenvolvido para otimização da sensibilidade e caracterização de amostras GMI.	58
Figura 24 – Diagrama de blocos da amostra GMI inserida na bobina de Helmholtz.	62
Figura 25 – Foto da bancada experimental, com a amostra GMI inserida na bobina de Helmholtz.	62
Figura 26 – Exemplo ilustrativo de uma curva de histerese [7].	63
Figura 27 – Exemplo de curva de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, obtida pelo sistema de caracterização de amostras GMI.	64
Figura 28 – Curvas de normalização logarítmica e linear da frequência de excitação.	71
Figura 29 – Cromossomo do algoritmo genético.	71
Figura 33 – Caracterização experimental da fase da impedância em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [31,07mA + 15sen(2\pi \cdot 16,72MHz \cdot t)]$ mA	81
Figura 34 – Sensibilidade de fase em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente.	81
Figura 35 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 4, para cada teste.	84
Figura 36 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 6, para cada teste.	86

Figura 37 – Caracterização experimental da fase da impedância em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [36,31 + 15\text{sen}(2\pi \cdot 1,17\text{MHz} \cdot t)] \text{ mA}$.	89
Figura 38 – Sensibilidade de fase em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [36,31 + 15\text{sen}(2\pi \cdot 1,17\text{MHz} \cdot t)] \text{ mA}$.	89
Figura 39 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 8, para cada teste.	92
Figura 40 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 10, para cada teste.	95
Figura 41 – Caracterização experimental da fase da impedância em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [37,31 + 1,98\text{sen}(2\pi \cdot 16,70\text{MHz} \cdot t)] \text{ mA}$.	98
Figura 42 – Sensibilidade de fase em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [37,31 + 1,98\text{sen}(2\pi \cdot 16,70\text{MHz} \cdot t)] \text{ mA}$.	98
Figura 43 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 13, para cada teste.	101
Figura 44 – Caracterização experimental da fase da impedância em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [31,20 + 1,69\text{sen}(2\pi \cdot 927,62\text{kHz} \cdot t)] \text{ mA}$.	103
Figura 45 – Sensibilidade de fase em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [31,20 + 1,69\text{sen}(2\pi \cdot 927,62\text{kHz} \cdot t)] \text{ mA}$.	103
Figura 46 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente	

de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 17, para cada teste.	107
Figura 47 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados para cada caso apresentado na Tabela 19.....	109
Figura 48 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados para cada caso da Tabela 19.	112

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação de algumas tecnologias convencionais de sensores magnéticos.	29
Tabela 2 – Parâmetros de configuração do algoritmo genético com codificação real.	79
Tabela 3 – Resultados obtidos pelo sistema automático de otimização de amostras GMI, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.	80
Tabela 4 – Análise da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.	82
Tabela 5 – Comparação dos erros percentuais E_s e E_H , obtidos em cada um dos três testes efetuados, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.	82
Tabela 6 – Análise do desempenho e da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e com as quatro variáveis livres.	85
Tabela 7 – Resultados obtidos pelo sistema automático de otimização de amostras GMI, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.	88
Tabela 8 – Análise da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.	90
Tabela 9 – Comparação dos erros percentuais E_s e E_H , obtidos em cada um dos três testes efetuados, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.	91

Tabela 10 – Análise do desempenho e da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres.....	93
Tabela 11 – Comparação dos erros percentuais E_S e E_H , obtidos em cada um dos três testes efetuados, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres.....	94
Tabela 12 – Parâmetros de configuração do algoritmo genético com codificação inteira.....	96
Tabela 13 – Resultados obtidos pelo sistema automático de otimização de amostras GMI, para o AG com codificação inteira, sem normalização da frequência e com as quatro variáveis livres.	97
Tabela 14 – Análise da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação inteira, sem normalização da frequência e com as quatro variáveis livres.	99
Tabela 15 – Comparação dos erros percentuais E_S e E_H , obtidos em cada um dos três testes efetuados, para o AG com codificação inteira, sem normalização da frequência e com as quatro variáveis livres.....	99
Tabela 16 – Resultados obtidos pelo sistema automático de otimização de amostras GMI, para o AG com codificação inteira, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres.....	102
Tabela 17 – Análise da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação inteira, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres.....	104
Tabela 18 – Comparação dos erros percentuais E_S e E_H , obtidos em cada um dos três testes efetuados, para o AG com codificação inteira, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres.....	105
Tabela 19 – Comparação dos melhores resultados obtidos pelas diferentes configurações de AGs avaliadas neste trabalho.....	108

Tabela 20 – Resultados obtidos pelo sistema de otimização para diferentes valores da amplitude da corrente.	112
--	-----

1. Introdução

1.1. Contextualização

Atualmente, sensores magnéticos são amplamente utilizados em muitas áreas da engenharia, sendo encontrados em diversos dispositivos modernos, tais como: computadores, discos de armazenamento, carros, aviões, celulares, etc. O sensoriamento magnético tem permitido inúmeros avanços tecnológicos ao longo do desenvolvimento da humanidade. Tendo em vista sua relevância, muitas investigações continuam a ser conduzidas a fim de melhorar continuamente o desempenho destes sensores. Por sua vez, nas últimas décadas, tecnologias promissoras têm sido descobertas no campo de sensores magnéticos, as quais demandam novos estudos de modo a se poder extrair o máximo proveito delas [1].

Fitas e fios de ligas ferromagnéticas têm atraído considerável atenção devido a suas propriedades físicas e aplicações tecnológicas. Um dos fenômenos mais interessantes observados nesses elementos é a magnetoimpedância gigante (GMI - *Giant Magnetoimpedance*), que pode ser observada, por exemplo, em amostras da família $\text{Co}_{75-x}\text{Fe}_x\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ [2–3]. O efeito GMI é caracterizado por grandes variações na impedância elétrica de determinadas amostras ferromagnéticas, excitadas por correntes alternadas, quando submetidas a um campo magnético externo [4–5]. Magnetômetros baseados no efeito GMI destacam-se por seu baixo custo de produção, excelente sensibilidade, portabilidade, capacidade de operação a temperatura ambiente e ampla gama de frequências de operação [2].

A impedância das amostras GMI é dependente da profundidade de penetração de corrente (*skin depth*) dentro do material, que por sua vez é afetada pela permeabilidade magnética. Por sua vez, esta é função do campo magnético externo e da corrente aplicada à amostra, sendo que variações no campo induzem alterações na impedância das amostras. Este processo prossegue até que se atinja o limite de saturação, que ocorre para um campo magnético externo suficientemente elevado a

ponto de rotacionar completamente os domínios magnéticos da amostra, reorientando-os ao longo da direção do campo [1,2].

Diversos grupos de pesquisa têm conduzido trabalhos destinados ao desenvolvimento de magnetômetros baseados em amostras GMI. Magnetômetros GMI são transdutores magnéticos cujos elementos sensores apresentam o efeito da magnetoimpedância gigante. A sensibilidade destes sensores é afetada por diversos parâmetros, tais como: composição química, dimensões da amostra, campo magnético externo, corrente de excitação, etc. Entretanto, ainda não existe um modelo quantitativo suficientemente abrangente capaz de modelar tal dependência [7–8].

A maximização da sensibilidade dos transdutores magnéticos está diretamente associada à otimização da sensibilidade de seus elementos sensores. No caso de elementos sensores GMI, deve-se definir qual é a combinação ótima de parâmetros responsável por maximizar a sensibilidade das amostras, sendo que tal procedimento é usualmente empírico [1,4–9]. Dessa forma, a caracterização experimental das amostras GMI tem por objetivo identificar o conjunto de parâmetros responsável pela maximização de sua sensibilidade. Este procedimento envolve a análise de dados, provenientes de um amplo espaço de busca, devido ao grande número de variáveis que afetam a sensibilidade. Consequentemente, uma avaliação exaustiva de todos os pontos do conjunto torna-se inviável na prática.

Até poucos anos atrás, magnetômetros GMI eram implementados por meio de leitura das variações no módulo da impedância dos sensores, em decorrência de variações no campo magnético [1,4–5,9,13–18]. No entanto, pesquisas recentes mostraram que transdutores magnéticos GMI baseados em leituras da fase da impedância, são até 100 vezes mais sensíveis do que aqueles baseados no módulo da impedância [4,17–21]. Consequentemente, o presente trabalho enfoca na otimização da sensibilidade de fase, objetivando estudar como as características de fase da impedância de amostras GMI são afetadas pelos parâmetros que influenciam o condicionamento das amostras, a fim de se determinar a condição que implica em sensibilidade máxima.

Até 2011, adotava-se um processo manual para a caracterização experimental de sensores GMI, realizada na PUC-Rio. Os elementos sensores eram inseridos no centro de uma Bobina de Helmholtz, utilizada para gerar o campo magnético de excitação das amostras. Por sua vez, este campo era controlado por meio de

variações manuais da corrente fornecida por uma fonte de alimentação conectada a Bobina de Helmholtz. O campo magnético era tipicamente variado entre, no máximo, -5 Oe e 5 Oe, em passos de 0,1 Oe.

O sistema implementado contava ainda com um medidor RLC utilizado para leitura dos valores de módulo e fase da impedância do sensor GMI analisado, correspondentes a cada valor de campo magnético. Este medidor também era capaz de fornecer a corrente de condicionamento das amostras GMI, com os valores desejados de frequência (entre 75 kHz e 30 MHz), nível CC (entre 0 mA e 100 mA) e amplitude (entre 0 mA e 28 mA). Ressalta-se que o ajuste destes parâmetros bem como a leitura de módulo e fase eram realizados de modo manual. Em particular, é importante destacar que na leitura dos dados de módulo e fase, indicados no visor do medidor RLC, era necessário realizar uma estimativa da média das leituras apresentadas, pois estas variavam significativamente a partir da segunda casa decimal. Dessa forma, compromete-se a confiabilidade das medições.

O procedimento aqui descrito permite a obtenção das curvas características de módulo e fase em função do campo magnético, para diferentes combinações dos parâmetros de interesse. Por sua vez, a avaliação destas curvas possibilita que se determine qual combinação de parâmetros implica na maximização da sensibilidade das amostras. Entretanto, destaca-se que o processo experimental realizado para obtenção de cada uma destas curvas era consideravelmente lento, levando em torno de 1 hora. Consequentemente, na prática, é impossível realizar uma avaliação exaustiva de todos os pontos contidos no espaço de busca, o que pode fazer com que o ponto ótimo não seja encontrado, especialmente em uma análise manual.

Em 2012, foi desenvolvido um sistema automatizado de caracterização da impedância elétrica das amostras GMI, em função de diferentes combinações dos parâmetros de interesse [22–24]. Desenvolveu-se em LabVIEW um software de controle do sistema de caracterização, o qual era interfaceado por meio de uma conexão GPIB ao medidor RLC e a uma fonte de corrente controlável. Dessa forma, automatizou-se o controle do medidor RLC e a geração do campo magnético ao qual os sensores GMI são submetidos, por meio do ajuste da corrente fornecida pela fonte de corrente controlável.

Apesar de automatizado, este sistema não utilizava nenhuma técnica inteligente de busca. O usuário simplesmente informava uma lista com diferentes combinações dos parâmetros da corrente de excitação das amostras (nível CC,

frequência e amplitude), bem como a faixa de campos magnéticos que desejava avaliar e o respectivo passo. Com base nos dados contidos nesta lista, o sistema executava sequencialmente todas as análises solicitadas e ao final salva as diversas curvas de caracterização obtidas em planilhas Excel, as quais eram posteriormente manualmente avaliadas pelo usuário a fim de identificar qual combinação de parâmetros resultou na maior sensibilidade. Destaca-se que, para avaliar de forma adequada a maior parte do espaço amostral, é necessário efetuar a avaliação das curvas características provenientes de variadas combinações das variáveis de interesse. Entretanto, ressalta-se que a capacidade de avaliação manual, para identificação do ponto de sensibilidade ótima, é comprometida caso muitas curvas experimentais sejam obtidas.

O sistema automatizado tornou o processo de caracterização mais ágil, propiciou reduções no tempo demandado para obtenção das curvas de caracterização e um aprimoramento da confiabilidade dos resultados das medições. Entretanto, ao invés do usuário arbitrar uma lista com as diferentes combinações de parâmetros a serem avaliados, percebe-se que seria interessante a adoção de uma técnica inteligente de busca guiada, capaz de evoluir para o ponto de sensibilidade ótima.

Assim, em 2014, desenvolveu-se um sistema neuro-genético destinado a determinar de forma automática a sensibilidade ótima de sensores GMI, para ligas ferromagnéticas amorfas de composição $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$, considerando os seguintes parâmetros de interesse: comprimento das amostras, nível CC, frequência da corrente de excitação e campo magnético externo [27–28]. O modelo foi composto por quatro redes neurais MLP, uma rede específica para cada um dos comprimentos de interesse (1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm). As redes foram utilizadas a fim de modelar o comportamento da fase da impedância de sensores GMI (saída da rede) em função dos parâmetros de interesse (entradas da rede), tendo sido treinadas por meio de um banco de dados contendo padrões advindos de medições experimentais anteriormente efetuadas [3]. Além das redes neurais, o sistema desenvolvido também continha um estágio baseado em algoritmos genéticos (GA – *Genetic Algorithm*), responsável por determinar o conjunto de parâmetros de interesse (entradas da rede) que leva à sensibilidade ótima, a qual era utilizada como função de avaliação do AG e obtida por meio do cálculo da derivada da saída das redes

(fase da impedância) em função de uma de suas variáveis de entrada (campo magnético).

1.2. Relevância e Justificativa

Conforme discutido na seção anterior, devido a sua grande complexidade, ainda não existe um modelo quantitativo suficientemente completo, capaz de definir a impedância de sensores GMI em função de todos os parâmetros que a afetam. Convencionalmente, são adotadas simplificações na definição de modelos utilizados para avaliar o comportamento da impedância em função de um dado parâmetro de interesse, ou de um conjunto específico de parâmetros [5,9–10,12]. Por outro lado, o processo de caracterização experimental da impedância de sensores GMI demanda uma grande quantidade de tempo, devido ao amplo espaço de busca formado pelas diversas variáveis que afetam a impedância das amostras GMI.

O sistema de caracterização automático anteriormente desenvolvido propiciou uma melhora considerável na velocidade do processo de caracterização de amostras, em relação ao tempo despendido no procedimento manual. Entretanto, a simples automatização do sistema de caracterização ainda é insatisfatória, pois a faixa de busca de cada um dos parâmetros de interesse é ampla e o problema de definição do ponto de sensibilidade máxima é intrinsecamente um processo de otimização multivariável. Dessa forma, tem-se que para se avaliar razoavelmente o conjunto amostral deve-se obter um número muito elevado de curvas de caracterização, associadas a diferentes combinações dos parâmetros de interesse. Consequentemente, torna-se o processo lento e reduz-se sua eficiência.

Assim, objetivando aprimorar o desempenho do processo de caracterização, em trabalhos anteriores foram propostas a adoção de técnicas de busca inteligentes, baseadas em inteligência computacional, que permitam encontrar no menor tempo a maior sensibilidade possível. Neste intuito, foi implementado o modelo computacional desenvolvido por [27–28], baseado em redes neurais artificiais (modelagem da impedância dos sensores GMI) e algoritmos genéticos (otimização da sensibilidade), a fim de permitir a determinação uma estimativa da combinação de parâmetros responsável pela maximização da sensibilidade de um dado sensor

GMI. No entanto, este modelo neuro-genético requer que sejam implementadas redes neurais específicas para amostras com composições químicas e/ou dimensões diferentes. Por sua vez, para serem treinadas adequadamente, estas redes demandam um grande banco de dados com medições experimentais, o que torna o processo lento e reduz sua generalidade.

Pretende-se que o novo método de otimização apresentado nesta dissertação possibilite a melhora do desempenho das técnicas anteriormente adotadas para determinação da combinação de parâmetros responsável pela maximização da sensibilidade de sensores GMI. O método aqui proposto objetiva permitir a implementação de um sistema de otimização mais prático e genérico, que permita encontrar de forma eficiente e eficaz a sensibilidade máxima de amostras GMI, em um intervalo de tempo reduzido.

O sistema automático de caracterização desenvolvido neste trabalho permite que se defina o ponto ótimo de operação (sensibilidade máxima) de sensores GMI com diferentes composições químicas e formas geométricas (comprimento, espessura e largura). O sistema é controlado por um modelo computacional baseado em algoritmos genéticos, implementado de forma que os genes dos indivíduos da população representem os parâmetros de interesse que afetam a sensibilidade dos sensores. Os equipamentos do sistema automático de caracterização têm seus valores ajustados pelos genes dos indivíduos, de modo que se possa medir experimentalmente a sensibilidade correspondente a cada indivíduo, ou seja, a cada combinação de parâmetros de interesse. Por sua vez, o AG utiliza a medição experimental da sensibilidade como a função de avaliação de cada indivíduo presente na população. Dessa forma, tem-se que o presente método substitui o estágio baseado em redes neurais, presente no método anteriormente desenvolvido por [27–28], por um estágio implementado diretamente em *hardware*, a fim de avaliar experimentalmente o valor da sensibilidade.

Tal variação na arquitetura do sistema possibilita que o mesmo se torne mais prático e genérico, visto que não demanda o treinamento de redes neurais específicas para amostras com composições químicas e dimensões diferentes. Além disso, contribui-se para a redução do tempo de processamento, visto que a seleção das combinações dos parâmetros a serem avaliados evolui de forma inteligente em direção ao ponto ótimo, o que possibilita uma busca guiada mais eficiente. Adicionalmente, reduz-se a incerteza, visto que a impedância das amostras é obtida

a partir de medições experimentais diretas, ao invés de ser estimada por meio de redes neurais.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está subdividido em 5 capítulos:

- ❖ O capítulo 1 apresenta a contextualização do problema abordado, destaca-se sua relevância e justificativa.
- ❖ O capítulo 2 apresenta um breve resumo de sensores magnéticos e os conceitos teóricos de magnetoimpedância gigante, detalhando aspectos relevantes para a fundamentação do trabalho. O efeito GMI é explicado de forma sucinta e ressaltam-se os parâmetros que afetam de modo mais direto o comportamento da impedância destes sensores. Adicionalmente, são discutidos os principais conceitos sobre os algoritmos genéticos, empregados nesta dissertação a fim otimizar a sensibilidade das amostras GMI. É apresentada uma breve explicação sobre seus princípios de funcionamento, características e funções.
- ❖ O capítulo 3 apresenta em detalhes os componentes do sistema de otimização e seu funcionamento. Inicia-se com a descrição do *hardware* utilizado no desenvolvimento do sistema, descrevendo-se suas principais características e faixas de operação. Na sequência, descrevem-se as principais características do módulo de otimização proposto, baseado em algoritmos genéticos. São detalhadas as modificações e melhorias mais relevantes, feitas em relação ao AG empregado no sistema neuro-genético anteriormente desenvolvido. Ressaltam-se ainda os métodos de codificação e normalização das variáveis de entrada. O módulo de controle e medição também é descrito, o qual é responsável por controlar todos os equipamentos presentes no sistema. Por fim, discute-se a interconexão dos dois módulos por meio de uma interface de comunicação TCP/IP, de modo a se poder implementar um sistema automático de otimização da sensibilidade de amostras GMI, capaz de evoluir em *hardware*.

- ❖ O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com o sistema de otimização implementado nesta dissertação. Discute-se e compara-se o desempenho de diferentes configurações analisadas, visando evidenciar a melhor configuração para caracterização de amostras GMI. Também, apresenta-se o conjunto de parâmetros responsável pela maximização da sensibilidade de uma amostra GMI analisada, bem como o respectivo valor de sensibilidade.
- ❖ O capítulo 5 apresenta as conclusões dos estudos realizados nesta dissertação. Discute-se os principais resultados obtidos e avalia-se o desempenho das abordagens propostas. Destacam-se ainda eventuais trabalhos futuros que permitam novos aprimoramentos no sistema aqui implementado.

2. Fundamentação

2.1. Sensores Magnéticos

Os sensores magnéticos têm sido úteis ao ser humano nas mais diversas aplicações, desde sistemas de navegação até na leitura da informação armazenada em discos rígidos de computadores. Na maioria das aplicações em que são empregados, os magnetômetros apresentam-se como alternativas de detecção seguras, não invasivas e não destrutivas. Adicionalmente, os mesmos também destacam-se por serem opções robustas, confiáveis e com pequena necessidade de manutenção em relação aos demais métodos de sensoriamento [3,10,25].

O primeiro detector de campo magnético a ser inventado foi a bússola, tendo sido desenvolvida pelos chineses no século I a.C. A civilização chinesa foi a primeira a entender e utilizar as propriedades da magnetita, a fim de localizar os pontos cardeais. Em particular, o Norte tinha grande importância na cultura chinesa, sendo que o trono do imperador ficava localizado no norte magnético do palácio. Desde então, foram realizados diversos estudos teóricos e experimentais, que levaram a uma profunda compreensão dos princípios que regem os fenômenos eletromagnéticos. O eletromagnetismo é uma importante área de estudo da ciência moderna, tendo possibilitado o desenvolvimento de grande parte das tecnologias presentes no mundo moderno, desde a geração de energia elétrica até a fabricação de aparelhos celulares [30–31].

Sensores magnéticos são materiais que apresentam variação de alguma de suas características em função de alterações no campo magnético. Por sua vez, um transdutor magnético, também conhecido como magnetômetro, é um instrumento que se utiliza de um sensor magnético a fim de converter um campo magnético em um sinal elétrico. Conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, os magnetômetros podem ser subdivididos em dois grandes grupos: os que medem apenas o módulo do campo (magnetômetros escalares) e os que

conseguem medir separadamente cada uma das componentes do campo (magnetômetros vetoriais) [1,26].

Os magnetômetros escalares possuem a vantagem de serem insensíveis a vibrações rotacionais, pois são afetados pelo módulo do campo resultante que atravessa o material, independentemente do valor individual de cada uma de suas componentes. Seus princípios de funcionamento baseiam-se no fato da divisão entre alguns níveis de energia de elétrons, ou de spins nucleares, ser proporcional à intensidade dos campos magnéticos incidentes, permitindo a implementação de magnetômetros. A obtenção de equipamentos de alta sensibilidade está associada à utilização de elementos químicos com linhas espectrais estreitas e tempos de vida longos. Tais fatores limitam a banda de frequência destes dispositivos, a qual raramente consegue ultrapassar 10 Hz. Em outras palavras, a sensibilidade de magnetômetros escalares, convencionalmente, decai rapidamente para frequências acima de 10 Hz [1].

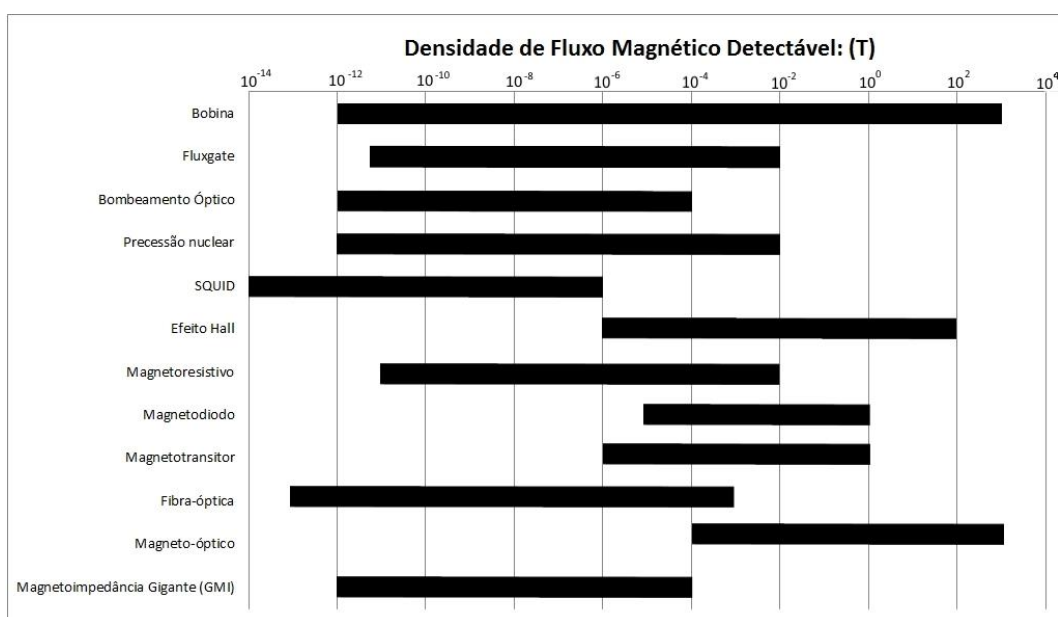
Por outro lado, ao contrário de magnetômetros escalares, tem-se que magnetômetros vetoriais possibilitam a medição individual das componentes do campo magnético. Praticamente todas as famílias de magnetômetros vetoriais são muito afetadas por vibrações rotacionais [1] e pelo ruído $1/f$, o qual é dependente da frequência do campo. Tipicamente, o ruído $1/f$ é tipo de ruído predominante em magnetômetros escalares, na faixa de baixas frequências. Por sua vez, para frequências mais elevadas este tipo de ruído torna-se cada vez menos significativo, fazendo com que a densidade espectral de ruído total atinja um patamar mínimo, atribuído ao ruído branco [26–35].



Figura 1 – Classificação de sensores magnéticos.

A resolução e o fundo de escala são parâmetros muito importantes na avaliação da adequabilidade de um magnetômetro a uma dada aplicação. Dessa forma, a Tabela 2 apresenta a comparação destas características para diferentes famílias de sensores magnéticos. Ressalta-se que além destes aspectos, a seleção de um dado magnetômetro para uma aplicação também deve levar em conta outras características, tais como: banda de frequências, resolução espacial, custo, etc [10,27].

Tabela 1 – Comparação de algumas tecnologias convencionais de sensores magnéticos.



O magnetômetro de precessão nuclear é o instrumento mais popular para medição escalar da intensidade de campo magnético. Sua principal aplicação está na exploração geológica e no mapeamento aéreo de campo magnético. Como seu princípio de funcionamento é baseado em constantes atômicas, é utilizado também como padrão para calibração de magnetômetros [36].

De acordo com os dados apresentados na Tabela 1, verifica-se que os magnetômetros SQUID são capazes de atingir as melhores resoluções. Dessa forma, os mesmos constituem a família de magnetômetros predominantemente empregada em aplicações críticas, envolvendo a medição de campos ultra fracos [1,30–32,36–40,42–43].

Desde a sua descoberta na década de 70 os sistemas SQUID evoluíram significativamente, sendo que encontram-se comercialmente disponíveis sistemas de alto desempenho, capazes de atingir resoluções da ordem de alguns femtoteslas. Tais sistemas são empregados em aplicações tão diversas como: medições

biomagnéticas, ressonância magnética, geologia, etc [10]. Entretanto, o funcionamento destes dispositivos é regido por princípios de supercondutividade, sendo que suas bobinas sensoras devem ser mantidas em temperaturas próximas do zero absoluto, em particular 4,2 K para SQUIDS LTS (*Low Temperature System*). Consequentemente, os mesmos demandam a utilização de hélio líquido para resfriamento das bobinas, o que eleva o custo de operação e limita seu potencial mercadológico. Por sua vez, o progresso recente na tecnologia de supercondutores de alta temperatura e o progresso constante na tecnologia de filmes finos permitiu a fabricação dos chamados SQUIDS HTS (*High Temperature System*), os quais operam em temperaturas mais altas, tipicamente 77 K, obtidas por meio de resfriamento por nitrogênio líquido. A utilização de nitrogênio, ao invés de hélio, permite uma redução no custo de manutenção do sistema. Porém, é importante ressaltar que, normalmente, o custo de fabricação de sistemas HTS é superior aos dos LTS e, ainda, as resoluções alcançadas por sistemas HTS são tipicamente inferiores as atingidas por sistemas LTS [37].

Por outro lado, bobinas de indução e *fluxgates* são famílias de magnetômetros vetoriais amplamente utilizadas em diversas áreas. Apesar de não conseguirem atingir os níveis de resolução alcançados com sistemas SQUID, são capazes de operar à temperatura ambiente e apresentam resoluções satisfatórias para diversas aplicações, sendo opções robustas, seguras e de baixo custo.

A bobina de indução, apresentada na Figura 2, tem seu princípio de operação regido pela lei de Faraday, a qual afirma que se induz uma tensão ε nos terminais de uma bobina, com N voltas, ao se variar no tempo o fluxo magnético Φ que a atravessa [1,10,27].

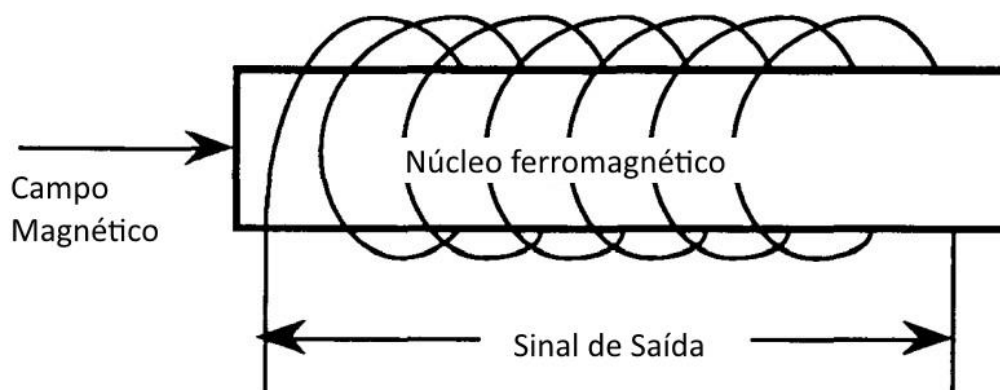


Figura 2 – Bobina de indução baseada na lei de indução de Faraday [27].

O comportamento da bobina de indução é descrito matematicamente por

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \mu_0 \mu_r A \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, μ_r é a permeabilidade magnética do núcleo da bobina, A é a área da seção transversal da bobina e H o campo magnético.

Por meio da eq. (1), verifica-se que a sensibilidade da bobina de indução depende da permeabilidade do material do núcleo, da área da bobina, do número de voltas e da taxa de mudança do fluxo magnético através da bobina. Esta família de magnetômetros apresenta problemas para medir tanto sinais com frequências muito baixas, pois as tensões induzidas tendem a ser muito pequenas, quanto sinais com frequência altas, pois as capacitâncias espúrias formadas pelo acoplamento das múltiplas espiras que compõem a bobina tendem a limitar a resposta em frequência [1].

Por sua vez, sensores *fluxgate* são convencionalmente utilizados em medições de campos DC ou campos magnéticos de baixa frequência, tipicamente até cerca de 1 kHz. Estes dispositivos permitem medições vetoriais e são capazes de medir campos de até 1 mT, com resolução da ordem de 10 pT. Conforme indicado na Figura 3, os *fluxgates* são compostos por um núcleo de material ferromagnético, com elevada permeabilidade, enrolado por duas bobinas: uma para detecção do campo e outra para excitação [1,4,7,33,37,45–46].

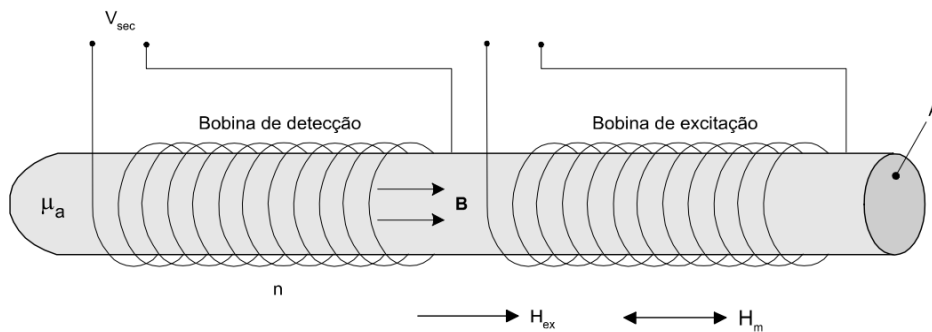


Figura 3 – Estrutura típica de um magnetômetro tipo Fluxgate.

Os magnetômetros *fluxgate* são muito utilizados em geofísica e aplicações espaciais, as quais foram recentemente revisadas por Acuna [38]. Bússolas baseadas em *fluxgates* são empregadas em aeronaves e veículos e possibilitam a implementação de sistemas de navegação precisos. Estes dispositivos também são empregados para confecção de sensores de corrente não invasivos, destinados a medição remota de corrente contínua. Ainda, destaca-se que magnetômetros

fluxgate compactos são utilizados para a leitura de rótulos magnéticos, bem como para detecção de objetos ferromagnéticos [39].

O magnetômetro de fibra óptica é um sensor relativamente novo, que se encontra ainda em fase de desenvolvimento tecnológico. Este dispositivo emprega duas fibras ópticas dispostas de modo a formar um interferômetro Mach-Zehnder [1]. Basicamente, utilizam-se dois segmentos de fibra óptica percorridos por uma onda eletromagnética (laser) gerada pela mesma fonte [27]. Adere-se um elemento magnetostrictivo a apenas um dos segmentos de fibra. Assim, na presença de um campo magnético externo, o segmento com o elemento magnetostrictivo estará sujeito a uma deformação longitudinal, enquanto que o segmento sem elemento magnetostrictivo não se deformará. Em virtude desta deformação mecânica, gera-se uma defasagem entre as ondas eletromagnéticas que atravessam os dois segmentos da fibra óptica. Na sequência, estas ondas são medidas por meio de detectores ópticos e comparadas a fim de se avaliar a defasagem entre as mesmas, a qual será proporcional ao campo magnético aplicado [1,49–50]. Estes dispositivos apresentam potencial para atingir níveis de resolução melhores do que os convencionalmente obtidos por *fluxgates*. A configuração esquemática de magnetômetros de fibra óptica pode ser observada na Figura 4.

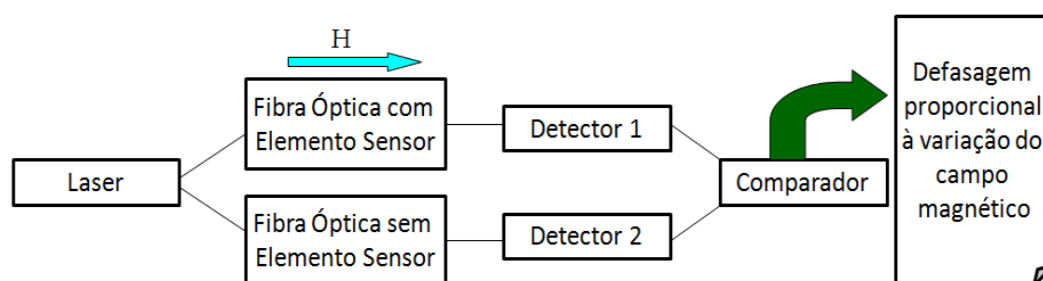


Figura 4 – Configuração esquemática de um transdutor magnético de Fibra-óptica.

Por sua vez, a Magnetoimpedância Gigante (GMI) é uma das tecnologias de detecção de campos magnéticos mais recentes, descoberta na década de 90, a qual também ainda encontra-se em fase de desenvolvimento, sendo considerada uma tecnologia promissora para o desenvolvimento de sensores de alto desempenho [4–5,16,51–52]. Amostras GMI excitadas por corrente alternada apresentam grandes variações de sua impedância em função do campo magnético aplicado. Atualmente, muitas investigações estão sendo conduzidas a fim de se aprimorar a compreensão sobre este fenômeno e se avaliar quais são os principais parâmetros que o afetam [7–8,23,27–28]. No capítulo 2 é apresentado um estudo mais detalhado deste

fenômeno, tendo em vista que o presente trabalho foca na otimização da sensibilidade de sensores GMI.

Apesar de ser um fenômeno relativamente novo, sensores baseados na magnetoimpedância gigante já têm sido empregados em várias aplicações, tais como: sistemas de navegação [40], controle de tráfego [40], detectores de presença [41], memórias e discos rígidos de alta densidade [42], detecção de fissuras em materiais [43] e aplicações biológicas e biomédicas [3,14,17,44–47].

Pesquisas anteriores indicam que este tipo de sensor pode alcançar excelentes resoluções, propiciando medições de campo da ordem de pT [47]. Pesquisas apresentadas na literatura [4], indicam que magnetômetros GMI podem futuramente substituir magnetômetros SQUID em certas aplicações críticas, superando assim limitações impostas por sistemas SQUIDs, atreladas ao alto custo e complexidade de operação. Uma destas aplicações é relacionada ao estudo de campos magnéticos gerados pelo corpo humano, conhecido como biomagnetismo. A medição de campos biomagnéticos é um problema de alta complexidade, devido às intensidades dos mesmos serem extremamente baixas, estando situadas tipicamente em uma faixa entre dezenas de femtoteslas e um nanotesla, ordens de grandeza envolvidas [48].

2.2. Magnetoimpedância Gigante

A Magnetoimpedância Gigante é caracterizada por uma forte dependência da impedância de uma amostra, em relação ao campo magnético externo ao qual a mesma é submetida. Geralmente, a literatura utiliza-se de uma figura de mérito denominada GMI(%), definida por meio da eq. (2), para mensurar esta dependência. Para cada valor de campo magnético H , o GMI(%) avalia o quanto o módulo da impedância da amostra variou em relação a seu valor em um dado campo suficientemente alto H_{max} , onde admite-se que o módulo da impedância do sensor está saturado [49].

$$GMI(\%) = \left[\frac{|Z(H)| - |Z(H_{max})|}{|Z(H_{max})|} \right] \cdot 10^2 \quad (2)$$

Tendo em vista a definição do GMI(%), percebe-se que o mesmo só permite inferir variações no módulo da impedância. Dessa forma, como o propósito desta dissertação é maximizar a sensibilidade de fase de amostras GMI, decidiu-se avaliar diretamente as curvas de fase da impedância em função do campo magnético externo, ao invés de curvas de GMI(%).

Ao se aplicar uma corrente alternada ao longo do comprimento de uma amostra GMI se produz um campo magnético transversal, que faz com que a amostra se magnetize e aumente sua permeabilidade magnética transversal. Por sua vez, nesta situação, ao se submeter a amostra a um campo magnético longitudinal ao seu comprimento, reorienta-se gradativamente os domínios magnéticos do material ao longo da direção do campo. Este efeito altera a permeabilidade magnética transversal e, conseqüentemente, modifica a profundidade de penetração de corrente (δ) dentro do material. Na sequência, tem-se que tais alterações na profundidade de penetração implicarão em alterações na impedância da amostra sensora. Dessa forma, é perceptível a existência de uma relação entre campo magnético e impedância, o que possibilita a utilização de amostras GMI como sensores magnéticos [4–5,9–10,51,62–63].

Em termos gerais, a impedância de um condutor depende da distribuição da corrente dentro do material. Em materiais magnéticos, a profundidade de penetração é afetada pela permeabilidade magnética, frequência da corrente de excitação e condutividade do material. Para frequências muito baixas, a profundidade de penetração pode se tornar maior do que as dimensões transversais da amostra, até mesmo se o material possuir uma alta permeabilidade magnética. Por outro lado, para frequências muito altas, a profundidade de penetração pode ser muito menor do que as dimensões transversais da amostra, fazendo com que a corrente se propague próxima à superfície. Em ambos os casos, a impedância do material deixa de variar significativamente com a permeabilidade magnética, visto que δ passa a ser dominado pela frequência da corrente de excitação. Isto faz com que em uma faixa intermediária de frequências, possa-se esperar intensas variações da impedância em função do campo magnético aplicado, pois δ torna-se altamente afetado pela permeabilidade magnética transversal [51–52,62,64].

2.2.1. Efeito GMI por Faixa de Frequências

A frequência da corrente de excitação é um parâmetro importante na determinação da profundidade de penetração da corrente, a qual explica a dependência da impedância da amostra com o campo magnético, na faixa média de frequências. Entretanto, em baixas e altas frequências outros mecanismos dominam o comportamento de sensores GMI. De acordo com a faixa de frequências selecionada, tem-se que:

- a. **Baixas frequências:** Até alguns kHz, as mudanças na impedância podem ser atribuídas ao efeito magnetoindutivo [50]. A profundidade de penetração da corrente é maior que as dimensões transversais da amostra. Somente a componente imaginária da impedância muda com a aplicação de um campo magnético externo [5,51,52].
- b. **Frequências Intermediárias:** Entre 100 kHz e alguns MHz, explica-se o efeito GMI com base na variação da profundidade da penetração da corrente em função do campo magnético externo, devido as grandes variações da permeabilidade magnética [51,53].
- c. **Altas Frequências:** A partir de dezenas de MHz até alguns GHz, o efeito GMI está relacionado ao efeito giromagnético e a relaxação ferromagnética. Este intervalo de frequências é caracterizado pelo aparecimento de efeitos dinâmicos sobre os processos de magnetização e por um efeito *skin* muito forte, isto é, a corrente flui por camadas extremamente próximas da superfície do material [68–69].

2.2.2. Magnetoiimpedância longitudinal (LMI)

Os resultados desta pesquisa foram obtidos por meio da análise de sensores baseados em um caso particular do efeito GMI, denominado Magnetoiimpedância Longitudinal (LMI). Ao se aplicar uma pequena corrente alternada I_{ac} ao longo do comprimento de uma amostra LMI, tem-se que a impedância complexa do material (Z) varia em função do campo magnético externo (H_{dc}), aplicado longitudinalmente a direção da corrente I_{ac} . Dessa forma, conforme indicado na Figura 5, será

perceptível uma variação na diferença de potencial (V), medida nas extremidades da amostra, em função de alterações no campo.

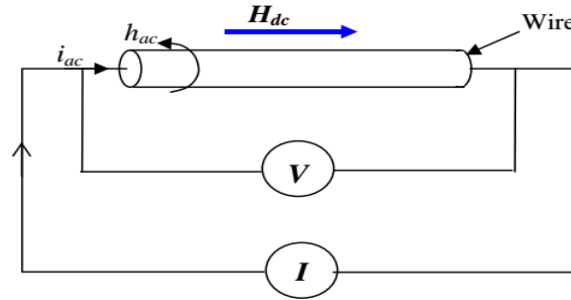


Figura 5 – Arranjo para medição do efeito GMI em amostras GMI excitadas por corrente alternada, na presença de um campo magnético externo [5].

É possível modelar os sensores GMI analisados por meio de um modelo elétrico baseado na associação em série de um resistor $R(H)$ com um indutor $L(H)$, sendo que ambos são afetados pelo campo magnético H . Dessa forma, é possível definir a impedância complexa $Z(H)$ da amostra como:

$$Z(H) = R(H) + j\omega L(H), \quad (3)$$

Utilizando-se a descrição fasorial de corrente e tensão alternada (CA), e arbitrando a fase da corrente (ϕ_I) como zero, tem-se que a impedância Z da amostra é dada por [54] :

$$Z(H) = \frac{|V(H)|e^{j\phi_V(H)}}{|I|e^{j\phi_I}} = \frac{|V(H)|}{|I|}e^{j\phi(H)} = |Z(H)|e^{j\phi(H)}. \quad (4)$$

Por meio da eq. (4), percebe-se que tanto o módulo quanto a fase da impedância são função do campo magnético.

Para uma liga ferromagnética metálica com comprimento L e secção transversal A , tem-se que [5,9]:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{LE_Z(s)}{A\langle j_z \rangle_A} = R_{CC} \frac{j_z(s)}{\langle j_z \rangle_A}, \quad (5)$$

onde E_Z é a componente longitudinal do campo elétrico, j_z é a componente longitudinal da densidade de corrente, R_{CC} é a resistência elétrica CC, s representa o valor da função na superfície do material e $\langle j_z \rangle_A$ é o valor médio da componente longitudinal da densidade de corrente ao longo da seção transversal A .

Conforme mencionado anteriormente, o efeito GMI está relacionado à dependência da profundidade de penetração de corrente com a permeabilidade

magnética transversal. De forma mais detalhada, para uma amostra em forma de fita, é possível definir [3]

$$Z = (1 - j) \frac{L}{2\omega\sigma\delta} \frac{1}{1 - e^{-\frac{(1-j)t}{2\delta}}} , \quad (6)$$

$$\delta = c \left(\sqrt{\frac{1}{2\pi\omega\mu_t\sigma}} \right) , \quad (7)$$

onde L é o comprimento da fita, t a espessura da fita, δ profundidade de penetração da corrente, σ a condutividade do material, μ_t a permeabilidade magnética transversal, ω a frequência angular da corrente e c a velocidade da luz no vácuo.

2.2.3.

Estrutura dos Domínios Magnéticos em Amostras GMI

Diferentes estruturas de domínios são observadas em diferentes tipos de materiais. A estrutura de um material produzido por técnicas de resfriamento rápido é muitas vezes determinada pelo acoplamento entre magnetostricção e tensões internas geradas no processo de fabricação. O conhecimento da estrutura dos domínios magnéticos em um material é extremamente importante no controle e adaptação das propriedades magnéticas do material.

A magnetostricção é um fenômeno magnetoelástico que pode apresentar-se de duas formas. Na magnetostricção negativa, o aumento do campo magnético externo resulta na redução do tamanho do material, ao longo da dimensão paralela ao campo aplicado. Ao contrário, na magnetostricção positiva, observa-se uma expansão do material ao longo da dimensão paralela ao campo aplicado.

Na Figura 6, são apresentadas representações simplificadas das estruturas de domínios magnéticos características de materiais dotados de magnetostricção positiva (a) e negativa (b). A magnetostricção positiva possui domínios magnéticos orientados longitudinalmente ao comprimento da amostra. Esta configuração favorece o surgimento de um efeito indesejável denominado LBE (*Large Barkhausen Effect*), que contribui para o aumento do ruído nas medições. Por outro lado, ligas amorfas com magnetostricção negativa e domínios magnéticos orientados de modo transversal ao comprimento da amostra contribuem para a intensificação do efeito GMI. Tal configuração de domínios pode ser obtida e

otimizada por meio de tratamentos térmicos (*annealing*) com aplicação de um campo magnético transversal.

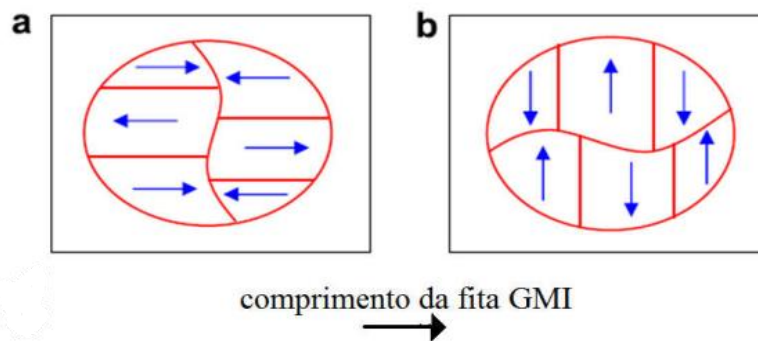


Figura 6 – Configuração dos domínios magnéticos de (a) amostras amorfas com magnetostricção positiva, (b) amostras amorfas com magnetostricção negativa.

2.2.4. GMI Assimétrica

As curvas de variação da impedância (Z) de sensores GMI em função do campo magnético (H) usualmente apresentam um comportamento simétrico em relação ao campo magnético aplicado. Entretanto, alguns fatores contribuem para o aparecimento de assimetrias, que levam a emergência de um fenômeno conhecido como Magnetoimpedância Gigante Assimétrica (AGMI). A literatura destaca três causas principais para o efeito AGMI: corrente CC [5,55–58], campo magnético CA [5,51,74–75] e processos de recozimento (*annealing*) [5,51,76–77]. Por meio do efeito AGMI é possível otimizar a sensibilidade e a linearidade das amostras sensoras.

2.2.4.1. GMI Assimétrica causada por Corrente CC

Este tipo de assimetria apresenta-se pela combinação da anisotropia magnética transversal com o campo magnético produzido pela corrente I_{cc} . Conforme indicado na Figura 7, quando se aplica uma corrente CC (I_{cc}) paralela à direção de propagação da corrente de excitação CA (I_{ca}) e ao campo magnético externo (H_{ext}), induz-se um campo magnético CC (H_{cc}) circunferencial ao comprimento da amostra. Por sua vez, os campos gerados pelas correntes I_{cc} (H_{cc}) e I_{ca} (H_{ca}) estimulam o processo de magnetização circunferencial, o qual opõe-se

ao sentido de magnetização induzido pelo campo magnético externo (H_{ext}), que é longitudinal [5,51,76–77].

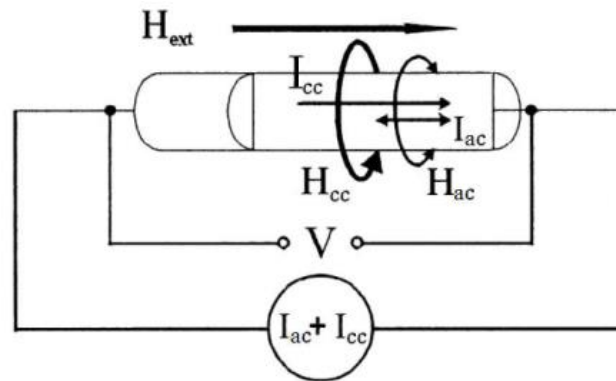


Figura 7 – Configuração experimental para medição do efeito AGMI causado por corrente CC [49].

Se a corrente CC é nula ($I_{cc} = 0$), a curva característica do efeito GMI em função do campo magnético externo (H_{ext}) é simétrica. Por outro lado, ao se aplicar uma corrente CC pode-se perceber a presença de um comportamento assimétrico, conforme indicado na Figura 8.

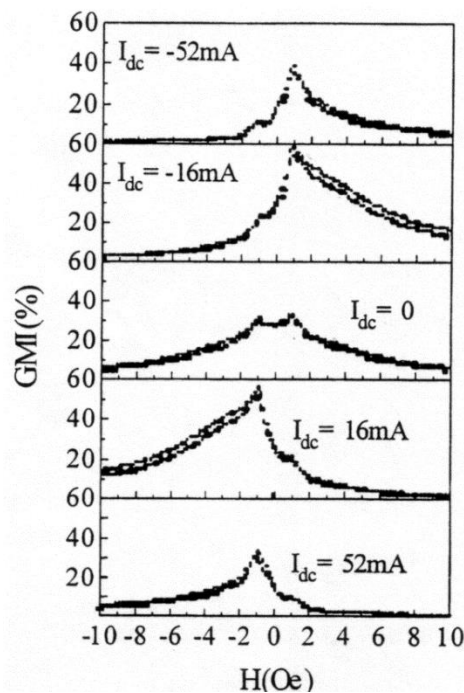


Figura 8 – GMI(%) em função do campo magnético externo, para diferentes valores de I_{cc} [49].

2.3. Algoritmos Genéticos

Algoritmos Genéticos (AGs) são métodos de busca e otimização, baseados em mecanismos de evolução natural. Fazem parte das técnicas de inteligência

computacional, mais especificamente de sistemas inspirados em princípios biológicos. AGs são baseados nos processos de evolução genética dos organismos biológicos, inspirados pela teoria da evolução de Darwin [59].

O processo de evolução executado por um algoritmo genético corresponde a um processo de busca em um espaço de soluções potenciais, almejando alcançar um objetivo proposto. O sucesso do método está associado à capacidade de exploração do espaço de busca e a utilização inteligente das melhores soluções identificadas [60].

O ciclo de funcionamento dos AGs é relativamente simples. Inicialmente, a fim de se compor uma população, são gerados indivíduos de forma aleatória de modo a se formar um conjunto de indivíduos, onde cada indivíduo corresponde a uma possível solução do problema. Na sequência, estes indivíduos são avaliados por meio de uma função de avaliação capaz de determinar a aptidão de cada um deles. Por sua vez, selecionam-se os melhores indivíduos da população em função de seus respectivos graus de aptidão, de modo a se privilegiar os mais aptos. Esse processo é repetido por N gerações, até que seja atingido algum critério de parada. A Figura 9 apresenta o funcionamento típico de um AG [61].

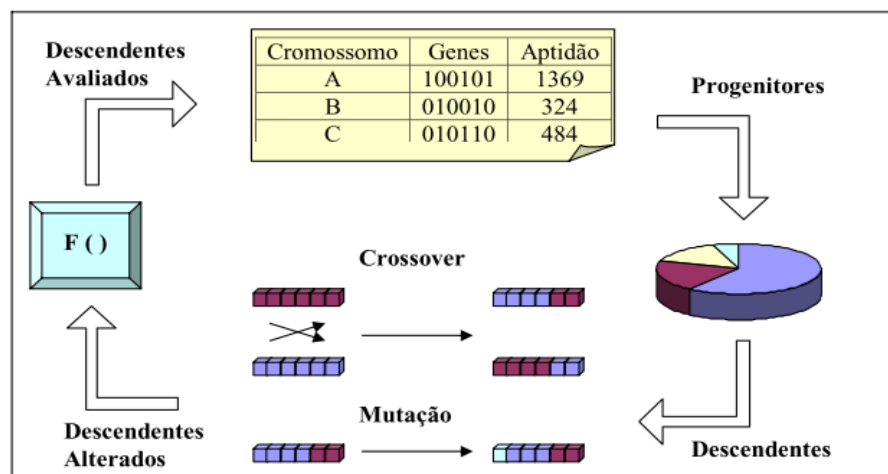


Figura 9 – Representação esquemática do funcionamento de um AG.

Os detalhes da operação de um AG são explicados nas subseções seguintes deste Capítulo. De modo geral, um algoritmo genético é composto pelos seguintes aspectos principais [60]:

- Uma representação genética para soluções potenciais (codificação);
- Uma forma de criar uma população inicial de soluções potenciais;

- Uma função de avaliação capaz de determinar o grau de aptidão dos indivíduos da população, a fim de permitir a comparação da qualidade das soluções;
- Operadores genéticos de cruzamento (*crossover*), que possibilitem que indivíduos de uma geração futura sejam formados pela recombinação genética de indivíduos de uma geração anterior, e mutação, que permitam certo nível de aleatoriedade ao longo do processo de evolução; e
- Valores para os parâmetros usados pelo AG (tamanho da população, probabilidades de aplicação dos operadores genéticos, etc.).

2.3.1. Representação Genética (Codificação)

Existem diversas formas de codificar a população inicial de um AG. A definição do tipo de representação ou codificação das soluções em cromossomos é um aspecto de extrema importância, sendo determinante para que o AG obtenha sucesso na solução de um problema.

Dependendo da codificação escolhida, cada indivíduo da população será representado por um conjunto de parâmetros representados convencionalmente por meio de valores binários, inteiros ou reais. A Figura 10 apresenta a estrutura de um cromossomo, com genes representados por números inteiros [62]. Destaca-se que cada gene está associado a uma variável que afeta diretamente a solução do problema.

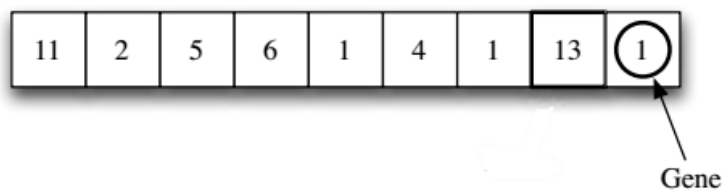


Figura 10 – Representação de um cromossoma em AGs.

Uma solução é formada pela interpretação de um indivíduo (cromossoma) da população por meio de uma função de avaliação, responsável por determinar seu grau de aptidão. Em alguns casos, pode-se utilizar mais de um indivíduo para representar uma solução, no entanto, cada um dos indivíduos que compõem a solução deve pertencer a uma população diferente [63].

2.3.2. População Inicial

A geração da população inicial marca o primeiro passo da cadeia de evolução de um algoritmo genético. Esse processo leva em consideração os seguintes fatores: viabilidade, limites do espaço de busca, tempo de processamento, abrangência da busca, tendência, restrições, entre outros. Destaca-se que a verificação da viabilidade é um aspecto muito importante, já que todos os indivíduos da população (incluindo aqueles presentes em populações futuras, gerados por cruzamentos e mutações) devem representar soluções viáveis [64].

Na maioria das vezes, a população inicial de indivíduos é gerada de forma aleatória. Entretanto, existem casos onde é mais apropriado gerar a população inicial por meio de uma heurística, a fim de poder-se introduzir, já na população inicial, indivíduos com características interessantes para a solução do problema em questão. Todavia, a população inicial não é uma fase crítica em algoritmos genéticos, sendo possível evoluir para soluções satisfatoriamente próximas da ótima independentemente do conjunto de indivíduos que compõem a população inicial, desde que a mesma contenha indivíduos suficientemente diversificados [65]. Entretanto, uma definição adequada da população inicial possibilita que sejam encontradas boas soluções em um número reduzido de gerações, o que reduz o tempo de processamento computacional.

2.3.3. Avaliação

A função de avaliação é um elemento de extrema importância, pois é utilizada para determinação da aptidão dos indivíduos, sendo responsável por estabelecer uma relação entre o algoritmo genético e o problema a ser solucionado. O valor retornado por uma função de avaliação indica o grau de aptidão do indivíduo analisado, considerando o objetivo proposto para o processo de otimização [66]. Dessa forma, a aptidão indica o quão bem um indivíduo da população atende aos requisitos de um problema. Normalmente, o grau de aptidão de cada indivíduo é representado por meio de valores escalares, inteiros ou reais.

2.3.4. Seleção

Uma vez terminada a fase de geração de cada um dos indivíduos que compõem a população, selecionam-se os melhores indivíduos para cruzamento genético, tendo em vista seus respectivos valores de aptidão. Os indivíduos com melhor aptidão possuem maior possibilidade de sobreviver e de serem selecionados para a etapa de reprodução [64].

Dessa forma, privilegia-se a seleção dos indivíduos progenitores mais aptos para o cruzamento genético, e, conseqüentemente, a transmissão de seus genes para novas gerações, as quais serão compostas majoritariamente por seus descendentes diretos [64].

Dentre os métodos de seleção existentes, destacam-se três:

- **Seleção por roleta:** é o método mais utilizado, consiste em associar os indivíduos da população a frações da área total de uma roleta, sendo cada uma destas frações proporcional à aptidão do indivíduo associado. Isto significa que cada indivíduo tem uma probabilidade de ser selecionado proporcional a sua aptidão. Conseqüentemente, os indivíduos com maior aptidão têm maiores probabilidades de serem escolhidos [60,67–69]. A Figura 11 exemplifica um método de seleção com roleta. Note que, quando a roleta gira, os indivíduos com maior aptidão têm maior probabilidade de serem escolhidos, devido a ocuparem uma área maior na superfície da roleta [70].

Indivíduo	Fitness	Fração da Roleta
A	84	19
B	12	3
C	180	40
D	110	25
E	59	13

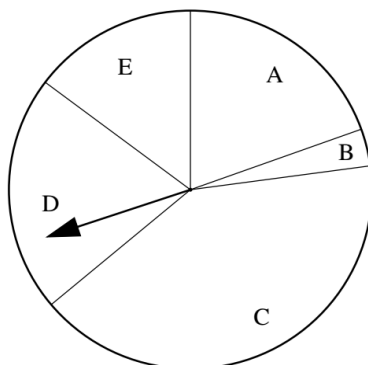


Figura 11 – Método de seleção por roleta.

- **Seleção por torneio:** Neste método, escolhe-se um número n de indivíduos de forma aleatória e se compara seus valores de aptidão. Dentre estes, seleciona-se para o cruzamento os dois indivíduos com as melhores aptidões [64,71]. O processo de seleção termina quando o número de torneios é igual ao tamanho da população. Recomenda-se usar este método quando existem diferenças significativas nos valores de aptidão dos indivíduos que compõem a população.
- **Seleção baseada em ordenação:** neste método, ao invés de se utilizar diretamente o valor absoluto da aptidão dos indivíduos para determinação das probabilidades de seleção para o cruzamento, as probabilidades de seleção são definidas a partir da ordenação ou posição relativa dos cromossomos na população, em função de suas respectivas aptidões [72].

2.3.5. Operadores Genéticos

Os operadores genéticos mais comumente utilizados em algoritmos genéticos são os de cruzamento (*crossover*) e mutação. Tais operadores são utilizados a fim de se encontrar novos indivíduos, que podem causar melhorias significativas na solução do problema em questão.

O operador de cruzamento é certamente um dos mais importantes dentre o conjunto de operadores dos AGs, pois o mesmo tem impacto direto no processo de evolução. Existem vários tipos de *crossover*, sendo os mais relevantes discutidos a seguir.

- *Cruzamento de um-ponto:* conforme indicado na Figura 12, depois de selecionados os indivíduos para cruzamento (pais), escolhe-se um ponto de ruptura aleatório no cromossomo, que divide os dois indivíduos em duas partes. Na sequência, estas partes são recombinadas entre si, criando-se dois novos filhos.

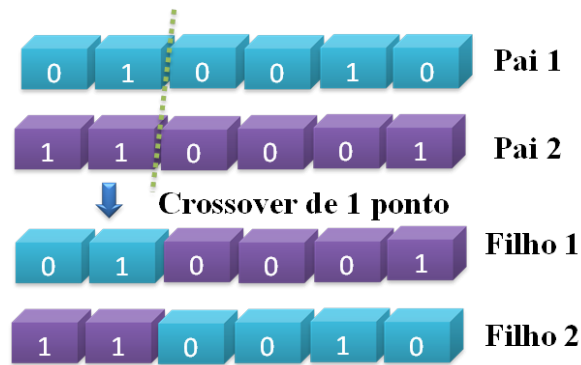


Figura 12 – Crossover de um ponto [61].

- *Cruzamento de dois-pontos*: O procedimento de cruzamento de dois pontos é similar ao crossover de um ponto. Entretanto, neste caso é necessário selecionar dois pontos de ruptura, ao invés de apenas um, e apenas os bits entre estes dois pontos de ruptura são efetivamente trocados, conforme indicado na Figura 13.

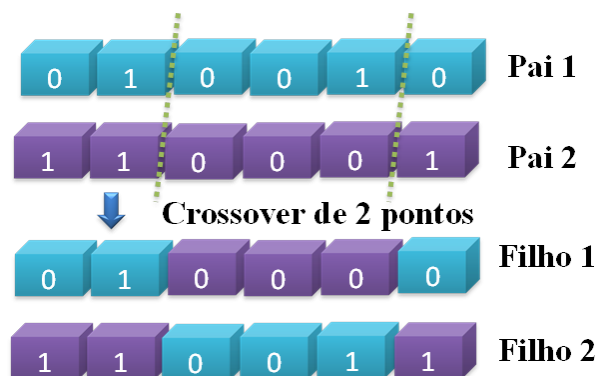


Figura 13 – Crossover de dois pontos [61].

- *Cruzamento Uniforme*: neste cruzamento é utilizada uma máscara binária, gerada aleatoriamente, para a recombinação genética dos progenitores. Por conseguinte, cada gene do filho tem 50 % de probabilidade se pertencer a cada um dos pais [73]. A Figura 14 apresenta uma representação esquemática da aplicação deste operador.

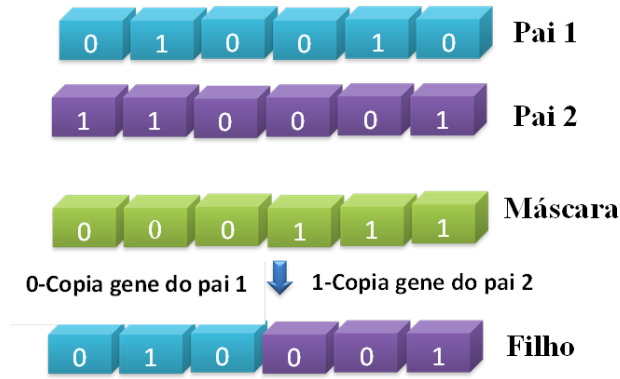


Figura 14 – Crossover Uniforme [61].

- *Cruzamento de Laplace:* também conhecido como LX (do inglês *Laplace Crossover*), é um operador do qual se obtém dois filhos a partir dos pais usando as eq. (8) [98-99].

$$\begin{aligned} y_i^{(1)} &= x_i^{(1)} + \beta |x_i^{(1)} - x_i^{(2)}|, \\ y_i^{(2)} &= x_i^{(2)} + \beta |x_i^{(1)} - x_i^{(2)}|. \end{aligned} \quad (8)$$

onde β é uma função dependente de u_i o qual é um número uniformemente distribuído entre 0 e 1. β se obtém invertendo a função de distribuição de Laplace.

$$\beta = \begin{cases} a - b \log_e(u), & u \leq 1/2 \\ a + b \log_e(u), & u > 1/2 \end{cases} \quad (9)$$

Os parâmetros a e b são chamados parâmetros de localização, geralmente se toma $a = 0$ e $b > 0$, também conhece-lhes como parâmetros de escala.

Por sua vez, a função do operador mutação é introduzir perturbações nos indivíduos com o objetivo de manter a diversidade genética da população, proporcionando uma maior exploração do espaço de busca. A mutação é aplicada a um gene do cromossomo, trocando seu valor por outro gerado aleatoriamente.

A probabilidade para que um indivíduo sofra mutação é um parâmetro ajustável pelo usuário. Este valor deve ser pequeno para que a solução não se degenera, ou seja, para não se prejudicar a convergência do algoritmo [64,66,76]. A Figura 15 indica a aplicação do operador mutação.

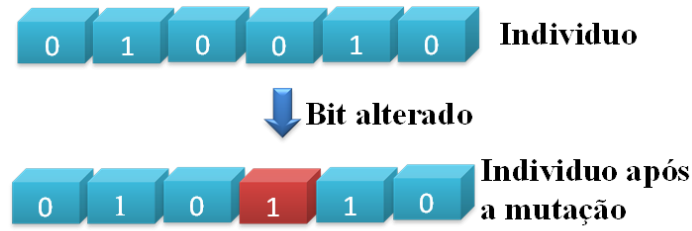


Figura 15 – Operador Mutação.

Um tipo de operador de mutação utilizado nesta dissertação foi o operador PM (do inglês *Power Mutation*), este tipo de mutação está baseada na lei de potência ou também conhecida como caída longa [77]; é usada para criar uma solução $y^{(l)}$ na vizinhança de um pai $x^{(l)}$, isto se faz de acordo ao expressado na eq. (10).

$$y^{(l)} = \begin{cases} x_i^{(l)} - s_i(x_i^{(l)} - x_i^L), & t < r \\ x_i^{(l)} + s_i(x_i^{(U)} - x_i^{(l)}), & t \geq r \end{cases} \quad (10)$$

onde,

$$t = \frac{x_i^{(l)} - x_i^{(L)}}{x_i^{(U)} - x_i^{(l)}},$$

s_i é a densidade da distribuição da função dada por $s_i(x) = x^p$ para $0 \leq x \leq 1$, p é índice da distribuição e r é um número aleatório ente 0 e 1 uniformemente distribuído.

2.3.6. Parâmetros da evolução

A configuração ótima dos parâmetros do algoritmo genético depende do problema a ser solucionado [78]. Os parâmetros que têm maior impacto no desempenho do algoritmo são [79]:

- *Tamanho da População*: é um parâmetro importante, pois afeta o desempenho global e a eficiência dos AGs. Uma população muito pequena implica em uma capacidade de exploração insuficiente do espaço de busca, fazendo com que o desempenho do AG seja reduzido. Por outro lado, uma população muito grande consome maiores recursos computacionais e demanda maiores tempos de processamento. Portanto, deve-se buscar um equilíbrio na seleção do tamanho da população, tendo em vista a definição de uma população

suficientemente grande que permita a obtenção de soluções satisfatórias em intervalos de tempo aceitáveis.

- *Taxa de Cruzamento*: define a probabilidade de recombinação entre os indivíduos da população. Taxas de cruzamento pequenas fazem com que o processo de busca torne-se muito lento, devido à escassa diversidade da população. Entretanto, taxas muito altas fazem com que novas estruturas sejam criadas muito rapidamente, o que pode comprometer o processo de evolução. Em muitos casos, a melhor opção é a definição de taxas de cruzamento adaptativas, onde a mesma é maior nas primeiras gerações e vai diminuindo gradativamente ao longo do processo de evolução.
- *Taxa de Mutação*: é a probabilidade de alteração aleatória de um gene de um cromossoma. A taxa de mutação previne que uma determinada população fique estagnada em torno de um valor sub-ótimo e possibilita que se atinja qualquer ponto contido no espaço de busca. Taxas de mutação muito baixas, reduzem a diversidade populacional e a capacidade de exploração de espaço de busca. Por outro lado, ao se optar por taxas de mutação muito altas, pode-se fazer com que a busca se torne essencialmente aleatória. Dessa forma, é possível adotar taxas adaptativas, baixas no início da evolução e mais altas no final.
- *Taxa de Elitismo*: é a taxa que controla a porcentagem da população que é conservada de uma geração a outra. Este parâmetro possibilita a manutenção dos melhores indivíduos de uma dada geração na geração seguinte, evitando perda de desempenho ao longo da evolução. Este parâmetro também pode ser definido de forma adaptativa. Recomenda-se que no início da evolução, um número maior de indivíduos seja mantido e que esta fração diminua gradativamente até o final da evolução.
- *Número de Gerações*: é um dos critérios de parada de um AG, indicando o número total de ciclos de evolução.

3. Sistema Automático de Otimização

A Figura 16 apresenta o diagrama de blocos de um circuito típico de magnetômetro GMI, baseado na leitura da fase da impedância dos elementos sensores [3,44].

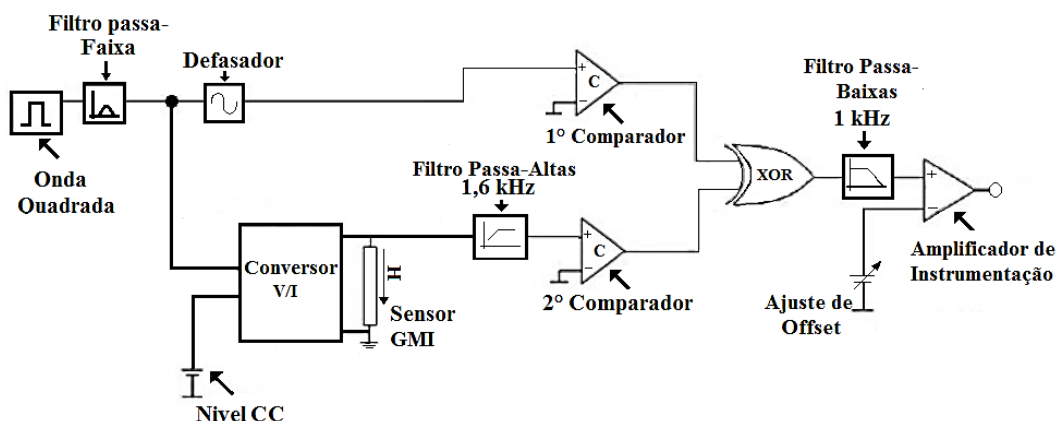


Figura 16 – Diagrama de blocos do circuito eletrônico de um magnetômetro GMI.

Conforme indicado na Figura 16, o circuito possui um estágio de excitação composto por um oscilador, responsável por gerar uma onda quadrada com uma determinada frequência (f). Em seguida, este sinal passa por um filtro passa-faixa com frequência central ajustada para a mesma frequência da onda quadrada. Dessa forma, gera-se na saída do filtro uma onda senoidal com frequência f .

Na sequência, esta onda senoidal é conectada a um conversor de tensão em corrente (conversor V/I), ajustado de modo a converter a onda senoidal de tensão em uma corrente alternada de mesma frequência e com a amplitude desejada (I_{CA}). Adicionalmente, o conversor V/I também recebe um nível CC fornecido por um regulador de tensão e converte-o na corrente contínua (I_{CC}) com a qual deseja-se excitar o sensor. Em particular, tem-se que a corrente total de excitação do sensor GMI (i_c) é dada pela superposição da corrente contínua com a alternada, de acordo com $i_c = [I_{CC} + I_{CA} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t)]$ mA. Por sua vez, o sensor GMI é polarizado por um campo magnético de polarização H_{pol} , responsável por garantir que o sensor opere em sua faixa ótima.

Na presente dissertação, aprimorou-se e incorporou-se novas funcionalidades ao sistema de caracterização automático de amostras GMI, desenvolvido em trabalhos anteriores [22–24,80], visando permitir que o sistema evolua automaticamente para a combinação de parâmetros (campo magnético de polarização dos sensores e nível CC, amplitude e frequência da corrente de excitação dos sensores) é responsável pela maximização da sensibilidade de fase do sensor GMI avaliado. Dessa forma, contribui-se para a maximização da sensibilidade do magnetômetro.

O sistema é controlado por um modelo computacional baseado em algoritmos genéticos, implementado de forma que os genes dos indivíduos da população representem os parâmetros de interesse que afetam a sensibilidade dos sensores. Os equipamentos do sistema automático de caracterização têm seus valores ajustados pelos genes dos indivíduos, de modo que se possa medir experimentalmente a sensibilidade correspondente a cada indivíduo, ou seja, a cada combinação de parâmetros de interesse. Por sua vez, o AG utiliza a medição experimental da sensibilidade como a função de avaliação de cada indivíduo presente na população.

O *hardware* do sistema automático de otimização de amostras GMI é composto por seis módulos principais: medidor RLC (4285A, *Agilent*); fonte de corrente (E3648A, *Agilent*); bobina de Helmholtz; inversor de polaridade, placa de aquisição de dados - DAQ (NI USB-6221, *National Instruments*) e um computador (PC). O medidor RLC e a fonte de corrente são interconectados ao PC por meio de uma interface GPIB-USB. Por sua vez, a DAQ é conectada ao PC por meio de uma interface USB. Os principais aspectos do *hardware* do sistema implementado são detalhados na seção 3.1.

O *software* do sistema é executado no PC, sendo composto por dois módulos principais: o módulo controle e medição, implementado em LabVIEW, e o módulo de otimização, implementado em MatLab. O primeiro módulo, descrito na seção 3.2, é responsável pela comunicação com os instrumentos empregados no sistema, a fim de controlá-los e de obter as medições de interesse. O segundo módulo, descrito na seção 3.3, é responsável por executar o algoritmo de otimização, baseado em algoritmos genéticos. Os dois módulos se intercomunicam por meio de protocolo TCP/IP.

Destaca-se que, optou-se por implementar o módulo de controle e medição em LabVIEW, a fim de se aproveitar parcialmente o arcabouço do sistema de

caracterização desenvolvido em 2012, o qual foi desenvolvido nesta plataforma [24].

A Figura 17 mostra um diagrama de blocos ilustrativo do sistema desenvolvido. Por sua vez, a Figura 18 apresenta uma foto da bancada de testes efetivamente implementada no laboratório.

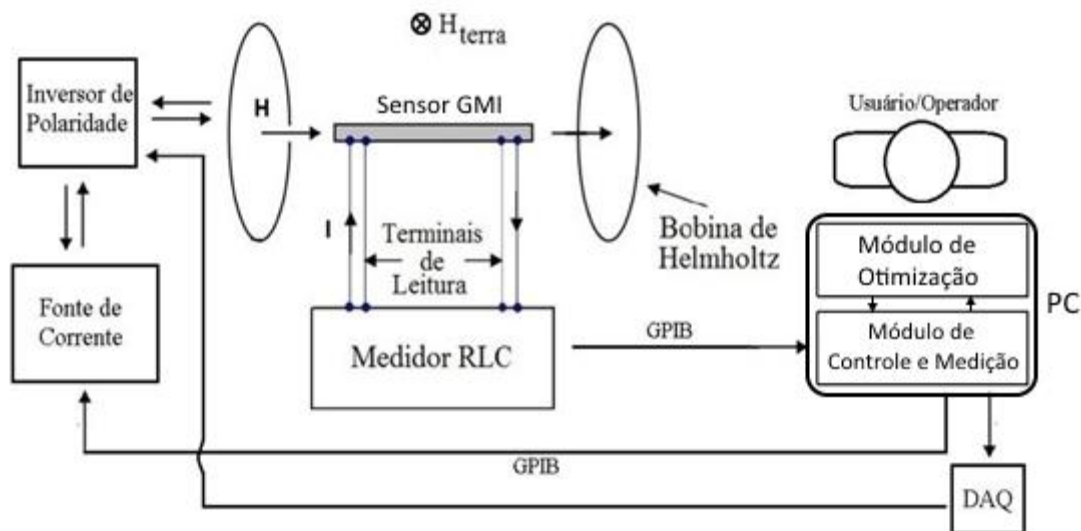


Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema automático de caracterização.

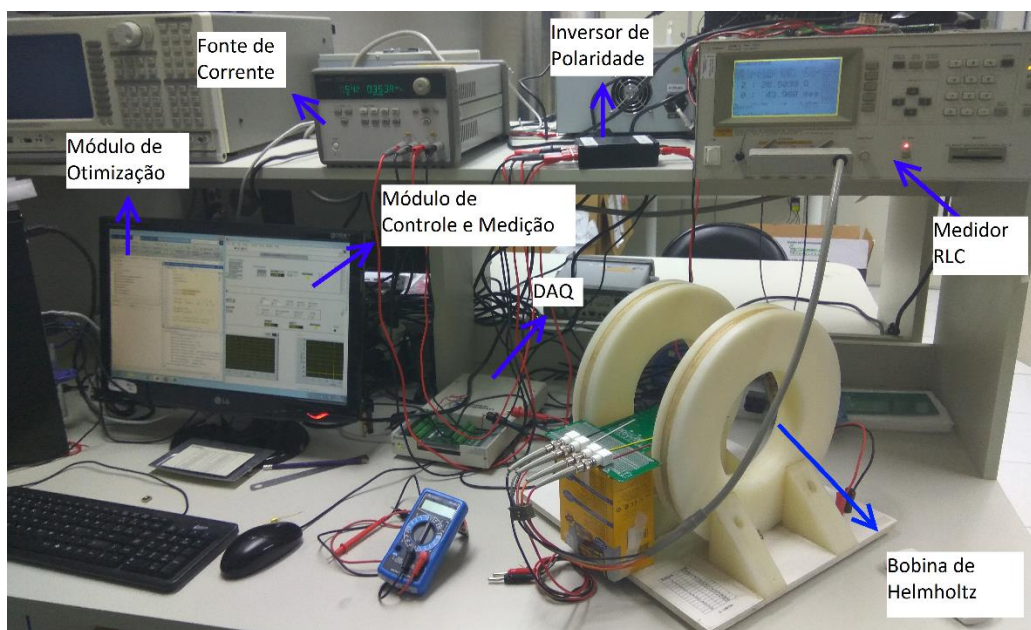


Figura 18 – Foto da bancada de testes, destacando os equipamentos utilizados no sistema automático de otimização.

3.1. **Hardware do Sistema**

O medidor RLC utilizado no sistema foi o modelo 4285A da Agilent™, o qual possui interface de comunicação GPIB e é capaz de medir diferentes parâmetros associados a impedância da amostra caracterizada, tais como: indutância, capacitância, resistência, módulo da impedância, fase da impedância, ente outros. As medições de módulo e fase da impedância, feitas por este instrumento, são efetuadas com precisão de 0,1 %.

O equipamento possui dois terminais destinados a excitação da amostra caracterizada, sendo possível excitar a mesma por meio de tensão ou corrente. Por sua vez, o equipamento possui dois terminais adicionais destinados a leitura da impedância da amostra, por meio de leituras de tensão. Dessa forma, tendo em vista as características de sensores GMI, decidiu-se excitar as amostras por corrente, de modo que variações no campo magnético impliquem em variações da tensão nos terminais de leitura, devido a mudanças na impedância da amostra sensora.

Em particular, o medidor RLC utilizado permite que se efetuem ajustes nos parâmetros da corrente de excitação, aplicada a amostra caracterizada, sendo possível definir frequências entre 75 kHz e 30 MHz, em passos de 100 Hz, níveis CC entre 0 mA e 100 mA e amplitudes entre 0 mA e 28.28 mA [81]. É importante destacar que a frequência, o nível CC e a amplitude da corrente de excitação são três dos quatro parâmetros considerados para maximização da sensibilidade de fase das amostras GMI. Estes parâmetros podem ser ajustados de forma automatizada por meio da informação recebida pela interface GPIB, que interconecta o medidor RLC ao PC, que executa o *software* de otimização, controle e medição aqui desenvolvido.

Além disso, tendo em vista que se tem interesse na avaliação da sensibilidade de fase dos elementos sensores, configurou-se o equipamento no modo de medição **Z- θ deg**, o qual efetua medições do módulo (Z), em ohms, e da fase (θ), em graus, da impedância da amostra avaliada. Destaca-se ainda que, o medidor RLC empregado pode efetuar, no máximo, uma nova medição a cada 30 ms [81]. Por sua vez, as leituras de módulo e fase são transmitidas ao *software* de otimização, controle e medição, por meio da interface GPIB, que interconecta o medidor RLC ao PC.

A Figura 19 apresenta uma foto da parte frontal do medidor RLC utilizado, configurado no modo de medição $Z-\theta \text{ deg}$.

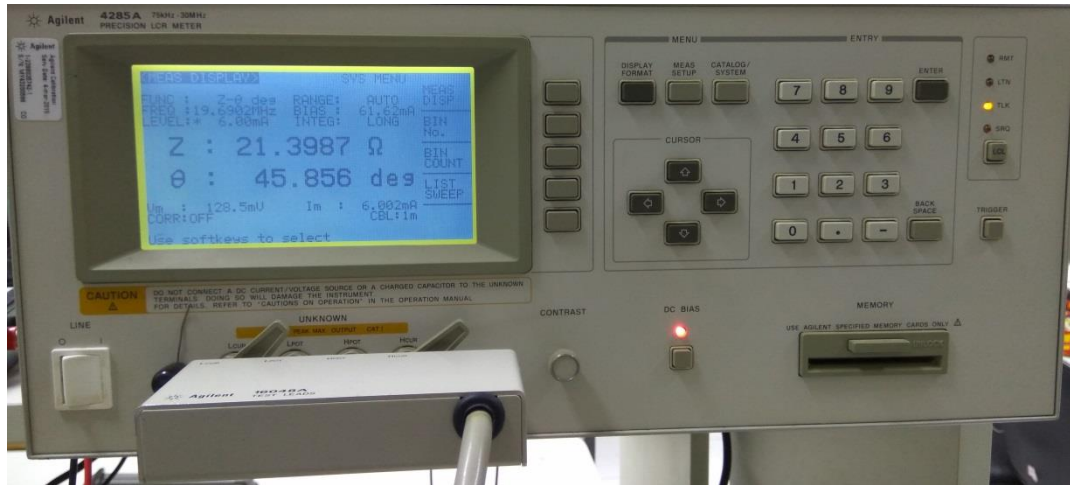


Figura 19 – Parte frontal do medidor RLC 4285A da Agilent™.

A fim de se poder avaliar a sensibilidade de fase S_{fas} dos sensores GMI, é necessário efetuar a medição da diferença de fase $\Delta\theta$ correspondente a uma dada diferença de campo ΔH , de modo a se poder definir $S_{fas} = \Delta\theta / \Delta H$.

Como ilustrado na Figura 17, as amostras GMI estão inseridas no centro de uma bobina de Helmholtz, sendo possível controlar o campo magnético H ao qual as amostras são submetidas, por meio de ajustes na corrente I que flui pela bobina de Helmholtz. Por sua vez, o medidor RLC pode ser empregado a fim de efetuar as leituras dos valores da fase da amostra analisada, θ_1 e θ_2 , correspondentes a dois campos magnéticos distintos H_1 e H_2 . Consequentemente, é possível definir $S_{fas} = (\theta_1 - \theta_2) / (H_1 - H_2)$. Por sua vez, o campo magnético de polarização é o valor médio entre H_1 e H_2 , sendo este o quarto parâmetros considerado no processo de maximização da sensibilidade de fase das amostras GMI.

A bobina de Helmholtz é um dispositivo capaz de gerar campos magnéticos praticamente uniformes na vizinhança da sua região central. Sua estrutura é implementada por duas bobinas circulares, ambas com o mesmo raio R e a mesma quantidade de espiras N . Estas bobinas são afastadas entre si por uma distância igual ao raio R das mesmas. O campo magnético gerado no centro desta estrutura é função da corrente I que flui pelas bobinas, de acordo com

$$H = \frac{8NI}{5\sqrt{5}R}, \quad (11)$$

onde H é a magnitude do campo magnético no centro das bobinas, I é a corrente CC que percorre as espiras, N é o número total de espiras em cada bobina e R é o raio das bobinas.

A Figura 20 apresenta a representação esquemática de uma Bobina de Helmholtz [82].

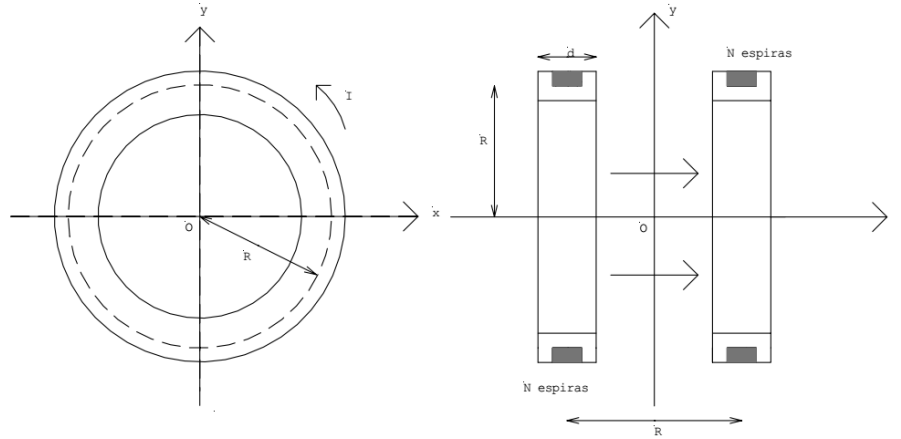


Figura 20 – Representação esquemática da estrutura de uma bobina de Helmholtz.

Mais especificamente, a bobina de Helmholtz utilizada para caracterização das amostras GMI avaliadas neste trabalho, é composta por duas bobinas circulares com 15 cm de raio, contendo 48 espiras cada, enroladas em seis camadas. Consequentemente, substituindo estes valores na eq. (11) e sabendo que $1 \text{ Oe} = 79,6 \text{ A/m}$, é possível definir a relação do campo magnético no centro da bobina $H(\text{Oe})$, em oersteds, em função da corrente $I(\text{A})$, em amperes, que a atravessa, por meio de

$$H[\text{Oe}] = 2,89I[\text{A}] \quad (12)$$

A fonte utilizada para excitar a bobina de Helmholtz, foi a fonte modelo E3648A, da Agilent™. Esta fonte possui 100 W de potência e pode ser configurada como fonte de corrente ou tensão. Ela pode ser ajustada para duas faixas de operação. Em uma destas faixa a tensão é limitada entre 0 V a 8 V e a corrente entre 0 A 5 A. Na outra faixa, limita-se a tensão entre 0 V e 20 V e a corrente entre 0 A e 2,5 A. A fonte possui duas saídas (OUT_1 e OUT_2), sendo ambas utilizadas pelo sistema de caracterização implementado. A saída OUT_1 é configurada como fonte de corrente e utilizada para excitar a bobina de Helmholtz (0-8V / 0-5A), enquanto que a saída OUT_2 é configurada como fonte de tensão e utilizada para alimentar o circuito inversor de polaridade, com uma tensão fixa de 9V.

Por sua vez, destaca-se que esta fonte pode ser controlada por interface GPIB, o que é essencial para a automatização do sistema, tendo em vista que o campo magnético gerado pela Bobina de Helmholtz é função da corrente I gerada por esta fonte. Em particular, por meio da interface GPIB, o *software* de otimização, controle e medição, transmite para a fonte o valor da corrente I associado ao valor de campo magnético que se deseja gerar na bobina de Helmholtz.

Conforme mencionado anteriormente, a saída OUT_1 da fonte E3648A foi configurada como fonte de corrente CC e utilizada para excitar a Bobina de Helmholtz. Esta fonte permite a geração de corrente em um único sentido, entretanto, deseja-se permitir que as amostras GMI inseridas no centro da Bobina de Helmholtz possam ser excitadas tanto por campos positivos quanto por campos negativos. Dessa forma, conforme apresentado no diagrama de blocos da Figura 17, a saída OUT_1 foi conectada a um inversor de polaridade utilizado a fim de permitir a inversão do sentido da corrente que flui pela Bobina de Helmholtz.

O circuito eletrônico do inversor de polaridade é apresentado na Figura 21, o qual é alimentado por uma tensão de 9V fornecida pela saída OUT_2 da fonte E3648A. O sentido da corrente que flui pela bobina de Helmholtz depende do nível lógico TTL conectado ao terminal V_{in} . Para um nível lógico baixo, os campos gerados pela Bobina de Helmholtz são positivos, e para um nível lógico alto, os campos são negativos. O terminal V_{in} é interconectado a uma das saídas digitais da placa de aquisição utilizada (NI USB-6221), a qual é conectada ao PC por meio de uma interface USB. Dessa forma, o *software* de otimização, controle e medição pode ajustar V_{in} conforme desejado.

De modo a reduzir o custo do sistema, a DAQ utilizada poderia ser substituída por uma DAQ mais simples, visto que se utilizou apenas uma saída digital da placa.

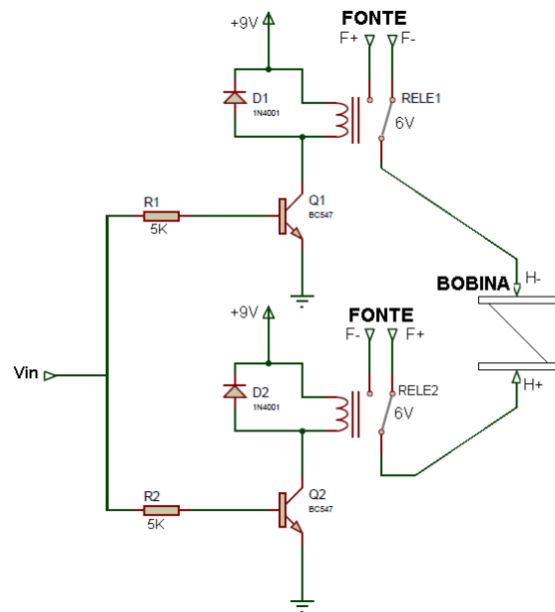


Figura 21 – Representação esquemática do circuito de inversão de polaridade.

3.2. Módulo de Controle e Medição

3.2.1. Software no LabVIEW

O LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica, desenvolvida pela *National Instruments*. Sua primeira versão comercial foi lançada em 1986, para computadores *Macintosh*, sendo posteriormente adaptada para plataformas baseadas nos sistemas operacionais *Windows*, *Linux* e *Solaris*.

Atualmente, *softwares* baseados em LabVIEW são amplamente empregados em tarefas de controle e automação, sendo que a grande maioria dos equipamentos de medição produzidos pelos principais fabricantes mundiais são compatíveis com esta plataforma de desenvolvimento. Por sua vez, a interface programação é simples e intuitiva, permitindo a implementação dos programas por meio do encadeamento de blocos que implementam funções específicas, de acordo com o modelo de um fluxograma de dados, oferecendo vantagens para a aquisição de dados e para sua manipulação.

Dessa forma, optou-se por desenvolver na plataforma LabVIEW o módulo de controle e medição do sistema aqui proposto, devido a esta plataforma possuir uma

arquitetura modular e oferecer ferramentas já desenvolvidas para o interfaceamento com todos os dispositivos utilizados no sistema. O programa desenvolvido em LabVIEW é responsável por:

- Controlar nível CC, amplitude e frequência da corrente de excitação gerada pelo medidor RLC;
- Ajustar o valor do campo magnético ao qual as amostras sensoras são submetidas, por meio do ajuste a corrente que flui pela bobina de Helmholtz;
- Ler os valores de módulo e fase da impedância das amostras, associados a cada valor de campo magnético arbitrado;
- Ajustar o sentido da corrente que flui pela bobina de Helmholtz, por meio do ajuste da saída digital da DAQ conectada ao inversor de polaridade.

O módulo de controle e medição, implementado em LabVIEW, se comunica por meio de uma interface de comunicação bidirecional TCP/IP com o módulo de otimização, implementado em MatLab, baseado em algoritmos genéticos e descrito na seção 3.3. O módulo de controle e medição recebe os seguintes parâmetros do módulo de otimização: nível CC, amplitude e frequência da corrente de excitação, além do valor de campo magnético ao qual se deseja submeter a amostra. Estes parâmetros são os genes de cada indivíduo presente na população do AG. Dessa forma, o módulo de controle e medição pode configurar adequadamente os equipamentos que compõem a bancada experimental. Por sua vez, módulo de controle e medição envia para o módulo de otimização as leituras de módulo e fase da impedância da amostra sensora, efetuadas nas condições estabelecidas pelo módulo de otimização. As leituras de fase são empregadas no cálculo da função de avaliação do AG, que busca otimizar a sensibilidade de fase S_{fas} .

Este processo permite a avaliação de todos os indivíduos gerados pelo AG, ao longo de todo o ciclo evolutivo. Por sua vez, ao final do processo de otimização, o módulo de otimização envia ao LabVIEW a combinação dos quatro parâmetros de interesse (genes) responsável pela obtenção da máxima sensibilidade de fase. Por sua vez, o módulo de controle e medição ajusta nível CC, amplitude e frequência da corrente de excitação, gerada pelo medidor RLC, de acordo com os valores ótimos retornados pelo módulo de otimização.

Na sequência, efetua-se a caracterização do módulo e da fase da amostra avaliada, para o campo magnético variando entre -2 Oe e 2 Oe. Note-se que, estes foram os limites arbitrados para a variável campo magnético de polarização, que é um dos genes do AG, conforme descrito na seção 3.3. Dessa forma, é possível verificar se, de fato, a curva de caracterização de fase obtida apresenta uma sensibilidade de fase máxima similar a indicada pelo AG, em torno de um valor de campo magnético similar ao campo magnético de polarização retornado pelo AG.

A Figura 22 apresenta a tela principal da interface gráfica com o usuário do *software* desenvolvido em LabVIEW, para o processo de otimização da sensibilidade e caracterização de amostras GMI. Os controles e indicadores são agrupados em dois grandes grupos: Otimização (destacado em azul) e Caracterização (destacado em vermelho).



Figura 22 – Tela principal da interface com o usuário do *software* desenvolvido para otimização da sensibilidade e caracterização de amostras GMI.

Na parte de *otimização*, está presente um conjunto de indicadores denominados *Dados recebidos do módulo de otimização*, que representam os genes do indivíduo da população do AG que se deseja avaliar, sendo subdivididos em: *Frequência (kHz)*, *Nível CC (mA)*, *Amplitude (mA)* e *Campo Magnético (Oe)*. Por sua vez, o valor da fase da impedância da amostra GMI analisada, associado ao

indivíduo avaliado, é medido diretamente pelo medidor RLC e informado no campo *Fase Medida (graus)*. Para se reduzir a incerteza de medição, são realizadas 5 medidas sucessivas deste parâmetro e seu valor médio é indicado no campo *Fase Média (graus)*, o qual é enviado para o módulo de otimização. Nota-se ainda a presença do indicador *Corrente na Bobina de Helmholtz (A)*, que apresenta o valor da corrente utilizada para excitar a Bobina de Helmholtz de modo que a mesma gere o campo magnético informado pelo indicador *Campo Magnético (Oe)*.

Por sua vez, o led indicador *Relé* acende quando o inversor de polaridade atua a fim de permitir que os campos magnéticos gerados pela Bobina de Helmholtz sejam negativos, e permanece apagado caso contrário. Por outro lado, quando o AG converge para uma solução ótima, o led indicador *Final Stop* acende e o indicador *Sensibilidade (°/Oe)* apresenta o valor da melhor sensibilidade de fase obtida pelo AG, encerrando o processo de busca e iniciando o processo de caracterização do melhor indivíduo encontrado.

A parte de **caracterização** é ativada ao fim do ciclo evolutivo do AG, tendo por objetivo a obtenção da curva de caracterização de fase correspondente ao melhor indivíduo encontrado. Dessa forma, pode-se avaliar se a sensibilidade de fase máxima apresentada é de fato similar a indicada pelo AG, em torno de um valor de campo magnético similar ao campo magnético de polarização também retornado pelo AG. Os controles *RLC port* e *Imp Type* são comuns tanto a parte de **caracterização** quanto a parte de **otimização**, sendo utilizados respectivamente para especificar a porta a qual o medidor RLC está conectado e o tipo de medição de impedância que se deseja efetuar. Em particular, ao se ajustar para *Imp Type* o medidor RLC retorna efetua medições de módulo, em ohms, e fase, em graus.

Por sua vez, o controle *Espera entre medições (ms)* também é comum as partes de **otimização** e **caracterização**, sendo utilizado para definir o tempo médio aguardado entre medições sucessivas. Destaca-se que tempos de espera pequenos tornam a análise mais rápida, entretanto aumentam a imprecisão das medições, visto que a cada novo indivíduo que se deseja avaliar é necessário aguardar um certo tempo até que as leituras de fase da impedância estabilizem. Dessa forma, decidiu-se fixar este parâmetro em 1000 ms, a fim de garantir que as leituras de fase sejam efetuadas de modo adequado.

Os indicadores *Freq_ót (kHz)*, *Niv_ót (mA)*, *H_ót (Oe)* e *Amp_ót (mA)* apresentam, respectivamente, a combinação dos parâmetros *Frequência (kHz)*,

Nível CC (mA), *Campo Magnético (Oe)* e *Amplitude (mA)* responsável pela máxima sensibilidade de fase obtida pelo AG. O medidor RLC é ajustado com os valores *Freq_ót (kHz)*, *Niv_ót (mA)* e *Amp_ót (mA)*, e, na sequência, são obtidas as curvas de módulo e fase da impedância da amostra GMI avaliada, em função do campo magnético. Estas curvas são apresentadas pelos indicadores gráficos mostrados na Figura 22. A faixa de campos magnéticos avaliada é especificada pelo controle *Faixa de Campos Magnéticos (Oe)*. Admitindo que este valor seja arbitrado em H_{limite} , são efetuadas medições entre $\pm H_{limite}$. Por sua vez, o passo das medições é definido pelo controle *Passo (Oe)*.

Os indicadores *Módulo (ohms)* e *Fase (graus)* apresentam as leituras informadas pelo medidor RLC a cada passo, os quais são utilizados para construção das curvas de caracterização apresentadas. O indicador *Quantidade total de passos* informa a quantidade total de passos que serão executados até a conclusão do processo de caracterização. Por outro lado, o indicador *Elemento avaliado* mostra o passo atual do estágio de caracterização, variando de zero até o valor apresentado pelo indicador *Quantidade total de passos*.

O indicador *Corrente na Bobina de Helmholtz (A)* é similar ao apresentado na parte de otimização, apresentando o valor da corrente utilizada para excitar a Bobina de Helmholtz de modo que a mesma gere o campo magnético desejado. Por sua vez, o *led* indicador *Relé 2* acende quando o inversor de polaridade atua a fim de permitir que os campos magnéticos gerados pela Bobina de Helmholtz sejam negativos, e permanece apagado caso contrário.

Destaca-se ainda que ao final da **caracterização**, os dados retornados pelo sistema de otimização e os dados e gráficos obtidos no processo de caracterização são salvos em uma planilha Excel, conforme apresentado na Figura 23. Esta planilha contém informações detalhadas dos resultados obtidos e, também, explicita a configuração e os parâmetros do algoritmo genético utilizado na otimização.



Figura 23 – Planilha de resultados obtidos pelo sistema de caracterização automático.

3.2.2. Descrição detalhada do processo de caracterização das amostras GMI

A caracterização de amostras GMI permite que se avalie o comportamento de sua impedância em função do campo magnético externo aplicado (H). As amostras devem ser excitadas por uma corrente i_c , denominada corrente de excitação ou condicionamento, a qual é expressada por

$$i_c = I_{CC} + I_{CA} \sin(2\pi \cdot f \cdot t), \quad (13)$$

onde I_{CC} é o nível CC, I_{CA} a amplitude e f a frequência da corrente i_c .

No processo de caracterização, os sensores GMI são inseridos no centro da Bobina de Helmholtz, conforme indicado nas Figuras 24 e 25. A amostra sensora é posicionada de forma que o campo magnético gerado pela Bobina seja longitudinal ao seu comprimento, visto que as amostras GMI analisadas são do tipo LMI (*Longitudinal Magnetoimpedance*), as quais são muito mais sensíveis a componente longitudinal do campo do que as componentes perpendicular e transversal. Adicionalmente, destaca-se que o conjunto amostra-bobina é alinhado de modo perpendicular ao campo magnético da Terra, de modo a se minimizar a influência deste nas medições[5,20,83].

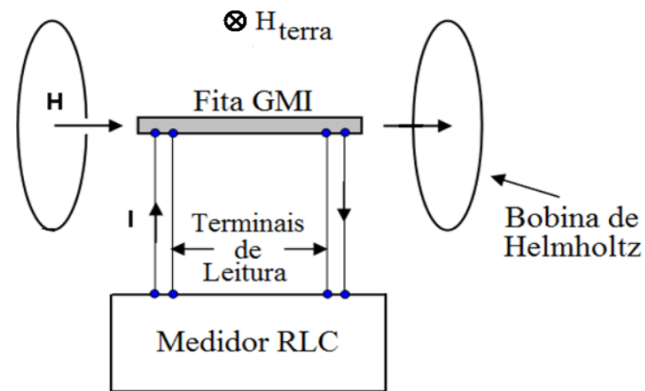


Figura 24 – Diagrama de blocos da amostra GMI inserida na bobina de Helmholtz.

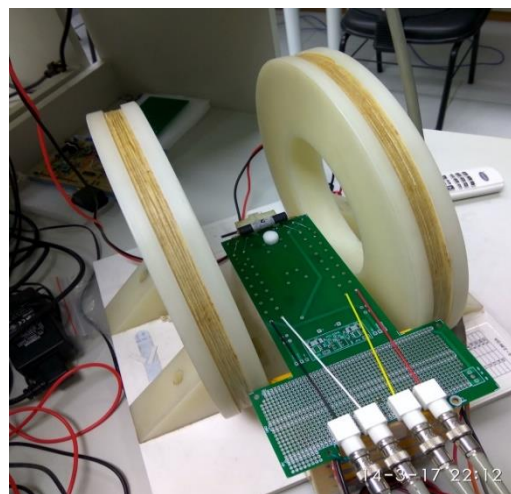


Figura 25 – Foto da bancada experimental, com a amostra GMI inserida na bobina de Helmholtz.

O processo de caracterização é iniciado configurando-se o medidor RLC (Figura 23) de acordo com o valor da corrente i_c que se deseja utilizar para excitar a amostra GMI avaliada, sendo possível definir os valores de frequência, nível CC e amplitude desta corrente.

Na sequência, a fonte de corrente, utilizada para excitar a Bobina de Helmholtz, é configurada de forma a gerar os valores de corrente correspondentes ao faixa de valores de campo magnético que se deseja inspecionar. A etapa de **caracterização** do *software* desenvolvido, discutido em 3.2.1, efetua medições a fim de avaliar eventuais efeitos de histerese. Entretanto, destaca-se que as medições realizadas na etapa de **otimização** não são efetuadas de modo a avaliar efeitos da histerese.

Dessa forma, as medições de impedância realizadas na etapa de **caracterização** começam quando o campo magnético externo gerado pela bobina é nulo ($H_{\text{inicio}} = 0$). Em seguida, incrementa-se gradativamente o campo até um valor

máximo (H_{max}) e, na sequência, reduz-se gradativamente o campo até um valor mínimo ($H_{min} = -H_{max}$). A partir de H_{min} , passa-se a incrementar novamente o campo até que se retorne ao ponto de partida ($H = 0$), completando o ciclo de histerese. As medições são realizadas em passos de tamanho fixo ΔH , sendo que a cada passo mede-se a impedância da amostra. Dessa forma, para cada valor do campo magnético tem-se dois valores de fase, exceto para os extremos da curva H_{max} e H_{min} , para os quais tem-se apenas um valor de fase, e para $H_{início}$, onde se obtêm 3 valores de fase.

A Figura 26 apresenta um exemplo ilustrativo do comportamento de uma curva de histerese de fase ou modulo em função do campo magnético.

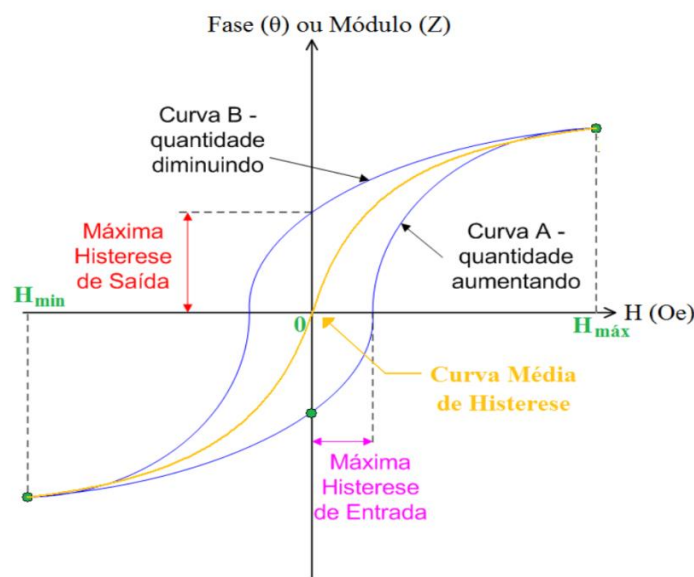


Figura 26 – Exemplo ilustrativo de uma curva de histerese [3].

Por sua vez, a Figura 27 apresenta uma curva de caracterização resultante de uma medição real efetuada com o sistema de caracterização de amostras GMI, desenvolvido em LabVIEW. O caso avaliado refere-se à situação em que uma amostra GMI com 3 cm de comprimento foi excitada por uma corrente com 40 mA de nível CC, 1 MHz frequência e 15 mA de amplitude. A curva de caracterização foi obtida para uma faixa de campos magnéticos variando entre -2,0 Oe e 2,0 Oe, em passos de 0,01 Oe. Apesar dos efeitos de histerese não terem sido significativos, na maior parte da curva, é possível observar uma histerese ligeiramente mais intensa na região entre -2 Oe e -1,2 Oe.

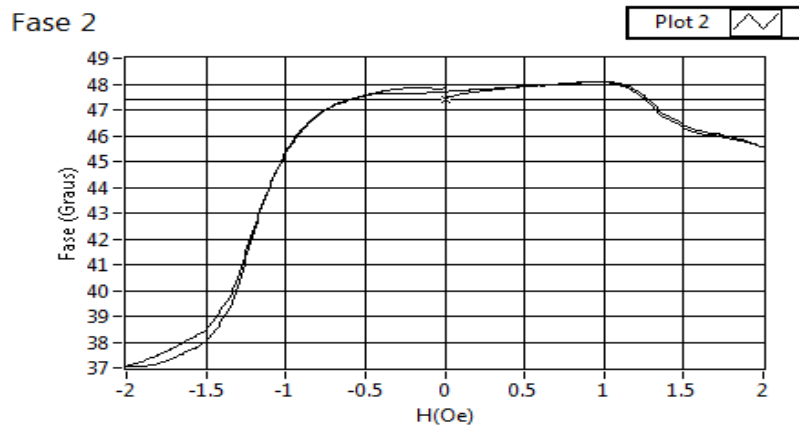


Figura 27 – Exemplo de curva de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, obtida pelo sistema de caracterização de amostras GMI.

Ressalta-se que, as curvas de caracterização apresentadas na seção de resultados deste trabalho são baseadas na “curva média da histerese”, a qual, tal como se observa na Figura 26, é obtida fazendo-se a média aritmética ponto-a-ponto dos valores de fase obtidos experimentalmente, para um mesmo valor de campo magnético externo.

3.3. Módulo de Otimização

O módulo de otimização objetiva identificar a combinação das quatro variáveis de interesse – nível CC (I_{cc}), amplitude (I_{ca}) e frequência (f) da corrente de excitação das amostras GMI, e campo magnético de polarização (H_{pol}) – responsável por maximizar a sensibilidade de fase (S_{fase}) da amostra GMI avaliada. Para tal fim, desenvolveu-se um método de solução baseado em algoritmos genéticos, cujos indivíduos são compostos por quatro genes: I_{cc} , I_{ca} , f , H_{pol} .

A sensibilidade de fase S_{fase} é dada pela derivada da fase da impedância (θ) em relação ao campo magnético externo aplicado (H). Por sua vez, tendo em vista as características do problema abordado, define-se S_{fase} como a função de avaliação (*fitness*) do algoritmo genético, sendo que quanto maior for o valor de S_{fase} mais apto é o indivíduo avaliado.

Como as expressões analíticas de θ em função de H não são conhecidas, assim como em trabalhos anteriores [27–28], optou-se por, aproximar a derivada pela técnica de diferenciação numérica baseada em diferenças centrais, conforme descrito pela eq. (14).

$$S_{fase} = \frac{\theta(I_{cc}, I_{ca}, f, H + \Delta H) - \theta(I_{cc}, I_{ca}, f, H - \Delta H)}{2\Delta H}, \quad (14)$$

onde ΔH é uma constante fixada a critério do usuário.

A princípio, em teoria, quanto menor for ΔH mais precisa é a estimativa de S_{fase} . Entretanto, levando em consideração critérios práticos, verifica-se que valores muito pequenos de ΔH implicam em variações muito pequenas da fase, as quais tornam-se difíceis de medir por meio do medidor RLC, aumentando a imprecisão na estimativa de S_{fase} . Ademais, considerando que a resolução da fonte de corrente CC utilizada para excitar a Bobina de Helmholtz é de 1 mA, utilizando a eq. (10) verifica-se que a menor variação de campo magnético que se pode fazer com a Bobina é

$$\Delta H_{\min} = 2,89 \times 0,001A \cong 0,0029 \text{ Oe}, \quad (15)$$

Tendo em vista estes aspectos, na maioria dos casos avaliados neste trabalho, adotou-se ΔH igual a 0,01 Oe, o qual não compromete a precisão das estimativas de S_{fase} e é um valor satisfatoriamente pequeno.

$$f'(x_k) = \frac{f(x_{k+1}) - f(x_{k-1})}{2\Delta x}, \quad (16)$$

onde

$$\Delta H = H_{k+1} - H_k = H_k - H_{k-1} \quad (17)$$

O algoritmo genético foi desenvolvido no *software* MatLab®, fazendo uso de seu *toolbox ga*, que fornece as funções necessárias para encontrar a combinação de parâmetros $(I_{cc}, I_{ca}, f, H_{pol})$ responsável pela maximização de S_{fase} . As próximas subseções da seção 3.3 descrevem as principais características do algoritmo genético desenvolvido, bem como demais aspectos relevantes do módulo de otimização.

3.3.1. Codificação

Nos primeiros algoritmos genéticos, os cromossomas eram representados por meio de cadeias binárias. Entretanto, apesar de estudos mostrarem que este é um tipo de codificação altamente representativo, sendo capaz de aprimorar a

capacidade do AG de evitar mínimos locais durante o processo de busca para, também observa-se que o uso de tal codificação acarreta em um alto custo computacional. Esta desvantagem torna-se especialmente significativa em problemas que possuam um grande espaço de busca e demandem alta precisão, pois deve-se aumentar a quantidade de *bits* para se obter soluções mais precisas.

Dessa forma, em muitos problemas de otimização, envolvendo manipulação de números reais por AGs, opta-se pela codificação real dos cromossomos, a fim de se superar as dificuldades relacionadas com a codificação binária. Esta representação tem se mostrado mais robusta para solucionar problemas envolvendo espaços de busca grandes e contínuos. Ao longo dos últimos anos, um grande esforço foi colocado no desenvolvimento de sofisticados operadores de *crossover* e mutação, destinados a aprimorar o desempenhos de AGs baseados em codificação real [75].

Nesta dissertação, foram desenvolvidos e avaliados dois algoritmos genéticos, um baseado em codificação real e o outro em codificação inteira. O primeiro AG foi desenvolvido utilizando codificação real dos genes que compõem cada indivíduo. Este tipo de codificação permite que se trabalhe com os operadores genéticos tradicionais, amplamente conhecidos.

Por outro lado, tendo em vista que processo de otimização é feito por meio de medições experimentais, verifica-se que os genes do AG desenvolvido (I_{cc} , I_{ca} , f , H_{pol}) não podem assumir valores contínuos. Na verdade, os mesmos só podem assumir valores discretos, associados à resolução dos equipamentos empregados para geração de I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol} . Consequentemente, por exemplo, sabendo que a faixa máxima de variação do nível CC da corrente (I_{cc}) gerada pelo medidor RLC vai de 0 mA a 100 mA, em passos de 0,01 mA, percebe-se que I_{cc} pode assumir no máximo 10000 valores discretos diferentes.

Com codificação real, o algoritmo genético pode produzir genes com valores que podem excursionar de forma contínua do limite inferior ao limite superior da faixa de valores estabelecida para cada gene, sem levar em conta a resolução dos equipamentos. A rigor, mesmo utilizando-se a codificação real, a menor distância entre dois valores sucessivos de um gene não é infinitesimal, pois a precisão numérica do *software* limita esta distância. O MatLab tem uma precisão numérica em ponto flutuante de 2^{-52} , o que pode fazer com que durante o processo de evolução sejam criados indivíduos muito próximos entre si. Isto se torna um problema,

devido ao valor da resolução dos equipamentos ser significativamente inferior à precisão numérica do *software*. Dessa forma, o AG pode gerar indivíduos diferentes entre si, para o *software*, mas para os quais a sensibilidade de fase seja avaliada de forma idêntica, isto é, para a mesma combinação de I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol} , devido às limitações do *hardware*.

Por exemplo, o medidor RLC tem uma resolução de 100 Hz, se o algoritmo genético produz indivíduos com variações inferiores a 100 Hz no valor do gene correspondente à frequência (f), o equipamento não alterará o valor da frequência, sendo que a estimativa de S_{fase} não será efetuada de forma correta. Devido a este problema, é possível inclusive que o mesmo indivíduo seja avaliado repetidas vezes, visto que indivíduos aparentemente diferentes para o *software* podem ser o mesmo indivíduo para as medições efetuadas pelo *hardware*. Este comportamento implica em aumentos desnecessários do tempo de busca e podem inclusive comprometer o sucesso do processo evolutivo.

De forma equivalente ao exemplo discutido no parágrafo anterior, para o caso da frequência, tem-se que os demais genes do AG também são diretamente afetados pela resolução dos equipamentos – nível CC, amplitude e campo magnético de polarização. Consequentemente, de forma a melhor compatibilizar o AG com as características do problema abordado, decidiu-se implementar uma segunda versão do AG, baseada na codificação inteira dos genes, ao invés da codificação real. Dessa forma, o algoritmo genético foi configurado de modo que cada gene só possa assumir um conjunto bem definido de valores discretos, tendo em vista as características dos equipamentos empregados, considerando os limites das faixas de variação de cada parâmetro e suas respectivas resoluções.

Para a frequência (f) da corrente de excitação, verifica-se que o medidor RLC empregado no sistema pode gerar frequências entre $f_{min} = 75 \text{ kHz}$ e $f_{max} = 30 \text{ MHz}$, em passos de $\Delta f = 100 \text{ Hz}$. Dessa forma, a quantidade máxima de valores discretos distintos que o gene associado à frequência (f) pode assumir, é dada por

$$k_{f \max} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\Delta f} = \frac{30000 \text{ kHz} - 75 \text{ kHz}}{0,1 \text{ kHz}} = 299250, \quad (18)$$

Consequentemente, a faixa de possíveis frequências que o medidor RLC pode gerar será discretizada por 299250 valores inteiros. Dessa forma, o gene associado à frequência poderá assumir valores inteiros k_f entre 0 e 299250. Por sua vez, conhecendo-se k_f pode-se definir o valor de frequência f associado, por meio de

$$f = 0,1k_f + 75 \quad (19)$$

onde k_f é um número inteiro entre 0 e 299250, e f é o valor da frequência discretizada, expressa em kHz.

Para o nível CC (I_{cc}) da corrente de excitação, verifica-se que medidor RLC empregado no sistema pode gerar níveis CC de corrente entre $I_{ccmin} = 0$ mA e $I_{ccmax} = 100$ mA, em passos de $\Delta I_{cc} = 0,01$ mA. Dessa forma, a quantidade máxima de valores discretos distintos que o gene associado ao nível CC (I_{cc}) pode assumir, é dada por

$$k_{I_{cc}max} = \frac{I_{ccmax} - I_{ccmin}}{\Delta I_{cc}} = \frac{100mA - 0mA}{0,01mA} = 10000, \quad (20)$$

Consequentemente, a faixa de possíveis níveis CC que o medidor RLC pode gerar será discretizada por 10000 valores inteiros. Dessa forma, o gene associado ao nível CC poderá assumir valores inteiros $k_{I_{cc}}$ entre 0 e 10000. Por sua vez, conhecendo-se $k_{I_{cc}}$ pode-se definir o valor do nível CC I_{cc} associado, por meio de

$$I_{CC} = 0.01k_{I_{cc}} \quad (21)$$

onde $k_{I_{cc}}$ é um número inteiro entre 0 e 10000, e I_{cc} é o valor do nível CC discretizado, expresso em mA.

Para a amplitude (I_{ca}) da corrente de excitação, verifica-se que medidor RLC empregado no sistema pode gerar amplitudes de corrente entre 0 mA e 20 mA, em passos de $\Delta I_{ca} = 0,1$ mA. Entretanto, como a impedância das amostras GMI avaliadas é muito baixa, tem-se que amplitudes inferiores a 1 mA implicam em baixíssimos níveis de tensão nos terminais de leitura, comprometendo a precisão das leituras efetuadas pelo medidor RLC. Dessa forma, optou-se por limitar a amplitude de corrente entre $I_{camin} = 1$ mA e $I_{ccmax} = 20$ mA. Assim, a quantidade máxima de valores discretos distintos que o gene associado a amplitude (I_{ca}) pode assumir, é dada por

$$k_{I_{ca}max} = \frac{I_{ca\max} - I_{camin}}{\Delta I_{ca}} = \frac{20mA - 1mA}{0,1mA} = 190, \quad (22)$$

Consequentemente, a faixa de possíveis amplitudes que o medidor RLC pode gerar será discretizada por 190 valores inteiros. Dessa forma, o gene associado a amplitude poderá assumir valores inteiros $k_{I_{ca}}$ entre 0 e 190. Por sua vez, conhecendo-se $k_{I_{ca}}$ pode-se definir o valor da amplitude I_{ca} associada, por meio de

$$I_{CA} = 0,1k_{I_{ca}} + 1 \quad (23)$$

onde k_{Ica} é um número inteiro entre 0 e 190, e I_{ca} é o valor discretizado da amplitude da corrente, expresso em mA.

Para o campo magnético de polarização (H_{pol}), verifica-se que o mesmo é gerado por uma Bobina de Helmholtz conectada a uma fonte de corrente CC. Por sua vez, verifica-se que esta fonte de corrente CC possui uma resolução $\Delta I_{Helmholtz} = 1$ mA. Consequentemente, utilizando a eq. (10), que define o campo magnético gerado pela Bobina de Helmholtz empregada no sistema em função da corrente aplicada a seus enrolamentos, verifica-se que a mínima variação de campo magnético que pode ser efetuada é $\Delta H_{pol} = 2,89$ mOe. Dessa forma, tendo em vista que arbitrou-se a faixa máxima de variação de campo entre $H_{polmin} = -2$ Oe e $H_{polmax} = 2$ Oe, tem-se que a quantidade máxima de valores discretos distintos que o gene associado ao campo magnético de polarização (H_{pol}) pode assumir, é dada por

$$k_{H_{polmax}} = \frac{H_{polmax} - H_{polmin}}{\Delta H_{pol}} = \frac{2Oe - (-2Oe)}{0,00289Oe} \cong 1384,083 \quad (24)$$

Entretanto, como $k_{H_{polmax}}$ deve ser um valor inteiro, aproxima-se o valor indicado na eq. (26) para 1384. Consequentemente, a faixa de possíveis valores de campo magnético de polarização que a Bobina de Helmholtz pode gerar será discretizada por 1384 valores inteiros, sendo 692 associados a campos negativos e 692 a campos positivos. Dessa forma, definiu-se que o gene associado ao campo magnético de polarização poderá assumir valores inteiros $k_{H_{pol}}$ entre -692 e 692. Por sua vez, conhecendo-se $k_{H_{pol}}$ pode-se definir o valor do campo magnético de polarização H_{pol} associado, por meio de

$$H_{pol} = \frac{2k_{H_{pol}}}{692} \quad (25)$$

onde k_H é um número inteiro entre -692 e 692, e H_{pol} é o valor discretizado do campo magnético de polarização, expresso em Oe.

Note que, conforme mencionado na parte inicial da seção 3.3, o valor adotado para o parâmetro ΔH , utilizado na eq. (14) para estimativa de S_{fase} , foi de 0,01 Oe. Para conseguir gerar estas variações de ΔH , de acordo com a eq. (10), a fonte de corrente utilizada para excitar a Bobina de Helmholtz deveria ser capaz de efetuar variações de corrente de aproximadamente 3,5 mA. Entretanto, a fonte empregada no sistema só consegue efetuar variações de corrente em passos de 1 mA. Dessa forma, de modo mais realístico, ao invés de assumir que a fonte efetua variações em passos de 3,5 mA, considera-se que as variações ocorrem em passos de 4 mA,

o que corresponde a variações de campo $\Delta H = 0,01156$ Oe, ao invés de $\Delta H = 0,01$ Oe. Consequentemente, adota-se $\Delta H = 0,01156$ Oe a fim de se obter uma melhor precisão na estimativa da sensibilidade de fase, avaliada por meio da eq. (14).

3.3.2. Normalização

O estudo apresentado neste trabalho objetiva contribuir para o desenvolvimento de magnetômetros GMI de alta sensibilidade, por meio da maximização da sensibilidade de fase dos elementos sensores. Por sua vez, conforme discutido anteriormente, assume-se que esta sensibilidade seja diretamente afetada por: I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol} .

Em particular, ao se projetar o circuito eletrônico do magnetômetro é desejável que se obtenham sensibilidades elevadas em baixas frequências, pois dessa forma reduz-se a complexidade e custo do circuito. Entretanto, o espaço de busca da frequência f vai de 75 kHz até 30 MHz. Dessa forma, percebe-se que, por exemplo, o intervalo de frequências $75 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$ corresponde a apenas aproximadamente 3 % dos dados do espaço de busca. Consequentemente, dificulta-se a identificação de soluções ótimas (S_{fase} máxima), na região de baixas frequências, visto que cerca de 97 % dos dados pertencentes ao conjunto de frequências está acima de 1 MHz.

A fim de priorizar a região de baixas frequências, propôs-se a aplicação de uma normalização logarítmica à variável frequência. Por meio desta normalização, aumenta-se a representatividade das baixas frequências no espaço de busca, tornando mais fácil a identificação de altas sensibilidades de fase (S_{fase}) em baixas frequências. A eq. (26) define a frequência normalizada f_n em função da frequência f .

$$f_n = \frac{\log(f) - \log(f_{\min})}{\log(f_{\max}) - \log(f_{\min})} \quad (26)$$

onde f_n é o valor normalizado da frequência, podendo variar entre 0 e 1, f_{\max} é o limite superior da faixa de frequências (30 MHz) e f_{\min} é o limite inferior (75 kHz).

Por sua vez, a Figura 28 compara duas curvas de f_n em função de f , uma obtida por meio de normalização logarítmica estabelecida pela eq. (23) e a outra utilizando-se uma normalização linear.

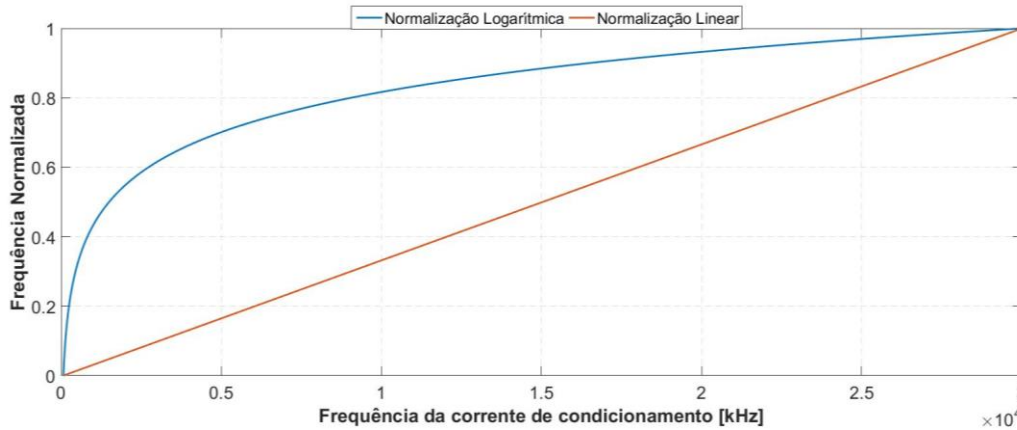


Figura 28 – Curvas de normalização logarítmica e linear da frequência de excitação.

Inspecionando-se a Figura 28, verifica-se que a normalização logarítmica torna as baixas frequências efetivamente mais representativas. Por exemplo, verifica-se que o intervalo de frequências $75 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$ passa a conter cerca de 43.3 % dos dados do espaço de busca de f , ao invés de apenas 3 %.

Por sua vez, a desnormalização pode ser efetuada por meio de

$$f = 10^{f_n \cdot \log\left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}}\right) + \log(f_{\min})} \quad (27)$$

Os algoritmos genéticos desenvolvidos foram testados tanto sem a normalização da frequência quanto com a normalização da frequência, a fim de se poder comparar os resultados provenientes destas duas metodologias.

3.3.3. Configuração do Algoritmo Genético desenvolvido

O tamanho da população foi fixado em 100 indivíduos, o qual propicia satisfatória capacidade de exploração do espaço de busca e adequada diversidade dos indivíduos pertencentes à população, tendo em vista que o problema de otimização proposto envolve uma otimização dependente de quatro variáveis – genes do AG (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}), conforme é mostrado na Figura 29.

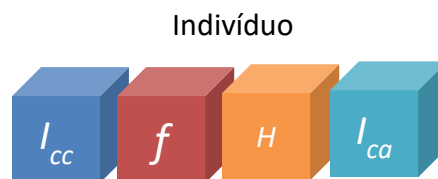


Figura 29 – Cromossomo do algoritmo genético.

Destaca-se que, foram efetuadas modificações nas definições internas das funções *mycreationfunction* e *stepga*, pertencentes ao *toolbox* de algoritmos

genéticos do MatLab, a fim de se poder ordenar de forma crescente os indivíduos da população, de acordo com o valor do campo magnético H_{pol} que se deseja avaliar. A princípio, a lista de 100 indivíduos que compõem a população de uma dada geração não possui uma ordenação específica. Entretanto, para o problema tratado, adaptou-se o AG de modo que os indivíduos sejam ordenados em função de H_{pol} , sendo que os primeiros indivíduos da lista são os que possuem os valores de H_{pol} mais negativos e os últimos aqueles com valores de H_{pol} mais positivos. Dessa forma, evita-se a ocorrência de transições bruscas do campo magnético gerado pela Bobina de Helmholtz, que implicariam em transições bruscas da fonte de corrente de alimentação durante o processo de avaliação dos indivíduos de uma dada população. Também, a ordenação proposta possibilita que o circuito de inversão de polaridade chaveie uma única vez durante o processo de avaliação dos indivíduos de uma dada população.

O número máximo de gerações do algoritmo genético foi ajustado para 100 como critério de parada rígido. Além disso, também adotou-se um critério de parada flexível, que interrompe a evolução do algoritmo quando a variação relativa média da função de avaliação, ao longo de uma quantidade pré-determinada de gerações (*StallGenLimit*), é menor do que um dado valor de tolerância arbitrado pelo usuário (*TolFun*). No AG implementado adotou-se $StallGenLimit = 10$ e $TolFun = 10^{-3}$. Para estas definições, os testes realizados indicaram que na maioria dos casos o AG converge antes de atingir as 100 gerações.

Para o AG baseado em codificação real, os operadores genéticos utilizados foram *crossover* uniforme e mutação adaptável. O valor da probabilidade de cruzamento utilizada (taxa de *crossover*) foi de 0,8 % e a taxa de mutação foi de 0,05. Por sua vez, para o AG baseado em codificação inteira, substitui-se estes operadores por operadores próprios deste tipo de codificação, o *crossover* de Laplace e a mutação *power* – ambos descritos na seção 2.2. As taxas de *crossover* e mutação foram mantidas iguais às definidas para o AG baseado em codificação real.

Para ambas as codificações, o método de seleção escolhido foi o método de *Torneio*, com um tamanho de torneio (*tournament size*) de 4. Neste método, escolhem-se 4 indivíduos aleatoriamente e se comparam seus valores de aptidão, selecionando o mais apto para o cruzamento. Este método assegura a diversidade da população, sobretudo quando existem grandes diferenças relativas entre os

valores de aptidão dos indivíduos pertencentes a uma dada população. Estudos indicam que a seleção por torneio agrega propriedades benéficas para a convergência e a redução do tempo computacional de AGs implementados por meio de codificação inteira [84].

Para evitar a perda dos melhores indivíduos ao longo do processo evolutivo, empregou-se um critério de elitismo ao processo de substituição dos indivíduos da população. Fixou-se o parâmetro *Elitecount* em 10, de modo a garantir que os 10 melhores indivíduos pertencentes à população de uma dada geração também estejam presentes na geração seguinte.

Outra questão importante, associada à implementação de um algoritmo genético, é a definição dos limites de cada uma das variáveis que compõem o espaço de busca. Conforme discutido anteriormente, as faixas de I_{cc} , I_{ca} e f foram definidas em função das características do medidor RLC utilizado para gerar estes parâmetros. Tendo em vista as restrições e limitações descritas ao longo do Capítulo 3, definiu-se:

$$\begin{aligned} 75\text{ kHz} &\leq f \leq 30\text{ MHz} \\ 0\text{ mA} &\leq I_{cc} \leq 100\text{ mA} \\ 1,41\text{ mA} &\leq I_{ca} \leq 28,28\text{ mA} \end{aligned} \quad (28)$$

A quarta variável que compõe o espaço de busca é o campo magnético de polarização H_{pol} , cuja faixa de valores foi definida em função dos valores tipicamente adotados em caracterizações de sensores GMI realizadas em trabalhos anteriores, descritos na literatura [3,4,80,85]. Na definição desta faixa, também foram consideradas limitações do instrumental empregado no sistema implementado. Em particular, foram observadas as características técnicas da fonte de corrente utilizada para excitar a Bobina de Helmholtz, responsável por gerar o campo magnético. Tendo em vista os aspectos supramencionados, definiu-se

$$-2\text{ Oe} \leq H_{pol} \leq 2\text{ Oe} , \quad (29)$$

Ressalta-se que, valores negativos de campo indicam que o sentido do nível CC (I_{cc}) da corrente que flui pela amostra GMI é oposto ao sentido do campo gerado pela Bobina de Helmholtz. Por sua vez, valores positivos de campo indicam que o sentido do nível CC (I_{cc}) da corrente que flui pela amostra GMI é o mesmo do campo gerado pela Bobina de Helmholtz.

3.4. Interface de Comunicação

Para permitir a comunicação do módulo de controle e medição, desenvolvido em LabVIEW®, com o módulo de otimização, desenvolvido em MatLab®, foi necessário estabelecer uma interface de comunicação entre eles. Para este fim, foi implementado um sistema de comunicação, baseado no protocolo TCP/IP, a fim de permitir a comunicação entre estas duas plataformas de *software* – LabVIEW® e MatLab®. O protocolo TCP/IP foi escolhido devido a sua versatilidade e capacidade de integração com diferentes plataformas. Além disso, o mesmo garante uma transmissão eficiente dos dados, que são entregues de forma sequencial, com baixa taxa de erros e de ocorrências de dados perdidos ou duplicados.

Tanto o MatLab quanto o LabVIEW possuem bibliotecas internas, contendo conjuntos de funções específicas destinadas a se estabelecer interfaces de comunicação baseadas no protocolo TCP/IP, as quais foram utilizadas para o desenvolvimento da arquitetura cliente-servidor aqui proposta para transferência de dados entre estas duas plataformas. A arquitetura cliente-servidor é um modelo comum para aplicativos em rede. No modelo cliente-servidor, um conjunto de processos (clientes) solicita serviços de outro conjunto de processos (servidores). Conforme ilustrado na Figura 30, foram configurados um cliente e um servidor em cada uma das plataformas, a fim de se sincronizar a execução do módulo de controle e medição (LabVIEW) com a do módulo de otimização (MatLab).

Ao se iniciar o sistema, o LabVIEW opera como servidor, aguardando o recebimento de informações, e o MatLab como cliente. Por sua vez, inicia-se a execução do algoritmo genético, no MatLab, e cada indivíduo da população é enviado, pelo cliente implementado em Matlab, ao servidor no LabVIEW, a fim de se poder definir o valor de fase associado ao mesmo.

A partir deste momento, o Matlab passa a operar como servidor, aguardando o recebimento de informações, e o LabVIEW como cliente. O servidor no MatLab recebe os valores de fase transmitidos pelo cliente implementado no LabVIEW e utiliza-se destes a fim de estimar a sensibilidade de fase do indivíduo avaliado (função de avaliação do AG).

Este processo repete-se de modo sequencial até que os indivíduos de todas as gerações sejam avaliados, ou seja, até que o AG convirja para uma solução ou atinja o número máximo de gerações.

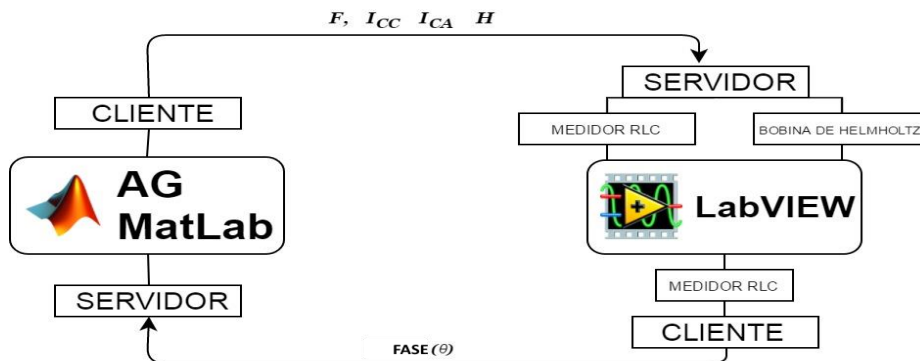


Figura 30 – Sistema de comunicação com protocolo TCP/IP, baseada em arquitetura cliente-servido entre MatLab® e LabVIEW®.

No sistema desenvolvido, a cada iteração são obtidos dois valores de fase, de modo a se poder estimar a função de avaliação do AG (S_{fase}). Dessa forma, para se avaliar um indivíduo da população com gene $H_{pol} = H_{teste}$ são efetuadas medições de fase em $(H_{teste} - \Delta H)$ e $(H_{teste} + \Delta H)$.

3.5. Dinâmica de Funcionamento do Sistema

A Figura 31 apresenta um fluxograma de processamento, que descreve de forma ilustrativa as diferentes etapas que compõem o sistema desenvolvido na presente dissertação.

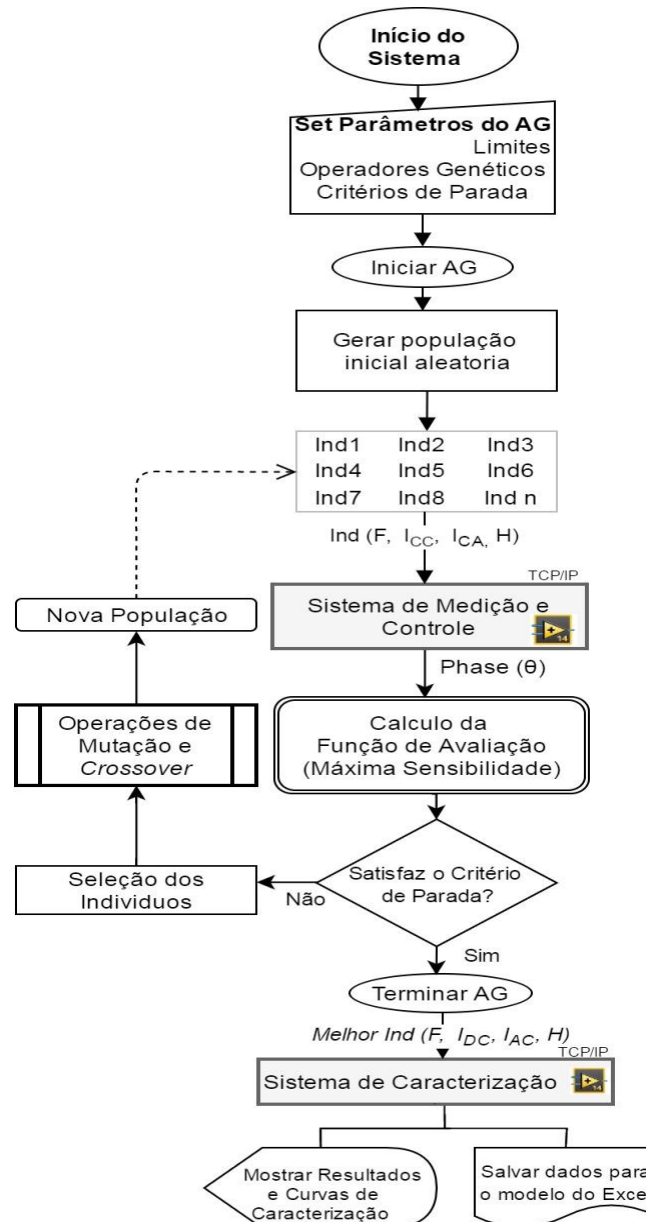


Figura 31 – Fluxograma de processamento do sistema desenvolvido.

Tendo em vista a cadeia de processamento estabelecida na Figura 31, verifica-se que, inicialmente, o algoritmo genético é configurado de acordo com parâmetros informados pelo usuário, podendo ser ajustados, por exemplo, os limites das variáveis, os operadores genéticos, o tamanho da população, o número máximo de gerações e os critérios de parada.

Na sequência, o algoritmo genético gera aleatoriamente o conjunto de indivíduos que compõem a população inicial. Estes indivíduos são encaminhados sequencialmente ao sistema de medição e controle, o qual avalia os valores de fase associados a cada um deles. Ressalta-se que, conforme descrito em 3.3.4, para se avaliar um indivíduo da população com gene $H_{pol} = H_{teste}$ são efetuadas medições

de fase em $(H_{teste} - \Delta H)$ e $(H_{teste} + \Delta H)$. Os resultados das medições são enviados de volta ao algoritmo genético, de modo que o mesmo possa avaliar a aptidão de cada indivíduo, por meio do cálculo de sua respectiva função de avaliação. Este processo é repetido até que o algoritmo genético atinja o critério de parada estabelecido e retorne a combinação de parâmetros (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) responsável pela obtenção da máxima sensibilidade de fase identificada.

Uma vez que a solução tenha sido encontrada, o algoritmo genético informa os valores ótimos de I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol} ao LabVIEW, onde é executado o processo de caracterização de amostra GMI, para o conjunto de dados fornecidos pelo algoritmo genético. Por sua vez, o processo de caracterização é detalhado no diagrama de blocos apresentado na Figura 32.

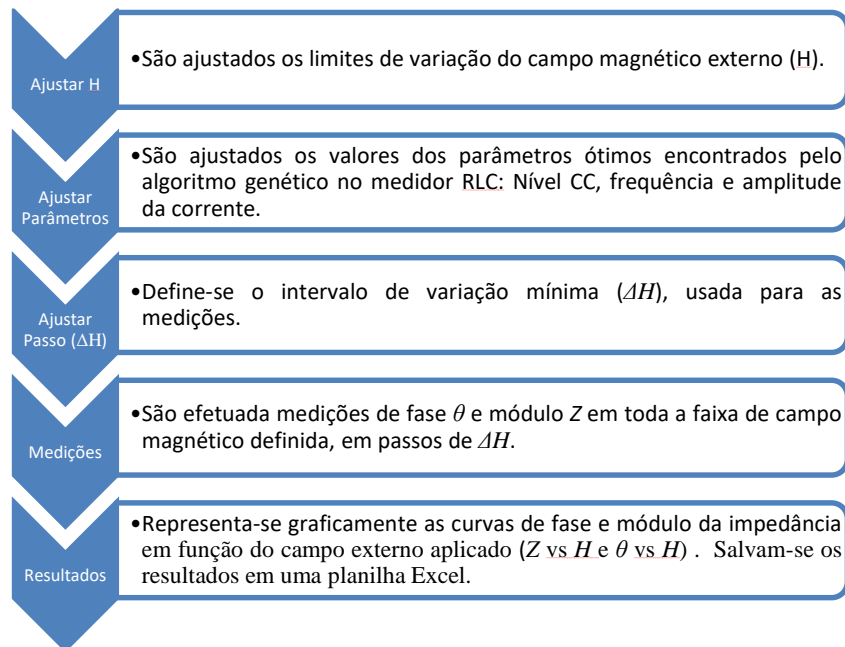


Figura 32 – Diagrama de blocos do processo de caracterização de amostras GMI.

A fim de avaliar a eficácia do sistema de otimização, ao final do processo de caracterização, é possível verificar se a curva de caracterização de fase obtida apresenta uma sensibilidade de fase máxima similar a indicada pelo AG, em torno de um valor de campo magnético similar ao campo magnético de polarização retornado pelo AG.

4. Resultados Experimentais e Discussão

O sistema automático de otimização desenvolvido nesta dissertação possibilita que se encontre o conjunto de parâmetros de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) responsável pela otimização da sensibilidade de fase de amostras GMI. Neste trabalho, utilizou-se o sistema desenvolvido para avaliação de uma amostra GMI, em forma de fita, de composição $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$, com 3 cm de comprimento, espessura média de 60 μm e largura média de 1,5 mm. Esta mesma amostra foi caracterizada em trabalhos anteriores por métodos distintos ao aqui desenvolvido, discutidos brevemente na seção 1.2 [3,4,48]. Dessa forma, pode-se comparar os resultados obtidos no presente trabalho com resultados advindos de trabalhos anteriores, apresentados na literatura.

Com a intenção de avaliar o desempenho do sistema automático de otimização de amostras GMI desenvolvido, foram avaliadas suas diferentes configurações, detalhadas no capítulo 3. Na seção 4.1, avalia-se o desempenho do sistema baseado em um AG com codificação real dos genes. Por sua vez, na seção 4.2, avalia-se o desempenho do sistema baseado em um AG com codificação inteira dos genes. Em ambos os casos, os AGs foram implementados tanto sem se efetuar a normalização logarítmica da frequência f , descrita na seção 3.3.2, quanto efetuando-se esta normalização. Dessa forma, é possível analisar a influência da normalização proposta nos resultados obtidos pelos AGs baseados em ambas as codificações avaliadas. A seção 4.3 compara e discute os resultados obtidos pelas configurações testadas nas seções 4.1 e 4.2.

4.1. Codificação Real

Nesta subseção apresentam-se os resultados obtidos adotando-se codificação real para os quatro genes (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) do AG desenvolvido. Conforme definido em 3.3, realizaram-se análises para correntes de excitação com níveis CC (I_{cc}) variando entre 0 mA e 100 mA, frequências (f) entre 75 kHz e 30 MHz e campos

magnéticos de polarização (H_{pol}) entre -2 Oe e 2 Oe. Por sua vez, tendo em vista que estudos anteriores concluíram que a amplitude da corrente CA (I_{ca}) tem pouca influência sobre a sensibilidade das amostras GMI [7–8], decidiu-se inicialmente manter este parâmetro fixo em 15 mA. Entretanto, a fim de averiguar a veracidade desta afirmação, no presente trabalho, também foram feitas análises definindo-se I_{ca} como uma variável livre, podendo variar entre 1.41 mA até os 28.28 mA.

Tendo em vista as definições feitas na seção 3.3.3, a Tabela 2 resume os valores estabelecidos para principais parâmetros adotados para o AG utilizado nas análises efetuadas nesta seção.

Tabela 2 – Parâmetros de configuração do algoritmo genético com codificação real.

Configuração do Algoritmo Genético	
População	100
Número de gerações	100
Taxa de <i>crossover</i>	0,8
Taxa de mutação	0,05
<i>Elite count</i>	10
<i>StallGen limit</i>	10
<i>TolFun</i>	10^{-3}
Tipo de <i>crossover</i>	Heurístico
Raio do <i>Crossover</i> Heurístico	2

Utilizou-se uma população de 100 indivíduos tanto para a situação sem normalização da frequência (subseção 4.1.1) quanto para a com normalização da frequência (subseção 4.1.2). Em ambos casos, foi utilizado *crossover* heurístico com um rádio (R) igual a 2. Ressalta-se que, para raios muito pequenos, os descendentes tendem a ser muito similares ao progenitor mais apto, reduzindo a diversidade populacional, o que torna o processo evolutivo mais lento e aumenta a probabilidade do algoritmo genético ficar preso em ótimos locais. No entanto, valores muito altos do raio fazem com que os descendentes sejam substancialmente distintos do progenitor mais apto, o que aumenta consideravelmente a aleatoriedade do processo evolutivo, dificultando a convergência.

4.1.1. Sem Normalização da Frequência

Nas análises realizadas nesta subseção, nenhum dos genes (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) do AG foi normalizado. Por sua vez, os resultados obtidos na seção 4.1.1.1 referem-se à configuração na qual fixou-se a amplitude da corrente (I_{ca}) em 15 mA. Dessa

forma, o AG passa ter 3 variáveis livres (I_{cc} , f e H_{pol}). Por outro lado, os resultados obtidos na seção 4.1.1.2 referem-se à configuração na qual permitiu-se que a amplitude da corrente (I_{ca}) pudesse variar entre 1.41 mA e 28.28 mA. Dessa forma, o AG passa ter efetivamente 4 variáveis livres.

4.1.1.1. Amplitude da Corrente Fixa

A Tabela 3 exibe os resultados obtidos pelo sistema automático de otimização, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA. Os resultados indicam a combinação de parâmetros livres (I_{cc} , f e H_{pol}) associada a máxima sensibilidade de fase encontrada (S_{fase}), cujo valor também é explicitado.

Tabela 3 – Resultados obtidos pelo sistema automático de otimização de amostras GMI, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.

Valores Retornados pelo AG		
f	16717,1	kHz
I_{cc}	31,07	mA
I_{ca}	15	mA
H_{pol}	-1,31	Oe
S_{fase}	23,09	°/Oe

Em função dos resultados explicitados na Tabela 3, verifica-se que a maior sensibilidade de fase obtida pelo sistema automático de otimização foi de 23,09 °/Oe, a qual é atingida ao se excitar a amostra GMI avaliada com uma corrente com nível CC de 31,07 mA, amplitude de 15 mA e frequência de 16,72 MHz. Os resultados da Tabela 3 informam ainda que esta sensibilidade ocorre na vizinhança de um campo magnético de polarização de -1,31 Oe.

Conforme descrito no capítulo 3, após o AG convergir para a solução considerada ótima, os valores ótimos das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) são encaminhados para o sistema de caracterização de amostras, o qual realiza a medição experimental da curva de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando os parâmetros do medidor RLC de acordo com os valores ótimos obtidos para I_{cc} , I_{ca} e f , conforme detalhado na subseção 3.2.2. A Figura 33 exibe a curva de caracterização da fase da impedância da amostra GMI

avaliada em função do campo magnético, obtida para os parâmetros ótimos encontrados pelo algoritmo genético – explicitados na Tabela 3.

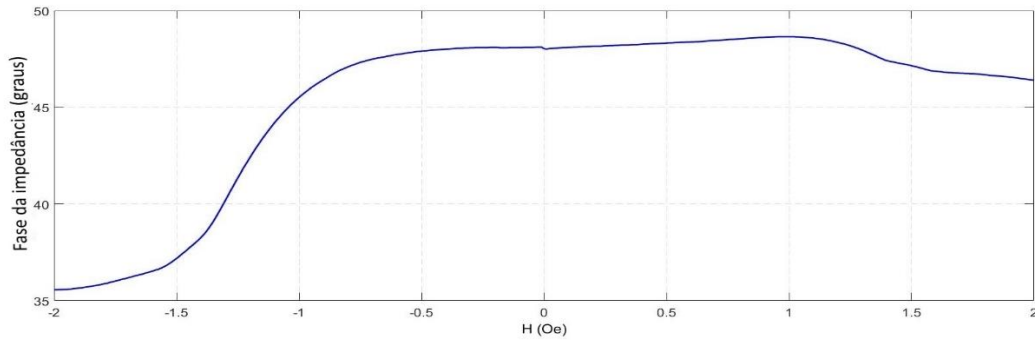


Figura 33 – Caracterização experimental da fase da impedância em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [31,07\text{mA} + 15\text{sen}(2\pi \cdot 16,72\text{MHz} \cdot t)]$ mA .

Por sua vez, a sensibilidade de fase da amostra GMI avaliada pode ser obtida derivando-se a fase da impedância em relação ao campo magnético. Dessa forma, aplica-se uma diferenciação numérica à curva de fase explicitada na Figura 33, a fim de se obter seus respectivos valores de sensibilidade S_{fase} ponto-a-ponto. A Figura 34 exibe a curva de S_{fase} em função de H , para campos entre -2,0 Oe e 2,0 Oe. Adotou-se $\Delta H = 0,01$ Oe, para o cálculo da diferenciação numérica, o qual é o mesmo valor utilizado para no cálculo da função de avaliação do algoritmo genético.

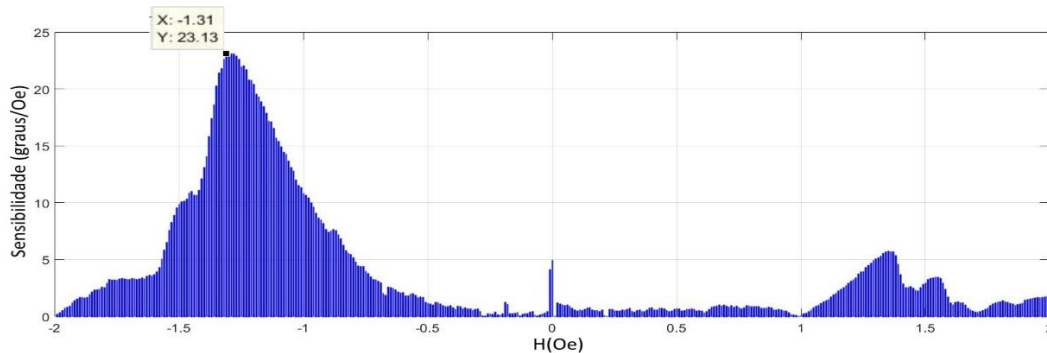


Figura 34 – Sensibilidade de fase em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente.

Inspecionando-se a Figura 34, verifica-se que a máxima sensibilidade encontrada na caracterização da amostra GMI foi $S_{caracterização} = 23,13$ °/Oe, a qual ocorre para $H_{caracterização} = -1,31$ Oe. Destaca-se que estes valores são satisfatoriamente próximos aos valores ótimos retornados pelo AG ($S_{fase} = 23,09$ °/Oe, em $H_{pot} = -1,31$ Oe), explicitados na Tabela 3.

A fim de se avaliar a repetibilidade do sistema de otimização desenvolvido, o mesmo processo de otimização que levou aos resultados indicados na Tabela 3 foi repetido mais duas vezes. Os resultados obtidos em cada um dos três testes efetuados são apresentados na Tabela 4, para fins de comparação dos parâmetros retornados pelo AG em cada repetição, isto é, as combinações das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes às máximas sensibilidade de fase (S_{fase}).

Adicionalmente, também são indicados na Tabela 4 os valores das máximas sensibilidade de fase ($S_{caracterização}$) obtidas pelas caracterizações realizadas após cada processo de otimização, bem como os valores de campos magnéticos ($H_{caracterização}$) correspondentes a cada uma das sensibilidade de fase ($S_{caracterização}$) obtidas. Para cada um dos testes efetuados, informa-se a quantidade de gerações até a convergência do AG e o tempo total de processamento computacional.

Tabela 4 – Análise da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Unidades
S_{fase}	23,09	22,96	22,87	°/Oe
$S_{caracterização}$	23,13	23,57	23,83	°/Oe
f	16717,1	16789,6	16765,2	kHz
I_{cc}	31,07	34,58	40,49	mA
I_{ca}	15	15	15	mA
H_{pol}	-1,31	-1,33	-1,34	Oe
$H_{caracterização}$	-1,31	-1,32	-1,34	Oe
Quantidade de gerações até a convergência	31	20	21	gerações
Tempo de processamento	3,8	2,4	2,7	horas

A fim de se fazer uma melhor avaliação quantitativa dos resultados, a Tabela 5 compara os parâmetros S_{fase} e H_{pol} , retornados pelo AG em cada um dos três testes efetuados, com os parâmetros $S_{caracterização}$ e $H_{caracterização}$, extraídos das respectivas curvas de caracterização. Apresenta-se também os erros percentuais E_S , entre $S_{caracterização}$ e S_{fase} , e E_H , entre $H_{caracterização}$ e H_{fase} .

Tabela 5 – Comparação dos erros percentuais E_S e E_H , obtidos em cada um dos três testes efetuados, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.

S_{fase} (°/Oe)	H_{pol} (Oe)	$S_{caracterização}$ (°/Oe)	$H_{caracterização}$ (Oe)	E_S (%)	E_H (%)
23,09	-1,31	23,91	-1,30	3,43%	0,77%
22,96	-1,33	24,16	-1,31	4,97%	1,53%
22,87	-1,34	23,95	-1,32	4,51%	1,52%

Por meio das Tabelas 4 e 5, comparando-se as sensibilidades máximas S_{fase} retornadas pelo AG em cada um dos os três testes efetuados, verifica-se que todos os valores obtidos foram satisfatoriamente próximos a 22,97 °/Oe, o que indica uma boa repetibilidade. Por sua vez, os valores de sensibilidade extraídos das curvas de caracterização ($S_{caracterização}$) também sempre se mantiveram próximos dos respectivos valores de S_{fase} . Também, conforme esperado, é perceptível que os valores de H_{pol} retornados pelo AG sempre foram similares aos valores de $H_{caracterização}$.

Dentre os testes efetuados, o maior erro E_S foi de 4,97 % e o maior erro E_H foi de 1,53 %, indicando uma boa repetibilidade. Destaca-se que estes erros são associados a variações entre os valores obtidos ao longo do processo de otimização e aqueles extraídos da curva de caracterização obtida após a conclusão da otimização. Dessa forma, os mesmos são atribuídos a: histerese, ruído magnético, variações térmicas, incertezas de medição dos instrumentos que compõem o sistema, entre outros.

Por sua vez, com relação à combinação das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes aos valores de S_{fase} obtidos em cada teste, observando-se a Tabela 4, percebe-se que não são observadas variações significativas em I_{ca} , f e H_{pol} . Em particular, em todos os testes, I_{ca} se manteve em 15 mA, visto que este foi o valor arbitrado para esta variável – I_{ca} não é uma variável livre na análise realizada nesta subseção. Por sua vez, em todos os testes, a variável f sempre se manteve satisfatoriamente próxima de 16,76 MHz e H_{pol} de -1,32 Oe. Por outro lado, as variações em I_{cc} são mais significativas, sendo que a diferença entre o mínimo ($I_{cc} = 31,07$ mA) e máximo ($I_{cc} = 40,49$ mA) valor obtido para I_{cc} é de 9,42 mA. Consequentemente, percebe-se que existe uma faixa de valores de I_{cc} para a qual se obtêm valores de sensibilidade de fase similares e elevados, em torno de 22,97 °/Oe.

Ressalta-se ainda que, por meio da Tabela 4, verifica-se que a quantidade de gerações até a convergência e, consequentemente, o tempo de processamento computacional, podem apresentar variações significativas. Tais variações estão provavelmente associadas a características da população inicial, a qual é distribuída aleatoriamente sobre o espaço de busca. Entretanto, as variações no número de gerações até a convergência parecem não impactar significativamente a solução do AG, visto que o mesmo sempre retornou valores de S_{fase} significativamente similares entre si. Este comportamento indica que o AG desenvolvido apresenta boa

imunidade as características particulares da população inicial. Destaca-se ainda que o tempo médio de processamento computacional foi de aproximadamente 3 horas, para cada teste.

A Figura 35 apresenta as curvas de caracterização de fase da impedância em função do campo magnético, associadas a cada um dos três testes realizados. Cada curva de caracterização foi obtida ajustando-se a corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 4.

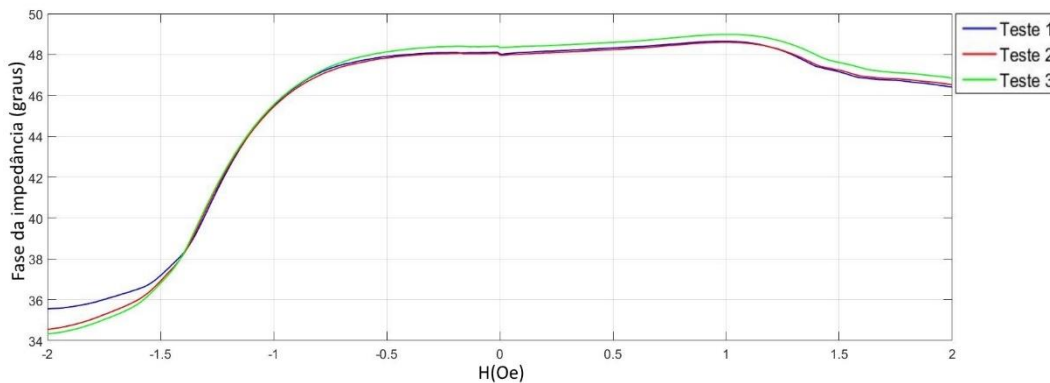


Figura 35 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 4, para cada teste.

Por meio da Figura 35, nota-se que as três curvas de caracterização obtidas apresentam comportamentos extremamente similares na faixa de -1,0 Oe até -1,4 Oe, que é claramente a região onde ocorre a sensibilidade máxima, visto que a inclinação da curva nesta região é significativamente superior à obtida em outras regiões. Por sua vez, sabendo que o nível CC (I_{cc}) é o único parâmetro da corrente de excitação que varia significativamente entre os três testes apresentados na Figura 35, comprova-se que estas variações em I_{cc} não têm impacto significativo no valor da sensibilidade máxima, conforme previsto pela análise dos dados da Tabela 4.

4.1.1.2. Amplitude da Corrente Variável

Nesta subseção apresentam-se os resultados obtidos pelo sistema automático de otimização, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e com as quatro variáveis livres (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}). Ao contrário da subseção 4.1.1.1, onde fixou-se o valor de I_{ca} em 15 mA, aqui permitiu-se que I_{ca} variasse entre 1.41 mA e 28.28 mA.

Por sua vez, a fim de se avaliar o desempenho do sistema de otimização desenvolvido e sua repetibilidade, executou-se o processo de otimização três vezes. Os resultados obtidos em cada um dos três testes efetuados são apresentados na Tabela 46, para fins de comparação dos parâmetros retornados pelo AG em cada repetição, isto é, as combinações das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes as máximas sensibilidade de fase (S_{fase}). Adicionalmente, também são indicados na Tabela 6 os valores das máximas sensibilidade de fase ($S_{caracterização}$) obtidas pelas caracterizações realizadas após cada processo de otimização, bem como os valores de campos magnéticos ($H_{caracterização}$) correspondentes a cada uma das sensibilidade de fase ($S_{caracterização}$) obtidas. Para cada um dos testes efetuados, informa-se a quantidade de gerações até a convergência do AG e o tempo total de processamento computacional.

Tabela 6 – Análise do desempenho e da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e com as quatro variáveis livres.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Unidades
S_{fase}	22,21	22,02	22,11	°/Oe
$S_{caracterização}$	22,75	22,84	22,65	°/Oe
f	16672,8	16655,9	16692,6	kHz
I_{cc}	37,9	34,84	35,74	mA
I_{ca}	7,02	3,96	9,98	mA
H_{pol}	-1,34	-1,31	-1,32	Oe
$H_{caracterização}$	-1,34	-1,33	-1,33	Oe
Quantidade de gerações até a convergência	25	20	17	gerações
Tempo de processamento	3,2	2,5	2,3	horas

Por meio da Tabelas 6, comparando-se as sensibilidade máximas S_{fase} retornadas pelo AG em cada um dos os três testes efetuados, verifica-se que todos os valores obtidos foram satisfatoriamente próximos a 22,11 °/Oe, o que indica uma boa repetibilidade. Por sua vez, os valores de sensibilidade extraídos das curvas de caracterização ($S_{caracterização}$) também sempre se mantiveram próximos dos respectivos valores de S_{fase} . Também, conforme esperado, é perceptível que os valores de H_{pol} retornados pelo AG sempre foram similares aos valores de $H_{caracterização}$.

Por sua vez, com relação a combinação das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes aos valores de S_{fase} obtidos em cada teste, observando-se a Tabela 6, percebe-se que não são observadas variações significativas em f e H_{pol} . Em particular, a variável f sempre se manteve satisfatoriamente próxima de 16,67

MHz e H_{pol} de -1,32 Oe. Por outro lado, as variações em I_{cc} e I_{ca} , apesar de pequenas, foram mais significativas. A diferença entre o mínimo ($I_{cc} = 34,84$ mA) e máximo ($I_{cc} = 37,90$ mA) valor obtido para I_{cc} é de 3,06 mA. Por sua vez, a diferença entre o mínimo ($I_{ca} = 3,96$ mA) e máximo ($I_{ca} = 9,98$ mA) valor obtido para I_{ca} é de 6,02 mA. Consequentemente, percebe-se que existem diferentes combinações de I_{cc} com I_{ca} para as quais se obtêm valores de sensibilidade de fase similares e elevados, em torno de 22,11 °/Oe. Adicionalmente, comparando-se o valor médio de S_{fase} obtido nesta seção (22,11 °/Oe) com o valor médio obtido na seção 4.1.1.1 (22,97 °/Oe), conclui-se que a utilização de I_{ca} como uma variável livre não propiciou ganho de desempenho.

Ressalta-se ainda que, por meio da Tabela 4, verifica-se que a quantidade de gerações até a convergência e, consequentemente, o tempo de processamento computacional, podem apresentar variações significativas. Tais variações estão provavelmente associadas a características da população inicial, a qual é distribuída aleatoriamente sobre o espaço de busca. Entretanto, as variações no número de gerações até a convergência parecem não impactar significativamente a solução do AG, visto que o mesmo sempre retornou valores de S_{fase} significativamente similares entre si. Este comportamento indica que o AG desenvolvido apresenta boa imunidade as características particulares da população inicial. Destaca-se ainda que o tempo médio de processamento computacional foi de aproximadamente 2,7 horas, para cada teste.

A Figura 36 apresenta as curvas de caracterização de fase da impedância em função do campo magnético, associadas a cada um dos três testes realizados. Cada curva de caracterização foi obtida ajustando-se a corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 6.

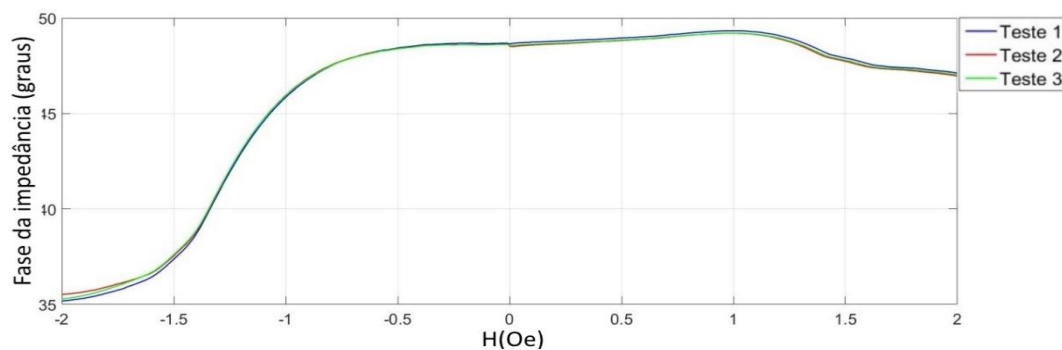


Figura 36 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 6, para cada teste.

Por meio da Figura 36, nota-se que as três curvas de caracterização obtidas apresentam comportamentos extremamente similares. Percebe-se ainda que a região entre -1,0 Oe e -1,4 Oe é onde está contida a sensibilidade máxima. Por sua vez, sabendo que o nível CC (I_{cc}) e a amplitude (I_{ca}) são os únicos parâmetros da corrente de excitação que variam significativamente entre os três testes apresentados na Figura 36, comprova-se que existem diversas combinações entre I_{cc} e I_{ca} para as quais pode-se obter sensibilidades máximas muito similares entre si, conforme previsto pela análise dos dados da Tabela 6.

4.1.2. Com Normalização da Frequência

As análises realizadas nesta subseção diferenciam-se das apresentadas em 4.1.1 por aqui ter sido efetuado um processo de normalização logarítmica na variável da frequência, conforme descrito na subseção 3.3.2, a fim de se tentar encontrar pontos ótimos de operação em baixas frequências.

Por sua vez, os resultados obtidos na seção 4.1.2.1 referem-se a configuração na qual fixou-se a amplitude da corrente (I_{ca}) em 15 mA. Dessa forma, o AG passa a ter 3 variáveis livres (I_{cc} , f e H_{pol}). Por outro lado, os resultados obtidos na seção 4.1.2.2 referem-se a configuração na qual a permitiu-se que a amplitude da corrente (I_{ca}) pudesse variar entre 1.41 mA e 28.28 mA. Dessa forma, o AG passa ter efetivamente 4 variáveis livres.

4.1.2.1. Amplitude da Corrente Fixa

A Tabela 3 exibe os resultados obtidos pelo sistema automático de otimização, para o AG com codificação real, sem normalização da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA. Os resultados indicam a combinação de parâmetros livres (I_{cc} , f e H_{pol}) associada a máxima sensibilidade de fase encontrada (S_{fase}), cujo valor também é explicitado.

Tabela 7 – Resultados obtidos pelo sistema automático de otimização de amostras GMI, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.

Valores Retornados pelo AG		
f	1170,18	kHz
I_{cc}	36,31	mA
I_{ca}	15	mA
H_{pol}	-1,4	Oe
S_{fase}	23,51	°/Oe

Em função dos resultados explicitados na Tabela 7, verifica-se que a maior sensibilidade de fase obtida pelo sistema automático de otimização foi de 23,51 °/Oe, a qual é atingida ao se excitar a amostra GMI avaliada com uma corrente com nível CC de 36,31 mA, amplitude de 15 mA e frequência de 1,17 MHz. Os resultados da Tabela 7 informam ainda que esta sensibilidade ocorre na vizinhança de um campo magnético de polarização de -1,4 Oe.

Comparando-se estes parâmetros com os indicados na Tabela 3 da seção 4.1.1, onde não normalizou-se a frequência, verifica-se que os valores de S_{fase} obtidos são muito próximos, entretanto o valor ótimo aqui obtido para a frequência (1,17 MHz) é cerca de quatorze vezes inferior ao valor apresentado na Tabela 3 (16,72 MHz). Este resultado indica que, conforme esperado, aparentemente, a normalização logarítmica da frequência permite que se encontrem soluções com elevadas sensibilidades em baixas frequências.

Conforme descrito no capítulo 3, após o AG convergir para a solução considerada ótima, os valores ótimos das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) são encaminhados para o sistema de caracterização de amostras, o qual realiza a medição experimental da curva de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando os parâmetros do medidor RLC de acordo com os valores ótimos obtidos para I_{cc} , I_{ca} e f , conforme detalhado na subseção 3.2.2. A Figura 37 exibe a curva de caracterização da fase da impedância da amostra GMI avaliada em função do campo magnético, obtida para os parâmetros ótimos encontrados pelo algoritmo genético – explicitados na Tabela 7.

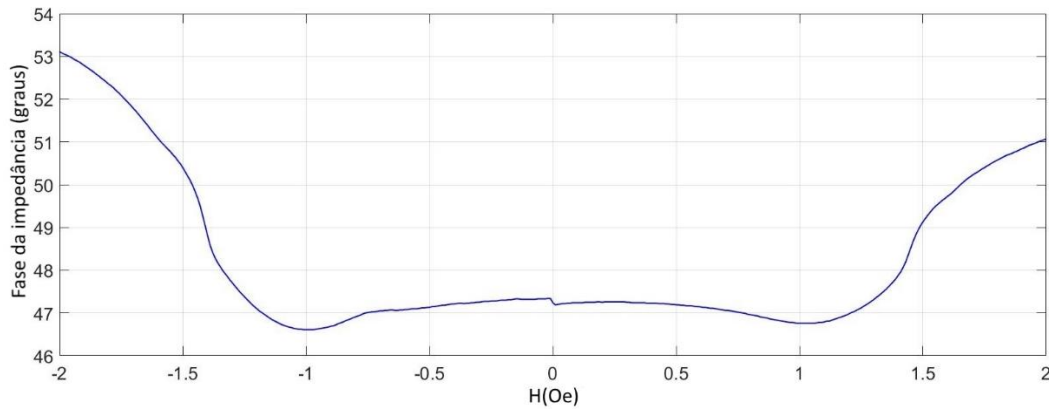


Figura 37 – Caracterização experimental da fase da impedância em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [36,31 + 15\text{sen}(2\pi \cdot 1,17\text{MHz} \cdot t)] \text{ mA}$.

Comparando-se a curva de caracterização apresentada na Figura 37 (com normalização logarítmica da frequência) com aquela anteriormente obtida na Figura 33 (sem normalização logarítmica da frequência), verifica-se que as mesmas possuem comportamentos substancialmente distintos, indicando que a normalização proposta afeta significativamente o comportamento do AG.

Por sua vez, a sensibilidade de fase da amostra GMI avaliada pode ser obtida derivando-se a fase da impedância em relação ao campo magnético. Dessa forma, aplica-se uma diferenciação numérica a curva de fase explicitada na Figura 37, a fim de se obter seus respectivos valores de sensibilidade S_{fase} ponto-a-ponto. A Figura 38 exibe a curva de S_{fase} em função de H , para campos entre -2,0 Oe e 2,0 Oe. Adotou-se $\Delta H = 0,01 \text{ Oe}$, para o cálculo da diferenciação numérica, o qual é o mesmo valor utilizado para no cálculo da função de avaliação do algoritmo genético.

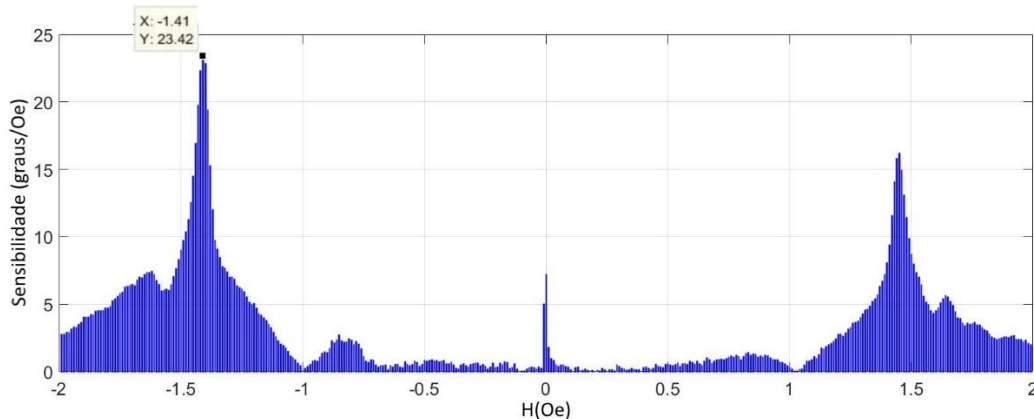


Figura 38 – Sensibilidade de fase em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [36,31 + 15\text{sen}(2\pi \cdot 1,17\text{MHz} \cdot t)] \text{ mA}$.

Inspecionando-se a Figura 38, verifica-se que a máxima sensibilidade encontrada na caracterização da amostra GMI foi $S_{caracterização} = 23,42 \text{ }^\circ/\text{Oe}$, a qual ocorre para $H_{caracterização} = -1,41 \text{ Oe}$. Destaca-se que estes valores são satisfatoriamente próximos aos valores ótimos retornados pelo AG ($S_{fase} = 23,51 \text{ }^\circ/\text{Oe}$, em $H_{pol} = -1,40 \text{ Oe}$), explicitados na Tabela 7.

A fim de se avaliar a repetibilidade do sistema de otimização desenvolvido, o mesmo processo de otimização que levou aos resultados indicados na Tabela 7 foi repetido mais duas vezes. Os resultados obtidos em cada um dos três testes efetuados são apresentados na Tabela 4, para fins de comparação dos parâmetros retornados pelo AG em cada repetição, isto é, as combinações das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes as máximas sensibilidades de fase (S_{fase}).

Adicionalmente, também são indicados na Tabela 8 os valores das máximas sensibilidades de fase ($S_{caracterização}$) obtidas pelas caracterizações realizadas após cada processo de otimização, bem como os valores de campos magnéticos ($H_{caracterização}$) correspondentes a cada uma das sensibilidades de fase ($S_{caracterização}$) obtidas. Para cada um dos testes efetuados, informa-se a quantidade de gerações até a convergência do AG e o tempo total de processamento computacional.

Tabela 8 – Análise da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Unidades
S_{fase}	23,51	22,40	24,39	$^\circ/\text{Oe}$
$S_{caracterização}$	23,42	23,42	23,14	$^\circ/\text{Oe}$
f	1170,18	1214,75	1266,07	kHz
I_{cc}	36,31	34,06	32,00	mA
I_{ca}	15	15	15	mA
H_{pol}	-1,40	-1,40	-1,37	Oe
$H_{caracterização}$	-1,41	-1,40	-1,37	Oe
Quantidade de gerações até a convergência	31	26	29	gerações
Tempo de processamento	3,8	3,6	3,7	horas

A fim de se fazer uma melhor avaliação quantitativa dos resultados, a Tabela 9 compara os parâmetros S_{fase} e H_{pol} , retornados pelo AG em cada um dos três testes efetuados, com os parâmetros $S_{caracterização}$ e $H_{caracterização}$, extraídos das respectivas curvas de caracterização. Apresenta-se também os erros percentuais E_S , entre $S_{caracterização}$ e S_{fase} , e E_H , entre $H_{caracterização}$ e H_{fase} .

Tabela 9 – Comparação dos erros percentuais E_S e E_H , obtidos em cada um dos três testes efetuados, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e fixando-se a amplitude da corrente em 15 mA.

S_{fase} (°Oe)	H_{pol} (Oe)	$S_{caracterização}$ (°Oe)	$H_{caracterização}$ (Oe)	E_S (%)	E_H (%)
23,51	-1,40	23,42	-1,41	0,38%	0,71%
22,40	-1,40	23,42	-1,40	4,36%	0,00%
24,39	-1,37	23,14	-1,37	5,40%	0,00%

Por meio das Tabelas 8 e 9, comparando-se as sensibilidades máximas S_{fase} retornadas pelo AG em cada um dos os três testes efetuados, verifica-se que todos os valores obtidos foram satisfatoriamente próximos a 23,43 °/Oe, o que indica uma boa repetibilidade. Entretanto, apesar de pequena, a dispersão dos valores de S_{fase} aqui encontrados, em torno deste valor médio, é ligeiramente superior a dispersão obtida em 4.1.1.1 (sem normalização). Por sua vez, os valores de sensibilidade extraídos das curvas de caracterização ($S_{caracterização}$) também sempre se mantiveram próximos dos respectivos valores de S_{fase} . Também, conforme esperado, é perceptível que os valores de H_{pol} retornados pelo AG sempre foram similares aos valores de $H_{caracterização}$.

Dentre os testes efetuados, o maior erro E_S foi de 5,40 % e o maior erro E_H foi de 0,71 %, indicando uma boa repetibilidade. Destaca-se que estes erros são associados a variações entre os valores obtidos ao longo do processo de otimização e aqueles extraídos da curva de caracterização obtida após a conclusão da otimização. Dessa forma, os mesmos são atribuídos a: histerese, ruído magnético, variações térmicas, incertezas de medição dos instrumentos que compõem o sistema, entre outros.

Por sua vez, com relação à combinação das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes aos valores de S_{fase} obtidos em cada teste, observando-se a Tabela 8, percebe-se que as variações em todas as variáveis são satisfatoriamente pequenas. Em particular, em todos os testes, I_{ca} se manteve em 15 mA, visto que este foi o valor arbitrado para esta variável – I_{ca} não é uma variável livre na análise realizada nesta subseção. Considerando-se os três testes efetuados, o valor médio de I_{cc} foi 34,12 mA, o de f foi 1,28 MHz e o de H_{pol} foi -1,39 Oe. Por outro lado, a diferença entre o mínimo ($I_{cc} = 32,00$ mA) e máximo ($I_{cc} = 36,31$ mA) valor obtido para I_{cc} é de 4,31 mA. Por sua vez, para f esta diferença é de 95,89 kHz e para H_{pol} de 0,03 Oe.

Ressalta-se ainda que, por meio da Tabela 8, verifica-se que se obteve uma maior estabilidade da quantidade de gerações até a convergência e, conseqüentemente, do tempo de processamento computacional, em relação ao comportamento indicado na Tabela 4 (sem normalização). Destaca-se ainda que o tempo médio de processamento computacional foi de aproximadamente 3,7 horas, para cada teste. O tempo médio de processamento para as análises efetuadas nesta subseção (com normalização e I_{ca} fixo) foi superior ao tempo médio de processamento demandado pelas análises sem normalização, apresentadas em 4.1.1.1.

A Figura 39 apresenta as curvas de caracterização de fase da impedância em função do campo magnético, associadas a cada um dos três testes realizados. Cada curva de caracterização foi obtida ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 8.

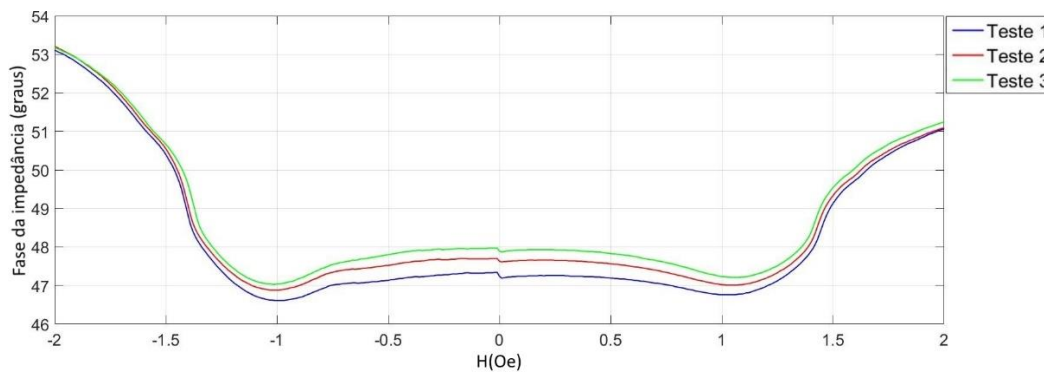


Figura 39 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 8, para cada teste.

Por meio da Figura 39, nota-se que as três curvas de caracterização obtidas apresentam comportamentos extremamente similares na vizinhança do valor H_{pol} retornado pelo AG, que possui um valor médio de -1,39 Oe. Adicionalmente, também verifica-se que a sensibilidade máxima ocorre na vizinhança deste ponto, visto que a inclinação das três curvas nesta região é significativamente superior às obtidas em outras regiões. Também, é possível concluir que as sensibilidades máximas de todas as três curvas obtidas são bastante similares, apesar das mesmas terem sido geradas a partir de combinações ligeiramente diferentes de I_{cc} , I_{ca} e f , conforme indicado na Tabela 8.

4.1.2.2. Amplitude da Corrente Variável

Nesta subseção apresentam-se os resultados obtidos pelo sistema automático de otimização, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}). Ao contrário da subseção 4.1.2.1, onde fixou-se o valor de I_{ca} em 15 mA, aqui permitiu-se que I_{ca} variasse entre 1.41 mA e 28.28 mA.

Por sua vez, a fim de se avaliar o desempenho do sistema de otimização desenvolvido e sua repetibilidade, executou-se o processo de otimização três vezes. Os resultados obtidos em cada um dos três testes efetuados são apresentados na Tabela 410, para fins de comparação dos parâmetros retornados pelo AG em cada repetição, isto é, às combinações das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes as máximas sensibilidade de fase (S_{fase}). Adicionalmente, também são indicados na Tabela 10 os valores das máximas sensibilidade de fase ($S_{caracterização}$) obtidas pelas caracterizações realizadas após cada processo de otimização, bem como os valores de campos magnéticos ($H_{caracterização}$) correspondentes a cada uma das sensibilidade de fase ($S_{caracterização}$) obtidas. Para cada um dos testes efetuados, informa-se a quantidade de gerações até a convergência do AG e o tempo total de processamento computacional.

Tabela 10 – Análise do desempenho e da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Unidades
S_{fase}	34,53	33,68	34,81	°/Oe
$S_{caracterização}$	31,65	31,12	33,53	°/Oe
f	917,11	863,23	1067,44	kHz
I_{cc}	30,39	29,1	33,09	mA
I_{ca}	1,47	2,16	1,52	mA
H_{pol}	-1,37	-1,37	-1,37	Oe
$H_{caracterização}$	-1,37	-1,37	-1,38	Oe
Quantidade de gerações até a convergência	42	28	39	gerações
Tempo de processamento	6,6	4,6	5,2	horas

A fim de se fazer uma melhor avaliação quantitativa dos resultados, a Tabela 11 compara os parâmetros S_{fase} e H_{pol} , retornados pelo AG em cada um dos três testes efetuados, com os parâmetros $S_{caracterização}$ e $H_{caracterização}$, extraídos das

respectivas curvas de caracterização. Apresenta-se também os erros percentuais E_S , entre $S_{caracterização}$ e S_{fase} , e E_H , entre $H_{caracterização}$ e H_{fase} .

Tabela 11 – Comparação dos erros percentuais E_S e E_H , obtidos em cada um dos três testes efetuados, para o AG com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres.

S_{fase} (°Oe)	H_{pol} (Oe)	$S_{caracterização}$ (°Oe)	$H_{caracterização}$ (Oe)	E_S (%)	E_H (%)
34,53	-1,37	31,65	-1,37	9,10%	0,00%
33,68	-1,37	31,12	-1,37	8,23%	0,00%
34,81	-1,37	33,53	-1,38	3,82%	0,72%

Por meio das Tabelas 10 e 11, comparando-se as sensibilidades máximas S_{fase} retornadas pelo AG em cada um dos os três testes efetuados, verifica-se que todos os valores obtidos foram satisfatoriamente próximos a 34,34 °Oe. Não foi observada uma dispersão significativa em torno deste valor médio de S_{fase} , o que indica uma boa repetibilidade. Por sua vez, ressalta-se ainda que o valor médio de S_{fase} aqui obtido é significativamente superior ao valor obtido na seção 4.1.2.1 (23,43 °Oe), onde efetuou-se a normalização da frequência, mas fixou-se a amplitude da corrente em 15 mA. Ademais, também verifica-se que esta sensibilidade é consideravelmente superior aos valores encontrados na subseção 4.1.1, onde não se normalizou a frequência. Tais resultados indicam que a normalização da frequência em conjunto com a definição de I_{ca} , como uma variável livre, propiciam a obtenção de sensibilidades de fase mais altas.

Por sua vez, os valores de sensibilidade extraídos das curvas de caracterização ($S_{caracterização}$) se mantiveram próximos dos respectivos valores de S_{fase} . Entretanto, observou-se um afastamento entre S_{fase} e $S_{caracterização}$, levemente superior ao obtido nas seções anteriores. Também, conforme esperado, é perceptível que os valores de H_{pol} retornados pelo AG sempre foram similares aos valores de $H_{caracterização}$.

Dentre os testes efetuados, o maior erro E_S foi de 9,10 %, o qual é superior aos valores de E_S provenientes das análises realizadas em seções anteriores. A amplitude da corrente I_{ca} afeta significativamente a incerteza do sistema, pois amplitudes muito baixas fazem com que os sinais lidos pelo medidor RLC tenham relações sinal/ruído piores. Por sua vez, destaca-se que os valores de I_{ca} expressos na Tabela 10, são os menores obtidos dentre todas as análises apresentadas em subseções anteriores do capítulo 4, o que justifica o incremento do erro E_S . Por outro lado, o maior erro E_H foi de 0,71 %, indicando uma boa repetibilidade deste parâmetro.

Por sua vez, com relação à combinação das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes aos valores de S_{fase} obtidos em cada teste, observando-se a Tabela 10 percebe-se que as variações em todas as variáveis são relativamente pequenas. Considerando-se os três testes efetuados, o valor médio de I_{cc} foi 30,86 mA, o de I_{ca} foi de 1,72 mA, o de f foi 949,26 kHz e o de H_{pol} foi -1,37 Oe. Por outro lado, a diferença entre o mínimo ($I_{cc} = 29,10$ mA) e máximo ($I_{cc} = 33,09$ mA) valor obtido para I_{cc} é de 3,99 mA. Por sua vez, para I_{ca} esta diferença é de 0,69 mA, para f esta diferença é de 204,21 kHz e para H_{pol} de 0,00 Oe.

Ressalta-se ainda que, por meio da Tabela 10, verifica-se que a quantidade de gerações até a convergência e, conseqüentemente, o tempo de processamento computacional, podem apresentar variações significativas, de modo equivalente à situação apresentada em muitas das avaliações anteriores. Por sua vez, o tempo médio de processamento computacional foi de aproximadamente 5,5 horas, para cada teste. Este tempo médio é significativamente superior ao obtido na subseção 4.1.2.1, que adotava normalização da frequência, mas fixava o valor de I_{ca} . O incremento do tempo médio de processamento é atribuído ao aumento da complexidade do problema, devido à adoção de I_{ca} como uma variável livre. Ressalta-se ainda que as análises efetuadas na subseção 4.1.2 (com normalização) obtiveram tempos médios de processamento superiores aos apresentados pelas análises efetuadas na seção 4.1.1 (sem normalização). Conseqüentemente, conclui-se que a normalização aumenta o tempo de processamento.

A Figura 40 apresenta as curvas de caracterização de fase da impedância em função do campo magnético, associadas a cada um dos três testes realizados. Cada curva de caracterização foi obtida ajustando-se a corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 10.

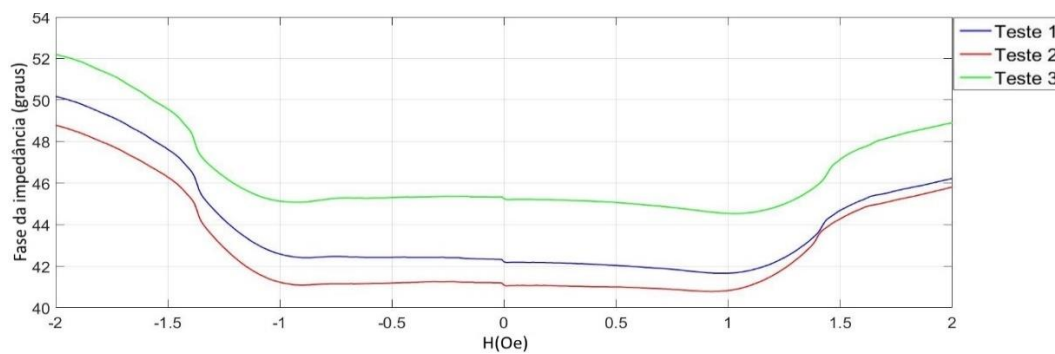


Figura 40 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 10, para cada teste.

Observando-se as curvas apresentadas na Figura 40, nota-se que as mesmas são significativamente diferentes entre si, ao contrário da situação observada nas análises anteriores. Entretanto, também percebe-se que a inclinação destas curvas é muito similar na vizinhança do campo de polarização $H_{pol} = -1,37$ Oe, retornado pelo AG. Dessa forma, conclui-se que a sensibilidade máxima das mesmas (S_{fase}) é de fato muito parecida, conforme indicado pelos dados apresentados na Tabela 10. Destaca-se que o AG desenvolvido busca combinações de I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol} que resultem nas maiores sensibilidades de fase possíveis. Entretanto, isto não significa que as curvas de caracterização correspondentes às diferentes combinações de I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol} , que resultem em valores similares de S_{fase} , tenham que ser iguais.

4.2. Codificação Inteira

Nesta subsecção apresentam-se os resultados obtidos adotando-se codificação inteira para os quatro genes (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) do AG desenvolvido, conforme descrito na seção 3.3.1. Em virtude dos resultados obtidos na seção 4.1, para o AG com codificação real, optou-se por se definir I_{ca} como uma variável livre em todos os testes aqui efetuados. Dessa forma, conforme definido em 3.3, realizaram-se análises para correntes de excitação com níveis CC (I_{cc}) variando entre 0 mA e 100 mA, amplitudes (I_{ca}) entre 1.41 mA e 28.28 mA, frequências (f) entre 75 kHz e 30 MHz e campos magnéticos de polarização (H_{pol}) entre -2 Oe e 2 Oe.

Tendo em vista as definições feitas na seção 3.3.3, a Tabela 12 resume os valores estabelecidos para principais parâmetros adotados para o AG utilizado nas análises efetuadas nesta seção.

Tabela 12 – Parâmetros de configuração do algoritmo genético com codificação inteira.

Configuração do Algoritmo Genético	
População	100
Número de gerações	100
Taxa de <i>crossover</i>	0,8
Taxa de mutação	0,005
<i>Elite count</i>	10
<i>StallGen limit</i>	10
<i>TolFun</i>	10^{-3}
Tipo de <i>crossover</i>	Laplace
Tipo de Mutação	<i>Power</i>

4.2.1. Sem Normalização da Frequência

Nas análises realizadas nesta subseção, nenhum dos genes (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) do AG foi normalizado. A Tabela 13 exibe os resultados obtidos pelo sistema automático de otimização, para o AG com codificação inteira, sem normalização da frequência e com as quatro variáveis livres. Os resultados indicam a combinação de parâmetros livres (I_{cc} , f e H_{pol}) associada a máxima sensibilidade de fase encontrada (S_{fase}), cujo valor também é explicitado.

Tabela 13 – Resultados obtidos pelo sistema automático de otimização de amostras GMI, para o AG com codificação inteira, sem normalização da frequência e com as quatro variáveis livres.

Valores Retornados pelo AG		
f	16699,1	kHz
I_{cc}	37,31	mA
I_{ca}	1,98	mA
H_{pol}	-1,34	Oe
S_{fase}	22,29	°/Oe

Em função dos resultados explicitados na Tabela 12, verifica-se que a maior sensibilidade de fase obtida pelo sistema automático de otimização foi de 22,29 °/Oe, a qual é atingida ao se excitar a amostra GMI avaliada com uma corrente com nível CC de 37,31 mA, amplitude de 1,98 mA e frequência de 16,70 MHz. Os resultados da Tabela 12 informam ainda que esta sensibilidade ocorre na vizinhança de um campo magnético de polarização de -1,34 Oe.

Conforme descrito no capítulo 3, após o AG convergir para a solução considerada ótima, os valores ótimos das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) são encaminhados para o sistema de caracterização de amostras, o qual realiza a medição experimental da curva de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando os parâmetros do medidor RLC de acordo com os valores ótimos obtidos para I_{cc} , I_{ca} e f , conforme detalhado na subseção 3.2.2. A Figura 41 exibe a curva de caracterização da fase da impedância da amostra GMI avaliada em função do campo magnético, obtida para os parâmetros ótimos encontrados pelo algoritmo genético – explicitados na Tabela 13.

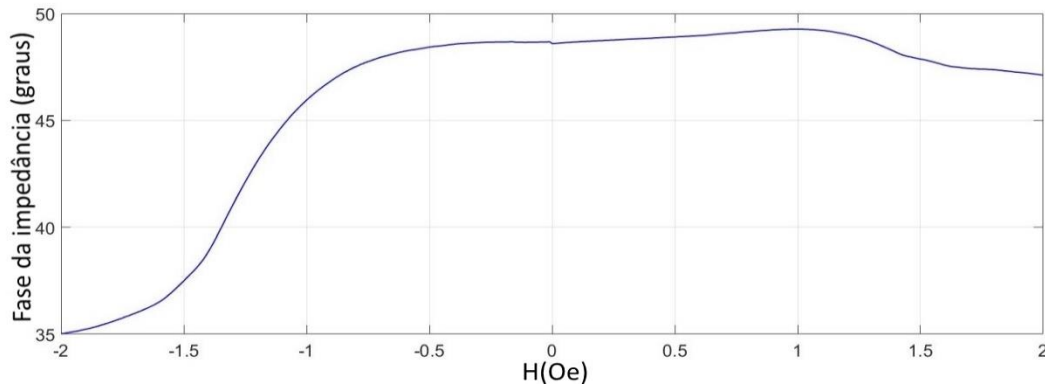


Figura 41 – Caracterização experimental da fase da impedância em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [37,31 + 1,98 \sin(2\pi \cdot 16,70 \text{ MHz} \cdot t)] \text{ mA}$.

Por sua vez, a sensibilidade de fase da amostra GMI avaliada pode ser obtida derivando-se a fase da impedância em relação ao campo magnético. Dessa forma, aplica-se uma diferenciação numérica a curva de fase explicitada na Figura 41, a fim de se obter seus respectivos valores de sensibilidade S_{fase} ponto-a-ponto. A Figura 42 exibe a curva de S_{fase} em função de H , para campos entre -2,0 Oe e 2,0 Oe. Em virtude do discutido na seção 3.3.1, adotou-se $\Delta H = 0,01156 \text{ Oe}$, para o cálculo da diferenciação numérica, o qual é o mesmo valor utilizado no cálculo da função de avaliação do algoritmo genético, com codificação inteira.

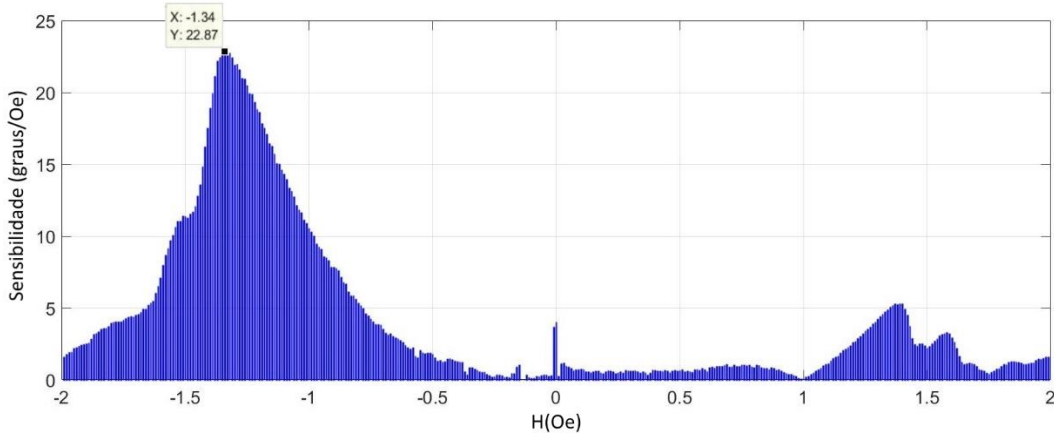


Figura 42 – Sensibilidade de fase em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [37,31 + 1,98 \sin(2\pi \cdot 16,70 \text{ MHz} \cdot t)] \text{ mA}$

Inspecionando-se a Figura 42, verifica-se que a máxima sensibilidade encontrada na caracterização da amostra GMI foi $S_{caracterização} = 22,87 \text{ }^\circ/\text{Oe}$, a qual ocorre para $H_{caracterização} = -1,34 \text{ Oe}$. Destaca-se que estes valores são satisfatoriamente próximos aos valores ótimos retornados pelo AG ($S_{fase} = 22,29 \text{ }^\circ/\text{Oe}$, em $H_{pol} = -1,34 \text{ Oe}$), explicitados na Tabela 13.

A fim de se avaliar a repetibilidade do sistema de otimização desenvolvido, o mesmo processo de otimização que levou aos resultados indicados na Tabela 13 foi repetido mais duas vezes. Os resultados obtidos em cada um dos três testes efetuados são apresentados na Tabela 14, para fins de comparação dos parâmetros retornados pelo AG em cada repetição, isto é, as combinações das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes às máximas sensibilidade de fase (S_{fase}).

Adicionalmente, também são indicados na Tabela 14 os valores das máximas sensibilidade de fase ($S_{caracterização}$) obtidas pelas caracterizações realizadas após cada processo de otimização, bem como os valores de campos magnéticos ($H_{caracterização}$) correspondentes a cada uma das sensibilidade de fase ($S_{caracterização}$) obtidas. Para cada um dos testes efetuados, informa-se a quantidade de gerações até a convergência do AG e o tempo total de processamento computacional.

Tabela 14 – Análise da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação inteira, sem normalização da frequência e com as quatro variáveis livres.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Unidades
S_{fase}	22,29	21,93	22,21	°/Oe
$S_{caracterização}$	22,89	22,78	22,98	°/Oe
f	16699,1	16651,7	16681,7	kHz
I_{cc}	37,31	36,1	39,88	mA
I_{ca}	1,98	7,49	6,08	mA
H_{pol}	-1,34	-1,32	-1,34	Oe
$H_{caracterização}$	-1,34	-1,33	-1,34	Oe
Quantidade de gerações até a convergência	21	29	23	gerações
Tempo de processamento	2,8	3,9	3,0	horas

A fim de se fazer uma melhor avaliação quantitativa dos resultados, a Tabela 15 compara os parâmetros S_{fase} e H_{pol} , retornados pelo AG em cada um dos três testes efetuados, com os parâmetros $S_{caracterização}$ e $H_{caracterização}$, extraídos das respectivas curvas de caracterização. Apresenta-se também os erros percentuais E_S , entre $S_{caracterização}$ e S_{fase} , e E_H , entre $H_{caracterização}$ e H_{fase} .

Tabela 15 – Comparação dos erros percentuais E_S e E_H , obtidos em cada um dos três testes efetuados, para o AG com codificação inteira, sem normalização da frequência e com as quatro variáveis livres.

S_{fase} (°/Oe)	H_{pol} (Oe)	$S_{caracterização}$ (°/Oe)	$H_{caracterização}$ (Oe)	E_S (%)	E_H (%)
22,29	-1,34	22,89	-1,34	2,62%	0,00%
21,93	-1,32	22,78	-1,33	3,73%	0,75%
22,21	-1,34	22,98	-1,34	3,35%	0,00%

Por meio das Tabelas 14 e 15, comparando-se as sensibilidades máximas S_{fase} retornadas pelo AG em cada um dos os três testes efetuados, verifica-se que todos os valores obtidos foram satisfatoriamente próximos a 22,14 °/Oe. Não foi observada uma dispersão significativa em torno deste valor médio de S_{fase} , o que indica uma boa repetibilidade. Na seção 4.1.1.2, para o AG com codificação real, sem normalização e com I_{ca} variável, o valor médio obtido para S_{fase} foi 22,11 °/Oe, o qual é muito próximo do valor médio aqui obtido. Dessa forma, verifica-se que a adoção da codificação inteira, ao invés da codificação real, não teve impacto significativo na sensibilidade máxima retornada pelo AG.

Por sua vez, os valores de sensibilidade extraídos das curvas de caracterização ($S_{caracterização}$) se mantiveram próximos dos respectivos valores de S_{fase} . Também, conforme esperado, é perceptível que os valores de H_{pol} retornados pelo AG sempre foram similares aos valores de $H_{caracterização}$. Dentre os testes efetuados, o maior erro E_S foi de 3,73 % e o maior erro E_H foi de 0,71 %, indicando uma boa repetibilidade de ambos os parâmetros.

Por sua vez, com relação à combinação das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes aos valores de S_{fase} obtidos em cada teste, observando-se a Tabela 13 percebe-se que as variações em todas as variáveis são satisfatoriamente pequenas, exceto para I_{ca} . Considerando-se os três testes efetuados, o valor médio de I_{cc} foi 37,76 mA, o de I_{ca} foi de 5,18 mA, o de f foi 16,68 MHz e o de H_{pol} foi - 1,33 Oe. Por outro lado, a diferença entre o mínimo ($I_{ca} = 1,98$ mA) e máximo ($I_{ca} = 7,49$ mA) valor obtido para I_{ca} é de 5,51 mA. Por sua vez, para I_{cc} esta diferença é de 3,78 mA, para f esta diferença é de 47,4 kHz e para H_{pol} de 0,02 Oe.

Destaca-se que, na seção 4.1.1.2, para o AG com codificação real, sem normalização e com I_{ca} variável, o valor médio obtido para f foi 16,67 MHz, o qual é muito próximo do valor médio de f aqui obtido. Dessa forma, verifica-se que a adoção da codificação inteira, ao invés da codificação real, não teve impacto significativo no valor ótimo de frequência retornado pelo AG.

Ressalta-se ainda que, por meio da Tabela 14, verifica-se que a quantidade de gerações até a convergência e, conseqüentemente, o tempo de processamento computacional, apresentam certa variação entre os três testes realizados. Por sua vez, o tempo médio de processamento computacional foi de aproximadamente 3,2 horas, para cada teste. Este tempo médio é ligeiramente superior ao obtido na subseção 4.1.1.2 (2,7 horas), para o AG com codificação real, sem normalização e

com I_{ca} variável. Este resultado indica que o AG baseado em codificação inteira tende a ser um pouco mais lento do que o baseado em codificação real.

A Figura 43 apresenta as curvas de caracterização de fase da impedância em função do campo magnético, associadas a cada um dos três testes realizados. Cada curva de caracterização foi obtida ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 14.

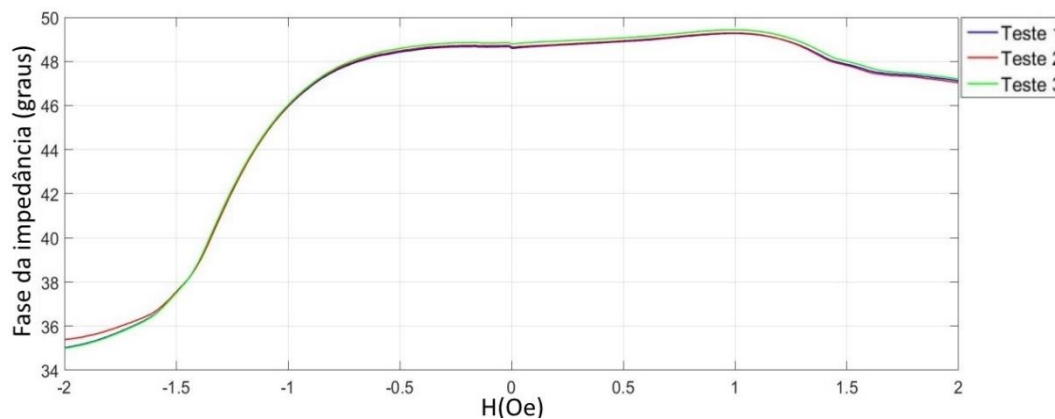


Figura 43 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 13, para cada teste.

Por meio da Figura 43, nota-se que as três curvas de caracterização obtidas apresentam comportamentos extremamente similares. Por sua vez, observa-se que, conforme esperado, a sensibilidade máxima de todas as curvas está contida na faixa de -1,2 Oe até -1,4 Oe, visto que a inclinação das curvas nesta região é significativamente superior às obtidas em outras regiões. Verifica-se ainda que as sensibilidades máximas associadas a cada um dos três testes são muito similares, visto que as inclinações máximas das três curvas são significativamente parecidas.

4.2.2. Com Normalização da Frequência

As análises realizadas nesta subseção diferenciam-se das apresentadas em 4.2.1 por aqui ter sido efetuado um processo de normalização logarítmica na variável da frequência, conforme descrito na subseção 3.3.2, a fim de se tentar encontrar pontos ótimos de operação em baixas frequências.

A Tabela 16 exhibe os resultados obtidos pelo sistema automático de otimização, para o AG com codificação inteira, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres. Os resultados indicam a combinação de

parâmetros livres (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) associada à máxima sensibilidade de fase encontrada (S_{fase}), cujo valor também é explicitado.

Tabela 16 – Resultados obtidos pelo sistema automático de otimização de amostras GMI, para o AG com codificação inteira, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres.

Valores Retornados pelo AG		
f	927,62	kHz
I_{cc}	31,20	mA
I_{ca}	1,69	mA
H_{pol}	-1,37	Oe
S_{fase}	31,88	°/Oe

Em função dos resultados explicitados na Tabela 16, verifica-se que a maior sensibilidade de fase obtida pelo sistema automático de otimização foi de 31,88 °/Oe, a qual é atingida ao se excitar a amostra GMI avaliada com uma corrente com nível CC de 31,20 mA, amplitude de 1,69 mA e frequência de 927,62 kHz. Os resultados da Tabela 15 informam ainda que esta sensibilidade ocorre na vizinhança de um campo magnético de polarização de -1,37 Oe.

Comparando-se estes parâmetros com os indicados na Tabela 13 da seção 4.2.1, onde não normalizou-se a frequência, verifica-se que o valor de S_{fase} aqui obtido é consideravelmente superior ao obtido na seção 4.2.1 (22,29 °/Oe). Por sua vez, comparando-se o valor de frequência aqui obtido (927,62 kHz) com o retornado pelo AG na Tabela 13 da seção 4.2.1 (16,70 MHz), observa-se que o valor ótimo de frequência retornado pelo AG é significativamente reduzido (18 vezes) ao se empregar a normalização logarítmica. Consequentemente, conforme esperado, aparentemente, a normalização logarítmica da frequência permite que se encontrem soluções com elevadas sensibilidades em baixas frequências. Adicionalmente, também se observa que estes valores de sensibilidade tendem a ser superiores às sensibilidades associadas a frequências mais altas.

Conforme descrito no capítulo 3, após o AG convergir para a solução considerada ótima, os valores ótimos das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) são encaminhados para o sistema de caracterização de amostras, o qual realiza a medição experimental da curva de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando os parâmetros do medidor RLC de acordo com os valores ótimos obtidos para I_{cc} , I_{ca} e f , conforme detalhado na subseção 3.2.2. A

Figura 44 exibe a curva de caracterização da fase da impedância da amostra GMI avaliada em função do campo magnético, obtida para os parâmetros ótimos encontrados pelo algoritmo genético – explicitados na Tabela 15.

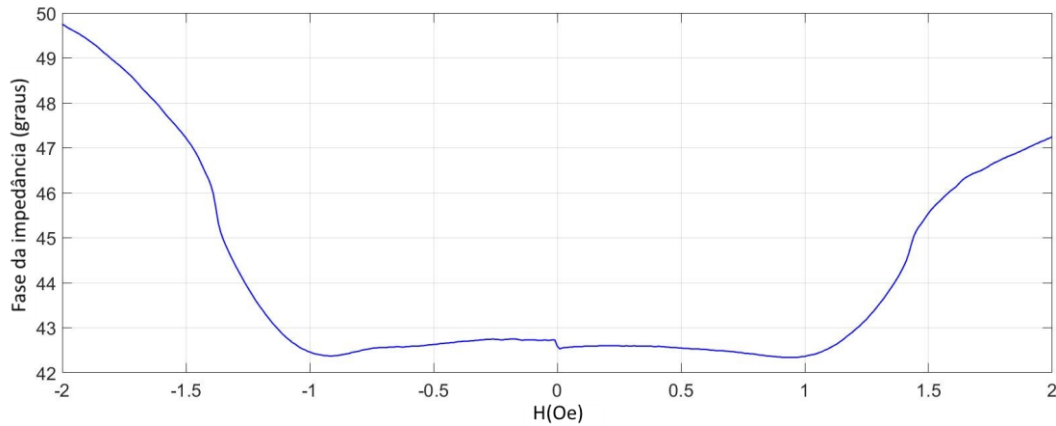


Figura 44 – Caracterização experimental da fase da impedância em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [31,20 + 1,69 \sin(2\pi \cdot 927,62 \text{kHz} \cdot t)] \text{ mA}$

Por sua vez, a sensibilidade de fase da amostra GMI avaliada pode ser obtida derivando-se a fase da impedância em relação ao campo magnético. Dessa forma, aplica-se uma diferenciação numérica à curva de fase explicitada na Figura 44, a fim de se obter seus respectivos valores de sensibilidade S_{fase} ponto-a-ponto. A Figura 45 exibe a curva de S_{fase} em função de H , para campos entre -2,0 Oe e 2,0 Oe. Em virtude do discutido na seção 3.3.1, adotou-se $\Delta H = 0,01156 \text{ Oe}$, para o cálculo da diferenciação numérica, o qual é o mesmo valor utilizado no cálculo da função de avaliação do algoritmo genético, com codificação inteira.

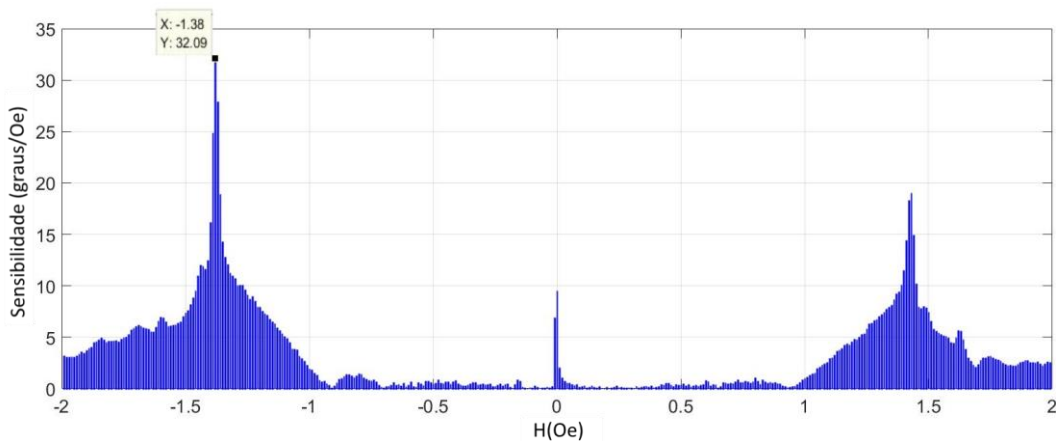


Figura 45 – Sensibilidade de fase em função do campo magnético, excitando-se a amostra GMI avaliada com uma corrente $i_c = [31,20 + 1,69 \sin(2\pi \cdot 927,62 \text{kHz} \cdot t)] \text{ mA}$.

Inspecionando-se a Figura 45, verifica-se que a máxima sensibilidade encontrada na caracterização da amostra GMI foi $S_{caracterização} = 32,09 \text{ }^\circ/\text{Oe}$, a qual

ocorre para $H_{caracterização} = -1,38$ Oe. Destaca-se que estes valores são satisfatoriamente próximos aos valores ótimos retornados pelo AG ($S_{fase} = 31,88$ °/Oe, em $H_{pol} = -1,37$ Oe), explicitados na Tabela 16.

A fim de se avaliar a repetibilidade do sistema de otimização desenvolvido, o mesmo processo de otimização que levou aos resultados indicados na Tabela 16 foi repetido mais duas vezes. Os resultados obtidos em cada um dos três testes efetuados são apresentados na Tabela 17, para fins de comparação dos parâmetros retornados pelo AG em cada repetição, isto é, as combinações das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes as máximas sensibilidades de fase (S_{fase}).

Adicionalmente, também são indicados na Tabela 17 os valores das máximas sensibilidades de fase ($S_{caracterização}$) obtidas pelas caracterizações realizadas após cada processo de otimização, bem como os valores de campos magnéticos ($H_{caracterização}$) correspondentes a cada uma das sensibilidades de fase ($S_{caracterização}$) obtidas. Para cada um dos testes efetuados, informa-se a quantidade de gerações até a convergência do AG e o tempo total de processamento computacional.

Tabela 17 – Análise da repetibilidade dos resultados obtidos pelo sistema proposto, para o AG com codificação inteira, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Unidades
S_{fase}	31,88	33,40	29,74	°/Oe
$S_{caracterização}$	32,08	30,85	31,42	°/Oe
f	927,62	1009,1	983,74	kHz
I_{cc}	31,20	33,31	28,02	mA
I_{ca}	1,69	2,12	2,12	mA
H_{pol}	-1,37	-1,39	-1,35	Oe
$H_{caracterização}$	-1,38	-1,39	-1,35	Oe
Quantidade de gerações até a convergência	46	27	43	gerações
Tempo de processamento	6,0	4,1	5,9	horas

A fim de se fazer uma melhor avaliação quantitativa dos resultados, a Tabela 18 compara os parâmetros S_{fase} e H_{pol} , retornados pelo AG em cada um dos três testes efetuados, com os parâmetros $S_{caracterização}$ e $H_{caracterização}$, extraídos das respectivas curvas de caracterização. Apresenta-se também os erros percentuais E_S , entre $S_{caracterização}$ e S_{fase} , e E_H , entre $H_{caracterização}$ e H_{fase} .

Tabela 18 – Comparação dos erros percentuais E_S e E_H , obtidos em cada um dos três testes efetuados, para o AG com codificação inteira, com normalização logarítmica da frequência e com as quatro variáveis livres.

S_{fase} (°Oe)	H_{pol} (Oe)	$S_{caracterização}$ (°Oe)	$H_{caracterização}$ (Oe)	E_S (%)	E_H (%)
31,88	-1,37	32,08	-1,38	0,62%	0,72%
33,40	-1,39	30,85	-1,39	8,27%	0,00%
29,74	-1,35	31,42	-1,35	5,35%	0,00%

Por meio das Tabelas 17 e 18, comparando-se as sensibilidades máximas S_{fase} retornadas pelo AG em cada um dos os três testes efetuados, verifica-se que todos os valores obtidos foram satisfatoriamente próximos a 31,67 °Oe. Entretanto, observa-se que, apesar de pequena, estes valores apresentam uma dispersão ligeiramente superior à apresentada na maioria das análises anteriores. Por sua vez, a Tabela 16, indica que os valores de I_{ca} retornados pelo AG nos três testes foram consideravelmente pequenos, da ordem de 1 ou 2 miliamperes. Dessa forma, conforme discutido em 4.1.2.2, esta dispersão pode ser atribuída as baixas amplitudes da corrente I_{ca} , as quais comprometem a relação sinal/ruído das medições efetuadas com o sistema.

Ressalta-se ainda que o valor médio de S_{fase} aqui obtido é significativamente superior ao valor obtido na seção 4.2.1 (22,14 °Oe), onde não normalizou-se a frequência. Tais resultados indicam que a normalização da frequência, propicia a obtenção de sensibilidades de fase mais altas. Esta conclusão, mostrou-se válida tanto para o AG com codificação inteira quanto para o AG com codificação real. Por outro lado, também nota-se que o tipo de codificação adotado parece não impactar significativamente no valor de S_{fase} retornado pelo AG.

Por sua vez, os valores de sensibilidade extraídos das curvas de caracterização ($S_{caracterização}$) se mantiveram próximos dos respectivos valores de S_{fase} . Entretanto, observou-se um afastamento entre S_{fase} e $S_{caracterização}$, levemente superior ao obtido na maioria das seções anteriores. Também, conforme esperado, é perceptível que os valores de H_{pol} retornados pelo AG sempre foram similares aos valores de $H_{caracterização}$. Dentre os testes efetuados, o maior erro E_S foi de 8,27 %, o qual é superior aos valores de E_S provenientes da maioria das análises realizadas em seções anteriores. Novamente, associa-se este aumento do erro aos valores extremamente baixos de I_{ca} . Por outro lado, o maior erro E_H foi de 0,72 %, indicando uma boa repetibilidade deste parâmetro.

Com relação à combinação das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes aos valores de S_{fase} obtidos em cada teste, observando-se a Tabela 17 percebe-se que as variações em todas as variáveis são relativamente pequenas. Considerando-se os três testes efetuados, o valor médio de I_{cc} foi 31,45 mA, o de I_{ca} foi de 1,98 mA, o de f foi 973,49 kHz e o de H_{pol} foi -1,37 Oe. Por outro lado, a diferença entre o mínimo ($I_{cc} = 28,02$ mA) e máximo ($I_{cc} = 33,31$ mA) valor obtido para I_{cc} é de 5,29 mA. Por sua vez, para I_{ca} esta diferença é de 0,43 mA, para f esta diferença é de 81,48 kHz e para H_{pol} de 0,04 Oe.

Ressalta-se ainda que, por meio da Tabela 17, verifica-se que a quantidade de gerações até a convergência e, conseqüentemente, o tempo de processamento computacional, podem apresentar variações significativas, de modo equivalente à situação apresentada em muitas das avaliações casos anteriores. Por sua vez, o tempo médio de processamento computacional foi de aproximadamente 5,3 horas, para cada teste. Este tempo médio é significativamente superior ao obtido na subseção 4.2.1 (3,2 horas), obtido para o AG com codificação inteira e sem normalização. Dessa forma, verifica-se que a normalização tende a aumentar significativamente o tempo de processamento, para AG com codificação inteira. Por outro lado, o tempo médio de processamento computacional do AG analisado na seção 4.1.2.2 (codificação real, com normalização da frequência e com quatro variáveis livres) foi de aproximadamente 5,5 horas. Conseqüentemente, verifica-se que a codificação inteira não teve impacto significativo no tempo total de processamento.

A Figura 46 apresenta as curvas de caracterização de fase da impedância em função do campo magnético, associadas a cada um dos três testes realizados. Cada curva de caracterização foi obtida ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 17.

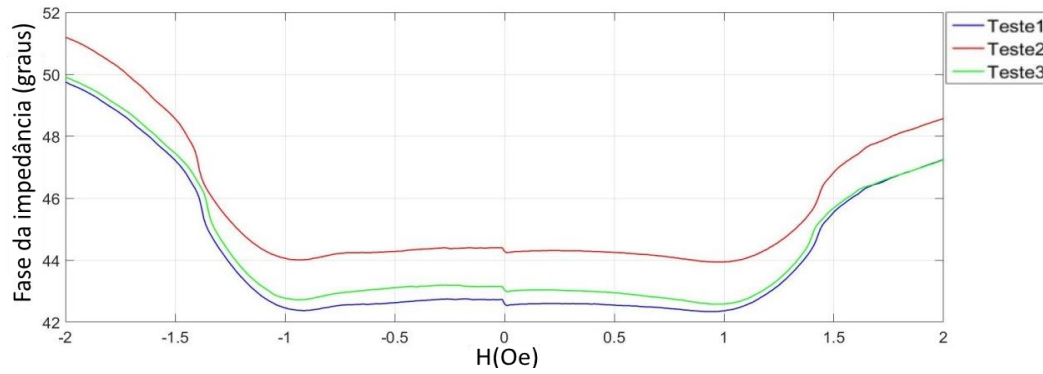


Figura 46 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 17, para cada teste.

Observando-se as curvas apresentadas na Figura 46, nota-se que as mesmas são significativamente diferentes entre si, de forma equivalente ao comportamento obtido na seção 4.1.2.2 (codificação real, com normalização da frequência e com quatro variáveis livres). Dessa forma, para o AG com normalização da frequência e com quatro variáveis livres, conclui-se que independentemente do tipo de codificação adotado (inteira ou real) os resultados obtidos são significativamente similares.

Também, percebe-se que a inclinação destas curvas é muito similar na vizinhança do campo de polarização $H_{pol} = -1,37$ Oe, retornado pelo AG. Dessa forma, conclui-se que a sensibilidade máxima das mesmas (S_{fase}) é de fato muito parecida, conforme indicado pelos dados apresentados na Tabela 16.

4.3. Comparação e Discussão

Esta seção apresenta uma comparação dos principais resultados obtidos ao longo do capítulo 4. Considerando-se as implementações do AG com quatro variáveis livres, efetuou-se uma comparação dos melhores resultados obtidos (S_{fase} máximas) para quatro configurações avaliadas:

1. **AG₁**: codificação real e sem normalização da frequência (seção 4.1.1),
2. **AG₂**: codificação real e com normalização da frequência (seção 4.1.2),
3. **AG₃**: codificação inteira e sem normalização da frequência (seção 4.2.1), e
4. **AG₄**: codificação inteira e com normalização da frequência (seção 4.2.2).

Os melhores resultados obtidos são apresentados na Tabela 419, a qual possibilita a comparação das combinações das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) correspondentes as máximas sensibilidades de fase (S_{fase}) obtidas por cada

uma os parâmetros retornados para cada uma das configurações de AG avaliadas (AG_1 , AG_2 , AG_3 e AG_4). Adicionalmente, também são indicados na Tabela 19 os valores das máximas sensibilidades de fase ($S_{caracterização}$) obtidas pelas caracterizações realizadas após os respectivos processos de otimização, bem como os valores de campos magnéticos ($H_{caracterização}$) correspondentes a cada uma das sensibilidades de fase ($S_{caracterização}$) obtidas. Para cada caso indicado na Tabela, informa-se a quantidade de gerações até a convergência do AG e o tempo total de processamento computacional.

Tabela 19 – Comparação dos melhores resultados obtidos pelas diferentes configurações de AGs avaliadas neste trabalho.

	AG ₁	AG ₂	AG ₃	AG ₄	Unidades
S_{fase}	22,21	34,81	22,29	33,40	°/Oe
$S_{caracterização}$	22,75	33,53	22,89	30,85	°/Oe
f	16672,8	1067,44	16699,1	1009,1	kHz
I_{cc}	37,9	33,09	37,31	33,31	mA
I_{ca}	7,02	1,52	1,98	2,12	mA
H_{pol}	-1,34	-1,37	-1,34	-1,39	Oe
$H_{caracterização}$	-1,34	-1,38	-1,34	-1,39	Oe
Quantidade de gerações até a convergência	25	39	21	27	gerações
Tempo de processamento	3,2	5,2	2,8	4,1	horas

Os resultados explicitados na Tabela 19, indicam que a normalização da frequência propicia um aumento significativo da sensibilidade de fase encontrada pelo AG, independentemente do AG ser baseado em codificação real ou inteira. Por outro lado, também observa-se que o tipo de codificação não tem influência significativa na sensibilidade máxima obtida pelo AG.

A normalização da frequência também permite que o AG encontre soluções ótimas na região de baixas frequências, o que reduz a complexidade e o custo dos circuitos eletrônicos de transdução utilizados no processo de conversão de campo magnético em uma tensão de saída. São observadas reduções superiores a 15 vezes, independentemente do tipo de codificação adotada.

Apesar dos aspectos benéficos da normalização, também verifica-se que, com normalização, os tempos de processamento computacional tendem a ser significativamente superiores aos obtidos sem normalização.

A Figura 47 apresenta as curvas de caracterização de fase da impedância em função do campo magnético, associadas a cada um dos quatro casos apresentados

na Tabela 19. Cada curva de caracterização foi obtida ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 19.

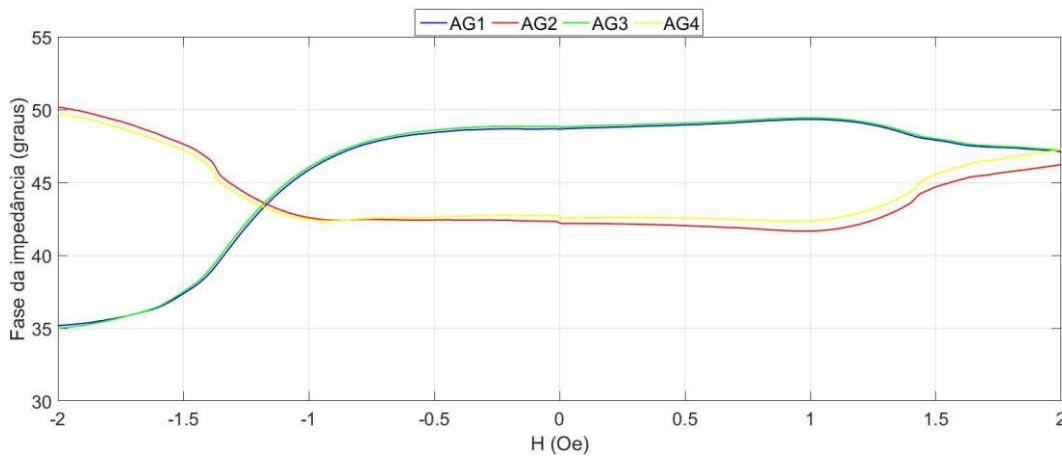


Figura 47 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados para cada caso apresentado na Tabela 19.

Observa-se que as curvas apresentadas na Figura 47 podem ser divididas em dois subgrupos em função de seu grau de similaridade. O primeiro subgrupo SB_1 é composto pelas curvas obtidas para as configurações AG_1 (codificação real sem normalização) e AG_3 (codificação inteira sem normalização) do algoritmo genético. Por sua vez, o segundo subgrupo SB_2 é composto pelas curvas obtidas para as configurações AG_2 (codificação real com normalização) e AG_4 (codificação inteira com normalização).

Inspecionando-se os gráficos apresentados, nota-se que a inclinação das curvas pertencentes a SB_1 , em torno de seus respectivos pontos de polarização H_{pol} (vide Tabela 19), são extremamente semelhantes. Por sua vez, esta mesma consideração pode ser feita a respeito das curvas pertencentes a SB_2 . Consequentemente, tem-se que a sensibilidade máxima das curvas pertencentes a SB_1 são muito próximas. Por meio de um raciocínio equivalente, também conclui-se que a sensibilidade máxima das curvas pertencentes a SB_2 são muito próximas. Em particular, tendo em vista as informações contidas na Tabela 19, tem-se que a sensibilidade das curvas pertencentes a SB_1 é de aproximadamente 22 °/Oe, enquanto que a apresentada pelas curvas pertencentes a SB_2 é de cerca de 34 °/Oe. Dessa forma, constata-se que a normalização efetuada tem grande impacto nas

soluções obtidas pelo AG, enquanto que a codificação não os afeta de forma tão significativa.

Destaca-se que as curvas pertencentes a SB_1 são obtidas excitando-se a amostra GMI com uma corrente com cerca de 16,7 MHz. Por outro lado, as curvas pertencentes a SB_2 são obtidas excitando-se a amostra GMI com uma corrente com cerca de 1,0 MHz. Dessa forma, verifica-se que a frequência de excitação tem um impacto no comportamento da fase da impedância das amostras GMI. Também, conclui-se que a normalização propiciou que o AG encontrasse soluções em baixas frequências, as quais são inclusive melhores do que as soluções obtidas em altas frequências. Esta afirmação é suportada pelos valores de S_{fase} obtidos: 22 °/Oe, em altas frequências, e 34 °/Oe, em baixas frequências. Por outro lado, a inspeção das curvas apresentadas na Figura 47 indica que a região linear, em torno de H_{pol} , apresentada pelas curvas pertencentes a SB_1 (altas frequências) é superior àquela apresentada pelas curvas pertencentes a SB_2 (baixas frequências).

O nível CC da corrente de excitação é um parâmetro que possibilita a indução de alterações significativas nas curvas de impedância em função do campo magnético, de sensores GMI. Em particular, conforme discutido no capítulo 2, a presença de um nível CC na corrente de excitação induz um comportamento assimétrico nestas curvas, denominado Magnetoimpedância Gigante Assimétrica (AGMI). Destaca-se que este comportamento assimétrico é perceptível em todas as quatro curvas apresentadas na Figura 47, conforme esperado, visto que em todos os casos a corrente de excitação utilizada possui componente CC.

Variações no nível CC afetam a assimetria e, conseqüentemente, a sensibilidade das amostras. Portanto, para uma determinada combinação dos demais parâmetros de otimização, existe um nível CC ótimo que maximiza a sensibilidade. Em particular, tendo em vista os resultados apresentados na Tabela 19, para as curvas pertencentes a SB_1 (altas frequências) este nível CC ficou em torno de 37 mA, enquanto que para as curvas pertencentes a SB_2 (baixas frequências) o valor obtido foi de aproximadamente 33 mA.

4.3.1. Influência da Amplitude da Corrente de Excitação

Estudos anteriores indicaram que variações na amplitude da corrente CA de excitação pouco afetam o comportamento da fase da impedância [3,33,41-42]. Entretanto, como o método aqui adotado possibilita uma melhor exploração do espaço de busca, decidiu-se efetuar avaliações nas quais a amplitude da corrente foi tratada como uma variável livre, a ser otimizada. Por sua vez, os resultados apresentados ao longo do capítulo 4 indicaram que em certas situações I_{ac} afeta significativamente a sensibilidade das amostras.

Os resultados obtidos para configurações do AG sem normalização da frequência, apresentados nas seções 4.1.1.2 e 4.2.1, indicaram que a amplitude não afeta significativamente os resultados, conforme observado em estudos anteriores [3,4,17,44]. Entretanto, os resultados obtidos para configurações do AG com normalização da frequência, apresentados nas seções 4.1.2.2 e 4.2.2, indicaram que a amplitude afeta significativamente os resultados. Em particular, observou-se que as sensibilidades ótimas obtidas ocorrem para amplitudes em torno de 2 mA, as quais são significativamente inferiores às convencionalmente adotadas (15 mA).

Ressalta-se que a obtenção destas novas soluções ótimas não está diretamente associada à normalização em si, mas sim ao fato de que ao se reduzir a frequência, aparentemente, deve-se também reduzir a amplitude da corrente para se otimizar a sensibilidade. Por sua vez, a normalização privilegia soluções pertencentes à região de baixas frequências, por isso a influência de I_{ca} na sensibilidade pode ser observada de forma mais acentuada ao se empregar o método de normalização descrito na seção 3.3.2.

De modo a se evidenciar de forma ainda mais clara a influência de I_{ca} na sensibilidade de fase (S_{fase}), realizaram-se novas análises de otimização utilizando-se o AG desenvolvido, com codificação real, com normalização logarítmica da frequência e fixando-se a amplitude da corrente (I_{ca}) em três valores distintos: 20 mA, 10 mA e 1,5 mA. A Tabela 20 apresenta a combinação de parâmetros livres (I_{cc} , f e H_{pol}) associada a máxima sensibilidade de fase encontrada (S_{fase}), cujo valor também é explicitado.

Tabela 20 – Resultados obtidos pelo sistema de otimização para diferentes valores da amplitude da corrente.

Amplitude da Corrente	$I_{ca} = 20 \text{ mA}$	$I_{ca} = 10 \text{ mA}$	$I_{ca} = 1.5 \text{ mA}$	Unidades
f	1177,53	1220,98	1030,68	kHz
I_{cc}	35,29	28,69	31,03	mA
H_{pol}	-1,4	-1,37	-1,38	Oe
S_{fase}	18,57	25,01	34,59	°/Oe

A Figura 48 apresenta as curvas de caracterização de fase da impedância em função do campo magnético, associadas a cada um dos casos indicados na Tabela 20. Cada curva de caracterização foi obtida ajustando-se a corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados na Tabela 20.

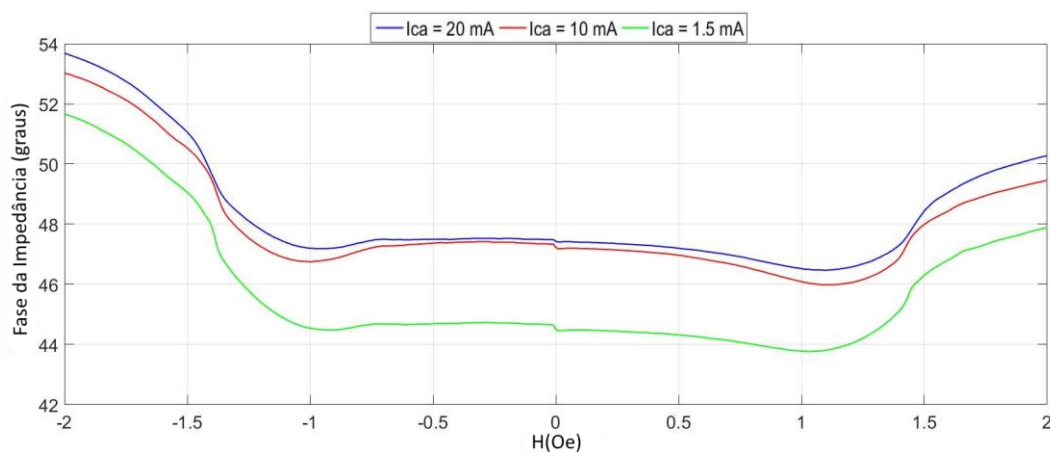


Figura 48 – Curvas experimentais de caracterização da fase da impedância em função do campo magnético, ajustando-se à corrente de excitação da amostra GMI avaliada de acordo com os valores de I_{cc} , I_{ca} e f especificados para cada caso da Tabela 19.

Os resultados indicados na Tabela 20 e na Figura 48 mostram que a sensibilidade máxima (S_{fase}) aumenta com a redução da amplitude da corrente. Em particular, ao se reduzir a amplitude da corrente de 20 mA para 1,5 mA, verifica-se que a sensibilidade sobe de 18,57 °/Oe para 34,59 °/Oe. Por outro lado, destaca-se que o projeto de um circuito de transdução que excite as amostras com amplitudes muito baixas pode ser problemático, pois os níveis de tensão passam a ser significativamente afetados por ruído. Dessa forma, a complexidade do circuito aumenta, pois deve-se buscar minimizar o ruído eletrônico.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

A sensibilidade de transdutores magnéticos (magnetômetros) é intimamente dependente da sensibilidade de seus elementos sensores. Consequentemente, a fim de se desenvolver magnetômetros de alta sensibilidade, capazes de medir campos magnéticos ultra-fracos, é imperativo que se otimize a sensibilidade dos sensores empregados na cadeia de transdução. Por sua vez, a sensibilidade de sensores magnéticos GMI é afetada por diversos parâmetros, tais como: nível CC (I_{cc}), amplitude (I_{ca}) e frequência (f) da corrente de excitação; além do campo magnético de polarização aplicado (H_{pol}). Entretanto, essa dependência ainda não é bem modelada quantitativamente, sendo que convencionalmente a definição da combinação destes parâmetros responsável pela maximização da sensibilidade dos sensores GMI, é baseada em um processo empírico de busca.

O sistema proposto e desenvolvido no presente trabalho possibilita a caracterização de amostras GMI genéricas, sendo capaz de identificar a combinação das variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}) responsável pela maximização de suas sensibilidades de fase (S_{fase}). Destaca-se que focou-se na otimização da sensibilidade de fase dos sensores, visto que trabalhos recentes mostraram que transdutores magnéticos GMI baseados em leituras da fase da impedância, são até 100 vezes mais sensíveis do que aqueles baseados no módulo da impedância [4,17–21].

O sistema de otimização desenvolvido é baseado no conceito de *hardware* evolucionário, sendo que o mesmo evolui para a solução ótima (maior S_{fase}) a partir de medições experimentais efetuadas diretamente por *hardware*. O sistema é controlado por um modelo computacional baseado em algoritmos genéticos, implementado de forma que os genes dos indivíduos da população representem os parâmetros de interesse que afetam a sensibilidade dos sensores (I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol}). Por sua vez, os equipamentos do sistema automático de caracterização têm seus valores ajustados pelos genes dos indivíduos, de modo que se possa medir

experimentalmente a sensibilidade correspondente a cada indivíduo, ou seja, a cada combinação de parâmetros de interesse. Por sua vez, o AG utiliza a medição experimental da sensibilidade como a função de avaliação de cada indivíduo presente na população.

Tendo em vista que as variáveis de interesse (I_{cc} , I_{ca} , f , H_{pol}) são números reais, a princípio, a codificação real seria a melhor opção a ser adotada para representação dos genes do algoritmo genético desenvolvido. Entretanto, como o processo de otimização é feito por meio de medições experimentais, verifica-se que os genes do AG desenvolvido (I_{cc} , I_{ca} , f , H_{pol}) não podem assumir valores contínuos. Na verdade, os mesmos só podem assumir valores discretos, associados a resolução dos equipamentos empregados para geração de I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol} . Dessa forma, empregando codificação real, o AG pode gerar indivíduos diferentes entre si, para o *software*, mas para os quais a sensibilidade de fase seja avaliada de forma idêntica, isto é, para a mesma combinação de I_{cc} , I_{ca} , f e H_{pol} , devido às limitações do *hardware*.

Consequentemente, de forma a melhor compatibilizar o AG com as características do problema abordado, decidiu-se avaliar também uma versão do AG, baseada na codificação inteira dos genes. Dessa forma, o algoritmo genético foi configurado de modo que cada gene só pudesse assumir um conjunto bem definido de valores discretos, tendo em vista as características dos equipamentos empregados, considerando os limites das faixas de variação de cada parâmetro e suas respectivas resoluções.

Por sua vez, ao se projetar o circuito eletrônico do magnetômetro é desejável que se obtenham sensibilidades elevadas em baixas frequências, pois dessa forma reduz-se a complexidade e custo do circuito. Entretanto, o espaço de busca da frequência f vai de 75 kHz até 30 MHz. Dessa forma, percebe-se que, por exemplo, o intervalo de frequências $75 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$ corresponde a apenas aproximadamente 3 % dos dados do espaço de busca. Consequentemente, dificulta-se a identificação de soluções ótimas (S_{fase} máxima), na região de baixas frequências, visto que cerca de 97 % dos dados pertencentes ao conjunto de frequências está acima de 1 MHz.

Dessa forma, a fim de priorizar a região de baixas frequências, propôs-se a aplicação de uma normalização logarítmica à variável frequência, a qual, conforme descrito na seção 3.3.2, torna as baixas frequências efetivamente mais

representativas, fazendo como que, por exemplo, o intervalo de frequências 75 kHz $< f < 1$ MHz passe a conter cerca de 43.3 % dos dados do espaço de busca de f , ao invés de apenas 3 %. Os algoritmos genéticos desenvolvidos foram testados tanto sem a normalização da frequência quanto com a normalização da frequência, a fim de se poder comparar os resultados provenientes destas duas metodologias.

Tendo em vista os aspectos supramencionados, foram desenvolvidas e avaliadas quatro diferentes configurações do algoritmo genético utilizado no processo de otimização. A configuração AG₁ emprega codificação real e não efetua a normalização da frequência, AG₂ emprega codificação real e normaliza a frequência, AG₃ emprega codificação inteira e não efetua a normalização da frequência e AG₄ emprega codificação inteira e normaliza a frequência.

Os resultados obtidos indicaram que, para os casos em que não se normalizou a frequência (AG₁ e AG₃), a frequência f associada a sensibilidade de fase S_{fase} retornada pelo AG é consideravelmente superior à retornada pelo AG ao se normalizar a frequência (AG₂ e AG₄). Em particular, a normalização da frequência propicia que se encontrem soluções ótimas em frequência cerca de 16 vezes inferiores aos valores de frequência tipicamente retornados por configurações do AG sem normalização. Destaca-se ainda, que os valores de S_{fase} retornados pelas configurações AG₂ e AG₄, com normalização, são cerca de 50 % maiores do que aqueles obtidos pelas configurações AG₁ e AG₃, sem normalização. Dessa forma, verifica-se que a normalização logarítmica implementada atende seu propósito, possibilitando uma melhor exploração da região de baixas frequências. Apesar dos aspectos favoráveis aqui destacados, os resultados obtidos também indicaram que, em baixas frequências, a região linear na vizinhança de H_{pol} (valor de campo onde se obtém sensibilidade de fase máxima) tende a ser menor do que a região tipicamente obtida para as soluções de altas frequências.

Por sua vez, conforme destacado na literatura [83], o nível CC da corrente afeta significativamente a sensibilidade das amostras, visto que ele induz assimetrias na curva de fase da impedância. Este efeito é conhecido como Magnetoimpedância Gigante Assimétrica (AGMI). Em particular, tem-se que I_{cc} afeta a inclinação das curvas de fase e, conseqüentemente, suas sensibilidades. Os resultados obtidos indicaram que, para a amostra GMI avaliada, os valores ótimos de I_{cc} ficaram tipicamente entre 30 mA e 40 mA, sendo perceptível que para as

soluções de baixas frequências eles tendem a se aproximar de 30 mA e para as soluções de altas frequências tendem a se aproximar de 40 mA.

A amplitude da corrente de excitação (I_{ca}) foi um parâmetro de otimização desconsiderado em muitos estudos anteriores, por considerar-se que o mesmo não impacta de forma efetiva a sensibilidade de fase [7–19]. Entretanto, as análises aqui realizadas indicaram que I_{ca} deve ser considerada uma variável livre no processo de otimização, permitindo variações significativas da sensibilidade, principalmente em baixas frequências. Os estudos realizados indicaram que, para amostra GMI avaliada, a sensibilidade de fase máxima tende a aumentar com a redução da amplitude da corrente (I_{ca}). Por outro lado, é importante destacar que ao se reduzir I_{ca} reduz-se também a queda de tensão sobre o elemento sensor e, consequentemente, dificulta-se sua leitura, pois estes níveis de tensão passam a ser mais afetados por ruído eletrônico. Dessa forma, para se tirar efetivamente proveito da elevação da sensibilidade advinda de reduções em I_{ca} , deve-se projetar o circuito a fim de se minimizar os níveis de ruído eletrônico.

As análises realizadas também indicaram que, ao se normalizar a frequência, o tempo de processamento tende a aumentar em mais de 50 %, independentemente de se empregar codificação real ou inteira. Para AG₄ (codificação inteira com normalização), o tempo médio de processamento é de aproximadamente 5,3 horas. Destaca-se que o processo evolutivo ocorre por iterações *software-hardware*, o que certamente acarreta em tempos de processamento superiores a um algoritmo de otimização implementado exclusivamente em *software*. Entretanto, por outro lado, a confiabilidade dos resultados aqui obtidos é significativamente superior, visto que a função de avaliação do AG é calculada a partir de parâmetros efetivamente medidos experimentalmente pelo sistema desenvolvido, ao invés de estimados por meio de um modelo matemático aproximado da amostra sensora.

A sensibilidade máxima obtida com o sistema desenvolvido na presente dissertação foi da ordem de 35 °/Oe, a qual é cerca de 4 vezes superior as sensibilidades máximas obtidas em trabalhos anteriormente publicados na literatura (9 °/Oe) [7,8,27–28,57], para amostras GMI de mesma composição Co₇₀Fe₅Si₁₅B₁₀ e com 3 cm de comprimento, espessura média de 60 µm e largura média de 1,5 mm. Destaca-se que, estes resultados reforçam que o método aqui proposto proporciona uma busca mais eficiente e eficaz dos dados contidos no espaço de busca.

Por sua vez, é razoável admitir que uma melhoria de 4 vezes na sensibilidade em $^{\circ}/\text{Oe}$ implica em um aumento de 4 vezes na sensibilidade total do magnetômetro GMI, contribuindo para a medição de campos magnéticos ultra-fracos.

Em função das características de desempenho aqui explicitadas, dentre as configurações de AG avaliadas, recomenda-se a adoção de AG4 (codificação inteira com normalização), com as quatro variáveis livres. Os resultados obtidos permitem concluir que o sistema implementado possibilita uma estimativa satisfatória do conjunto de parâmetros que resultam na maximização da sensibilidade de fase da amostra GMI avaliada.

O sistema apresentou boa repetibilidade dos resultados, com base nas análises preliminares aqui efetuadas. Entretanto, recomenda-se que o mesmo seja submetido a uma bateria maior de testes a fim de se poder estimar de forma mais fidedigna sua repetibilidade. Em geral, deseja-se que os transdutores magnéticos apresentem um comportamento linear ao longo de sua faixa de operação. Consequentemente, deve-se garantir que a sensibilidade não varie significativamente ao longo da faixa de campos magnéticos que o sensor é capaz de ler. Dessa forma, recomenda-se que em trabalhos futuros, o AG também leve em consideração a linearidade ao longo de uma dada faixa de campos. Em outras palavras, sugere-se que seja implementado um AG cuja função de avaliação (sensibilidade de fase) seja penalizada por eventuais não linearidades existentes ao longo da faixa de campos magnéticos de interesse.

Sugere-se que em trabalhos futuros seja avaliado se é possível diminuir o tempo de espera entre medições sucessivas da fase da impedância dos sensores, visto que este parâmetro afeta diretamente o tempo total do processo de otimização.

Tendo em vista que, aparentemente, existem múltiplas combinações dos parâmetros de interesse que implicam em valores elevados e aproximadamente iguais de S_{fase} , sugere-se que o comportamento do sistema seja avaliado ao se empregar outros algoritmos de otimização, que apresentem melhor desempenho na resolução de problemas multimodais, a fim de se poder comparar tais resultados com os aqui obtidos por meio do emprego de algoritmos genéticos.

Por sua vez, destaca-se que o desempenho de gradiômetros magnéticos está intimamente relacionado ao grau de homogeneidade de seus elementos sensores. Em trabalhos anteriores, verificou-se que muitas das amostras GMI analisadas possuem comportamentos de fase significativamente heterogêneos. Dessa forma,

propõe-se que, em trabalhos futuros, o método aqui desenvolvido seja adaptado, a fim de buscar a combinação de parâmetros (I_{cc} , I_{ca} , f , H_{pol}) responsável pela homogeneização das curvas de fase da impedância de duas amostras GMI heterogêneas, ao longo de uma dada faixa de campos.

Referências bibliográficas

- [1] LENZ, J.; EDELSTEIN, S. Magnetic sensors and their applications. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, n. 3, p. 631–649, 2006.
- [2] MACHADO, F.L.A.; SILVA, B.L. DA; REZENDE, S.M.; MARTINS, C.S. Giant ac magnetoresistance in the soft ferromagnet Co_{70.4}Fe_{4.6}Si₁₅B₁₀. **Journal of Applied Physics**, v. 75, n. 10, p. 6563–6565, 1994.
- [3] COSTA DA SILVA, E. desenvolvimento de transdutor baseado na fase da magnetoimpedância gigante para medição de campos biomagnéticos. 2010
- [4] COSTA DA SILVA, E. magnetômetros gmi de alta sensibilidade para medição de campos magnéticos ultra-fracos. 2013
- [5] PHAN, M.-H.; PENG, H.-X. Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications. **Progress in Materials Science**, v. 53, p. 323–420, 2008.
- [6] HAUSER, H.; KRAUS, L.; RIPKA, P. Giant magnetoimpedance sensors. **IEEE Instrum**, v. 4, p. 28–32, 2001.
- [7] KNOBEL, M.; PIROTA, K.R. Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 242–245, p. 33–40, 2002.
- [8] PIROTA, K. Magnetoimpedância Gigante em Materiais Ferromagnéticos Amorfos: Uma Breve Introdução. **Physicae**, v. 1, n. 1, p. 37–44, 2000.
- [9] KRAUS, L. GMI modeling and material optimization. **Sensors and Actuators A**, v. 106, p. 187–194, 2003.
- [10] MAHDI, A.. E.; PANINA, L.; MAPPS, D. Some new horizons in magnetic sensing: High-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 105, n. 3, p. 271–285, 2003.
- [11] BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C.; SILVA, E.C.; GUSMÃO, L. a. P. Electronic approach for enhancing impedance phase sensitivity of GMI magnetic sensors. **Electronics Letters**, v. 49, n. 6, p. 396–397, 2013.
- [12] GUSMÃO, L.A.P.; CAVALCANTI, F.M.P.; HALL BARBOSA, C.; COSTA MONTEIRO, E.; MACHADO, F.L.. Desenvolvimento de

- Transdutor Magnético baseado em Magnetoimpedância Gigante. In: 6th International Seminar on Electrical Metrology (SEMETRO). **Proceedings of the 6th International Seminar on Electrical Metrology**, p. 158–161, 2005.
- [13] LOUZADA, D.R. desenvolvimento de um transdutor de pressão de alta sensibilidade, baseado no fenomeno de magnetoimpedancia gigante, para aplicação biomédica. 2006
- [14] CAVALCANTI, F.M.P. desenvolvimento e caracterização de um transdutor magnético baseado no fenômeno da magnetoimpedância gigante. 2005
- [15] GELIANG, Y.; XIONGZHU, B.; BO, Y.; YUNLONG, L.; CHAO, X. Differential-type GMI magnetic sensor based on longitudinal excitation. **IEEE Sensors Journal**, v. 11, p. 2273–2278, 2011.
- [16] ZHAO, W.; BU, X.; YU, G.; XIANG, C. Feedback-type giant magneto-impedance sensor based on longitudinal excitation. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 324, n. 19, p. 3073–3077, 2012.
- [17] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L.A.P.; HALL BARBOSA, C.R.; COSTA MONTEIRO, E. Transdutor de pressão, baseado nas características de fase do efeito GMI, destinado a aplicações biomédicas. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 21, n. 6, p. 598–608, 2010.
- [18] SILVA, E.C.; GUSMÃO, L.A.P.; MONTEIRO, E.C.; BARBOSA, C.R.H. Characterization of the Magnitude Impedance of Ribbon-Shaped GMI Samples and their use in Transducers aimed at Biomedical Applications.
- [19] DOHUN KIM, D.; HYUNGKYUNG KIM, H.; SUNHEE PARK, S.; WOORYOUNG LEE, W.; WON YOUNG JEUNG, W.Y. Operating Field Optimization of Giant Magneto Impedance (GMI) Devices in Micro Scale for Magnetic Bead Detection. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 44, n. 11, p. 3985–3988, 2008.
- [20] COSTA SILVA, E.; GUSMÃO, L.A.P.; HALL BARBOSA, C.R.; COSTA MONTEIRO, E. High sensitivity triaxial magnetic field transducer, based on the phase characteristics of the GMI effect. **19th IMEKO World Congress 2009**, v. 4, n. January, p. 2572–2576, 2009.
- [21] SILVA, E.C. DA; GUSMÃO, L.A.P. DE; HALL BARBOSA, C.R.; MONTEIRO, E.C.; ARAÚJO MACHADO, F.L. DE Sensitivity improvement of GMI magnetic and pressure transducers for biomedical

- measurements. **Revista Brasileira de Engenharia Biomedica**, v. 27, n. 2, p. 79–89, 2011.
- [22] CARNEIRO, J.H.C.C.; SILVA, E.C.; GUSMÃO, L.A.P.; BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C. System for Automatic Characterization of Giant Magneto-Impedance Samples. 2012.
- [23] COSTA, J.H. sistema automático de caracterização de fitas gmi. 2011
- [24] SILVA, E.C.; CARNEIRO, J.H.C.C.; GUSMÃO, L.A.P.; BARBOSA, C.R.H.; ELISABETH, C. Development of a fast and reliable system for the automatic characterization of Giant magnetoimpedance samples. **Acta Imeko**, v. 2, n. 1, p. 21–26, 2013.
- [25] MAHDI, A.E.; MAPPS, D.J. High-Tc SQUIDS: The ultra sensitive sensors for non-destructive testing and biomagnetism. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 81, n. 1, p. 367–370, 2000.
- [26] CLARKE, J.; BRAGINSKI, A.I. **The SQUID Handbook: Vol 2 Applications of SQUIDS and SQUID Systems**. 2006.
- [27] LENZ, J.E.J.E. A review of magnetic sensors. **Proceedings of the IEEE**, v. 78, n. 6, p. 973–989, 1990.
- [28] ANDRÄ, W.; NOWAK, H. **Magnetism in Medicine: A Handbook**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2007.
- [29] GRÜNBERG, P.A. From spin waves to giant magnetoresistance and beyond: The 2007 Nobel Prize for Physics was shared by Albert Fert and Peter Grünberg. **Reviews of Modern Physics**, v. 80, n. 4, p. 1531–1540, 2008.
- [30] RIPKA, P.; JANOSEK, M. Advances in Magnetic Field Sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 10, n. 6, p. 1108–1116, 2010.
- [31] NOR, A.F.M.; HILL, E.W.; BIRTHWISTLE, K.; PARKER, M.R. Noise in NiFeCo/Cu spin valve sensors. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 81, n. 1, p. 67–70, 2000.
- [32] RIPKA, P. **Magnetic sensors and magnetometers**. Artech House, 2001.
- [33] VEERDONK, R.J.M. VAN DE; BELIËN, P.J.L.; SCHEP, K.M.; KOOLS, J.C.S.; NOOIJER, M.C. DE; GIJS, M.A.M.; COEHOORN, R.; JONGE, W.J.M. DE 1/F Noise in Anisotropic and Giant Magnetoresistive Elements. **Journal of Applied Physics**, v. 82, n. 12, p. 6152, 1997.
- [34] EDELSTEIN, A.S.; FISCHER, G.A. Minimizing 1/f noise in magnetic sensors using a microelectromechanical system flux concentrator. **Journal of**

- Applied Physics**, v. 91, n. 10, p. 7795, 2002.
- [35] EDELSTEIN, A.S.; FISCHER, G.A.; PEDERSEN, M.; NOWAK, E.R.; CHENG, S.F.; NORDMAN, C.A. Progress toward a thousandfold reduction in $1/f$ noise in magnetic sensors using an ac microelectromechanical system flux concentrator (invited). **Journal of Applied Physics**, v. 99, n. 8, p. 08B317, 2006.
- [36] PALHA, R. & LIZARRALDE, F. magnetômetro de fluxo saturado (fluxgate) em arranjo gradiométrico para detecção de dutos e cabos. 2003
- [37] KOCH, H. Mature SQUID-systems and their application. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 7, n. 2, p. 3738–3743, 1997.
- [38] ACUÑA, M.H.; H., M. Space-based magnetometers. **Review of Scientific Instruments**, v. 73, n. 11, p. 3717–3736, 2002.
- [39] RIPKA, P. Advances in fluxgate sensors. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 106, n. 1, p. 8–14, 2003.
- [40] HONKURA, Y. Development of amorphous wire type MI sensors for automobile use. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 249, n. 1, p. 375–381, 2002.
- [41] ATALAY, F.E.; ATALAY, S. A position sensor based on magneto-impedance effect. **Physica Status Solidi (A) Applied Research**, v. 189, n. 2, p. 311–315, 2002.
- [42] DELOOZE, P.; PANINA, L.; MAPPS, D.; UENO, K.; SANO, H. Effect of transverse magnetic field on thin-film magneto impedance and application to magnetic recording. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 272, p. 2266–2268, 2004.
- [43] GARCÍA-MARTÍN, J.; GÓMEZ-GIL, J.; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E. Non-destructive techniques based on eddy current testing. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 11, n. 3, p. 2525–65, 2011.
- [44] SILVA, E.C.; GUSMÃO, L.A.P.; BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C. Medição Da Onda De Pulso Arterial Por Magnetômetro Gmi E Marcador Magnético. p. 1402–1405, 2014.
- [45] KURLYANDSKAYA, G. V.; SÁNCHEZ, M.L.; HERNANDO, B.; PRIDA, V.M.; GORRIA, P.; TEJEDOR, M. Giant-magnetoimpedance-based sensitive element as a model for biosensors. **Applied Physics Letters**, v. 82, n. 18, p. 3053, 2003.

- [46] CHIRIAC, H.; TIBU, M.; MOGA, A.-E.; HEREA, D.D. Magnetic GMI sensor for detection of biomolecules. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 293, p. 671–676, 2005.
- [47] UCHIYAMA, T.; NAKAYAMA, S.; MOHRI, K.; BUSHIDA, K. Biomagnetic field detection using very high sensitivity magnetoimpedance sensors for medical applications. **physica status solidi (a)**, v. 206, n. 4, p. 639–643, 2009.
- [48] LEIPNER, Y. métodos para homogeneização das características de fase da impedância de sensores gmi. 2014
- [49] GONÇALVES, L.A.P. & PEREIRA, L.A. efeito hall planar e magneto impedância gigante em liga ferromagnética amorfa $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{5}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$. 2006
- [50] KAWASHIMA, K.; KOHZAWA, T.; YOSHIDA, H.; PANINA, L. V. Magneto-inductive effect (MI effect) in amorphous wires. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 28, n. 5 pt 2, p. 3150–3152, 1992.
- [51] DUQUE, J.G. dos S., KNOBEL, M., & CAMPINAS, U.E. de magnetoimpedancia gigante linear e não-linear em ligas amorfas. 2005
- [52] PANINA, L.V. Asymmetrical giant magneto-impedance (AGMI) in amorphous wires. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 249, n. 1, p. 278–287, 2002.
- [53] BEACH, R.S.; BERKOWITZ, A.E. Sensitive field- and frequency-dependent impedance spectra of amorphous FeCoSiB wire and ribbon (invited). **Journal of Applied Physics**, v. 76, n. 10, p. 6209–6213, 1994.
- [54] CAVALCANTI, F.M.P. desenvolvimento e caracterização de um transdutor magnetico baseado no fenomeno da magnetoimpedancia gigante. 2005
- [55] GONÇALVES, L.A.P.; SOARES, J.M.; MACHADO, F.L.A.; RODRIGUES, A.R. Hall and giant magnetoimpedance effects in the $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{5}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ metallic glass. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 352, n. 32–35, p. 3659–3662, 2006.
- [56] MACHADO, F.L.A.; RODRIGUES, A.R.; PUÇA, A.A.; ARAUJO, A.E.P. de Highly Asymmetric Giant Magnetoimpedance. **Materials Science Forum**, v. 302–303, p. 202–208, 1999.
- [57] BYON, K.S.; YU, S.-C.; KIM, C.G.; YOON, S.S. Asymmetric characteristics of magnetoimpedance in amorphous $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ wire. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 226–230, n. April 2015,

- p. 718–720, 2001.
- [58] PHAN, M.-H.; YU, S.-C.; KIM, C.G.; VÁZQUEZ, M. Origin of asymmetrical magnetoimpedance in a Co-based amorphous microwire due to dc bias current. **Applied Physics Letters**, v. 83, n. 14, p. 2871–2873, 2003.
- [59] GOLDBERG, D.E. (David E.; E., D. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [60] MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. Springer-Verlag, 1996.372–373p.
- [61] OTERO, J.A.B. algoritmos genéticos aplicados à solução do problema inverso biomagnético. 2016
- [62] ALMEIDA, M. uma metodologia baseada em algoritmos geneticos para melhorar o perfil de tensão diário de ´ sistemas de potência. 2012
- [63] VARGAS ABS DA CRUZ, A. otimização de planejamentos com restrição de precedência usando algoritmos genéticos e co-evolução cooperativa. 2003
- [64] GERMAN MALDONADO TAVARA, E. & GERMÁN, M.T.E. algoritmo genético multiobjetivo na predição de estruturas proteicas no modelo hidrofóbico polar. 2012
- [65] CASTRO, R. otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos. 0. 2001
- [66] BARRICO, C.M.C.S. otimização evolucionária multi-objectivo em ambientes incertos : pesquisa de soluções robustas. 2007
- [67] FOGEL, D.B. Evolutionary algorithms in theory and practice. **Complexity**, v. 2, n. 4, p. 26–27, 1997.
- [68] MITCHELL, M. (Computer scientist) **An introduction to genetic algorithms**. MIT Press, 1996.
- [69] AURÉLIO, M.; PACHECO, C. Algoritmos Genéticos: Princípios E Aplicações. 1999.
- [70] OLIVEIRA, L. algoritmos geneticos híbridos para redução de perdas técnicas em redes primárias de distribuição considerando variações de demandas. 2005
- [71] GOLDBERG, D.E. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. 1989.
- [72] FOGEL, D.B. A Comparison of Evolutionary Programming and Genetic

- Algorithms on Selected Constrained Optimization Problems. **Simulation**, v. 64, n. 6, p. 397–404, 1995.
- [73] LIEPINS, G.E.; VOSE, M.D. Characterizing crossover in genetic algorithms. **Annals of Mathematics and Artificial Intelligence**, v. 5, n. 1, p. 27–34, 1992.
- [74] SORSA, A.; PELTOKANGAS, R.; LEIVISK, K. **Real-coded genetic algorithms and nonlinear parameter identification**. 2008.
- [75] DEEP, K.; THAKUR, M. A new crossover operator for real coded genetic algorithms. **Applied Mathematics and Computation**, v. 193, n. 1, p. 211–230, 2007.
- [76] GONCALVES MENDES, B. otimização da localização de poços de petróleo com completção seca utilizando algoritmos genéticos. 2013
- [77] DEEP, K.; THAKUR, M. A new mutation operator for real coded genetic algorithms. **Applied Mathematics and Computation**, v. 193, n. 1, p. 211–230, 2007.
- [78] RICARDO LINDEN **Algoritmos Genéticos**. 2012.
- [79] MENDES SIMAO, L. otimização da programação da produção em refinarias de petróleo utilizando algoritmos genéticos e co-evolução cooperativa. 2004
- [80] PITTA BOTELHO, A.C.O.; VELLASCO, M.M.B.R.; HALL BARBOSA, C.R.; COSTA SILVA, E. Neuro-genetic system for optimization of GMI samples sensitivity. **Neural Networks**, v. 75, p. 141–149, 2016.
- [81] TECHNOLOGIES, K. 4285A Precision LCR Meter. 2014.
- [82] ROBERT, R. Bobina de Helmholtz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 1, p. 40–44, 2003.
- [83] SILVA, E.C.; GUSMÃO, L. a P.; BARBOSA, C.R.H.; MONTEIRO, E.C.; MACHADO, F.L. a High sensitivity giant magnetoimpedance (GMI) magnetic transducer: magnitude versus phase sensing. **Measurement Science and Technology**, v. 22, n. 3, p. 35204, 2011.
- [84] DEEP, K.; SINGH, K.P.; KANSAL, M.L.; MOHAN, C. A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 212, n. 2, p. 505–518, 2009.
- [85] PITTA BOTELHO, A.C.O. modelo inteligente para otimização da sensibilidade de amostras gmi. 2014