

2 Caracterização das Amostras GMI

2.1. Caracterização Experimental: Metodologia

Visando ao desenvolvimento de um transdutor magnético GMI de elevada sensibilidade, capaz de detectar campos ultra-fracos, e sabendo que este transdutor utiliza as fitas GMI como seus elementos sensores, deseja-se otimizar (maximizar) as sensibilidades de módulo S_{mod} e/ou fase S_{fas} das amostras GMI. Essas sensibilidades são definidas como:

$$S_{mod} = \frac{d|Z_{sens}(H)|}{dH} \quad (27)$$

$$S_{fas} = \frac{d\theta_{sens}(H)}{dH} \quad (28)$$

Por sua vez, a sensibilidade é tipicamente afetada por uma série de parâmetros, como amplitude, frequência e nível CC da corrente de excitação; dimensões (comprimento, largura, espessura) das amostras GMI; campo magnético de polarização (gerado por uma fonte externa a fim de garantir que o sensor opere em sua faixa mais sensível); entre outros. Assim, as amostras GMI foram experimentalmente caracterizadas de forma a se verificar qual é o conjunto de parâmetros que leva às sensibilidades ótimas de módulo S_{mod} e fase S_{fas} .

A corrente de condicionamento (ou excitação) i_C , utilizada para condicionar as amostras GMI é expressa de acordo com a eq. (29),

$$i_C = I_{CC} + I_{ca} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t), \quad (29)$$

onde I_{CC} é o nível CC da corrente i_C , e I_{ca} é a amplitude e f é a frequência da componente alternada (CA) de i_C .

No procedimento de caracterização, todas as medições foram realizadas com amostras GMI ($\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$) em forma de fita, com espessura média de 60 μm e largura de 1,5 mm. Realizaram-se análises para correntes CC variando entre

0 mA e 100 mA e para frequências de 75 kHz a 30 MHz. Foi também estudada a influência do comprimento da fita, analisando-se amostras com 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm. Percebeu-se que variações na amplitude da corrente CA de excitação pouco afetam o comportamento da fase. Assim, manteve-se esse parâmetro fixo em 15 mA [83].

Objetivando tornar mais ágil o processo de caracterização das amostras GMI, desenvolveu-se um sistema de caracterização automática [112, 116], que permitiu uma redução significativa do tempo despendido no processo de caracterização. No processo manual era necessário cerca de uma hora para se completar uma medição típica, sendo que o sistema desenvolvido faz o mesmo em cerca de cinco minutos. A maior velocidade na realização das medições permitiu a obtenção de um volume muito maior de dados experimentais, os quais são cruciais para diversos métodos de análise, visando à otimização da sensibilidade dos sensores.

A técnica de soldagem empregada objetivando a conexão das extremidades das fitas GMI aos terminais elétricos - estiletos de metal (p. ex. latão ou cobre) - foi a solda de ponto. Por sua vez, os fios condutores são soldados aos terminais elétricos por solda de Estanho-Chumbo.

Durante os procedimentos de caracterização, as fitas GMI são colocadas no centro de uma Bobina de Helmholtz, como indicado na Figura 13, de forma que o campo gerado pela Bobina seja longitudinal ao comprimento das fitas. Ainda, o conjunto fita-bobina é posicionado de forma a garantir que a direção do campo magnético da Terra, medido com auxílio de uma bússola, seja perpendicular ao comprimento das fitas (Figura 13). Assim, minimiza-se a influência deste nas medições (as fitas GMI utilizadas são do tipo LMI, ou seja, a sensibilidade a campos perpendiculares é muito baixa) [36, 83-84, 113, 116].

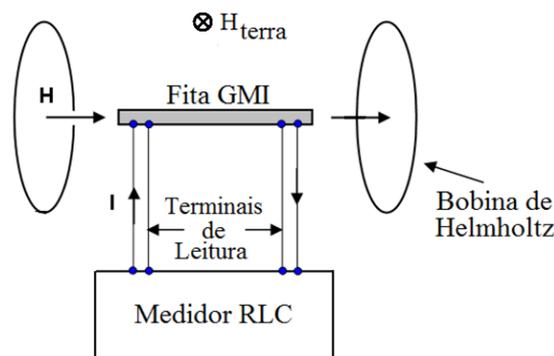


Figura 13 – Diagrama de Blocos do sistema utilizado na caracterização das fitas GMI.

A fim de minimizar a interferência eletromagnética ambiental, os ensaios de caracterização das amostras GMI deveriam ser realizados dentro de câmaras magneticamente blindadas. Contudo, a caracterização é feita utilizando campos CC, de modo que a câmara utilizada deve ser capaz de atenuar significativamente campos com baixas frequências, o que não se verifica para as blindagens convencionais (por exemplo, alumínio ou gaiolas de Faraday), as quais atenuam satisfatoriamente apenas frequências acima de centenas de hertz. Dessa forma, seria necessário empregar câmaras blindadas feitas com materiais que possuam altíssimas permeabilidades magnéticas em baixas frequências (por exemplo, μ -metal), as quais possuem custos elevados [4, 7, 95-97, 121-122].

Assim, destaca-se que os resultados aqui obtidos são provenientes de ensaios realizados em ambientes desprovidos de blindagem, pois a ordem de grandeza da interferência é significativamente inferior aos valores dos campos magnéticos gerados durante o procedimento de caracterização das amostras.

As medições de módulo e fase foram realizadas com auxílio de um Medidor RLC (4285A, Agilent), o qual também foi o responsável pelo condicionamento (CC e CA) das fitas. Por sua vez, o campo magnético gerado pela bobina de Helmholtz é controlado por uma fonte de corrente CC, de acordo com a eq. (30),

$$H = \frac{8NI}{5\sqrt{5}R}, \quad (30)$$

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 bobina de Helmholtz disponível no LaBioMet (PUC-Rio) possui 48 espiras em cada bobina e um raio de 15 cm. Logo, o campo magnético em oersteds, $H[Oe]$, no centro da bobina de Helmholtz, em função da corrente em amperes, $I[A]$, que atravessa a bobina, é dado por:

$$H[Oe] = 2,87.I[A]. \quad (31)$$

O oersted (Oe) é a unidade de campo magnético do sistema CGS, a qual é amplamente utilizada na literatura do efeito GMI. A unidade SI (*International System of Units*) de campo magnético é o ampere por metro ($A\ m^{-1}$), o qual relaciona-se com o oersted pela expressão

$$1 \text{ Oe} \triangleq \frac{1}{4\pi} \times 10^3 \text{ Am}^{-1}. \quad (32)$$

A Figura 14 apresenta a Bobina de Helmholtz utilizada no processo de caracterização das amostras, com uma fita GMI em seu centro.

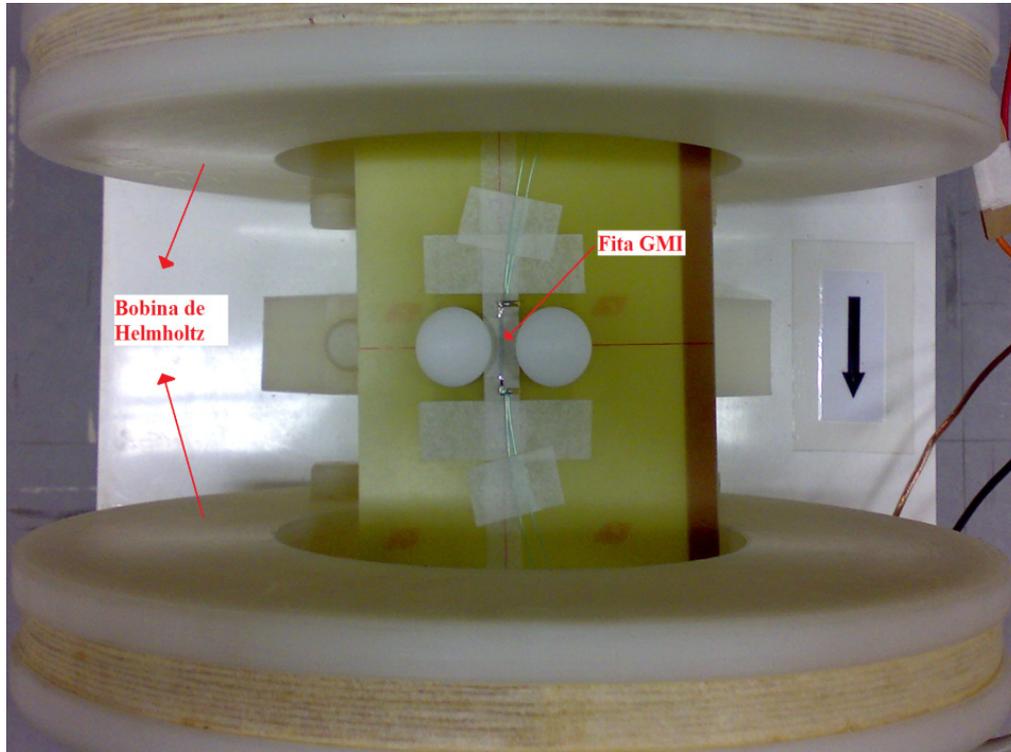


Figura 14 – Bobina de Helmholtz com a fita GMI posicionada em seu centro.

As curvas de caracterização da impedância (módulo e fase) das amostras GMI em função do campo magnético externo apresentadas nesta Tese foram levantadas considerando-se a histerese [36, 123]. Ou seja, as medições de impedância são realizadas com amostras previamente desmagnetizadas e começam na situação em que a componente do campo magnético paralela à fita é nula ($H_{início} = 0$). Em seguida, aumenta-se o campo até um valor máximo ($H_{máx}$) e, na sequência, reduz-se o campo, passando por $H_{início} = 0$, até um valor mínimo $H_{min} = -H_{máx}$. Finalmente, a fim de completar o ciclo de histerese, percorre-se o trajeto de H_{min} a $H_{início}$.

Dessa forma, para cada valor do campo magnético tem-se dois valores de módulo e dois valores de fase, exceto para os extremos da curva $H_{máx}$ e H_{min} , para os quais tem-se apenas um valor de módulo e outro de fase, e para $H_{início}$, onde se obtêm 3 valores de módulo e outros 3 de fase.

Destaca-se que as curvas de caracterização apresentadas nesse capítulo são as “curvas médias de histerese”. Esta curva é obtida ponto-a-ponto fazendo-se as médias aritméticas dos valores de módulo, ou fase, obtidos experimentalmente para um mesmo valor do campo magnético externo. Ainda, ressalta-se que os resultados experimentais apresentados nas subseções 2.1.1 e 2.1.2 são provenientes de medições realizadas durante os trabalhos de mestrado do autor [82]. Tais resultados são reapresentados no presente trabalho a fim de se evidenciar como a impedância das amostras GMI é afetada pelo comprimento das amostras, nível CC e frequência da corrente de condicionamento.

Para implementação do magnetômetro GMI desenvolvido no presente trabalho optou-se por se utilizar uma amostra GMI com 3 cm de comprimento. Dessa forma, com base nos dados experimentais previamente adquiridos e na discussão apresentada na seção 2.1.3, durante os trabalhos deste doutorado, inspecionou-se mais detalhadamente o comportamento da amostra GMI selecionada na vizinhança da sua região de sensibilidade de fase máxima. Esta análise é explicitada na seção 2.2.

2.1.1. Caracterização Experimental do Módulo da Impedância

A Figura 15 apresenta as curvas características de variação do módulo da impedância das amostras GMI analisadas (elementos sensores) em função do campo magnético CC, paralelo ao comprimento das amostras, para diversas frequências f da corrente de condicionamento i_C . A variação do módulo é medida em relação à $|Z_{sens}(0)|$, que é o valor do módulo da impedância quando o campo magnético externo é nulo. Por sua vez, a Figura 16 apresenta as curvas características do módulo da impedância $|Z_{sens}(H)|$ das amostras GMI em função do campo magnético, para diversos níveis CC (I_{cc}) da corrente i_C . Em ambas as Figuras (Figura 15 e 16), apresentam-se os resultados provenientes de medições realizadas em amostras em forma de fita com quatro comprimentos diferentes: 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm [82-83].

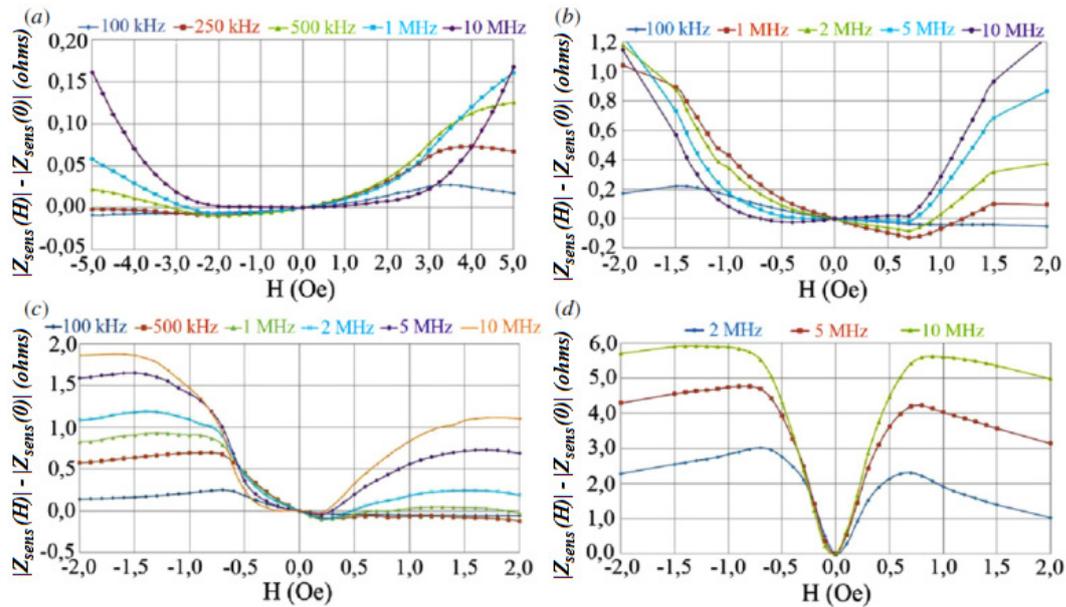


Figura 15 – Módulo da impedância de amostras GMI, em forma de fita, em função do campo magnético, submetidas a $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi f t)]$ mA, com os seguintes comprimentos: (a) 1 cm, (b) 3 cm, (c) 5 cm e (d) 15 cm.

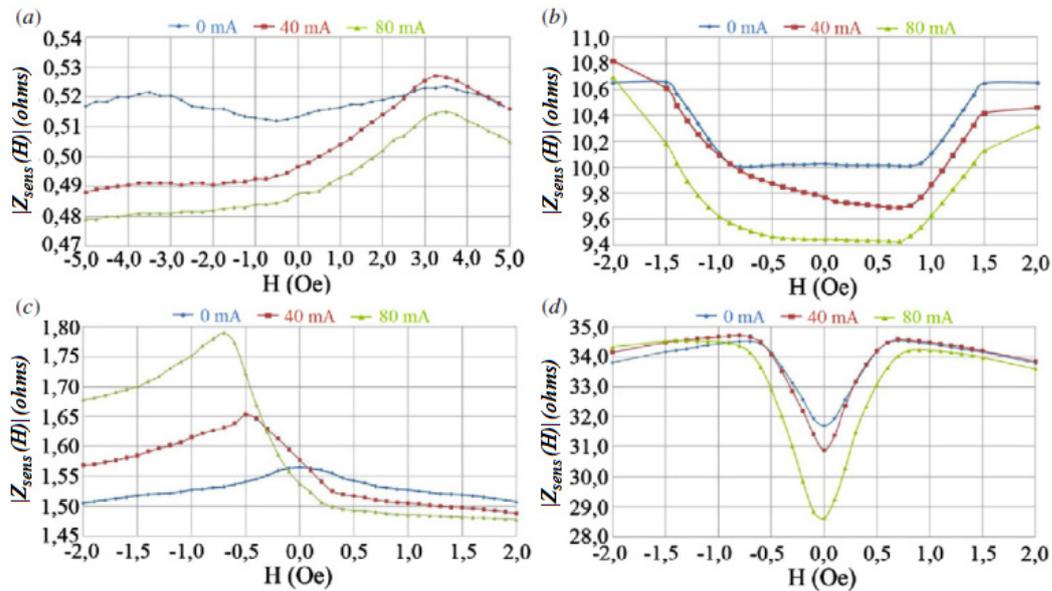


Figura 16 – Módulo da impedância de amostras GMI, em forma de fita, em função do campo magnético; para amostras com diversos comprimentos: (a) 1 cm, excitada por $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$ mA, (b) 3 cm, excitada por $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 5 \cdot 10^6 t)]$ mA, (c) 5 cm, excitada por $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$ mA e (d) 15 cm, excitada por $i_C = [I_{cc} + 15 \text{ sen}(2\pi 10 \cdot 10^6 t)]$ mA.

2.1.2. Caracterização Experimental da Fase da Impedância

A Figura 17 apresenta as curvas características de variação da fase da impedância das amostras GMI analisadas (elementos sensores) em função do campo magnético CC, paralelo ao comprimento das amostras, para diversas frequências f da corrente de condicionamento i_C . A variação da fase é medida em relação a $\theta_{sens}(0)$, que é o valor da fase da impedância quando o campo magnético externo é nulo. Por sua vez, a Figura 18 apresenta as curvas características da fase da impedância $\theta_{sens}(H)$ das amostras GMI em função do campo magnético, para diversos níveis CC (I_{cc}) da corrente i_C . Em ambas as Figuras (Figura 17 e 18), apresentam-se os resultados provenientes de medições realizadas em amostras em forma de fita com quatro comprimentos diferentes: 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm [82-83].

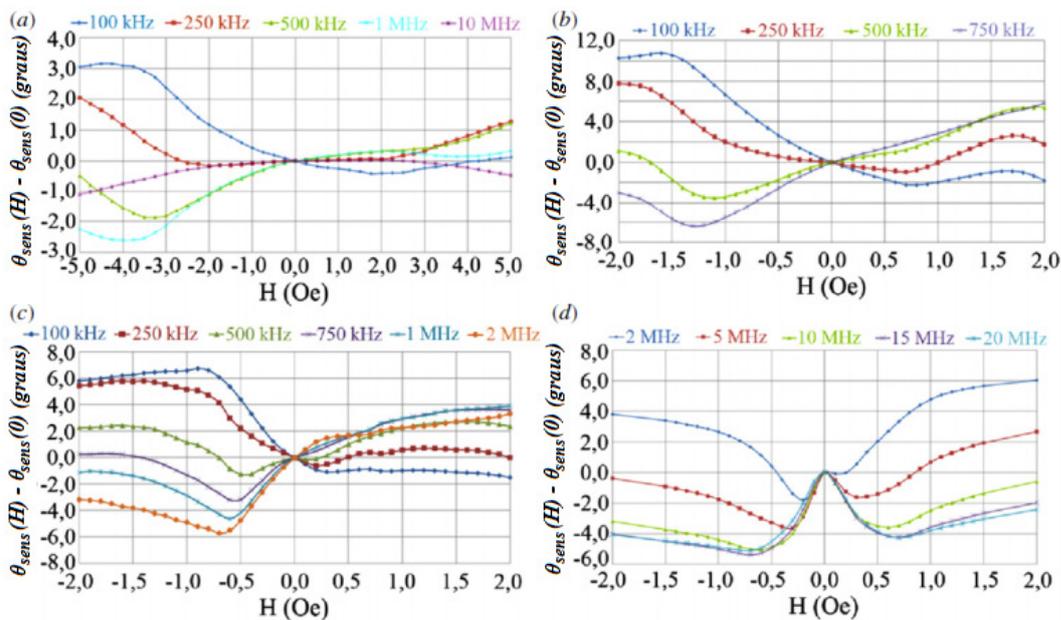


Figura 17 – Fase da impedância de amostras GMI, em forma de fita, em função do campo magnético, submetidas a $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi f t)]$ mA, com os seguintes comprimentos: (a) 1 cm, (b) 3 cm, (c) 5 cm e (d) 15 cm.

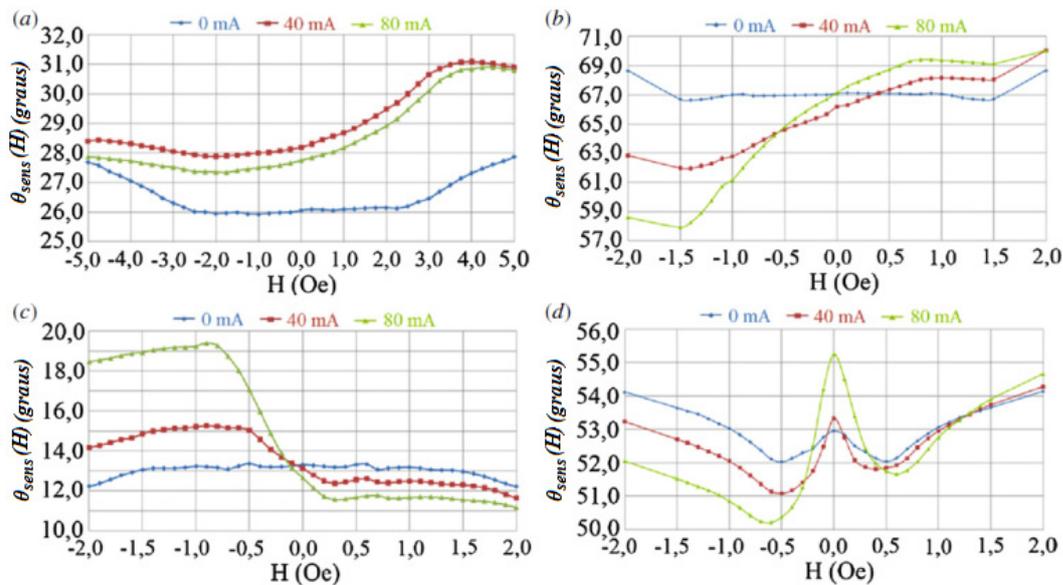


Figura 18 –Fase da impedância de amostras GMI, em forma de fita, em função do campo magnético; para amostras com diversos comprimentos: (a) 1 cm, excitada por $i_c = [I_{cc} + 15 \sin(2\pi 10^5 t)]$ mA, (b) 3 cm, excitada por $i_c = [I_{cc} + 15 \sin(2\pi 2 \cdot 10^6 t)]$ mA, (c) 5 cm, excitada por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

2.1.3. Análise dos Resultados Experimentais

Os gráficos apresentados (Figuras 15 a 18) indicam que as características de módulo e fase das amostras GMI são afetadas por todos os parâmetros analisados: comprimento das amostras, nível CC e frequência da corrente de excitação.

É claramente perceptível que o efeito AGMI está associado aos níveis CC da corrente de excitação, os quais afetam significativamente as sensibilidades de módulo (Figura 16) e fase (Figura 18). Isto significa que, quando apropriadamente selecionados, a adição de níveis CC a correntes de excitação puramente alternadas pode elevar consideravelmente a sensibilidade das amostras GMI.

Observando-se as características de módulo em função do campo magnético, pode-se verificar que a sensibilidade destas curvas tende a aumentar com a frequência da corrente de excitação; porém, também, nota-se que tal tendência tende a saturar para frequências acima de 10 MHz (Figura 15). Por outro lado, a inspeção das características de fase em função do campo magnético permite que se conclua que, para a faixa de frequências analisada, a sensibilidade

máxima ocorre para duas frequências: uma da ordem de quilohertz e outra em torno de alguns megahertz – Figura 17 [81, 83].

A variação do comprimento das amostras GMI afeta de forma não-linear a dependência de módulo e fase em função da frequência e do nível CC da corrente de excitação. Foi verificado que existe um comprimento para o qual a sensibilidade específica (sensibilidade por unidade de comprimento) atinge seu valor ótimo, o qual não ocorre para a amostra com o maior comprimento.

A Tabela 3 apresenta, para cada um dos comprimentos analisados, as sensibilidades máximas de módulo e fase das amostras GMI em função do campo magnético, indicando os parâmetros de condicionamento experimentalmente utilizados para a obtenção da respectiva sensibilidade. Para fins de comparação, a respectiva sensibilidade específica de cada amostra também é apresentada na Tabela 3. Dessa forma, pode-se facilmente verificar qual o melhor comprimento de amostra, isto é, aquele que implica na maior sensibilidade específica.

Tabela 3 – Sensibilidade ótima de módulo e fase das amostras GMI, em função do comprimento e da corrente de excitação.

Tipo	Compr.	Corrente de Excitação			Sensibilidade	Sensibilidade Específica
		Amplitude	Frequência	Nível CC		
Módulo	1 cm	15 mA	10 MHz	80 mA	0,09 Ω Oe ⁻¹	0,09 Ω (Oe cm) ⁻¹
	3 cm		10 MHz	80 mA	1,42 Ω Oe ⁻¹	0,47 Ω (Oe cm) ⁻¹
	5 cm		10 MHz	80 mA	4,20 Ω Oe ⁻¹	0,84 Ω (Oe cm) ⁻¹
	15 cm		10 MHz	80 mA	11,59 Ω Oe ⁻¹	0,77 Ω (Oe cm) ⁻¹
Fase	1 cm		100 kHz	80 mA	1,36° Oe ⁻¹	1,36° (Oe cm) ⁻¹
	3 cm		125 kHz	80 mA	9,48° Oe ⁻¹	3,16° (Oe cm) ⁻¹
	5 cm		100 kHz	80 mA	10,80° Oe ⁻¹	2,16° (Oe cm) ⁻¹
	15 cm		10 MHz	100 mA	17,41° Oe ⁻¹	1,16° (Oe cm) ⁻¹

Inspecionando a Tabela 3, verifica-se que, enquanto a sensibilidade (módulo e fase) aumenta com o comprimento da amostra GMI, a sensibilidade específica possui pontos de máximo, 3,16° (Oe cm)⁻¹, para a fase em 3 cm, e 0,84 Ω (Oe cm)⁻¹, para o módulo em 5 cm [83].

Todas as sensibilidades de módulo máximas ocorreram para a frequência de 10 MHz, o que corrobora a hipótese de que altas sensibilidades de módulo dependem de altas frequências da corrente de excitação. Entretanto, a análise das sensibilidades de fase da impedância permite que se conclua que as sensibilidades ótimas ocorrem para 100 kHz (1 e 5 cm) e 125 kHz (3 cm). No caso da amostra GMI com 3 cm de comprimento, a vizinhança de 100 kHz foi experimentalmente inspecionada em detalhes, isto é, em passos de frequência menores que nos outros casos (1, 5 e 15 cm), justificando a pequena diferença obtida entre a frequência ótima para 3 cm (125 kHz) e a frequência ótima para amostras de 1 cm e 5 cm (100 kHz).

A amostra de 15 cm não foi caracterizada para frequências da ordem de 100 kHz, pois se objetivava empregá-la em transdutores magnéticos GMI baseados nas características de módulo, os quais, de acordo com a literatura, apresentam sensibilidades ótimas em frequências muito superiores a 100 kHz [36, 64]. Assim, esta amostra foi experimentalmente analisada apenas para frequências acima de 1 MHz, justificando o fato do valor ótimo de frequência desta amostra ter sido 10 MHz, conforme apresentado na Tabela 3, ou seja, aproximadamente 100 vezes acima do obtido para os demais comprimentos analisados. Ainda, considerando todo o conjunto de medições, verifica-se que para todos os demais comprimentos analisados existem sensibilidades máximas de fase para duas frequências distintas – uma da ordem de 100 kHz e outra da ordem de alguns megahertz – sendo que se pode inferir que a amostra de 15 cm também deve possuir um máximo de sensibilidade em torno de 100 kHz [81, 83].

2.1.4. Otimização da Sensibilidade das Amostras GMI

Conforme previamente discutido, a sensibilidade dos transdutores magnéticos está diretamente associada à sensibilidade de seus elementos sensores. Dessa forma, a otimização da sensibilidade dos elementos sensores é fundamental. No caso de amostras GMI, a sensibilidade é afetada por diversos parâmetros, e essa dependência ainda não é bem modelada quantitativamente de forma suficientemente abrangente, sendo que a busca do condicionamento ótimo é, usualmente, empírica [1-2, 36, 64-67].

Assim, no presente trabalho, desenvolveu-se um modelo computacional capaz de auxiliar os procedimentos experimentais adotados, no intuito de se definir qual a combinação ótima dos parâmetros de condicionamento responsável por maximizar a sensibilidade das amostras GMI. Redes Neurais são um excelente método de aproximação de funções, pois são altamente imunes ao ruído das variáveis de entrada e não demandam o conhecimento prévio do tipo de função que relaciona entradas e saídas [124-127]. Estas condições levaram à seleção desta ferramenta para a implementação do modelo, o qual baseia-se em duas Redes Neurais, uma para modelar a sensibilidade do módulo da impedância do efeito GMI, S_{mod} , e outra para modelar a sensibilidade da fase da impedância, S_{fas} , respectivamente definidas pelas eqs. (27) e (28). Ambas as redes implementadas possuem quatro variáveis de entrada: comprimento das amostras, nível CC (indutor de assimetria - AGMI), frequência da corrente de excitação e campo magnético externo. Informações detalhadas sobre este trabalho desenvolvido são apresentadas no apêndice A [113].

2.2. Características da Amostra GMI Selecionada

Os desenvolvimentos experimentais apresentados nos capítulos 3 (excetuando-se a seção 3.1) e 4 utilizaram como elemento sensor uma amostra GMI com 3 cm de comprimento. Após analisar-se a dependência de suas curvas características, de fase da impedância em função do campo magnético, em relação à amplitude, frequência e nível CC da corrente de excitação, optou-se por condicionar esta amostra com uma corrente CA com 15 mA de amplitude e 100 kHz de frequência, superposta a um nível CC de 80 mA, visto que esta foi a situação para a qual obteve-se uma sensibilidade máxima de fase ($6,8^\circ \text{ Oe}^{-1}$). As curvas experimentais de histerese, de módulo $|Z_{sens}(H)|$ e fase $\theta_{sens}(H)$ da impedância, são respectivamente apresentadas nas Figuras 19(a) e 19(b); enquanto que as respectivas curvas médias de módulo e fase são explicitadas nas Figuras 20(a) e 20(b).

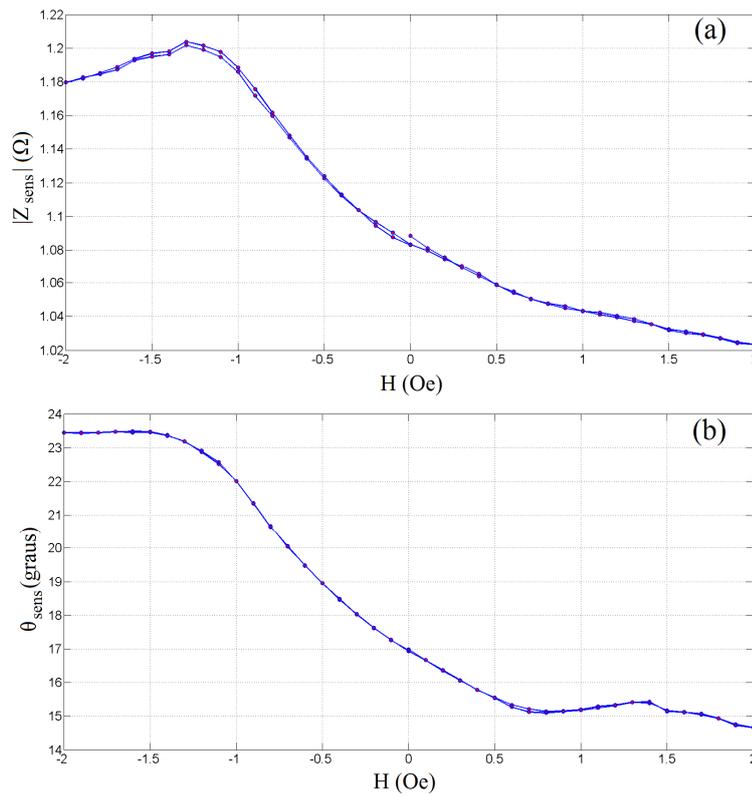


Figura 19 – Curvas de Histerese de Módulo e Fase da amostra GMI com 3 cm de comprimento, excitada por $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$ mA. (a) Módulo da Impedância em função do campo magnético; e (b) Fase da impedância em função do campo magnético.

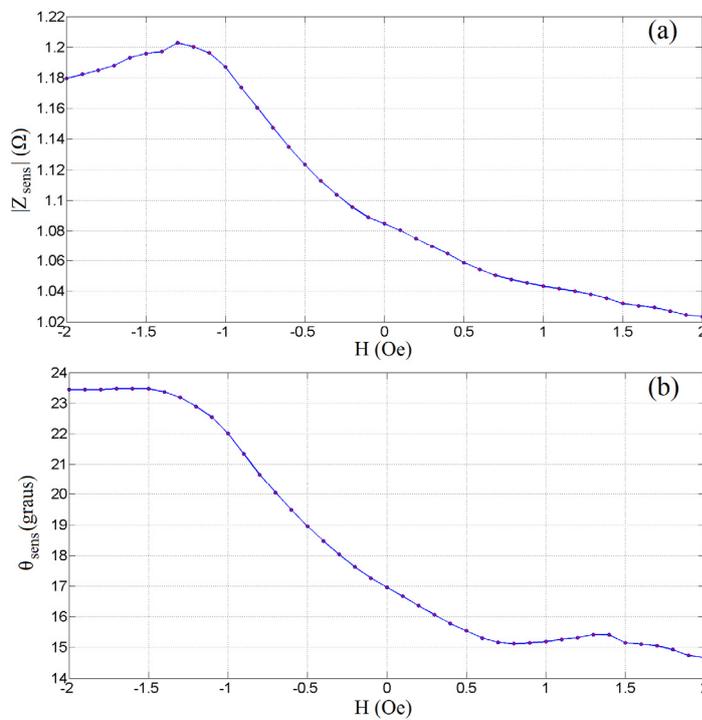


Figura 20 – Curvas Médias de Módulo e Fase da amostra GMI com 3 cm de comprimento, excitada por $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$ mA. (a) Módulo da Impedância em função do campo magnético; e (b) Fase da impedância em função do campo magnético.

Observando-se a Figura 19, verifica-se que a histerese é satisfatoriamente pequena, sendo que, na curva de fase (Figura 19(b)), ela só é visualmente perceptível na vizinhança de 0,7 Oe. Essa é uma característica extremamente desejável tendo-se em vista o emprego do elemento sensor no desenvolvimento de um transdutor magnético.

Por meio da Figura 20(b), nota-se que a região entre -0,4 Oe e -1,0 Oe apresenta alta sensibilidade, em graus por oersted, e é satisfatoriamente linear, indicando que, dentro desta região, a sensibilidade é aproximadamente constante. Desta forma, esta faixa de campos magnéticos é a região mais adequada para operação do transdutor magnético GMI. Em particular, a fim de se utilizar a maior excursão simétrica possível, é indicado que se polarize o sensor no ponto médio desta região de operação, ou seja, em $H_{pol} = -0,7$ Oe. Destaca-se ainda que, a partir dos dados experimentais apresentados, verifica-se que a sensibilidade máxima é de aproximadamente $6,8^\circ \text{ Oe}^{-1}$.

2.2.1. Modelo elétrico da amostra GMI selecionada

Conforme discutido na seção 1.1.6.1 e explicitado na eq. (5), sabe-se que amostras GMI podem ser eletricamente modeladas por uma resistência $R_{sens}(H)$ em série com uma indutância $L_{sens}(H)$ [36, 83]. Por sua vez, com base nas medições experimentais de módulo e fase, apresentadas na Figura 20, e utilizando-se as eqs. (33) e (34) podem-se determinar, respectivamente, as características de R_{sens} e L_{sens} em função de H . Estas características são explicitadas na Figura 21, e serão utilizadas nos exemplos de aplicação do método de amplificação da sensibilidade de fase, descrito no capítulo 3.

$$R_{sens}(H) = |Z_{sens}(H)| \cos \theta_{sens}(H) \quad (33)$$

$$L_{sens}(H) = \frac{|Z_{sens}(H)| \sin \theta_{sens}(H)}{\omega} \quad (34)$$

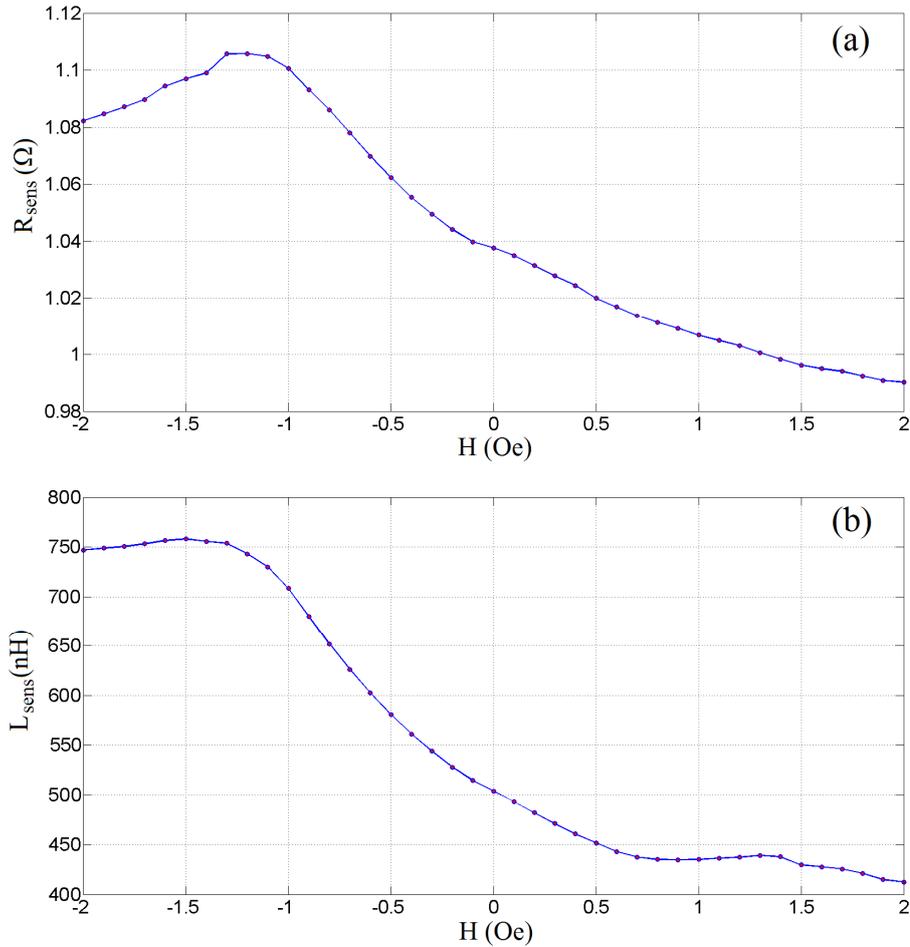


Figura 21 – Curvas Médias de Resistência e Indutância da amostra GMI com 3 cm de comprimento, excitada por $i_C = [80 + 15 \text{ sen}(2\pi 10^5 t)]$ mA. (a) Resistência em função do campo magnético; e (b) Indutância em função do campo magnético.

Na região de operação (-0,4 Oe até -1,0 Oe), ambas as curvas (Figura 21(a) e 21(b)) são satisfatoriamente lineares, podendo ser adequadamente modeladas por um polinômio de 1º grau, ou seja, uma reta. Dessa forma, na região de operação, para o campo magnético H expresso em oersteds, tem-se que a eq. (35) apresenta a expressão analítica de $R_{sens}(H)$, em ohms, e a eq. (36) a de $L_{sens}(H)$, em henrys.

$$R_{sens}(H) = -0,0762 \times H + 1,0245 \quad (35)$$

$$L_{sens}(H) = (-246,25 \times H + 457,68) \times 10^{-9} \quad (36)$$

2.2.2. Sensibilidade aos parâmetros da corrente de condicionamento

A dependência da fase da impedância da amostra utilizada em relação a perturbações nos parâmetros (amplitude, frequência e nível CC) da corrente de condicionamento foi experimentalmente avaliada, objetivando-se verificar se o comportamento da fase não é significativamente afetado por tais perturbações.

A Figura 22(a) exibe as características de fase da amostra GMI utilizada em função do campo magnético, para diferentes valores da amplitude da corrente de excitação I_{ca} , entre 10 mA e 20 mA. A fim de permitir uma melhor interpretação dos resultados experimentais obtidos e sabendo-se que se optou por excitar as amostras com uma corrente $I_{ca} = 15$ mA, apresenta-se ainda a Figura 22(b), que mostra as variações provocadas na fase da impedância $\Delta\theta_{I_{ca}}$, atribuídas a variações da amplitude I_{ca} da corrente de excitação, em torno do valor selecionado de 15 mA. Matematicamente, define-se $\Delta\theta_{I_{ca}}$ como

$$\Delta\theta_{I_{ca}}(H) = \theta_{sens}(H, I_{ca}) - \theta_{sens}(H, I_{ca} = 15mA). \quad (37)$$

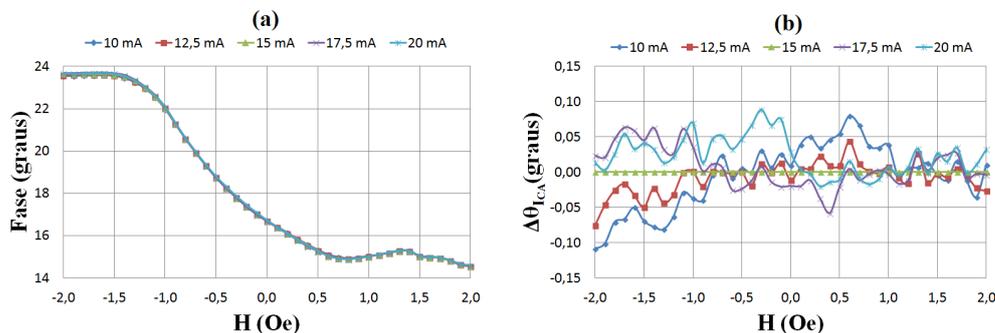


Figura 22 – (a) Curvas de fase da impedância e (b) Curvas de variação de fase $\Delta\theta_{I_{ca}}$ em função do campo magnético, para diferentes valores de amplitude I_{ca} da corrente de excitação (10 mA, 12,5 mA, 15 mA, 17,5 mA e 20 mA).

Observando-se a Figura 22(a) percebe-se que as variações feitas em I_{ca} praticamente não afetam a curva de fase original $\theta_{sens}(H, I_{ca} = 15$ mA), visto que uma inspeção visual permite apenas que se verifique que todas as curvas de fase estão praticamente superpostas, independentemente de I_{ca} . Por sua vez, a Figura 22(b) permite que se quantifiquem, de forma mais adequada, as variações de fase advindas das perturbações em I_{ca} . Destaca-se que, para $I_{ca} = 15$ mA, a curva de $\Delta\theta_{I_{ca}}(H)$ tem todos os seus valores iguais a zero, em decorrência da definição feita na eq. (37).

A análise da Figura 22(b) indica que, para todos os valores de I_{ca} avaliados, sempre se obtém $|\Delta\theta_{Ica}(H)| < 0,12^\circ$; reforçando a afirmação de que perturbações em I_{ca} pouco afetam os valores de fase. Por sua vez, por meio dos resultados obtidos, também se pode concluir que, na vizinhança de $H_{pol} = -0,7$ Oe, o parâmetro $|\partial\theta/\partial I_{ca}|$ é da ordem de $0,01^\circ \text{ mA}^{-1}$. No entanto, deve-se mencionar que o comportamento apresentado na Figura 22(b) é significativamente aleatório, sendo, em sua maior parte, atribuído à incerteza do sistema de medição. Dessa forma, tem-se que as variações de fase atribuídas exclusivamente a I_{ca} são ainda menores, ou seja, os valores obtidos para $|\Delta\theta_{Ica}(H)|$ e $|\partial\theta/\partial I_{ca}|$ são limites superiores desses parâmetros, sendo que seus valores reais são ainda menores.

A Figura 23(a) exhibe as características de fase da amostra GMI utilizada em função do campo magnético, para diferentes valores de frequência f da corrente de excitação, entre 95 kHz e 105 kHz. A fim de permitir uma melhor interpretação dos resultados experimentais obtidos e sabendo-se que se optou por excitar as amostras com uma corrente com $f = 100$ kHz, apresenta-se ainda a Figura 23(b) que mostra as variações provocadas na fase da impedância $\Delta\theta_f$, atribuídas a variações da frequência f da corrente de excitação, em torno do valor selecionado de 100 kHz. Matematicamente, define-se $\Delta\theta_f$ como

$$\Delta\theta_f(H) = \theta_{sens}(H, f) - \theta_{sens}(H, f = 100\text{kHz}). \quad (38)$$

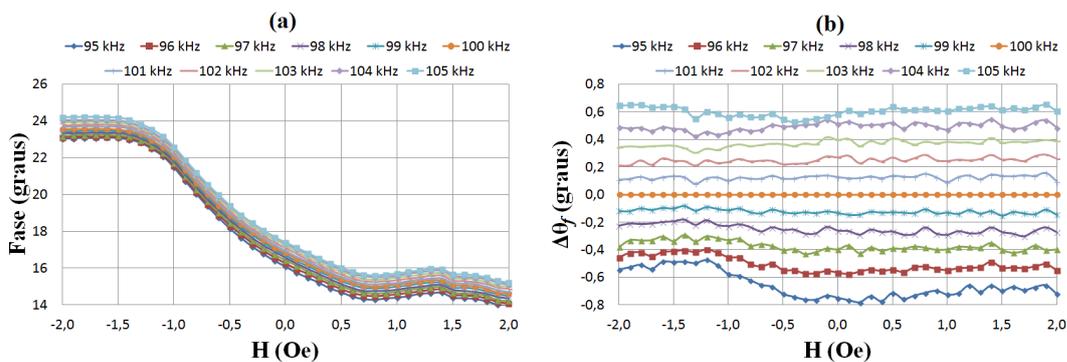


Figura 23 – (a) Curvas de fase da impedância e (b) Curvas de variação de fase $\Delta\theta_{Ica}$ em função do campo magnético, para diferentes valores de frequência f da corrente de excitação (95 kHz a 105 kHz, em passos de 1 kHz).

Observando-se a Figura 23(a) percebe-se que as variações feitas em f não afetam significativamente a morfologia da curva de fase original $\theta_{sens}(H, f = 100 \text{ kHz})$. Consequentemente, pode-se inferir que pequenas variações na frequência f , em torno de 100 kHz, não acarretarão em variações significativas

da sensibilidade de fase, que por definição é a derivada de $\theta_{sens}(H)$ em relação ao campo magnético H . Por outro lado, ao se variar a frequência f , observa-se uma pequena variação no valor absoluto da fase da impedância. Este fato é melhor visualizado inspecionando-se a Figura 23(b), de onde pode-se verificar que, para a faixa de frequências avaliada, obteve-se $|\Delta\theta_f(H)| < 0,8^\circ$. Destaca-se que, para $f=100$ kHz, a curva de $\Delta\theta_f(H)$ tem todos os seus valores iguais a zero, em decorrência da definição feita na eq. (38).

Ao contrário da dependência da fase com a amplitude da corrente, verifica-se que a dependência da fase com a frequência apresenta uma clara tendência, sendo que a análise da Figura 23 deixa claro que, na vizinhança de $f=100$ kHz, o valor absoluto da fase aumenta gradualmente com a frequência. Dessa forma, por meio dos resultados obtidos, também se pode concluir que, na vizinhança de $H_{pol} = -0,7$ Oe, o parâmetro $|\partial\theta/\partial f|$ é da ordem de $0,12^\circ \text{ kHz}^{-1}$. Ressalta-se que, atualmente, é relativamente simples implementar/utilizar osciladores, em 100 kHz, que possuam incertezas inferiores a 1% em sua frequência nominal. Assim, no pior caso, ter-se-iam variações de fase da ordem de $0,12^\circ$ em função da incerteza do oscilador.

A Figura 24 exibe as características de fase da amostra GMI utilizada em função do campo magnético, para diferentes valores do nível CC I_{CC} da corrente de excitação, entre 0 mA e 100 mA.

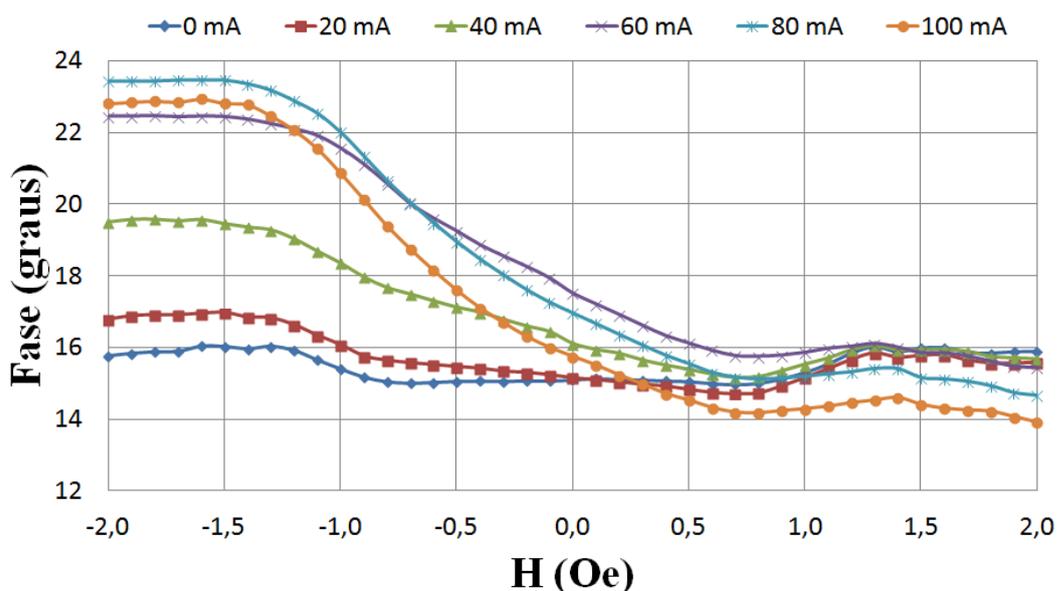


Figura 24 – Curvas de fase da impedância em função do campo magnético, para diferentes níveis CC I_{CC} da corrente de excitação (0 mA a 100 mA, em passos de 20 mA).

Conforme esperado, os resultados experimentais indicados na Figura 24 explicitam a indução do efeito AGMI por nível CC de corrente. A curva de fase para $I_{CC} = 0$ mA é quase perfeitamente simétrica porém, ao se aumentar I_{CC} verifica-se claramente o surgimento de assimetria. Este efeito provoca alterações significativas tanto no valor absoluto de $\theta_{sens}(H)$ quanto na sensibilidade de fase.

Na Figura 24, pode-se observar que, até $I_{CC} = 80$ mA, a sensibilidade de fase, na vizinhança de $H_{pol} = -0,7$ Oe, aumenta com o nível CC. No entanto, não se verifica um aumento significativo de sensibilidade entre as curvas com $I_{CC} = 80$ mA e com $I_{CC} = 100$ mA. Este fato levou a seleção do nível CC de 80 mA para excitação das amostras. Também, pode-se constatar que variações do nível CC implicam em grandes alterações no comportamento de $\theta_{sens}(H)$, porém esta dependência enfraquece para variações em torno de níveis CC iguais ou superiores a 80 mA. Ainda, por meio dos resultados obtidos, também se pode concluir que, na vizinhança de $H_{pol} = -0,7$ Oe, o parâmetro $|\partial\theta/\partial I_{CC}|$ é sempre igual ou inferior a $0,05^\circ \text{ mA}^{-1}$.

Tendo em vista os resultados obtidos e a análise realizada nesta seção pode-se concluir que, excitando-se a amostra GMI com uma corrente com 15 mA de amplitude, 100 kHz de frequência e 80 mA de nível CC, suas características de fase serão fracamente afetadas por pequenas perturbações nos parâmetros da corrente de excitação.