

HOMOGENEIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE FASE DE AMOSTRAS GMI PARA LEITURA GRADIOMÉTRICA

Leonardo Gouvêa e Silva Fortaleza

Projeto de Graduação



HOMOGENEIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE FASE DE AMOSTRAS GMI PARA LEITURA GRADIOMÉTRICA

Aluno(s): Leonardo Gouvêa e Silva Fortaleza

Orientador(es): Moisés Henrique Szwarcman

Luiz Antônio Pereira de Gusmão

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Agradecimentos

À Deus, sem o qual nada seria possível.

Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram.

À minha avó, que tornou possíveis os estudos na PUC.

Ao meu orientador, Moisés Henrique Szwarcman, por toda a compreensão e por possibilitar a realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Luiz Antônio Pereira de Gusmão, cuja paciência e experiência são extraordinários, encontrando novos caminhos para proceder que muito agregaram ao trabalho.

Ao Eduardo Costa da Silva, cujo entusiasmo pela ciência é contagiante, sempre incentivando a busca por inovações e cuja linha de pesquisa direcionou a este trabalho.

Ao Prof. Fernando Luis de Araújo Machado (Departamento de Física / UFPE), pelas amostras GMI fornecidas.

Aos integrantes do CBPF, por permitirem a confecção da placa de circuito impresso.

À minha família e amigos, pelo suporte e por compreenderem os momentos de ausência devido aos estudos.

Resumo

Os sensores de campo magnético baseados no efeito da Magnetoimpedância Gigante (GMI) têm sido estudados como uma nova alternativa na medição de campos magnéticos ultra-fracos. Para a realização de tais medições é necessária a redução da interferência magnética por meio do emprego de configurações gradiométricas, cujo desempenho depende da homogeneidade das características da impedância dos elementos sensores. Neste trabalho são inicialmente descritos estudos teóricos destinados a implementação de um circuito eletrônico capaz de homogeneizar as características de fase de amostras GMI. Na sequência, é mencionada a evolução do circuito desenvolvido e são apresentados resultados de simulações que levaram à configuração final da montagem experimental.

Palavras-chave: Homogeneização; Fase da Impedância; Magnetoimpedância Gigante; Sensores Magnéticos; Instrumentação Eletrônica.

HOMOGENEZATION OF PHASE CHARACTERISTICS IN GMI SAMPLES FOR GRADIOMETRIC READING

Abstract

Sensors based on the Giant Magnetoimpedance (GMI) effect have been studied as a new alternative in the measurement of ultra-weak magnetic fields. These measurements require reduced magnetic interference, obtained by employing gradiometric configurations, whose performance depends on the homogeneity of the impedance characteristics of the sensor elements. In this work theoretical studies aiming at the implementation of an electronic circuit capable of homogenizing the phase characteristics of GMI samples are presented, followed by the description of the evolution of the developed circuit and are introduced simulation results that lead to the final configuration of the experimental assembly of the circuit.

Keywords: Homogenization; Impedance Phase; Giant Magnetoimpedance; Magnetic Sensors; Electronic Instrumentation.

Sumário

1.	Introdução	1
2.	Magnetoimpedância Gigante (GMI).....	2
2.1.	Definição	2
2.2.	Magnetoimpedância longitudinal (LMI)	2
2.3.	GMI assimétrica (AGMI)	3
3.	Caracterização de Amostras GMI	4
3.1.	Sistema automático de caracterização.....	4
3.2.	Resultados experimentais das caracterizações.....	5
4.	Métodos de Homogeneização	6
4.1.	Considerações iniciais	6
4.2.	Método do intervalo	7
4.3.	Método da derivada/ponto.....	9
4.4.	Método do gradiente.....	12
4.5.	Comparação entre os métodos.....	15
5.	Circuito de Homogeneização	18
5.1.	FDNR (<i>Frequency-dependent negative resistance</i>)	18
5.2.	Primeira versão do circuito de homogeneização.....	19
5.3.	Adaptações do circuito homogeneizador	20
6.	Simulações do Circuito de Homogeneização.....	22
7.	Montagem Experimental	30
8.	Conclusões	33
9.	Bibliografia	34
10.	Anexos	35
10.1.	Arquivo do TopSpice para análises no domínio do tempo (.TRAN) e da frequência (.AC) ...	35
10.2.	Arquivo do MatLab para resultados teóricos dos diversos métodos.....	37
10.3.	Arquivo do MatLab para resultados do método do gradiente a partir das simulações	43
10.4.	Folhas de características dos amplificadores operacionais utilizados: OPA2822 e LM6172:	49

Índice de Figuras

Figura 1 - Medição típica do efeito GMI através da diferença de potencial	2
Figura 2 - Configuração Experimental para indução de AGMI numa amostra em forma de fio	3
Figura 3 - Exemplo de curvas GMI(%) em função do campo magnético externo, para uma mesma amostra submetida à diferentes correntes CC	3
Figura 4 - Diagrama do Sistema Automático de Caracterização de Amostras GMI	4
Figura 5 - Curvas de Fase da Impedância para três fitas GMI distintas, porém de mesma composição ..	5
Figura 6 - Diagrama de Blocos do Circuito de Homogeneização	6
Figura 7 - Curvas de Fase da Impedância em função do Campo Magnético	7
Figura 8 - Resultado teórico da homogeneização através do Método do Intervalo para a Fita REF+	8
Figura 9 - Resultado teórico da homogeneização através do Método do Intervalo para a Fita REF-	8
Figura 10 - Comparação entre as derivadas da fase da impedância em relação ao campo magnético para o método do intervalo.....	9
Figura 11 - Resultado teórico da homogeneização através do Método da Derivada/Ponto para a Fita REF+	11
Figura 12 - Resultado teórico da homogeneização através do Método da Derivada/Ponto para a Fita REF-	11
Figura 13 - Comparação entre as derivadas da fase da impedância em relação ao campo magnético para o método da derivada/ponto.....	12
Figura 14 - Resultado teórico da homogeneização através do Método do Gradiente para a Fita REF	14
Figura 15 - Comparação entre as derivadas da fase da impedância em relação ao campo magnético para o método do gradiente.....	14
Figura 16 - Erro Absoluto de Homogeneização para os Diversos Métodos	15
Figura 17 - Erro Percentual de Homogeneização para os Diversos Métodos	16
Figura 18 - (a) <i>Generalized Immittance Converter</i> (GIC) e (b) <i>Frequency-Dependent Negative Resistance</i> (FDNR).....	18
Figura 19 - Esquemático da primeira versão do circuito homogeneizador.....	19
Figura 20 - Versão aprimorada do circuito homogeneizador	21
Figura 21 -Tensões e correntes em função do tempo para o circuito homogeneizador	22
Figura 22 - Parte Imaginária e Parte Real da Impedância Equivalente do FDNR em função da frequência e do campo magnético H.....	23
Figura 23 - Fase e Módulo da Impedância Equivalente do Circuito Homogeneizador em função da frequência e do campo magnético H	24
Figura 24 - Módulo da Impedância Equivalente em Função do Campo Magnético para o Método do Gradiente.....	25
Figura 25 - Fase da Impedância Equivalente em Função do Campo Magnético para o Método do Gradiente	25
Figura 26 - Resistência Série Equivalente em Função do Campo Magnético para o Método do Gradiente	26
Figura 27 - Reatância Série Equivalente em Função do Campo Magnético para o Método do Gradiente	26
Figura 28 - Derivada de Fase da Impedância em Relação ao Campo Magnético para o Método do Gradiente.....	27
Figura 29 - Erro Absoluto de Sensibilidade para o Método do Gradiente.....	27
Figura 30 - Erro Percentual de Sensibilidade para o Método do Gradiente	28
Figura 31 - Vista Superior do Projeto das Trilhas e Nós do Circuito Homogeneizador para Fabricação em Prototipadora	30
Figura 32 - Vista Inferior da Placa Fabricada pela Prototipadora (Lado do Cobre).....	31
Figura 33 - Vista Superior do Circuito Homogeneizador Montado.....	32

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores Estatísticos para o Erro Percentual de Sensibilidade para os Diversos Métodos, considerando apenas o intervalo entre -1,25 e -0,25 Oe	16
Tabela 2 - Valores Estatísticos para o Erro Percentual de Sensibilidade para os Diversos Métodos, considerando apenas o intervalo entre -0,80 e -0,60 Oe	17
Tabela 3 - Valores Estatísticos para o Erro Percentual de Sensibilidade para o Método do Gradiente usando diferentes Amplificadores Operacionais, considerando apenas o intervalo entre -1,25 e -0,25 Oe	28
Tabela 5 - Valores Estatísticos para o Erro Percentual de Sensibilidade para o Método do Gradiente usando diferentes Amplificadores Operacionais, considerando apenas o intervalo entre -0,80 e -0,60 Oe	29

1. Introdução

O efeito da Magnetoimpedância Gigante (GMI) é caracterizado pela variação da impedância de uma amostra de material amorfo de acordo com o campo magnético que o atravessa [1]. Estudos sobre esse tema têm sido intensificados desde os anos 1990, devido a vantagens como o baixo custo para produção em escala, a boa sensibilidade e a grande faixa de frequências de operação apresentados por essas amostras.

O Laboratório de Biometrologia (LaBioMet), pertencente ao Programa de Pós Graduação em Metrologia da PUC-Rio, vem realizando pesquisas relacionadas ao estudo e desenvolvimento de métodos para o diagnóstico clínico não invasivo, em especial, o desenvolvimento de transdutores biomagnéticos baseados no efeito GMI [2].

Campos biomagnéticos são gerados por organismos vivos ou por marcadores magnéticos inseridos nesses organismos. Os exames cardíacos, em particular, podem ser beneficiados de forma expressiva com equipamentos não invasivos de alta sensibilidade. É possível identificar alterações nas funções elétricas ou mecânicas do coração através de correntes elétricas e campos magnéticos gerados em sua operação. Estes indicadores são detectados pelos métodos da Eletrocardiografia (ECG) e Magnetocardiografia (MCG), respectivamente. MCGs apresentam vantagens sobre ECGs, ao detectar fenômenos eletrofisiológicos mais fracos, não necessitar de elementos de estímulo (eletrodos) e de sofrer menor interferência de outros tecidos corporais [3].

No entanto, as densidades de fluxo magnético de fontes biomagnéticas são extremamente baixas (1 fT a 1 nT), com magnitude muito inferior à densidade do fluxo magnético terrestre (de aproximadamente 20 μ T) e ao ruído magnético ambiental. O campo magnético cardíaco se encontra na ordem de 100 pT. Para superar esse obstáculo, é possível utilizar câmaras magnéticas blindadas, capazes de expressiva atenuação das interferências ambientais. Outra abordagem possível é a implementação de uma configuração gradiométrica, com a qual se realiza uma leitura diferencial entre dois sensores de comportamento idêntico, um próximo à fonte de interesse, e outro a uma distância suficiente para que não seja significativamente sensibilizado pelo sinal. O sinal resultante dessa leitura diferencial é o de interesse, livre do ruído, suposto comum a ambos os sensores. Desta forma, o gradiômetro permite o aumento da razão sinal/ruído, sem as desvantagens de custo apresentadas pelas câmaras blindadas. No entanto, seu desempenho está fortemente atrelado à homogeneidade dos elementos sensores.

O magnetômetro de alta sensibilidade mais utilizado atualmente para medições biomagnéticas é baseado no elemento sensor SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Porém, os custos associados a esse tipo de magnetômetro, que requer resfriamento com nitrogênio ou hélio líquido para operação e necessita de uma câmara magnética blindada, são proibitivos para o uso hospitalar comum. O uso do elemento sensor GMI em configuração gradiométrica é capaz de oferecer uma alternativa de baixo custo para esse tipo de aplicação.

Estudos realizados no LaBioMet, indicaram que as fitas GMI, mesmo apresentando a mesma composição química e mesmas dimensões físicas (comprimento, largura e espessura), não apresentam as mesmas variações de impedância, para uma mesma variação do campo magnético [4]. Ou seja, foi constatado um comportamento heterogêneo das amostras, o que impossibilitaria o desenvolvimento de um gradiômetro, baseado nesses sensores, com desempenho satisfatório.

Esses estudos também indicaram que, comparado com as correspondentes características do módulo de sua impedância, o comportamento de variação de fase das amostras GMI é mais adequado às medidas de campos magnéticos baixos, apresentando alta sensibilidade e faixas de comportamento linear com a variação do campo magnético [5].

O presente trabalho pretende desenvolver um circuito homogeneizador do comportamento das características de fase θ da impedância de amostras GMI com a variação do campo magnético, visando a utilização das amostras em configurações gradiométricas.

2. Magnetoimpedância Gigante (GMI)

2.1. Definição

Materiais que são simultaneamente condutores e magnéticos (geralmente ferromagnéticos) apresentam variações da impedância quando submetidos a campos magnéticos estáticos, caracterizando a Magnetoimpedância (MI). Correntes alternadas que fluem através desses materiais geram campos magnéticos transversais que induzem alguma magnetização. A baixas frequências, esses fenômenos contribuem com um acréscimo de uma tensão de origem indutiva através do condutor. A frequências mais altas, a corrente passa a fluir mais próxima da superfície do condutor, também afetando a componente resistiva da tensão. A magnetização aumenta a permeabilidade do condutor. A profundidade de penetração de correntes (skin depth) nesses materiais depende de sua permeabilidade magnética. A distribuição da corrente então varia com o campo magnético aplicado, além do formato do condutor e da frequência da corrente. Com isso, para uma mesma corrente, obtemos valores de tensão diferentes para diferentes campos magnéticos. Ou seja, a impedância do material sofreu variação com o campo magnético.

Esse efeito pode ser mensurado através da variação percentual da impedância:

$$GMI(\%) = \frac{\Delta Z}{Z}(\%) = \frac{|Z(H_{dc})| - |Z(H_{sat})|}{|Z(H_{sat})|} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde H_{dc} é o campo magnético estático externo aplicado à amostra e H_{sat} é o campo limite de saturação do efeito de variação da impedância. É tomado o maior valor de $|\frac{\Delta Z}{Z}|$, que passa a ser uma característica importante da amostra.

Na maioria dos condutores magnéticos, esse efeito é geralmente muito pequeno e pode ser desprezado. No entanto, foi descoberto que certas amostras ferromagnéticas sofrem um efeito bem mais perceptível da variação da impedância (800%) para campos magnéticos pequenos (apenas alguns Oe¹), fenômeno que passou a ser denominado Magnetoimpedância Gigante.

2.2. Magnetoimpedância longitudinal (LMI)

O trabalho realizado se baseia em um caso particular do efeito GMI, aplicável a amostras em formato de fitas ou fios, as quais tem uma direção preferencial (longitudinal) para receber campos magnéticos e sofrer variações perceptíveis da impedância. Injetando uma corrente ao longo da amostra e um campo magnético paralelo à corrente, é possível medir o efeito GMI (nesse caso denominado LMI) através da diferença de potencial entre as extremidades da amostra, como exibido na Fig. 1.

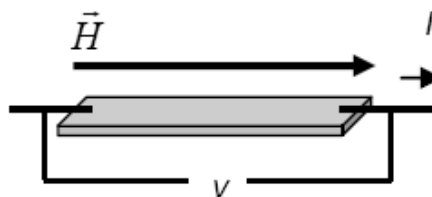


Figura 1 - Medição típica do efeito GMI através da diferença de potencial entre as extremidades da amostra

¹ A unidade de campo magnético do sistema CGS, denominada oersted (Oe), é mais utilizada na literatura sobre efeitos GMI do que a correspondente unidade do sistema SI (Tesla), e equivale a $\frac{1}{4\pi} \cdot 10^3$ A/m.

Equações que regem o comportamento podem ser encontradas em [1] e [4]. Entretanto, a caracterização experimental das fitas utilizadas foi mais adequada para o presente trabalho do que os correspondentes modelos matemáticos, pois foram identificados comportamentos diferentes para o fenômeno em amostras de mesma composição e mesmas características de comprimento, largura e altura. As amostras podem ser modeladas por uma resistência e reatância em série, ambas variando com o campo magnético. Em geral, as amostras têm reatância de natureza indutiva.

2.3. GMI assimétrica (AGMI)

As curvas GMI, da impedância em função do campo magnético são geralmente simétricas em relação ao campo. É possível tornar esse comportamento assimétrico de diversas formas, como o uso de corrente CC, campo magnético CA ou uma alteração no processo de fabricação denominada "exchange bias" [6]. Utilizou-se, ao longo dos trabalhos conduzidos no LaBioMet, uma corrente CC para gerar o comportamento da Magnetoimpedância Gigante Assimétrica (AGMI).

Quando é aplicada uma corrente CC (I_{cc}) paralela à direção do campo magnético externo (H_{ext}), é gerada uma componente de campo magnético circunferencial (H_{cc}), que atua juntamente com uma componente alternada (H_{ca}) devido à corrente CA (I_{ca}). A resultante helicoidal desses efeitos se opõe à magnetização induzida pelo campo externo e causa a assimetria do efeito GMI. A Fig. 2 ilustra a situação para uma amostra em forma de fio e a Fig. 3 exibe alguns resultados experimentais do efeito.

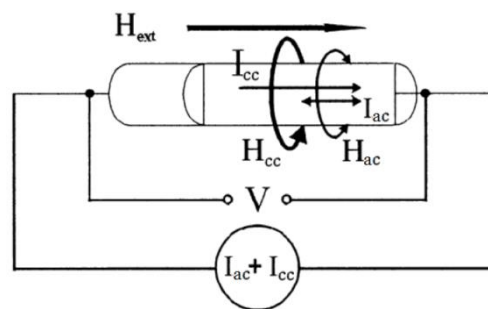


Figura 2 - Configuração Experimental para indução de AGMI numa amostra em forma de fio

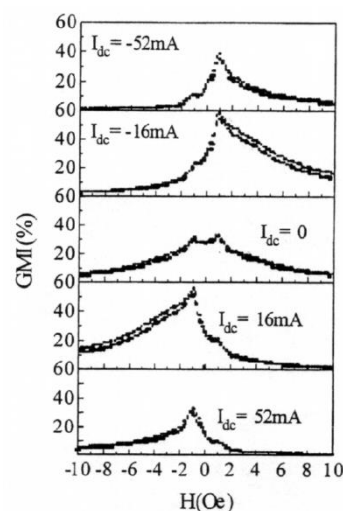


Figura 3 - Exemplo de curvas GMI(%) em função do campo magnético externo, para uma mesma amostra submetida à diferentes correntes CC

A presença da assimetria nas curvas GMI é vantajosa por dois motivos: Dessa forma é possível distinguir o sentido do campo externo aplicado à amostra e a sensibilidade na região ao redor do campo externo de 0 Oe aumenta de forma significativa. Esse segundo efeito depende também do valor selecionado para a corrente CC, pois após certo valor a sensibilidade volta a se reduzir.

3. Caracterização de Amostras GMI

3.1. Sistema automático de caracterização

Integrantes do LaBioMet desenvolveram um sistema automático de caracterização de amostras GMI [7] e [8]. A excitação da amostra é realizada por um Medidor RLC (Agilent – 4285A), que também obtém os valores de módulo e fase de impedância da mesma. O campo magnético externo é gerado por uma corrente CC controlada (fonte de corrente Agilent E3648) passando por uma bobina de Helmholtz de 48 espiras por bobina e raio de 15 cm. Bobinas de Helmholtz geram campos cujo valor é fornecido por (2):

$$H = \frac{8 \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{5\sqrt{5} \cdot R} \approx 9 \times 10^{-3} \cdot \frac{N \cdot I}{R} [Oe] \quad (2)$$

Onde H é a magnitude do campo magnético no centro das bobinas, μ_0 é a constante de permeabilidade magnética do vácuo, 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. Para a bobina utilizada:

$$H[Oe] = 2,877 \cdot I[A] \quad (3)$$

Os terminais elétricos das fitas GMI são feitos de latão, fixados através da técnica de solda de ponto, pois soldas de chumbo não são capazes de se fixar nas amostras. O Medidor GMI utiliza terminais de leitura a quatro pontos através de conectores BNC.

O controle do sistema de caracterização é realizado por um programa desenvolvido em LabVIEW, com sinais de controle enviados através de uma interface GPIB (General Purpose Interface Bus) e de um DAQ (Data Aquisition – NI USB 6221), que controla uma caixa inversora de polaridade da corrente CC aplicada à bobina. Na Fig. 4 encontra-se um diagrama do sistema:

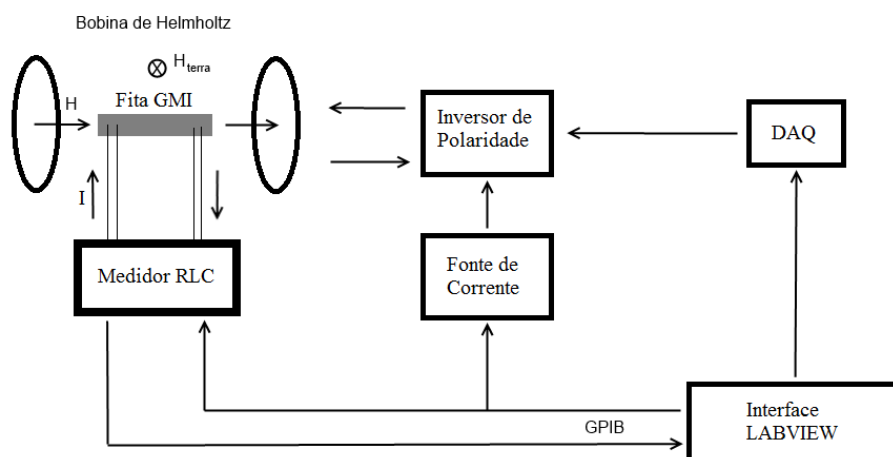


Figura 4 - Diagrama do Sistema Automático de Caracterização de Amostras GMI

As medidas são realizadas levando em consideração a curva de histerese. Para isso, parte-se de um campo inicial nulo crescendo até o campo máximo, em seguida decrescendo até o campo mínimo e, por fim, crescendo até retornar ao campo inicial nulo. Os resultados finais de módulo e fase correspondem à média aritmética dos valores obtidos para um mesmo valor de campo magnético.

O usuário seleciona os parâmetros a serem utilizados (faixa de campos magnéticos aplicados, passo de aumento do campo, valor das correntes CA e CC utilizadas na fita, frequência da corrente CA) e descreve a composição da fita com suas medidas. Os resultados são exportados para um arquivo Excel e catalogados segundo as especificações utilizadas, a data e a hora das medidas.

3.2. Resultados experimentais das caracterizações

A partir do levantamento de diversas curvas de módulo e fase da impedância em função do campo magnético externo, foram observadas diversas características importantes das amostras GMI utilizadas. Parâmetros de excitação das amostras foram otimizados de forma empírica, sempre com o objetivo de se obter valores máximos de sensibilidade da impedância da fita em relação ao campo aplicado [4]. A partir desses resultados, os estudos do presente trabalho foram realizados em fitas GMI de composição $Co_{75}Fe_{25}Si_{15}B_{10}$ com mesmas características dimensionais (comprimento de 3 cm, espessura de 60 μm e largura de 1,5 mm), excitadas por uma corrente CC com 80 mA superposta a uma corrente CA com 15 mA de amplitude e 100 kHz de frequência, caracterizadas no intervalo entre -2,0 e 2,0 Oe com passo de 0,05 Oe.

Para efeito do que se pretende aplicar nesse trabalho, o aspecto mais relevante das caracterizações que foram realizadas é a heterogeneidade observada entre as relações $\theta \times H$ entre amostras distintas que possuem as mesmas características de composição, de dimensões e de excitação. Naturalmente, devido aos reduzidos valores que caracterizam os Z dessas amostras, não se pode descartar a possibilidade de que alterações da impedância geradas pela solda de ponto possam contribuir para a heterogeneidade das amostras. As curvas na Fig. 5 exemplificam essa heterogeneidade:

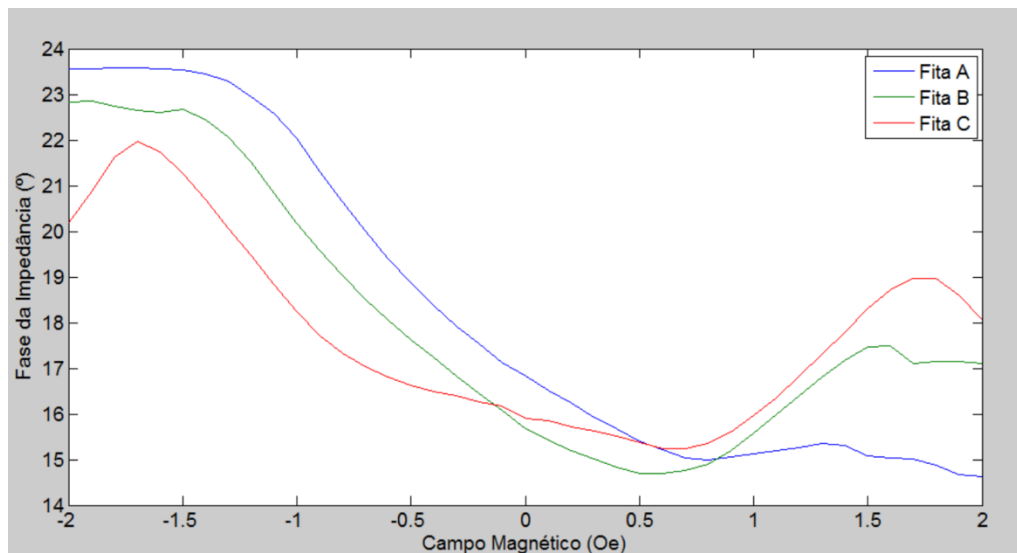


Figura 5 - Curvas de Fase da Impedância para três fitas GMI distintas, porém de mesma composição

A utilização de transdutores magnéticos em configuração gradiométrica depende da homogeneidade das amostras, o que torna necessário o estudo de como aproximar as curvas obtidas das amostras, ao menos em uma faixa conveniente de valores do campo de excitação. A técnica visada é a implementação de um circuito homogeneizador capaz de tornar iguais as partes lineares das curvas de fase de duas fitas distintas. Com isso, a sensibilidade entre as duas fitas também seria igualada.

4. Métodos de Homogeneização

4.1. Considerações iniciais

A fase θ_{sensor} do elemento sensor (fita GMI) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{sensor} = \arctg \left(\frac{X_{sensor}}{R_{sensor}} \right) \quad (4)$$

Todos os métodos de homogeneização aqui propostos utilizam-se de um circuito em série com a fita a ser homogeneizada (fita B). Este circuito é composto por uma resistência de ajuste (R_{aj}) em série com uma reatância de ajuste (X_{aj}), conforme apresentado na Fig. 6 [9] e [10]. A fase θ_{eq} da impedância equivalente Z_{eq} do circuito desenvolvido é dada por (5):

$$\theta_{eq} = \arctg \left(\frac{X_{sensor} + X_{aj}}{R_{sensor} + R_{aj}} \right) \quad (5)$$

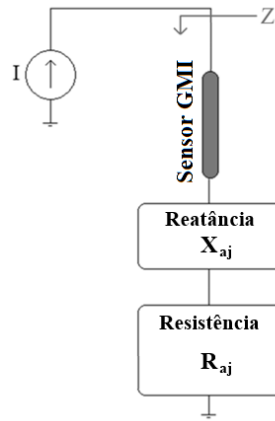


Figura 6 - Diagrama de Blocos do Circuito de Homogeneização

O foco do presente trabalho é homogeneizar o comportamento de fase em função do campo magnético de uma dada fita B real (experimentalmente caracterizada) com relação a uma fita hipotética (referência), cuja curva de fase com relação ao campo magnético é uma reta com alta sensibilidade. Isso torna o processo de homogeneização extremamente mais interessante, visto que é possível tornar o comportamento de fase de N fitas, heterogêneas entre si, igual ao comportamento de uma amostra arbitrária. Dessa forma, pode-se definir uma sensibilidade desejada para certa aplicação e tornar-se mais fácil a aplicação do processo a fitas quaisquer, desde que tenham comportamento aproximadamente linear na faixa de campos desejada.

Por meio de medições experimentais, obteve-se a característica de fase da amostra B, apresentada na Fig. 7. Observando-se essa figura, percebe-se que a dependência entre fase e campo magnético é satisfatoriamente linear na faixa entre -1,25 Oe e -0,25 Oe. Dessa forma, os métodos de homogeneização aqui desenvolvidos foram aplicados a esta região de campos magnéticos.

Para se avaliar o desempenho dos métodos foram utilizadas três curvas hipotéticas de mesma sensibilidade ($36^\circ/\text{Oe}$), apresentadas na Fig. 7, cujas expressões analíticas estão definidas em (6), (7) e (8):

$$\text{Fita REF+ :} \quad \theta_{REF+} [^\circ] = -36 \cdot H[\text{Oe}] - 3 \quad (6)$$

$$\text{Fita REF :} \quad \theta_{REF} [^\circ] = -36 \cdot H[\text{Oe}] - 8 \quad (7)$$

$$\text{Fita REF- :} \quad \theta_{REF-} [^\circ] = -36 \cdot H[\text{Oe}] - 13 \quad (8)$$

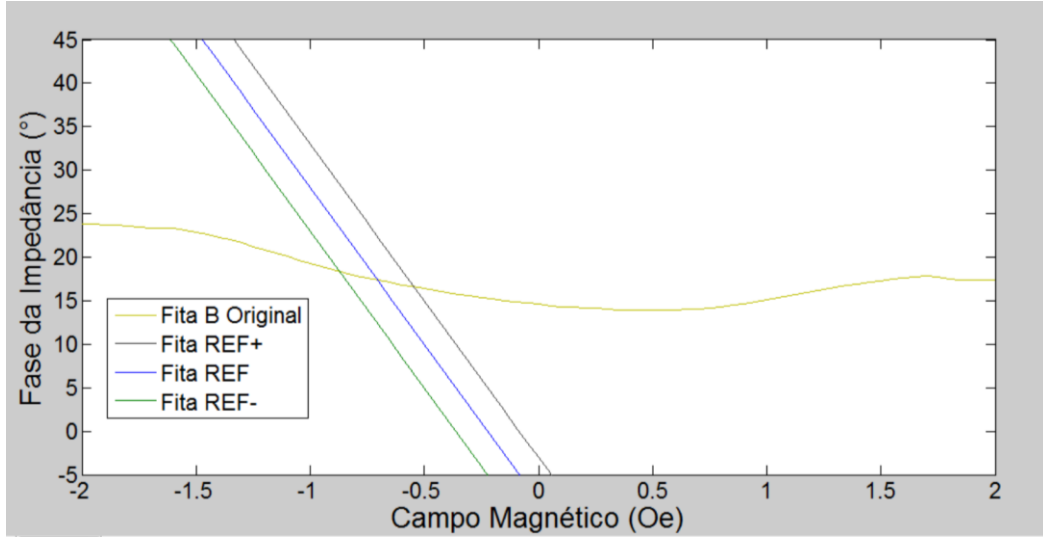


Figura 7 - Curvas de Fase da Impedância em função do Campo Magnético

4.2. Método do intervalo

Este método propõe homogeneizar as características de fase de amostras heterogêneas num dado intervalo de campos, entre H_1 e H_2 . Para tal fim, iguala-se nas extremidades do intervalo de campo considerado, o valor da fase da impedância do conjunto fita B + circuito de homogeneização ao valor da fase da fita de referência [11]. É possível equacionar da seguinte forma, com base em (4) e (5):

$$\begin{cases} \theta_{ref}(H_1) = \theta_{eq}(H_1) \Rightarrow \tan(\theta_{ref}(H_1)) = \frac{X_B(H_1) + X_{aj}}{R_B(H_1) + R_{aj}} \\ \theta_{ref}(H_2) = \theta_{eq}(H_2) \Rightarrow \tan(\theta_{ref}(H_2)) = \frac{X_B(H_2) + X_{aj}}{R_B(H_2) + R_{aj}} \end{cases} \quad (9)$$

Com base na Fig. 7, o intervalo considerado linear foi identificado de modo que $H_1 = -1,25$ Oe e $H_2 = -0,25$ Oe. Para identificar se há alguma dificuldade em realizar a translação da curva da fita B para se aproximar da curva de referência, os cálculos foram realizados para duas referências, REF+ e REF-. Para a fita B, obtivemos os seguintes valores: $R_B(H_1) = 0,932052 \, \Omega$, $X_B(H_1) = 0,362454 \, \Omega$, $R_B(H_2) = 0,836742 \, \Omega$, $X_B(H_2) = 0,229750 \, \Omega$. Por sua vez, também, a partir dos dados apresentados da Fig. 7, tem-se que os valores obtidos das fitas hipotéticas foram:

$$\tan(\theta_{REF+}(H_1)) = \tan(42^\circ) = 0,900404 \quad (10)$$

$$\tan(\theta_{REF+}(H_2)) = \tan(6^\circ) = 0,105104 \quad (11)$$

$$\tan(\theta_{REF-}(H_1)) = \tan(32^\circ) = 0,624869 \quad (12)$$

$$\tan(\theta_{REF-}(H_2)) = \tan(-4^\circ) = 0,069927 \quad (13)$$

Solucionando o sistema definido em (14), chega-se ao seguinte resultado para a fita hipotética REF+:

$$R_{aj} = -0,777787 \, \Omega \quad (15)$$

$$X_{aj} = -0,223553 \, \Omega \quad (16)$$

$$C_{aj} = \frac{1}{\omega \cdot X_{aj}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot X_{aj}} = 7,11932 \mu F \quad (17)$$

A Fig. 8 apresenta o comportamento da amostra B homogeneizada por meio do método do intervalo, (Fita B homogeneizada (INT / REF+)), em relação à fita de referência REF+.

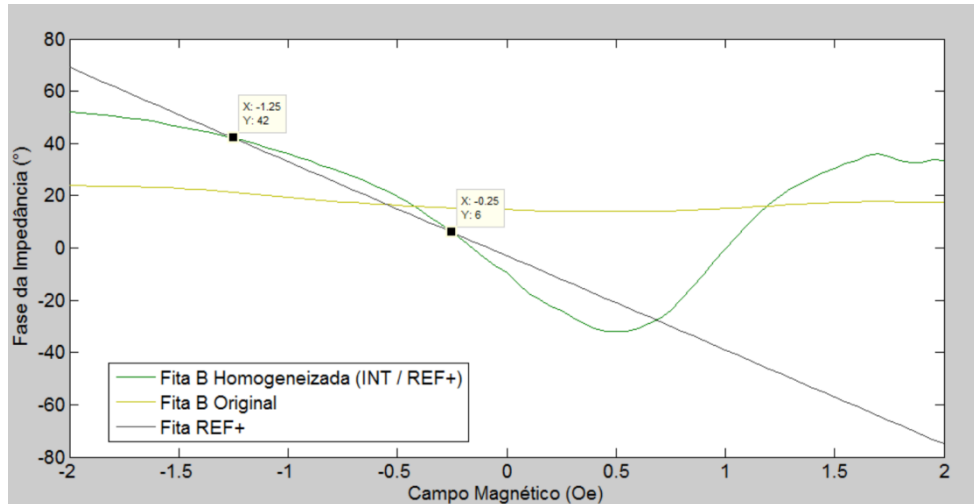


Figura 8 - Resultado teórico da homogeneização através do Método do Intervalo para a Fita REF+

Da mesma forma, para a fita hipotética REF-, tem-se:

$$R_{aj} = -0,731462 \Omega \quad (18)$$

$$X_{aj} = -0,237112 \Omega \quad (19)$$

$$C_{aj} = \frac{1}{\omega \cdot X_{aj}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot X_{aj}} = 6,71223 \mu F \quad (20)$$

A Fig. 9 apresenta o comportamento da amostra B homogeneizada por meio do método do intervalo, (Fita B homogeneizada (INT / REF-)), em relação à fita de referência REF-.

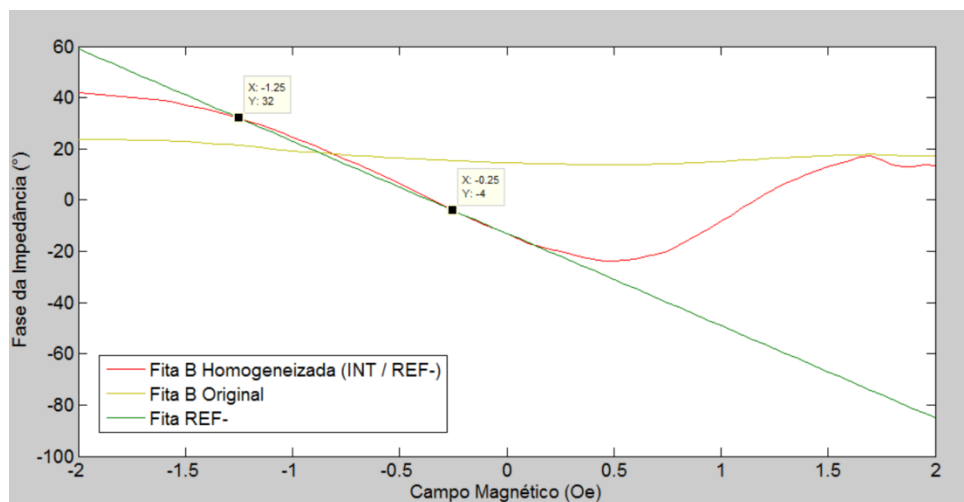


Figura 9 - Resultado teórico da homogeneização através do Método do Intervalo para a Fita REF-

Sempre que se deseja tornar as características de fase de uma curva de menor sensibilidade iguais às de outra de maior sensibilidade, é necessário se fazer uso de um circuito homogeneizador capaz de gerar um R_{aj} negativo. Uma possibilidade é a utilização de um GIC (*General Immitance Converter*), conforme será descrito no capítulo 5 a seguir. Os resultados apresentados em (16), (19) e (22) corroboram tal afirmação, visto que a fita B possui sensibilidade inferior tanto em relação a REF+ quanto a REF-.

É possível observar que a curva da fita homogeneizada para REF- se aproxima mais da fita hipotética. Isso sugere que a dificuldade em homogeneizar as características de fase da amostra tende a aumentar para curvas idealizadas que sejam mais afastadas da curva da fita original. Uma análise mais pertinente envolve a comparação das derivadas das curvas nas Figs. 8 e 9 com relação ao campo magnético. Destaca-se que estas derivadas possibilitam que se analise o valor da sensibilidade $\frac{\Delta\theta}{\Delta H}$ ponto a ponto, ou seja, para cada valor de campo magnético. Utilizando as funções analíticas dos polinômios de interpolação (obtidos para cada uma das curvas) e o cálculo de suas respectivas derivadas ponto a ponto no MatLab, é possível traçar os gráficos da Fig. 10:

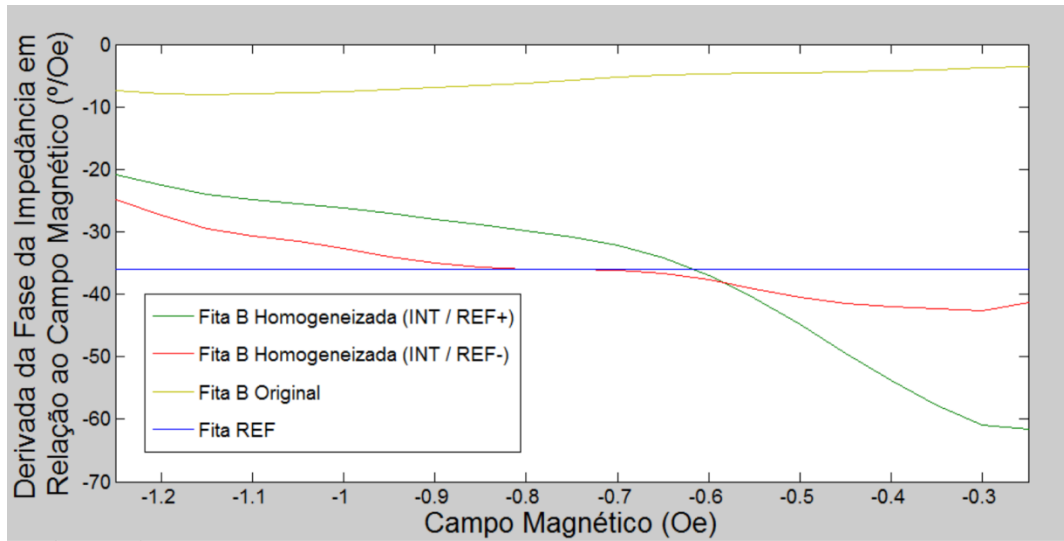


Figura 10 - Comparação entre as derivadas da fase da impedância em relação ao campo magnético para o método do intervalo

Por meio da Fig. 10, observa-se que a homogeneização com relação a REF- teve maior sucesso do que a da fita REF+. Em compensação, também é possível visualizar que o comportamento da fita B homogeneizada pelos dois processos se torna menos linear que o da fita original.

4.3. Método da derivada/ponto

Este método objetiva igualar tanto o valor absoluto da fase das fitas (homogeneizada e de referência), quanto as suas sensibilidades $\frac{\Delta\theta}{\Delta H}$, em um mesmo campo magnético de polarização (H_{pol}). O sistema de equações estabelecido é o seguinte:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{ref}(H_{pol}) = \theta_{eq}(H_{pol}) \Rightarrow \tan(\theta_{ref}(H_{pol})) = \frac{X_B(H_{pol}) + X_{aj}}{R_B(H_{pol}) + R_{aj}} \quad (a) \\ \frac{d\theta_{ref}}{dH} \big|_{H_{pol}} = \frac{d\theta_{eq}}{dH} \big|_{H_{pol}} \quad (b) \end{array} \right. \quad (21)$$

Definiu-se H_{pol} como o ponto médio do intervalo considerado, que foi o mesmo do método anterior (-0,25 a -1,25 Oe), obtendo-se então $H_{pol} = -0,75$ Oe. Por sua vez, assumindo que, no intervalo de interesse, o comportamento de fase da amostra B em função do campo magnético é satisfatoriamente linear, pode-se aproximar a derivada no ponto pela definição feita em (21b), de forma que se obtém:

$$\frac{\Delta\theta_{ref}}{\Delta H} = \frac{\Delta\theta_{eq}}{\Delta H} \Rightarrow \Delta\theta_{ref} = \Delta\theta_{eq} = \theta_{ref}(H_{pol} + \Delta) - \theta_{ref}(H_{pol} - \Delta) \quad (22)$$

E, a partir de (22), chega-se finalmente a

$$= \arctan\left(\frac{\theta_{ref}(H_{pol} + \Delta) - \theta_{ref}(H_{pol} - \Delta)}{\frac{X_B(H_{pol} + \Delta) + X_{aj}}{R_B(H_{pol} + \Delta) + R_{aj}}}\right) - \arctan\left(\frac{X_B(H_{pol} - \Delta) + X_{aj}}{R_B(H_{pol} - \Delta) + R_{aj}}\right) \quad (23)$$

Destaca-se que se considerou $\Delta = 0,5$ Oe. Novamente utilizaram-se as referências REF+, REF e REF-. Para a fita B original, obtêm-se os seguintes valores: $R_B(H_{pol}) = 0,877716 \Omega$, $X_B(H_{pol}) = 0,278672 \Omega$, $R_B(H_{pol} - \Delta) = 0,932052 \Omega$, $X_B(H_{pol} - \Delta) = 0,362454 \Omega$, $R_B(H_{pol} + \Delta) = 0,836742 \Omega$, $X_B(H_{pol} + \Delta) = 0,229750 \Omega$. Por sua vez, os valores obtidos das fitas hipotéticas foram:

$$\tan(\theta_{REF+}(H_{pol})) = \tan(24^\circ) = 0,445229 \quad (24)$$

$$\Delta\theta_{REF+} = \theta_{REF+}(H_{pol} + \Delta) - \theta_{REF+}(H_{pol} - \Delta) = 6^\circ - 42^\circ = -36^\circ = -0,628319 \text{ rad} \quad (25)$$

$$\tan(\theta_{REF-}(H_{pol})) = \tan(14^\circ) = 0,249328 \quad (26)$$

$$\Delta\theta_{REF-} = \theta_{REF-}(H_{pol} + \Delta) - \theta_{REF-}(H_{pol} - \Delta) = -4^\circ - 32^\circ = -36^\circ = -0,628319 \text{ rad} \quad (27)$$

Resolvendo o sistema composto por (21a) e (23), chegamos ao seguinte resultado para a fita hipotética REF+:

$$R_{aj} = -0,760641 \Omega \quad (28)$$

$$X_{aj} = -0,226547 \Omega \quad (29)$$

$$C_{aj} = \frac{1}{\omega \cdot X_{aj}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot X_{aj}} = 7,02525 \mu F \quad (30)$$

A Fig. 11 apresenta o comportamento da amostra B homogeneizada por meio do método da derivada/ponto (Fita B homogeneizada (DP / REF+)), em relação à amostra de referência REF+.

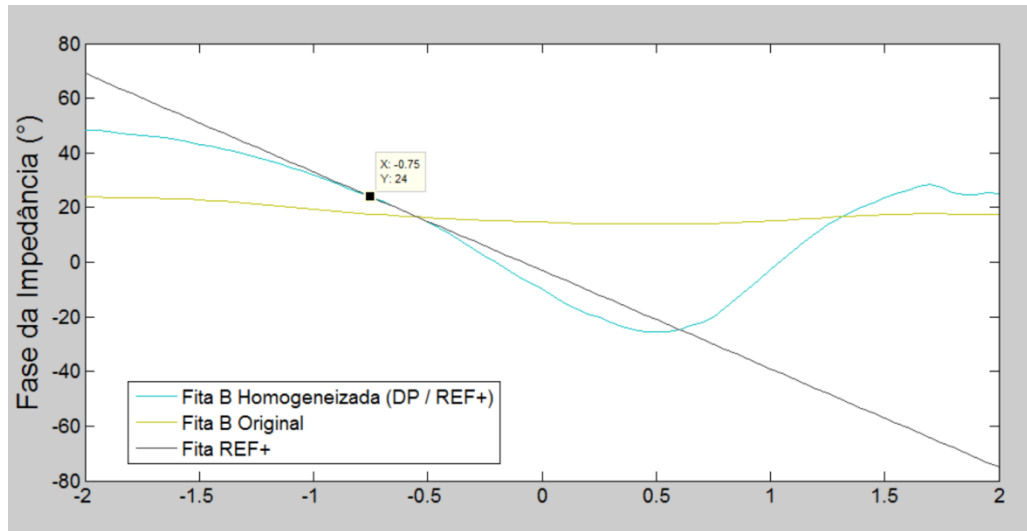


Figura 11 - Resultado teórico da homogeneização através do Método da Derivada/Ponto para a Fita REF+

Para a fita hipotética REF-:

$$R_{aj} = -0,724909 \, \Omega \quad (31)$$

$$X_{aj} = -0,240573 \, \Omega \quad (32)$$

$$C_{aj} = \frac{1}{\omega \cdot X_{aj}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot X_{aj}} = 6,61567 \, \mu F \quad (33)$$

A Fig. 12 apresenta o comportamento da amostra B homogeneizada por meio do método da derivada/ponto (Fita B homogeneizada (DP / REF-)), em relação à amostra de referência REF-.

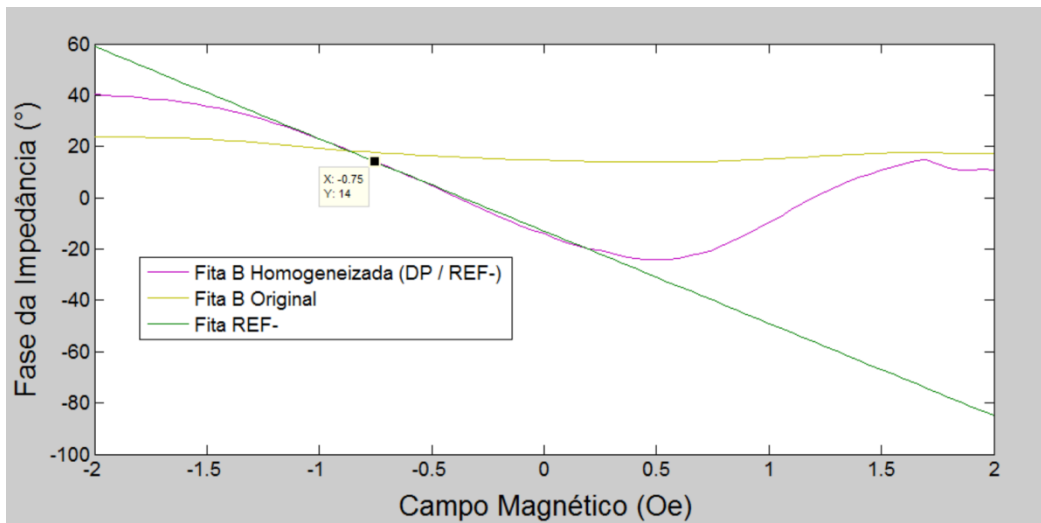


Figura 12 - Resultado teórico da homogeneização através do Método da Derivada/Ponto para a Fita REF-

Comparando-se os resultados explicitados nas Figs. 11 e 12, verifica-se da mesma forma que no processo anterior (método do intervalo), aqui também se consegue manter o comportamento de fase da fita B homogeneizada em relação a REF- mais próxima de seu comportamento teórico ideal, e em um intervalo maior de campo magnético do que o apresentado para REF+. Esse fato reforça a suposição de que esses processos de homogeneização são tão mais eficientes quanto menor for a distância entre a curva a ser homogeneizada e a curva de referência. A Fig. 13 apresenta as derivadas de fase da impedância com relação ao campo magnético para os resultados apresentados nas Figs. 11 e 12.

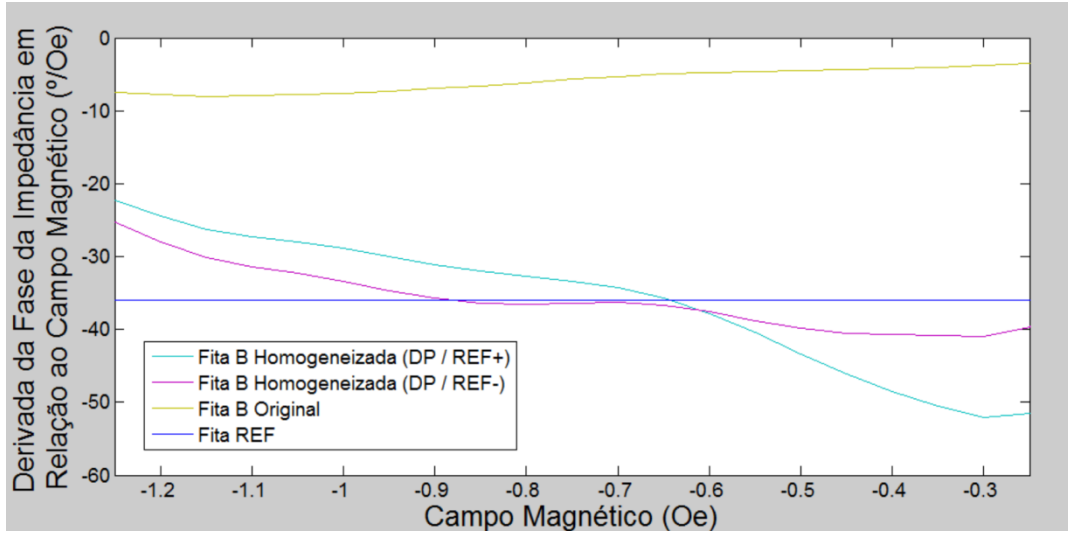


Figura 13 - Comparação entre as derivadas da fase da impedância em relação ao campo magnético para o método da derivada/ponto

A comparação das derivadas mostra que a homogeneização para a referência REF- teve maior sucesso, pois sua derivada está mais próxima da referência ao longo do intervalo de interesse, estando inclusive quase idêntica à referência no trecho entre -0,9 Oe e -0,7 Oe.

4.4. Método do gradiente

Este método busca igualar a sensibilidade fase da fita B homogeneizada à sensibilidade das fitas de referência, no campo magnético de polarização H_{pol} , sem ter necessidade de tornar o valor absoluto da fase igual em qualquer ponto no intervalo H_1 a H_2 . Assumindo que, no intervalo de interesse, o comportamento de fase da amostra B em função do campo magnético é satisfatoriamente linear, pode-se aproximar a derivada no ponto pela variação da fase θ dividido pela variação do campo magnético H . Isso se resume à seguinte equação:

$$\frac{d\theta_{ref}}{dH}|_{H_{pol}} = \frac{d\theta_{eq}}{dH}|_{H_{pol}} \Rightarrow \frac{\Delta\theta_{ref}}{\Delta H} = \frac{\Delta\theta_{eq}}{\Delta H} \Rightarrow \Delta\theta_{ref} = \Delta\theta_{eq} \quad (34)$$

De (34) é possível obter:

$$\begin{aligned} \theta_{ref}(H_{pol} + \Delta) - \theta_{ref}(H_{pol} - \Delta) &= \arctan\left(\frac{X_B(H_{pol} + \Delta) + X_{aj}}{R_B(H_{pol} + \Delta) + R_{aj}}\right) - \\ &\quad - \arctan\left(\frac{X_B(H_{pol} - \Delta) + X_{aj}}{R_B(H_{pol} - \Delta) + R_{aj}}\right) \end{aligned} \quad (35)$$

Por consistir em apenas uma equação com duas variáveis, há um grau de liberdade que permite a escolha de um valor ou para R_{aj} ou para X_{aj} , desde que o valor arbitrado para uma destas variáveis permita que (35) implique numa solução real para a variável remanescente. Como valores de resistência são mais fáceis de serem implementados através de ampla variedade de valores fixos ou de resistências variáveis (potenciômetros), é usual se arbitrar prioritariamente o valor da reatância. A solução matemática resulta geralmente em dois valores para a variável dependente, sendo que uma das soluções não é aceitável ao verificar sua curva da derivada de fase da impedância em função do campo magnético, possivelmente por representar uma resposta no quadrante errado do círculo trigonométrico.

O intervalo considerado linear foi o mesmo utilizado nos outros métodos, com $H_1 = H_{pol} - \Delta = -1,25$ Oe e $H_2 = H_{pol} + \Delta = -0,25$ Oe. Nesse caso, como a sensibilidade de todas as curvas de referência é a mesma e este método não homogeneiza o valor absoluto da fase (i.e., não há necessidade de translação da curva para igualar o valor da fase em qualquer ponto), os mesmos valores de R_{aj} e X_{aj} são obtidos independentemente da curva de referência usada. Para efeito dos cálculos apresentados, optou-se por utilizar a fita de referência REF. A fita B possui os seguintes valores de interesse: $R_B(H_1) = 0,932052 \Omega$, $X_B(H_1) = 0,362454 \Omega$, $R_B(H_2) = 0,836742 \Omega$, $X_B(H_2) = 0,229750 \Omega$. Por sua vez, os valores obtidos da fita hipotética foram:

$$\Delta\theta_{REF} = \theta_{REF}(H_2) - \theta_{REF}(H_1) = 1^\circ - 37^\circ = -36^\circ = -0,628319 \text{ rad} \quad (36)$$

Solucionando (35), chegamos às seguintes faixas de valores possíveis (usando $f = 100$ kHz):

$$-0,932054 \Omega < R_{aj} < -0,654088 \Omega \quad (37)$$

$$-0,500676 \Omega < X_{aj} < -0,222710 \Omega \quad (38)$$

$$3,17880 \mu F < C_{aj} < 7,14627 \mu F \quad (39)$$

Várias possibilidades foram examinadas, mas por razões relacionadas à montagem do circuito (adoção de valores de componentes internos do circuito que sejam disponíveis comercialmente e que contornem a ocorrência de saturação dos amplificadores operacionais etc), será aqui considerada a seguinte combinação de valores para C_{aj} e R_{aj} :

$$C_{aj} = 6,11141 \mu F \rightarrow X_{aj} = -0,260423 \Omega \quad (40)$$

$$R_{aj} = -0,697885 \Omega \quad (41)$$

A Fig. 14 apresenta o comportamento da amostra B homogeneizada por meio do método do gradiente (Fita B homogeneizada (GRAD / REF-)), em relação à amostra de referência REF.

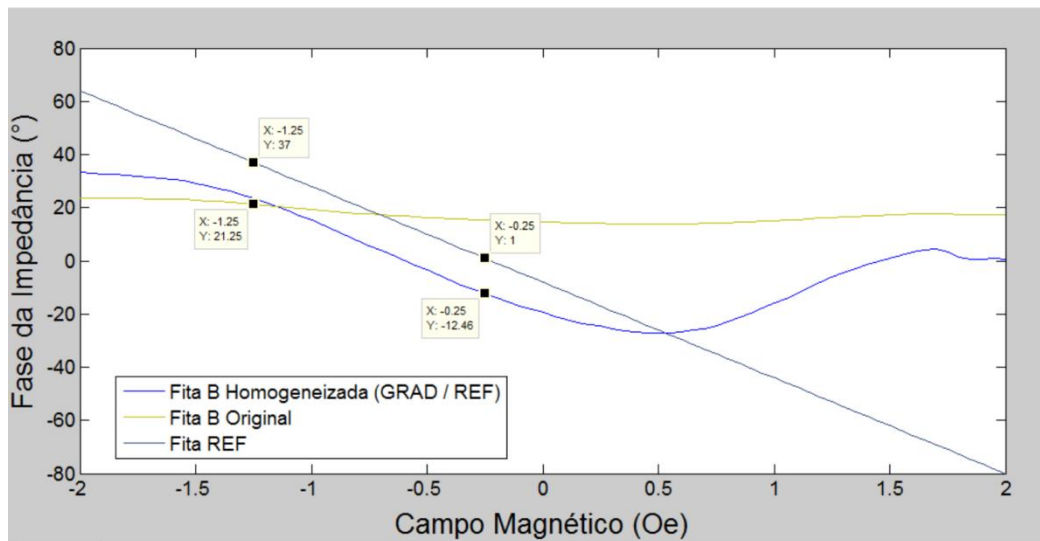


Figura 14 - Resultado teórico da homogeneização através do Método do Gradiente para a Fita REF

As curvas não se tocam no intervalo selecionado, o que era esperado, pois o método não torna necessário igualar a fase em nenhum ponto. Nesse intervalo, as curvas aparentam ser paralelas, o que atende ao objetivo da homogeneização. Ressalta-se que no presente método a derivada no ponto H_{pol} foi aproximada pela inclinação média no intervalo e que, como a característica de fase da amostra B não é absolutamente linear, não se tem erro nulo em $H_{pol} = -0,75$ Oe.

A Fig. 15 apresenta as derivadas de fase da impedância com relação ao campo magnético para os resultados apresentados na Fig. 14.

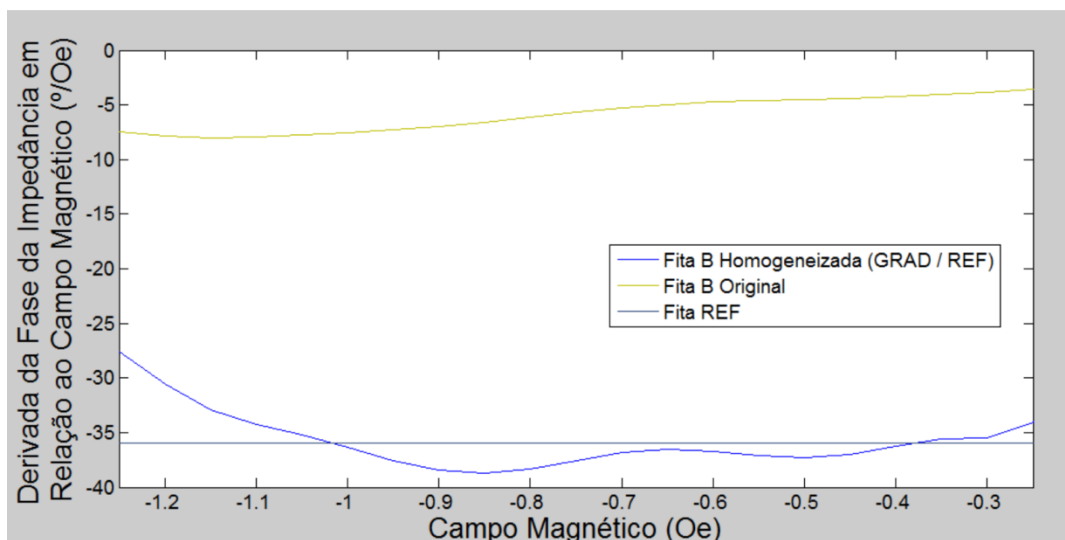


Figura 15 - Comparação entre as derivadas da fase da impedância em relação ao campo magnético para o método do gradiente

Observando a Fig. 15, é possível identificar que a derivada da curva de fase homogeneizada se aproxima da referência e se mantém próxima durante quase todo o intervalo considerado linear, afastando-se de forma mais acentuada apenas na extremidade inferior do mesmo.

4.5. Comparação entre os métodos

O critério escolhido para comparar os métodos de homogeneização é o erro de sensibilidade. A fórmula para erro (absoluto) de sensibilidade é:

$$\varepsilon = x - x_0 \quad (42)$$

onde x é o valor obtido pela derivada da fase em relação ao campo magnético e x_0 é o valor de referência (derivada da fase da fita hipotética em relação ao campo magnético da fita hipotética). Os resultados estão expressos graficamente na Fig. 16.

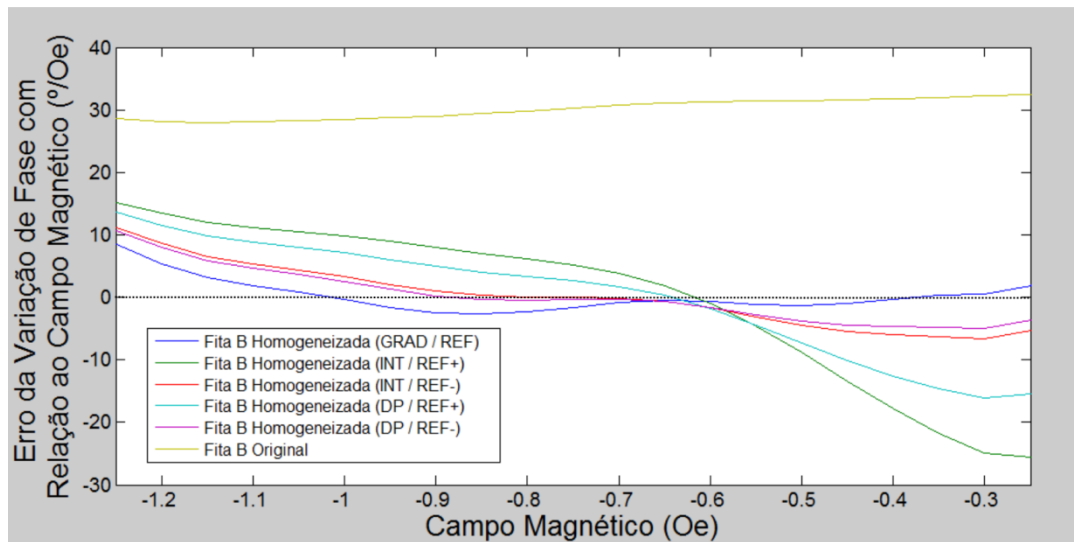


Figura 16 – Erro Absoluto de Homogeneização para os Diversos Métodos

Observamos que todos os métodos reduzem de forma considerável o erro presente na fita B original, sendo que os métodos do intervalo e da derivada/ponto apresentam resultados muito similares, especialmente quando a referência é a fita REF-. O método do gradiente apresenta erros menores que os demais na maior parte do intervalo. Os métodos associados à homogeneização em relação à referência REF+ trazem erros maiores.

Outra medida de erro possível é o erro percentual, que apresenta valores normalizados:

$$\varepsilon_p = \left| \frac{x - x_0}{x_0} \right| \cdot 100 \quad (43)$$

Os resultados estão expressos graficamente na Fig. 17.

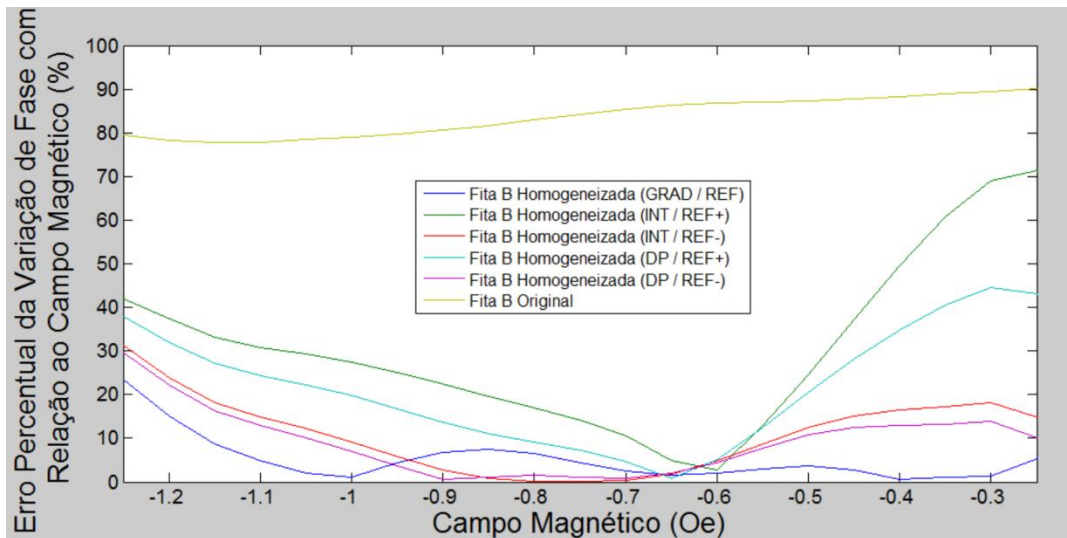


Figura 17 - Erro Percentual de Homogeneização para os Diversos Métodos

As curvas roxa e vermelha indicam que, na vizinhança de $H_{pol} = -0,75$ Oe, consegue-se obter erros percentuais muito pequenos (inferiores a 5%), tanto para o método do intervalo quanto para o da derivada/ponto, ambos em relação a REF-. Por sua vez, o método do gradiente (curva azul), consegue manter um erro percentual pequeno para uma faixa mais extensa de campos magnéticos. Para todos os métodos analisados, a homogeneização em relação a REF- sempre apresenta erros percentuais menores do que em relação a REF+.

A medida normalizada torna mais relevante o uso de valores estatísticos como média, desvio padrão e mediana, os quais são apresentados nas Tabelas 1 e 2. Na Tabela 1 eles são apresentados considerando-se o intervalo de campo entre $H_1 = -1,25$ Oe e $H_2 = -0,25$ Oe. A Tabela 2 registra os valores correspondentes a um intervalo mais próximo do ponto de polarização $H_{pol} = -0,75$ Oe, nominalmente entre $-0,80$ Oe e $-0,60$ Oe.

Método	Erro Percentual ($\Delta H = 1$ Oe)		
	Média	Desvio Padrão	Mediana
Gradiente	5,1696	5,3540	3,6752
Intervalo REF+	30,5671	19,3551	27,4292
Intervalo REF-	10,8966	8,6129	12,2461
Derivada/Ponto REF+	21,7065	13,4442	20,4299
Derivada/Ponto REF-	9,2681	7,6451	10,1415
Fita B Original	83,6785	4,3577	84,1815

Tabela 1 - Valores Estatísticos para o Erro Percentual de Sensibilidade para os Diversos Métodos, considerando apenas o intervalo entre $-1,25$ e $-0,25$ Oe

Método	Erro Percentual ($\Delta H=0,2$ Oe)		
	Média	Desvio Padrão	Mediana
Gradiente	3,3300	2,0557	2,3864
Intervalo REF+	9,9116	6,0277	10,4589
Intervalo REF-	1,4013	2,0278	0,2626
Derivada/Ponto REF+	5,3826	3,1279	5,0365
Derivada/Ponto REF-	1,9373	1,4275	1,4322
Fita B Original	85,0975	1,5775	85,3379

Tabela 2 - Valores Estatísticos para o Erro Percentual de Sensibilidade para os Diversos Métodos, considerando apenas o intervalo entre -0,80 e -0,60 Oe

A análise dos valores contidos nessas tabelas mostra que o método do gradiente obteve maior sucesso em homogeneizar a fita B num intervalo maior. Nesse intervalo ($\Delta H=1,0$ Oe), ele apresenta erros menores (evidenciado pela média e pela mediana) e menor variação entre os valores pontuais de erro, ou seja, uma derivada mais próxima de ser constante (evidenciado pelo desvio padrão).

Em um intervalo menor em torno do ponto de polarização, os métodos do intervalo e da derivada-ponto com a referência REF- apresentaram erros menores que o método do gradiente, além de manterem suas derivadas mais próximas de serem constantes. Logo, dependendo da aplicação e de uma escolha adequada para a referência, é possível obter resultados vantajosos com esses métodos.

Vale ressaltar que essas observações são válidas para o exemplo numérico que foi estudado e é possível que para outra fita a ser homogeneizada e outras referências, outros métodos podem se revelar como soluções melhores. No entanto, os resultados indicam que quanto mais afastada a fase no campo de polarização da fita a ser homogeneizada $\theta_B(H_{pol})$ para a da referência $\theta_{REF}(H_{pol})$, mais vantajosa será a utilização do método do gradiente, que depende apenas da variação $\Delta\theta/\Delta H$. De maneira inversa, quanto mais próxima for $\theta_B(H_{pol})$ de $\theta_{REF}(H_{pol})$, menor será a diferença do resultado dos três métodos de homogeneização apresentados.

Outro fator relevante na comparação entre os métodos é a flexibilidade de aplicação. Os métodos do intervalo e da derivada/ponto apresentam apenas uma solução possível, enquanto que o método do gradiente resulta em um intervalo de valores com solução possível. Isso torna o método do gradiente mais fácil de ser implementado. Mesmo que a montagem não resulte nos valores teóricos de componentes de ajuste, há a possibilidade de encontrar outra solução próxima que satisfaça às condições de homogeneização.

Pelas razões apresentadas, o método do gradiente foi considerado o mais adequado para a montagem experimental.

5. Circuito de Homogeneização

5.1. FDNR (*Frequency-dependent negative resistance*)

Tipicamente, deseja-se fazer com que as características de fase de uma amostra com menor sensibilidade tornem-se similares àquelas exibidas por uma amostra com maior sensibilidade. Nesta situação, independentemente do método de homogeneização escolhido, tem-se que R_{aj} será uma resistência negativa. Dessa forma, optou-se por implementar a resistência negativa R_{aj} por meio da topologia FDNR (*Frequency-Dependent Negative Resistance*), que é obtida ao se configurar adequadamente as impedâncias de um GIC (*Generalized Immittance Converter*), como pode ser visto na Fig. 18 [12-13].

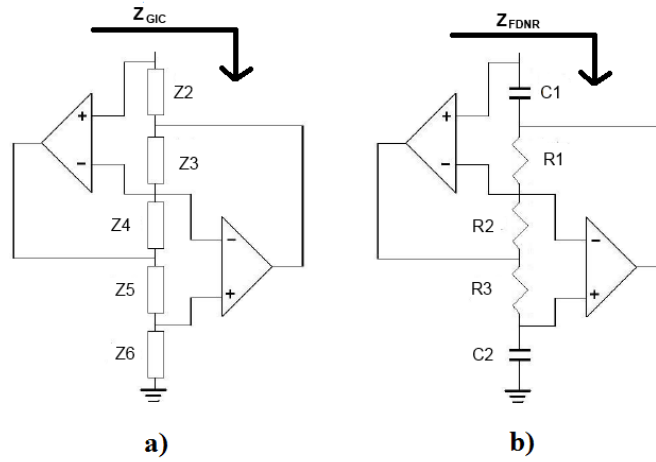


Figura 18 - (a) *Generalized Immittance Converter (GIC)* e (b) *Frequency-Dependent Negative Resistance (FDNR)*

Supondo amplificadores operacionais ideais, a impedância equivalente Z_{GIC} , apresentada na Fig. 18(a), é definida por (44). Por sua vez, a expressão analítica da impedância equivalente Z_{FDNR} , apresentada na Figura 18(b), é explicitada em (45).

$$Z_{GIC} = \frac{Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6}{Z_3 \cdot Z_5} \quad (44)$$

$$Z_{FDNR} = -\frac{R_2}{\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_3} \quad (45)$$

Onde:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (46)$$

Destaca-se que a utilização do FDNR possibilita a implementação da resistência negativa R_{aj} com grande flexibilidade na escolha da combinação dos valores de suas impedâncias internas (Fig. 18). Contudo, tem-se que o valor de R_{aj} será dependente da frequência ω .

5.2. Primeira versão do circuito de homogeneização

A primeira versão do circuito consistiu na aplicação direta do FDNR da Fig. 18(b), disposto em série com uma capacitância de ajuste C_{aj} e com a fita B (representada pela resistência R_b e pela indutância L_b), conforme indicado na Fig. 19. Em teoria, este circuito é capaz de implementar todos os métodos descritos no capítulo 5, sendo que os valores de R_{aj} e C_{aj} são obtidos a partir do respectivo sistema de equações definido para o método de homogeneização selecionado. Em geral, R_{aj} é uma resistência negativa com valor absoluto muito pequeno. Por outro lado, é recomendável que o valor da impedância Z_{FDNR} não seja muito pequeno [13]. Dessa forma, implementa-se R_{aj} por meio da combinação em série de Z_{FDNR} com R_{POT} , o que possibilita trabalhar com Z_{FDNR} maiores. Ainda, de modo a fornecer caminho para a corrente CC da fita (80 mA), a qual não passa por C_{aj} , foi colocada a resistência de escape R_{esc1} . Por sua vez, para permitir passagem à corrente de polarização CC do amplificador operacional X1, foi colocada a resistência de escape R_{esc2} . Ambas são de valor elevado em comparação com as impedâncias no resto do circuito para terem influência mínima na impedância equivalente, considerando que estão dispostas em paralelo.

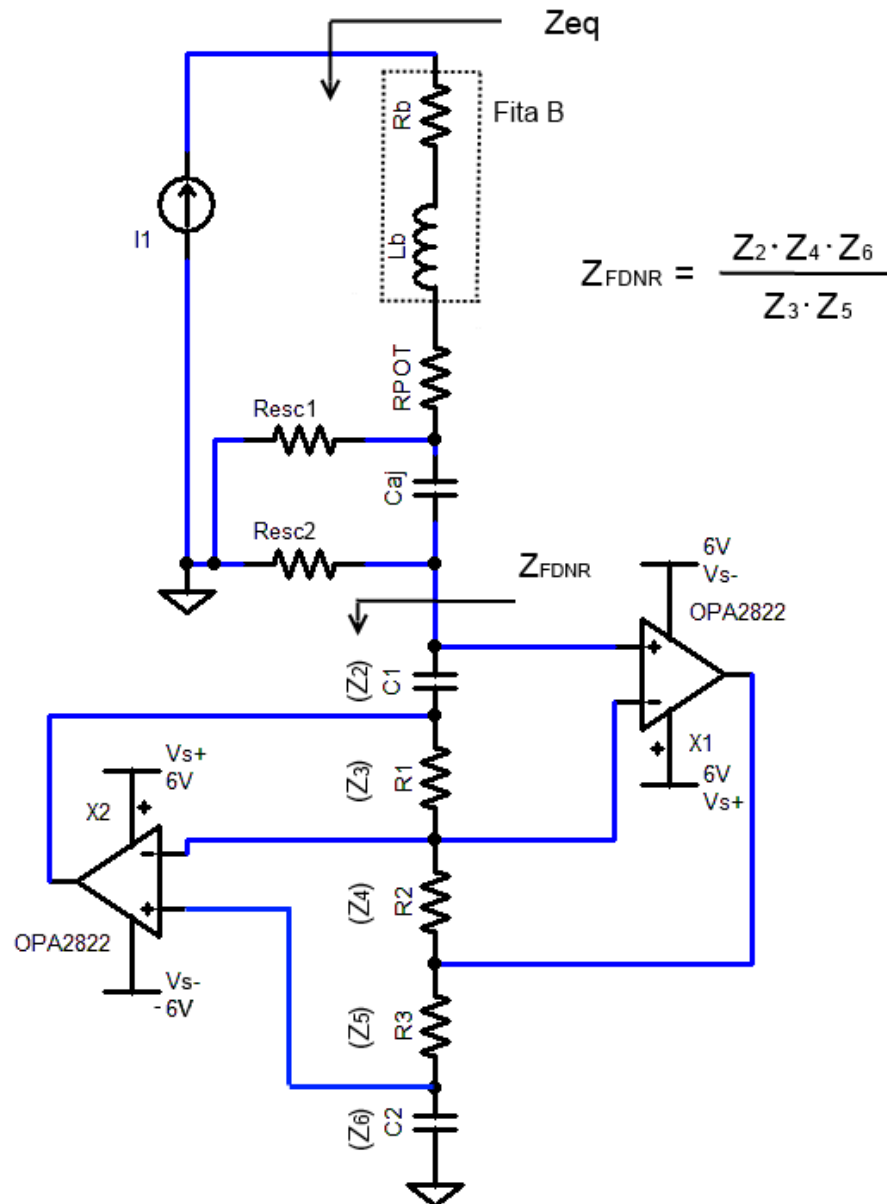


Figura 19 - Esquemático da primeira versão do circuito homogeneizador

O amplificador operacional escolhido foi o OPA2822, que apresenta características de bom desempenho para essa aplicação, destacando-se seu elevado produto ganho-banda passante (240 MHz). Para alimentar esse amplificador, foram utilizados $V_S^- = -6\text{ V}$ e $V_S^+ = 6\text{ V}$. A fonte de corrente de polarização I_1 , como já foi mencionado no capítulo 3 (item b), injeta uma corrente CC com 80 mA superposta a uma corrente CA com 15 mA de amplitude e 100 kHz de frequência.

Simulações iniciais do circuito foram bem sucedidas, no entanto as primeiras montagens experimentais revelaram a presença indesejada de uma capacitância espúria. Verificou-se que esse resultado pode ser atribuído à existência de uma pequena parcela resistiva em série com a capacitância de capacitores reais. Maiores detalhes sobre esse tema (incluindo resultados das simulações) podem ser encontrados em [14]. Levando em conta as resistências R_{C1} e R_{C2} em série com C_1 e C_2 , respectivamente, obtém-se a seguinte equação para a impedância equivalente do FDNR:

$$Z_{FDNR} = -\frac{R_2 \cdot \left(R_{C1} \cdot R_{C2} - \frac{1}{\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2} \right)}{R_1 \cdot R_3} - j \cdot \frac{R_2 \cdot (R_{C1} \cdot C_1 + R_{C2} \cdot C_2)}{\omega \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2} \quad (47)$$

É possível separar essa impedância em termos de uma resistência equivalente do FDNR (R_{FDNR}) em série com uma capacitância equivalente do FDNR (C_{FDNR}). Assim, têm-se:

$$R_{FDNR} = -\frac{R_2 \cdot \left(R_{C1} \cdot R_{C2} - \frac{1}{\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2} \right)}{R_1 \cdot R_3} \quad (48)$$

$$C_{FDNR} = -\frac{R_1 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}{R_2 \cdot (R_{C1} \cdot C_1 + R_{C2} \cdot C_2)} \quad (49)$$

Tipicamente, o valor da capacitância C_{FDNR} é menor do que o da capacitância equivalente desejada, obtida por meio da solução matemática do método de homogeneização escolhido. Dessa forma, não é possível se obter a capacitância equivalente desejada por meio de variações em C_{aj} . Consequentemente, a princípio, a presença desta capacitância espúria C_{FDNR} impossibilita o sucesso da homogeneização. Destaca-se que tal observação, também, foi verificada por meio de simulações computacionais SPICE.

5.3. Adaptações do circuito homogeneizador

Inicialmente, inseriu-se uma indutância de ajuste L_{aj} em série com o FDNR de modo a corrigir essa componente capacitiva indesejada. Entretanto, a utilização de indutores é uma fonte de ruídos, que poderiam afetar significativamente o circuito. Dessa forma, decidiu-se por se implementar uma configuração alternativa baseada na geração da capacitância de ajuste (C_{aj}) pela própria capacitância gerada pelo FDNR (C_{FDNR}), conforme apresentado na Fig. 20. Conhecendo-se os valores das resistências R_{C1} e R_{C2} , com base na equação (49), pode-se definir convenientemente C_{FDNR} por meio do ajustes das resistências e capacitâncias. Ressalta-se que, apesar da ausência de uma capacitância em série com a fita GMI remover as razões apresentadas anteriormente para o uso de resistências de escape, a presença do nível de corrente CC de 80 mA levaria à saturação dos amplificadores operacionais. Assim, ainda é necessário inserir uma resistência de escape R_{esc} que absorva toda a corrente CC. Fazendo $R_{esc} = 75\ \Omega$ e colocando-a entre um ponto do circuito e V_S^- , obtém-se uma corrente de 80 mA e tensão CC de aproximadamente zero no ponto em que a resistência foi conectada.

Usando (35), (48) e (49) é possível escolher valores para os componentes que satisfaçam à homogeneização através do método do gradiente. No exemplo aqui descrito, objetivou-se homogeneizar o comportamento de fase da fita B em relação a REF, sendo que a solução (35) implica em $C_{aj} = 6,11141\ \mu\text{F}$ e $R_{aj} = -0,697885\ \Omega$. Assim, inicialmente, arbitram-se valores para $C_{aj} = C_{FDNR}$ e obtém-se um valor para R_{aj} . Há certa liberdade também nas escolhas dos componentes internos do FDNR. Primeiramente, arbitra-se um valor para R_{FDNR} que seja negativo e de módulo maior que o módulo de R_{aj} . Então, arbitram-se os valores das capacitâncias internas do FDNR (C_1 e C_2), por ser um componente cuja disponibilidade de valores é reduzida. Na sequência, utilizam-se das relações matemáticas e dos valores

arbitrados para se obter os valores das resistências utilizadas no FDNR (R_1 , R_2 e R_3), as quais devem ser selecionadas a fim de garantir que as tensões de saída dos amplificadores operacionais não saturem. Por sua vez, o valor a ser utilizado para R_{POT} é a diferença entre R_{aj} e R_{FDNR} . Tendo em vista os aspectos aqui discutidos o circuito desenvolvido, para aplicação do método do gradiente, foi implementado pelo conjunto de impedâncias explicitado em (50).

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = 10 \text{ nF} \\ C_2 = 10 \text{ nF} \\ R_{C1} = 8,5 \Omega \text{ (implementado por potenciômetro de } 10 \Omega) \\ R_{C2} \text{ é um curto, aproximado nas simulações por } 0,1 \Omega \\ R_1 = 1 \text{ k}\Omega \\ R_2 = 43 \Omega \\ R_3 = 226 \Omega \\ R_{POT} = 4,12 \Omega \text{ (implementado por potenciômetro de } 10\Omega) \\ R_{esc} = 75 \Omega \end{array} \right. \quad (50)$$

O circuito aprimorado é apresentado na Fig. 20:

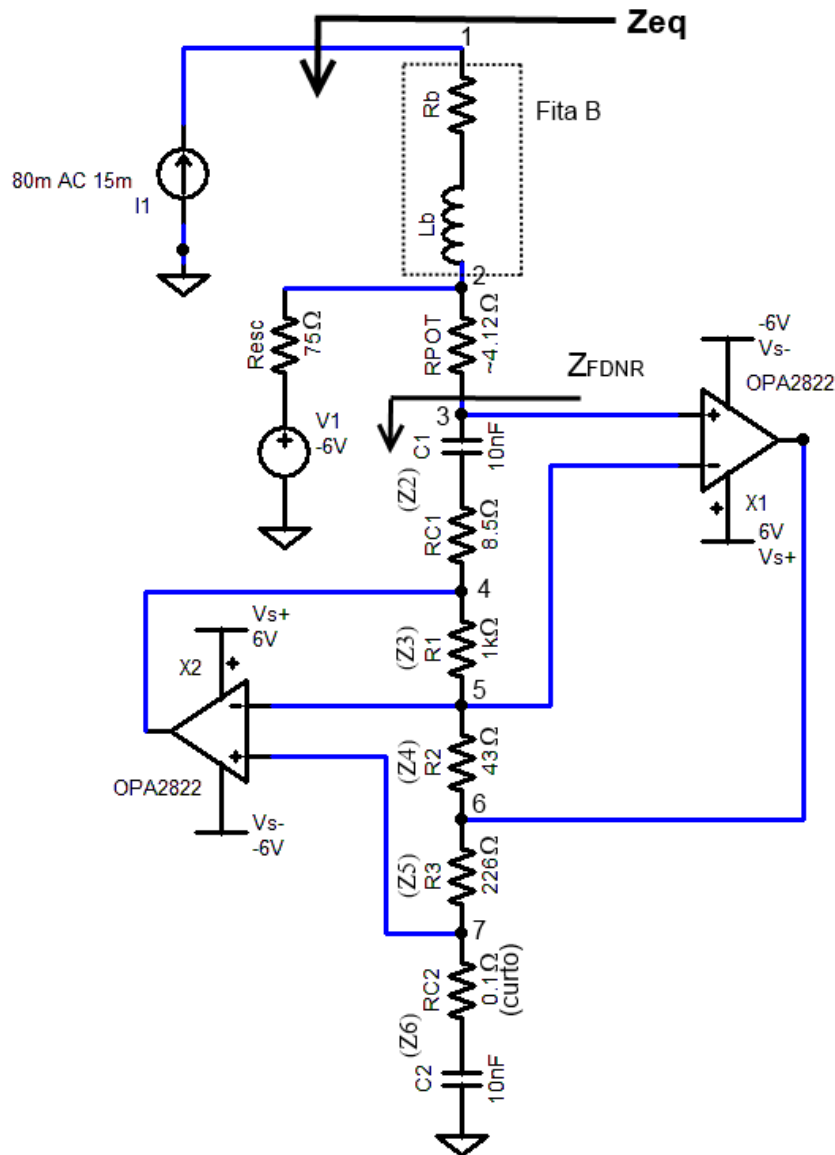


Figura 20 - Versão aprimorada do circuito homogeneizador

6. Simulações do Circuito de Homogeneização

Foram realizadas simulações SPICE do circuito apresentado na Fig. 20, configurado com as impedâncias definidas em (50). A Fig. 21 apresenta os resultados destas simulações, explicitando tensões e correntes em alguns nós de interesse, seguindo a numeração dos nós do circuito definida na Fig. 20.

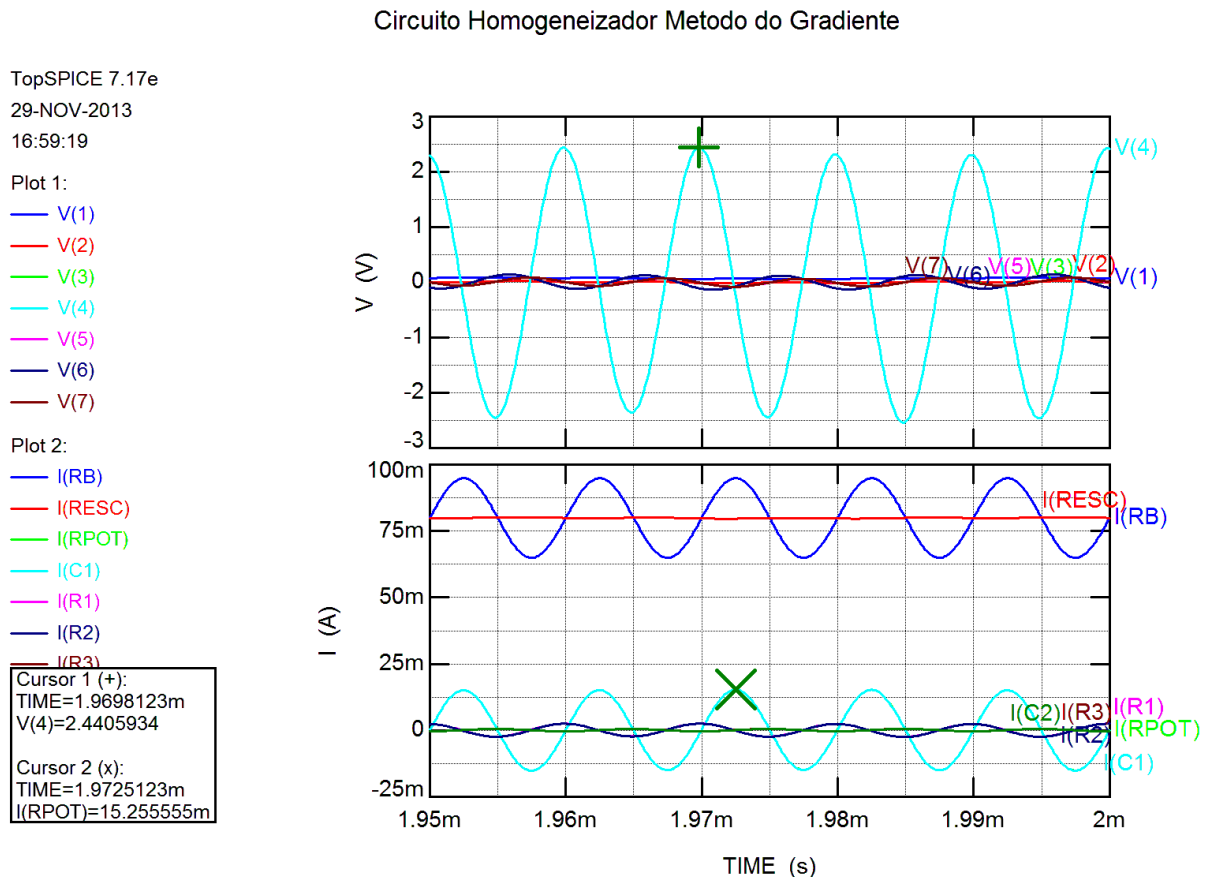


Figura 21 -Tensões e correntes em função do tempo para o circuito homogeneizador

Verifica-se que todas as tensões no circuito possuem amplitudes abaixo de 2,5 V, o que está bem abaixo do limite para saturação de tensão dos amplificadores operacionais, que ocorre próximo a $\pm 4,9$ V. A passagem da componente CC por R_{esc} se mostra necessária para que o circuito mantenha as tensões dentro desse limite, pois uma corrente de 80 mA fluindo pela resistência de 75Ω em direção a $V_s^- = -6$ V resulta em uma tensão de aproximadamente 0 V na outra extremidade de R_{esc} , efetivamente removendo a componente CC das tensões internas do FDNR. Observa-se também que apenas a tensão do nó 4 (saída do amplificador X2) apresenta tensões com amplitude acima de 200 mV.

Em relação às correntes, observa-se que R_{esc} efetivamente retira quase toda a componente CC da corrente que flui pela fita B, permitindo que o nível CC da corrente que flui pelo FDNR seja desprezível. Assim, garante-se uma excursão simétrica, em torno de aproximadamente 0 V, da componente CA das tensões internas do FDNR e afasta-se as tensões de saída dos AmpOps X1 e X2 de suas respectivas saturações. A maior corrente após R_{esc} é a que passa por C_1 , que se mantém com amplitude de 15,26 mA. O amplificador OPA2822 suporta correntes de saída até pelo menos ± 90 mA, logo não há risco de se incorrer em limitações impostas por sua capacidade de corrente.

Na sequência, avaliou-se o desempenho do circuito no domínio da frequência. A Fig. 22, exibe a componente real e imaginária da impedância do FDNR em função da frequência, para diversos campos magnéticos. Por sua vez, a Fig. 23, explicita as curvas de módulo e fase da impedância equivalente do circuito Z_{eq} (vide Figura 20), em função da frequência, para diferentes campos magnéticos. A impedância das amostras GMI varia em função de do campo magnético, sendo que tal dependência poder ser expressa por meio de variações em suas componentes resistiva R_B e indutiva L_B . Dessa forma, as simulações são feitas para pares de valores R_B e L_B , em função de H , obtidos na caracterização experimental da fita B.

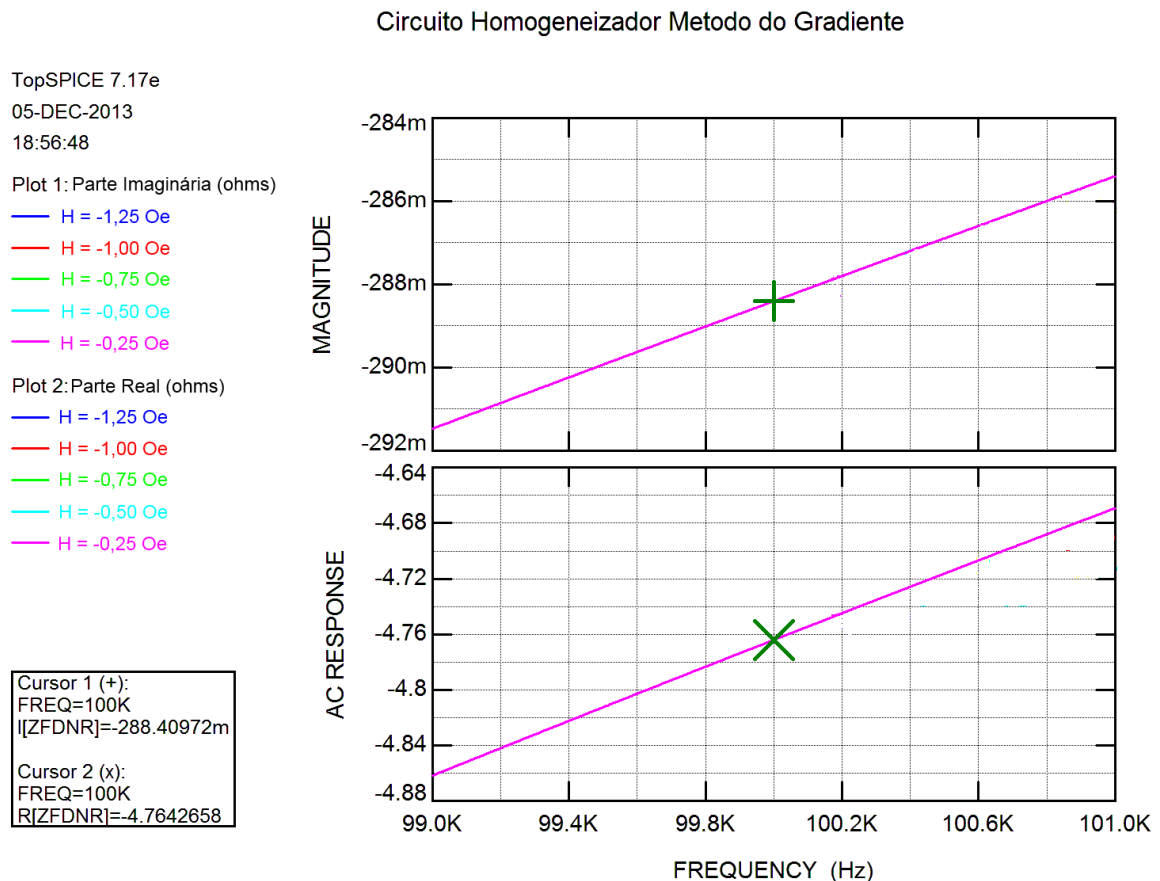


Figura 22 - Parte Imaginária e Parte Real da Impedância Equivalente do FDNR em função da frequência e do campo magnético H

Conforme esperado, visto que amostra GMI é conectada externamente ao FDNR, as curvas de impedância do FDNR não variam em função do campo magnético, por isso as curvas se sobrepõem. Com base nos resultados apresentados na Fig. 22, para a frequência de 100 kHz, obtém-se $R_{FDNR} = -4,76 \Omega$ e $X_{FDNR} = -0,288 \Omega$, valores muito próximos aos do projeto teórico, que eram $R_{FDNR} = -5 \Omega$ e $X_{FDNR} = X_{aj} = -0,260 \Omega$. Com o ajuste dos potenciômetros R_{POT} e R_{C1} seria possível realizar um ajuste fino na resistência e na reatância, respectivamente, até se atingir o valor desejado.

Circuito Homogeneizador Metodo do Gradiente

TopSPICE 7.17e

05-DEC-2013

18:56:02

Plot 1: Fase (graus)

H = -1,25 Oe

H = -1,00 Oe

H = -0,75 Oe

H = -0,50 Oe

H = -0,25 Oe

Plot 2: Módulo (ohms)

H = -1,25 Oe

H = -1,00 Oe

H = -0,75 Oe

H = -0,50 Oe

H = -0,25 Oe

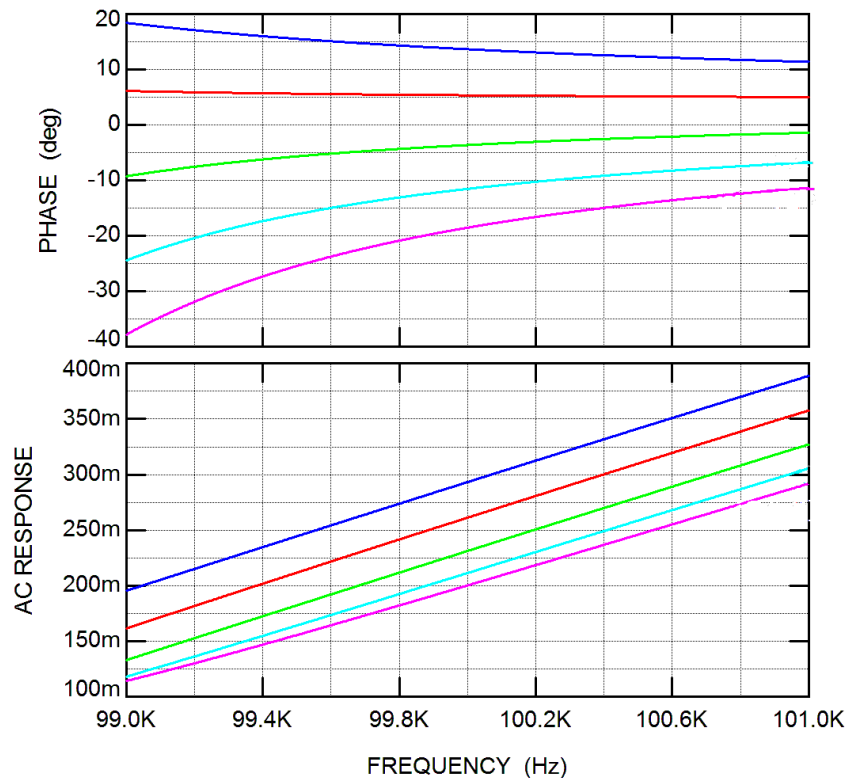


Figura 23 - Fase e Módulo da Impedância Equivalente do Circuito Homogeneizador em função da frequência e do campo magnético H

O comportamento de variação de módulo e fase com a frequência, observado na Fig. 23, ocorre por causa do FDNR, já que, por simplicidade, a fita GMI foi modelada apenas para a frequência de 100 kHz. Assume-se que a impedância da amostra GMI não é significativamente afetada pela frequência, na faixa de frequências apresentada na Fig. 23 (99 kHz a 101 kHz). É possível observar que o espaçamento entre curvas de fase consecutivas é aproximadamente constante para a frequência de 100 kHz. Isso evidencia o fato de o comportamento em função do campo magnético ser aproximadamente linear, visto que as variações de campo são iguais ($\Delta H = 0,25$ Oe). Também, percebe-se que o mesmo não ocorre com o módulo da impedância, o qual apresenta um comportamento não-linear.

A partir dos dados provenientes das simulações, apresentadas na Fig. 23, pode-se observar o valor da fase θ_{eq} para cada valor de H , para a frequência de 100 kHz e utilizando o amplificador OPA2822.

Com a finalidade de avaliar a influência das características não-ideais do AmpOp empregado no circuito de homogeneização, também realizaram-se tais simulações com um amplificador operacional ideal (AmpOp Ideal) e usando outro modelo de amplificador disponível no laboratório com produto ganho-banda passante suficientemente alto (porém, menor que a do OPA2822), que era o LM6172. Utilizando os novos valores simulados, assim como aqueles medidos experimentalmente para a fita B original e os valores ideais para R_{aj} e X_{aj} , obtidos em (40) e (41) para a homogeneização pelo método do gradiente de forma teórica, encontraram-se os resultados apresentados nas Figs. 24 e 25.

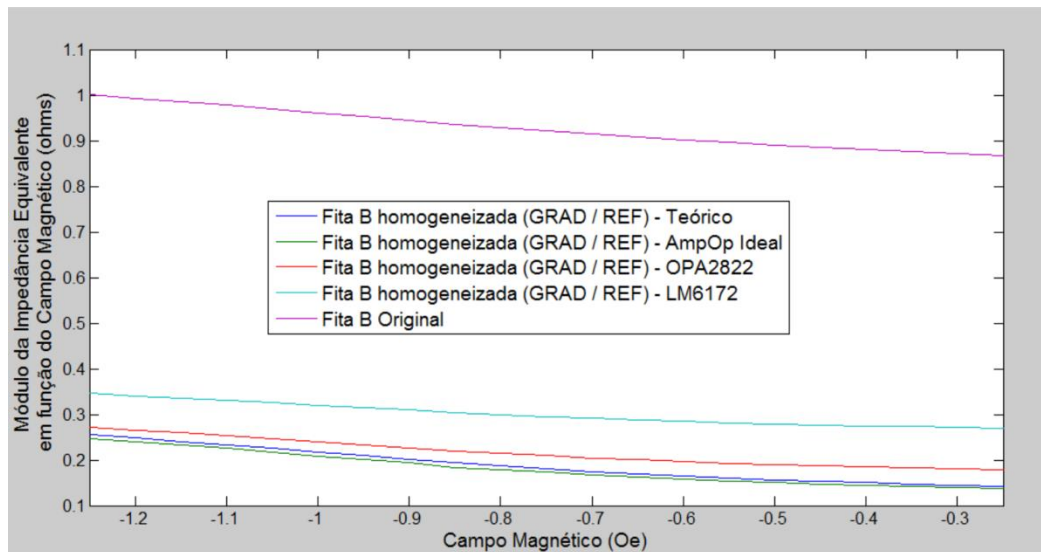


Figura 24 - Módulo da Impedância Equivalente em Função do Campo Magnético para o Método do Gradiente

Por meio da Fig. 24, observa-se que a simulação utilizando o amplificador operacional ideal está de acordo com a teoria, havendo uma diferença muito pequena entre os resultados. Por sua vez, a curva obtida com o amplificador OPA2822 se aproxima muito dos resultados teóricos, mas percebe-se a existência de uma diferença não desprezível. Já o LM6172 exibe um erro considerável. Os resultados das simulações deixam claro que características não-ideais dos amplificadores operacionais podem alterar significativamente o comportamento do circuito homogeneizador.

A Fig. 25 apresenta a fase da impedância equivalente, em função do campo magnético:

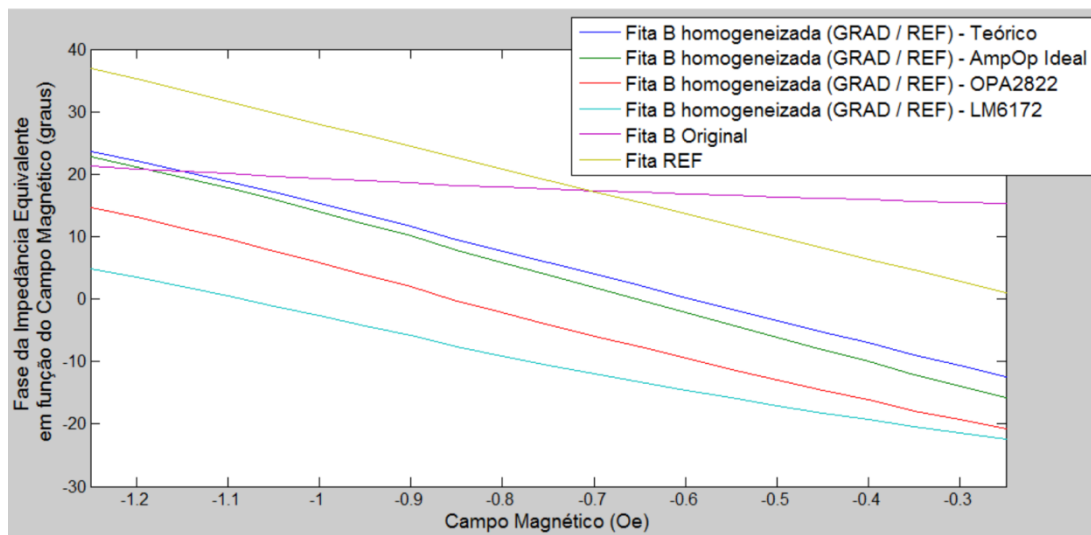


Figura 25 - Fase da Impedância Equivalente em Função do Campo Magnético para o Método do Gradiente

Na Fig. 25, verifica-se que há uma pequena diferença entre os valores teóricos e simulados, supondo-se um amplificador operacional ideal, inclusive havendo uma pequena diferença nas inclinações das curvas de fase. A simulação com o OPA2822 obtém valores de fase diferentes dos teóricos, mas sua inclinação é satisfatoriamente próxima à da teórica. Novamente, os resultados advindos do emprego do LM6172 são os piores, havendo diferença significativa na inclinação da fase em relação ao campo magnético. Ainda assim, destaca-se que em todos os casos analisados, verifica-se que a sensibilidade das amostras homogeneizadas aumenta substancialmente em relação à apresentada pela fita B original.

A Fig. 26 apresenta a resistência série equivalente para o circuito, em função do campo magnético:

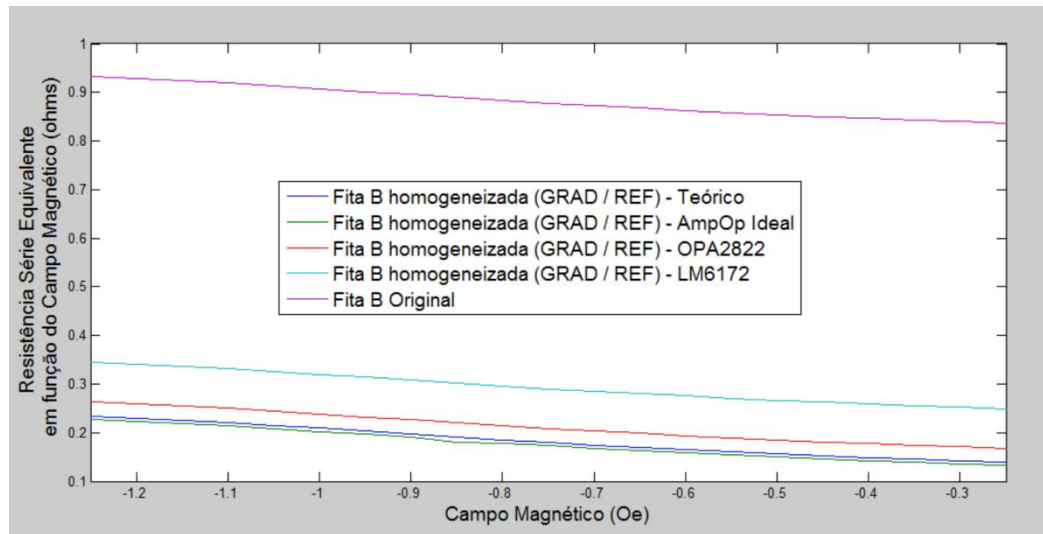


Figura 26 - Resistência Série Equivalente em Função do Campo Magnético para o Método do Gradiente

Visualizando o comportamento da resistência série equivalente em relação ao campo magnético, apresentado na Fig. 26, verifica-se que as curvas estão separadas entre si apenas por um valor constante de resistência, o que é esperado considerando o circuito desenvolvido. A curva obtida pelo emprego do amplificador LM6172 apresenta a maior diferença em relação à curva de homogeneização teórica. No entanto, destaca-se que, ainda assim, esta diferença é muito menor do que a observada entre a curva da fita B original e a de homogeneização teórica. Os erros aqui obtidos, com relação ao comportamento teórico ideal, podem ser facilmente reduzidos por meio de ajustes na resistência variável R_{POT} , que influencia apenas o valor absoluto da resistência série equivalente, sem afetar a inclinação das curvas.

A Fig. 27 apresenta a reatância série equivalente para o circuito, em função do campo magnético:

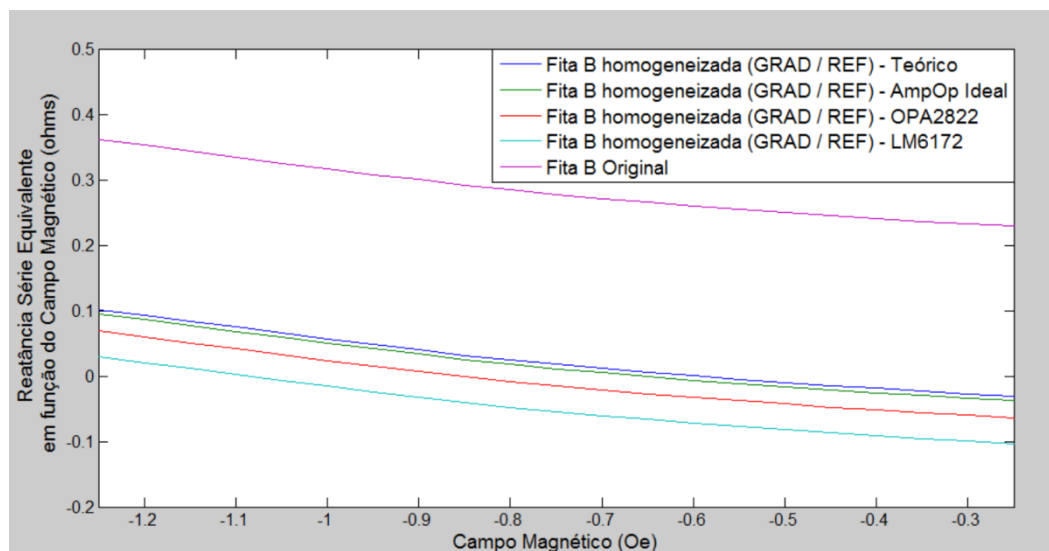


Figura 27 - Reatância Série Equivalente em Função do Campo Magnético para o Método do Gradiente

Por meio da inspeção da Fig. 27, percebe-se que, novamente, as curvas estão separadas entre si por um valor constante, nesse caso de reatância série. Dentre as fitas homogeneizadas, o LM6172 obteve o maior erro em relação à teoria. O erro da reatância série pode ser minimizado realizando um ajuste da resistência variável R_{C1} que, de acordo com (47) e com o curto em R_{C2} , altera de forma linear o valor da reatância X_{FDNR} e tem efeito desprezível em R_{FDNR} .

A Fig. 28 apresenta a derivada de fase da impedância equivalente em relação ao campo magnético:

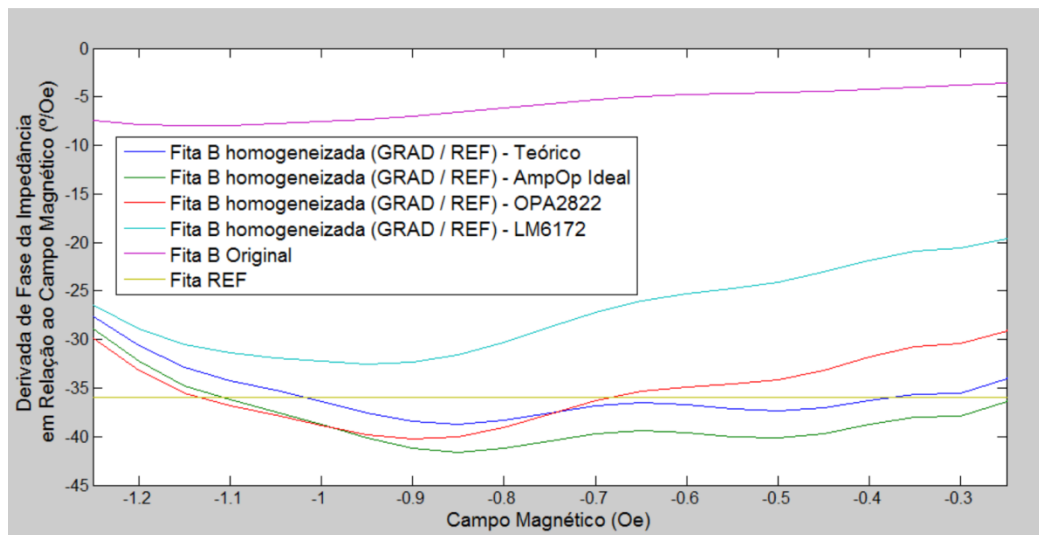


Figura 28 - Derivada de Fase da Impedância em Relação ao Campo Magnético para o Método do Gradiente

Observando a Fig. 28, verifica-se mais uma vez que até mesmo a homogeneização teórica não garante que a sensibilidade altera a derivada de fase da impedância em relação ao campo magnético, tornando o comportamento no intervalo menos linear. A simulação com o amplificador operacional ideal apresenta um erro constante em relação à teoria, enquanto que o OPA2822 e o LM6172 têm erros que variam com o campo magnético, ou seja, a impedância da fita B tem alguma influência naquela gerada pelo FDNR, devido a características não-ideais dos amplificadores operacionais. O OPA2822 apresenta comportamento muito semelhante a um amplificador ideal no intervalo entre -1,25 Oe e -0,90 Oe, quando a impedância da fita B é maior e mais indutiva. O amplificador LM6172 apresenta uma curva muito semelhante à do OPA2822, porém seu erro é consideravelmente maior.

A Fig. 29 apresenta os erros absolutos de sensibilidade para os casos estudados:

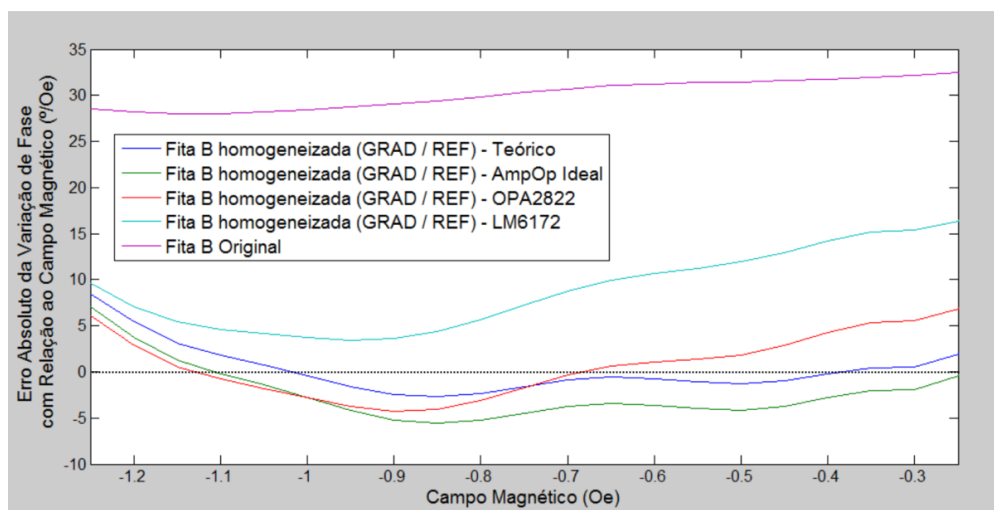


Figura 29 - Erro Absoluto de Sensibilidade para o Método do Gradiente

As observações para a Fig. 28 são válidas para a Fig. 29. É interessante que o erro absoluto de sensibilidade para a homogeneização com o OPA2822 se mantém abaixo de 7 °/Oe no intervalo de interesse, enquanto que a homogeneização teórica mantém o erro abaixo de 9 °/Oe nesse intervalo, pois apresenta erros maiores para os campos magnéticos entre -1,25 Oe e -0,8 Oe.

A Fig. 30 apresenta os erros percentuais de sensibilidade para os casos estudados:

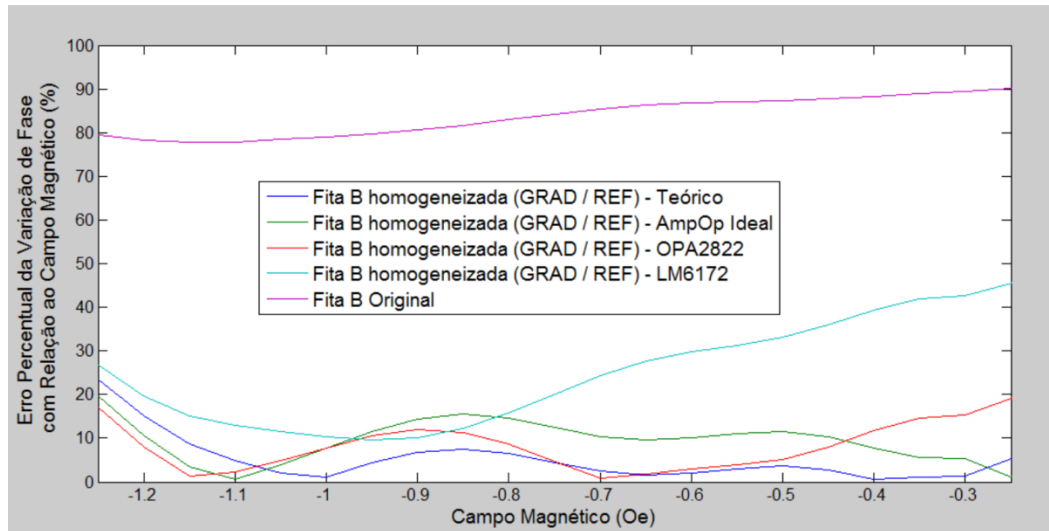


Figura 30 - Erro Percentual de Sensibilidade para o Método do Gradiente

Na Fig. 30, verifica-se que os erros percentuais da homogeneização teórica são os menores na maior parte do intervalo de interesse. Também durante a maior parte do intervalo, a simulação da homogeneização com o OPA2822 tem erros percentuais menores do que os da simulação com o amplificador operacional ideal. Os erros percentuais da homogeneização com o LM6172 são os maiores na maior parte do intervalo, chegando em certos pontos a serem maiores que a metade do erro percentual da fita B original, que varia entre 80 e 90%. A partir dos valores obtidos, é possível extrair os valores estatísticos apresentados na Tabela 3:

Método do Gradiente	Erro Percentual		
	Média	Desvio Padrão	Mediana
Teórico	5,1696	5,3540	3,6752
AmpOp Ideal	9,3713	4,8266	10,2712
OPA2822	8,1781	5,4029	7,9180
LM6172	24,5511	12,0132	24,4006
Fita B Original	83,6785	4,3577	84,1815

Tabela 3 - Valores Estatísticos para o Erro Percentual de Sensibilidade para o Método do Gradiente usando diferentes Amplificadores Operacionais, considerando apenas o intervalo entre -1,25 e -0,25 Oe

Através da média e da mediana, confirma-se que a homogeneização teórica apresenta os valores de erro percentual mais baixos. Pela mesma verificação, o OPA2822 apresenta erros mais baixos que o amplificador operacional ideal. O OPA2822 também apresenta variação de valores muito próxima à da homogeneização teórica, ao comparar seus valores de desvio padrão. O LM6172 apresenta altos valores de média e mediana, aproximadamente três vezes maiores do que os obtidos pelo OPA2822. Além disso, os erros percentuais do LM6172 têm alto desvio padrão, o que sugere que a aproximação linear é mais prejudicada ao utilizar esse componente. A fita B original apresenta o menor desvio padrão e, portanto, o comportamento mais próximo do linear.

Uma análise para um intervalo mais próximo do campo magnético de polarização H_{pol} é apresentada na Tabela 4:

Método do Gradiente	Erro Percentual		
	Média	Desvio Padrão	Mediana
Teórico	3,3300	2,0557	2,3864
AmpOp Ideal	11,3915	2,0939	10,4229
OPA2822	3,8095	3,0220	3,0832
LM6172	23,5541	5,6712	24,4006
Fita B Original	85,0975	1,5775	85,3379

Tabela 4 - Valores Estatísticos para o Erro Percentual de Sensibilidade para o Método do Gradiente usando diferentes Amplificadores Operacionais, considerando apenas o intervalo entre -0,80 e -0,60 Oe

Novamente os erros percentuais da homogeneização teórica são os menores. A homogeneização com o amplificador operacional ideal apresenta erros altos nesse intervalo, mais que três vezes maiores que o resultado teórico. O OPA2822 obteve erros muito próximos dos teóricos. O LM6172 novamente exibe erros muito maiores e maior distância à linearidade. A fita B original apresenta erros ligeiramente maiores nesse intervalo menor, mas seu desvio padrão se reduziu para menos que a metade, caracterizando comportamento ainda mais linear.

A análise de todos esses resultados mostra que o amplificador operacional OPA2822 se apresenta como excelente escolha para a montagem experimental. Além disso, verifica-se que o uso das resistências variáveis R_{POT} e R_{C1} torna possível o ajuste fino das características de resistência série equivalente e reatância série equivalente, respectivamente, ambas diretamente relacionadas ao comportamento da fase da impedância em relação ao campo magnético do circuito homogeneizador.

7. Montagem Experimental

Como o circuito trabalha com impedâncias baixas, é imprescindível minimizar o efeito resistivo e capacitivo das trilhas, assim como minimizar as possibilidades de inserção de ruído no circuito. Para isso, foi utilizada uma placa de circuito impresso de cobre cujas trilhas foram feitas por uma prototipadora, o que foi possível graças ao auxílio do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

O desenho do circuito foi desenvolvido visando otimizar o espaçamento entre os componentes do circuito e, ao mesmo tempo, criar trilhas grossas (de baixa impedância) entre a fita B e o resto do circuito. O design final é apresentado na Fig. 31, onde espaços em branco representam trilhas de cobre.

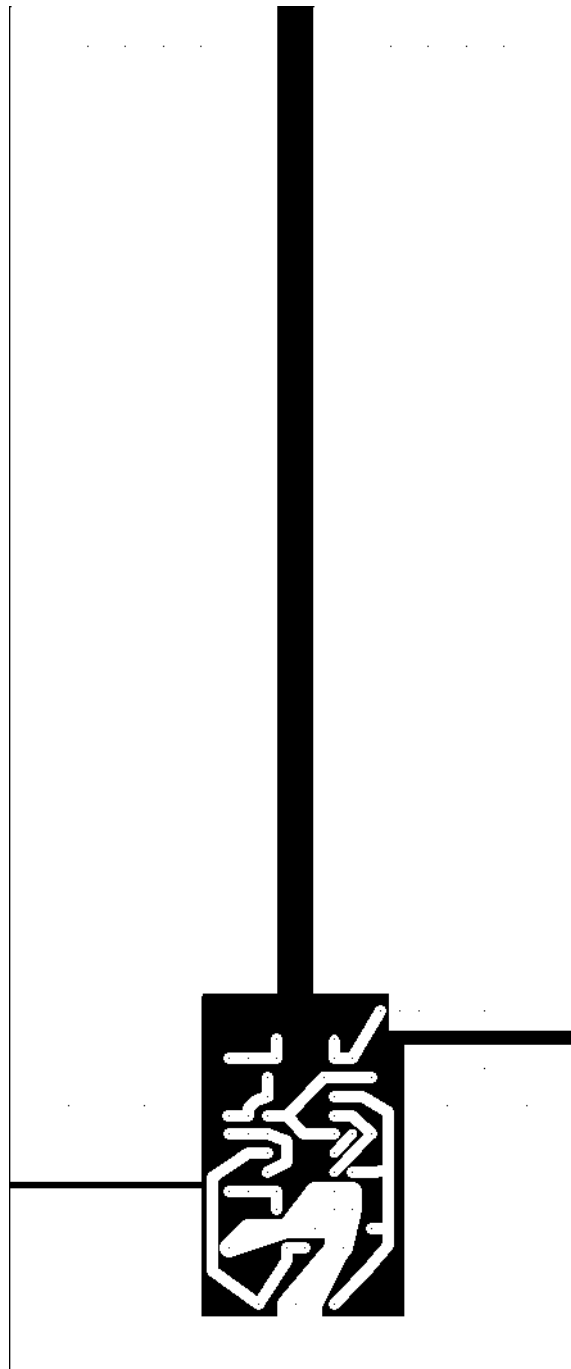


Figura 31 – Vista Superior do Projeto das Trilhas e Nós do Circuito Homogeneizador para Fabricação em Prototipadora

Na Fig. 32 é apresentado o resultado final da placa ao sair da prototipadora. A visão está espelhada por se tratar da vista inferior. Posteriormente, o cobre entre as trilhas da parte do circuito que contém o FDNR foi retirado para evitar efeitos indesejados.



Figura 32 - Vista Inferior da Placa Fabricada pela Prototipadora (Lado do Cobre)

A Fig. 33 mostra o circuito montado, incluindo os terminais BNC para utilização do Medidor RLC. Alguns valores de componente não correspondem aos utilizados na versão final, inclusive está ausente a resistência variável R_{C1} e o curto em R_{C2} , que foram adicionados posteriormente. Há também capacitores de acoplamento nos terminais de alimentação dos amplificadores operacionais, objetivando a filtragem de ruídos.

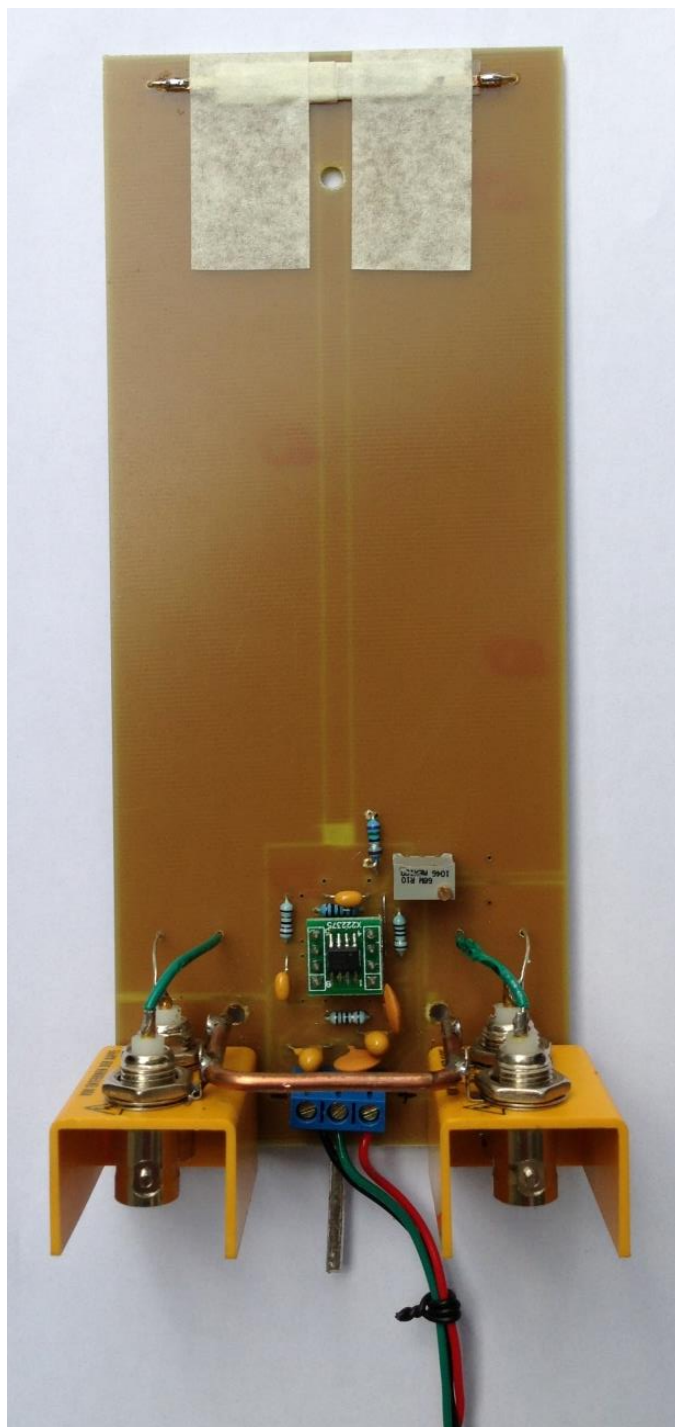


Figura 33 – Vista Superior do Circuito Homogeneizador Montado

Apesar de terem se iniciado as medições experimentais, não houve tempo para finalizar as medidas de forma satisfatória e conclusiva. Inclusive, o computador responsável pelo controle automático da caracterização apresentou problemas pouco tempo após a montagem do circuito. Portanto, os resultados experimentais ficaram em aberto por enquanto.

8. Conclusões

Os resultados obtidos através da teoria e das simulações indicam que é viável a utilização do circuito homogeneizador projetado para a homogeneização do comportamento das características de fase da impedância de amostras GMI, em função do campo magnético. Dessa forma, torna-se possível a utilização de fitas GMI inicialmente heterogêneas em configurações gradiométricas destinadas a medição de campos magnéticos ultra-fracos.

Dentre os métodos de homogeneização desenvolvidos e avaliados teoricamente, conclui-se que o método do gradiente se mostrou a alternativa mais flexível, propiciando uma maior liberdade na seleção dos componentes de ajuste, C_{aj} e R_{aj} . Também, verificou-se que este método possibilita a manutenção de bons resultados (erro pequeno entre a sensibilidade da amostra de referência e a da homogeneizada) por intervalos relativamente grandes de campo magnético. Por outro lado, o método da derivada/ponto pode alcançar resultados ainda melhores do que o do gradiente, porém apenas em intervalos menores, situados na vizinhança de H_{pol} . O método do intervalo se revelou o pior, o que pode ser justificado pela ausência de uma condição explícita para igualar as derivadas das curvas de fase da impedância em função do campo magnético.

Destaca-se que ainda é necessário obter mais resultados experimentais para comprovar definitivamente o funcionamento do circuito homogeneizador e verificar eventuais ajustes necessários para sua otimização. A princípio, as maiores dificuldades identificadas parecem ser advindas dos ajustes da resistência negativa, implementada por meio do FDNR. É necessário utilizar amplificadores operacionais com elevado produto ganho-banda passante, além de elevadas impedâncias de entrada, diferenciais e de modo-comum para reduzir os efeitos devido a suas características não-ideais. Uma vez que essas características essenciais estejam garantidas, é preciso observar os limites de saturação de tensão e corrente dos amplificadores operacionais utilizados, requisitando análise caso a caso para valores de componentes possíveis. Provavelmente esse inconveniente pode ser minimizado utilizando amplificadores operacionais rail-to-rail ou que suportem maiores tensões de alimentação, desde que possuam produto ganho-banda passante similar ou superior ao OPA2822. A alimentação do circuito por baterias também é recomendável, a fim de se reduzir o nível de ruído advindo da rede elétrica.

Outros fatores que podem afetar a montagem experimental, são as frequências naturais de oscilação devido a presença do FDNR e possíveis capacitâncias espúrias entre as trilhas da PCB, que poderiam interferir no funcionamento de um circuito que utiliza-se de impedâncias baixas.

9. Bibliografia

- [1] C. Tannous e J. Gieraltowski, "Giant magneto-impedance and its applications," J. Mat. Sci., vol. 15, n. 3, pp. 125-133, Mar. 2004.
- [2] E. C. Silva, "Magnetômetro GMI de Alta Sensibilidade para Medição de Campos Magnéticos Ultra-fracos," Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2013.
- [3] S. Yamada e I. Yamaguchi, "Magnetocardiograms in clinical medicine: unique information on cardiac ischemia, arrhythmias, and fetal diagnosis," Intern. Med., vol. 44, n. 1, Jan. 2005.
- [4] E. C. Silva, "Desenvolvimento de Transdutor Baseado na Fase da Magnetoimpedância Gigante para Medição de Campos Biomagnéticos," Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2010.
- [5] E. C. Silva, L. A. P. Gusmão, C. R. H. Barbosa, E. Costa Monteiro e F. L. A. Machado, "High sensitivity giant magnetoimpedance (GMI) magnetic transducer: magnitude versus phase sensing," Measurement Science & Technology (Print), vol. 22, n. 3, p. 035204, 2011.
- [6] M.-H. Phan e H.-X. Peng, "Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications," Progress in Materials Science, vol. 53, pp. 323-420, 2008.
- [7] J. H. C. C. Carneiro, E. C. Silva, L. Gusmão, C. Barbosa e E. C. Monteiro, "System for automatic characterization of giant magneto-impedance samples," em Proceedings of the XX IMEKO World Congress [Metrology for Green Growth], Busan, Republic of Korea, 2012.
- [8] E. Costa Silva, J. H. C. C. Carneiro, L. A. P. Gusmão, C. R. Hall Barbosa e E. Costa Monteiro, "Development of a fast and reliable system for the automatic characterization of Giant magnetoimpedance samples," vol. 2, pp. 1-6, 2013.
- [9] E. Costa Silva, L. A. P. Gusmão, C. R. H. Barbosa e E. C. Monteiro, "An electronic approach to homogenize the impedance phase characteristics of heterogeneous GMI sensors," Acta IMEKO, pp. 70-76, 2012.
- [10] E. C. Silva, L. A. P. Gusmão, C. R. H. Barbosa e E. C. Monteiro, "Homogenization of The Impedance Phase Characteristics of Giant Magnetoimpedance Sensors," em Proceedings of the IX SEMETRO, Natal, Brasil, 2011.
- [11] Y. Leipner, E. Costa Silva, C. R. Hall Barbosa, L. Gusmão e E. Costa Monteiro, "Homogeneização da Sensibilidade de Fase de Amostras GMI para Medições de Campo Biomagnético," em Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia, Porto de Galinhas, PE, 2012.
- [12] A. Antoniou, "Realizations of gyrators using operational amplifiers and their use in RC-Active Networks Synthesis," Proc. Inst. Elec, pp. 1838-1850, 1969.
- [13] L. T. Bruton, RC-Active Circuits: Theory and Design, London: Prentice-Hall International, 1980.
- [14] L. G. S. Fortaleza, E. Costa Silva, L. A. P. Gusmão, C. R. Hall Barbosa e E. Costa Monteiro, "Homogeneização das características de fase de amostras GMI para leitura gradiométrica," em Proc. of the 10th International Congress on Electrical Metrology, Buenos Aires, Argentina, 2013.

10. Anexos

10.1. Arquivo do TopSpice para análises no domínio do tempo (.TRAN) e da frequência (.AC)

Circuito Homogeneizador Metodo do Gradiente

*SIMULAÇÃO DA EXCITAÇÃO

Para .AC

*I1 0 1 AC 15m

*I3 0 1 DC 80m

Para .TRAN

*I1 0 1 sin(80m 15m 100kHz)

*ALIMENTAÇÃO DOS AMPOP'S DO GIC

V1 11 0 6V

V2 12 0 -6V

*SIMULAÇÃO DA AMOSTRA

Rb 1 1A 0.877716

Lb 1A 2 443.520056nH

*SIMULAÇÃO DO CIRCUITO HOMOGENIZADOR

Resc 2 12 75

RPOT 2 3 4.121434689

*SIMULAÇÃO DO CIRCUITO HOMOGENIZADOR - GIC - R NEGATIVO

C1 3 3A 10nF

RC1 3A 4 8.5

C2 7A 0 10nF

RC2 7 7A 0.1

R1 4 5 1000

R2 5 6 43

R3 6 7 226

X1 3 5 6 11 12 OPA2822

X2 7 5 4 11 12 OPA2822

.OPTIONS GMIN=1E-16

.AC

*.AC LIN 1000 90k 110k

*.SAVE

*#AUTO PLOT AC M[{Zeq=V(1)/I(Rh)}]

*#AUTO PLOT AC P[{Zeq=V(1)/I(Rh)}]

*#AUTO PLOT AC R[{Zeq=V(1)/I(Rh)}]

*#AUTO PLOT AC I[{Zeq=V(1)/I(Rh)}]

*#AUTO PLOT AC M[{Zfdnr=V(3)/I(RPOT)}]

*#AUTO PLOT AC P[{Zfdnr=V(3)/I(RPOT)}]

*#AUTO PLOT AC R[{Zfdnr=V(3)/I(RPOT)}]

*#AUTO PLOT AC I[{Zfdnr=V(3)/I(RPOT)}]

.TRAN

*.TRAN 0.1us 2ms 1950us 0.1us

*.SAVE

*#AUTO PLOT TRAN I(Rb) I(Resc) I(RPOT) I(C1) I(R1) I(R2) I(R3) I(C2) V(1) V(2) V(3) V(4) V(5) V(6) V(7)

AQUI ENTRAM MODELOS DOS AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Para variações de Rb e Lb com o campo magnético (Nessa seção para campos magnéticos entre -1,25 e -0,20 Oe)

*.ALTER
*Rb 1 2 0.934973
*Lb 2 3 589.706849nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.932052
*Lh 2 3 576.863577nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.927729
*Lh 2 3 562.950892nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.923322
*Lh 2 3 548.781165nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.918884
*Lh 2 3 534.306878nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.913062
*Lh 2 3 519.682441nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.907129
*Lh 2 3 505.474091nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.901468
*Lh 2 3 491.887358nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.895583
*Lh 2 3 479.429104nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.889307
*Lh 2 3 465.542003nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.883126
*Lh 2 3 454.155564nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.877716
*Lh 2 3 443.520056nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.872225
*Lh 2 3 433.667334nH

*.ALTER
*Rh 1 2 0.86751
*Lh 2 3 424.582439nH

```
*.ALTER
*Rh 1 2 0.863105
*Lh 2 3 415.450595nH
```

```
*.ALTER
*Rh 1 2 0.858221
*Lh 2 3 407.400838nH
```

```
*.ALTER
*Rh 1 2 0.854024
*Lh 2 3 399.616223nH
```

```
*.ALTER
*Rh 1 2 0.850089
*Lh 2 3 391.825618nH
```

```
*.ALTER
*Rh 1 2 0.846788
*Lh 2 3 385.15824nH
```

```
*.ALTER
*Rh 1 2 0.84332
*Lh 2 3 377.853981nH
```

```
*.ALTER
*Rh 1 2 0.840007
*Lh 2 3 371.763328nH
```

```
*.ALTER
*Rh 1 2 0.836742
*Lh 2 3 365.658223nH
```

```
*.ALTER
*Rh 1 2 0.834212
*Lh 2 3 360.532672nH
```

```
.END
```

10.2. Arquivo do MatLab para resultados teóricos dos diversos métodos

```
clear all
clc
```

```
w = 2*pi*100000;
```

```
ZH =
[1.00514;1.00659;1.00830;1.01017;1.01197;1.01290;1.01357;1.01731;1.02412;1.0249
1;1.02343;1.01958;1.01591;1.01097;1.00572;1.00005;0.99287;0.98561;0.97829;0.969
69;0.96112;0.95298;0.94489;0.93618;0.92808;0.92089;0.91380;0.90760;0.90172;0.89
558;0.89017;0.88502;0.88069;0.87610;0.87188;0.86771;0.86442;0.86123;0.85797;0.8
5524;0.85285;0.85092;0.84831;0.84687;0.84520;0.84372;0.84214;0.84048;0.83929;0.
83828;0.83834;0.83824;0.83891;0.83977;0.84103;0.84277;0.84516;0.84755;0.85069;0.
85355;0.85683;0.85946;0.86267;0.86624;0.86968;0.87350;0.87588;0.87878;0.88149;
0.88405;0.88545;0.88677;0.88752;0.88768;0.88700;0.88399;0.87908;0.87754;0.87722
;0.87653;0.87649];
```

```

TH =
[23.80480;23.78250;23.70960;23.64415;23.56110;23.44910;23.39725;23.34370;23.292
85;23.10320;22.82625;22.59115;22.27605;21.97305;21.61810;21.24995;20.87020;20.4
7785;20.06980;19.67790;19.29585;18.92390;18.59060;18.20690;17.90655;17.61440;17
.34865;17.09345;16.82725;16.60795;16.38350;16.15130;15.94925;15.72300;15.53995;
15.35365;15.19225;15.02030;14.87150;14.75400;14.63817;14.44855;14.31725;14.2280
0;14.13845;14.10555;13.99825;13.94045;13.88900;13.87550;13.87390;13.89175;13.91
000;14.00995;14.04920;14.14860;14.32950;14.49975;14.67420;14.89700;15.11245;15.
33065;15.59305;15.82895;16.07050;16.31665;16.54425;16.73935;16.95255;17.12425;1
7.30315;17.47780;17.61995;17.79020;17.84385;17.68450;17.45690;17.35965;17.35065
;17.43235;17.40190];

k = 1;
for i = -2:0.05:2

    TH1(k,1) = -36.*i-8;
    TH1A(k,1) = -36.*i-3;
    TH1B(k,1) = -36.*i-13;

    k = k + 1;
end

H = -2:0.05:2;
Hf = -1.3:0.05:-0.2;

inic = 1;

for numb=1:size(H,2)
    if(abs(H(numb)-Hf(1))< 1e-5)
        break
    else
        inic = inic +1;
    end
end

fim = inic + size(Hf,2)- 1;

RH = ZH.*cos(TH.*pi./180);
LH = ZH.*sin(TH.*pi./180)./w;

figure(1);
plot(H,TH,H,TH1A,H,TH1,H,TH1B)
legend('Fita B','Fita REF+','Fita REF', 'Fita REF-')
axis([-2 2 10 25])
xlabel('Campo Magnético (Oe)')
ylabel('Fase da Impedância (°)')

%Valores sem usar forma FDNR final:
Rpotn_a = 0;
% R = -.9251094882;
% X = 1/((w^2).*5*10^(-6));
R = -.8882576239;
X = 1/((w^2).*0.000006111411576);

Rpotn_c = 0;
% RHC = -.6610327958;
% XHC = 1/((w^2).*5*10^(-6));
RHC = -.6978846641;

```

```

XHC = 1/((w^2).*0.000006111411576);

% Novo Método do Gradiente
R1H = RH + R + Rpotn_a;
X1H = LH - X;

R1HC = RH + RHC + Rpotn_c;
X1HC = LH - XHC;

% % Método do Intervalo
%Valores sem usar forma FDNR final:

Rpot_a = 0;
Rint_a = -.7777872163;
Xint_a = -.2235534400./w;

Rpot_b = 0;
Rint_b = -.7314622884;
Xint_b = -.2371117120./w;

R1Hint = RH + Rpot_a + Rint_a;
X1Hint = LH + Xint_a;

R1HCint = RH + Rpot_b + Rint_b;
X1HCint = LH + Xint_b;

% % Método da Derivada-Ponto/ Gradiente Antigo
%Valores sem usar forma FDNR final:

Rpotda = 0;
Rderiva = -.7606414950;
Xderiva = -.2265469420./w;

Rpotdb = 0;

Rderivb = -.7249091418;
Xderivb = -.2405728412./w;

R1Hderiv = RH + Rderiva + Rpotda;
X1Hderiv = LH + Xderiva;

R1HCderiv = RH + Rderivb + Rpotdb;
X1HCderiv = LH + Xderivb;

T1H = atan2(X1H.*w,R1H).*180./pi;

T1HC = atan2(X1HC.*w,R1HC).*180./pi;

T1Hderiv = atan2(X1Hderiv.*w,R1Hderiv).*180./pi;

T1HCderiv = atan2(X1HCderiv.*w,R1HCderiv).*180./pi;

T1Hint = atan2(X1Hint.*w,R1Hint).*180./pi;

T1HCint = atan2(X1HCint.*w,R1HCint).*180./pi;

```

```

HA = H(inic:fim);
HC = H(inic:fim);

Porig = polyfit(Hf',TH(inic:fim),10);
% Forig = polyval(Porig,H);
Dorig = polyder(Porig);

PA = polyfit(Hf',TH1A(inic:fim),10);
% FA = polyval(PA,HA);
DA = polyder(PA);

PH1 = polyfit(Hf',TH1(inic:fim),10);
% FH1 = polyval(PH1,HA);
DH1 = polyder(PH1);

PH = polyfit(Hf',T1H(inic:fim),10);
% FH = polyval(PH,HA);
DH = polyder(PH);

PC = polyfit(Hf',TH1B(inic:fim),10);
% FC = polyval(PC,HC);
DC = polyder(PC);

PHC = polyfit(Hf',T1HC(inic:fim),10);
% FHC = polyval(PHC,HC);
DHC = polyder(PHC);

PHderiv = polyfit(Hf',T1Hderiv(inic:fim),10);
% FHderiv = polyval(PHderiv,HA);
DHderiv = polyder(PHderiv);

PHCderiv = polyfit(Hf',T1HCderiv(inic:fim),10);
% FHCderiv = polyval(PHCderiv,HC);
DHCderiv = polyder(PHCderiv);

PHint = polyfit(Hf',T1Hint(inic:fim),10);
% FHint = polyval(PHint,HA);
DHint = polyder(PHint);

PHCint = polyfit(Hf',T1HCint(inic:fim),10);
% FHCint = polyval(PHCint,HC);
DHCint = polyder(PHCint);

Eorig = polyval(Dorig,HA) - polyval(DH1,HA);

EorigC = polyval(Dorig,HC) - polyval(DH1,HC);

Egrad = polyval(DH,HA) - polyval(DH1,HA);

EgradC = polyval(DHC,HC) - polyval(DH1,HC);

Ederivada = polyval(DHderiv,HA) - polyval(DA,HA);

EderivadaC = polyval(DHCderiv,HC) - polyval(DC,HC);

```



```
Eintervalo = polyval(DHint,HA) - polyval(DA,HA);

EintervaloC = polyval(DHCint,HC) - polyval(DC,HC);

figure(10);

plot(HA,polyval(DHC,HC),HA,polyval(DHint,HA),HC,polyval(DHCint,HC),HA,polyval(DHderiv,HA),HC,polyval(DHCderiv,HC),Hf,polyval(Dorig,Hf),Hf,polyval(DA,Hf),Hf,polyval(DH1,Hf),Hf,polyval(DC,Hf))
legend('Fita B Homogeneizada (GRAD / REF)','Fita B Homogeneizada (INT / REF+)', 'Fita B Homogeneizada (INT / REF-)', 'Fita B Homogeneizada (DP / REF+)', 'Fita B Homogeneizada (DP / REF-)', 'Fita B Original', 'Fita REF+', 'Fita REF', 'Fita REF-')
xlabel('Campo Magnético (Oe)')
ylabel('Derivada da Fase da Impedância em Relação ao Campo Magnético (°/Oe)')

figure(11);
plot(H,T1HC,H,T1Hint,H,T1HCint,H,T1Hderiv,H,T1HCderiv,H,TH,H,TH1A,H,TH1,H,TH1B)
legend('Fita B Homogeneizada (GRAD / REF)', 'Fita B Homogeneizada (INT / REF+)', 'Fita B Homogeneizada (INT / REF-)', 'Fita B Homogeneizada (DP / REF+)', 'Fita B Homogeneizada (DP / REF-)', 'Fita B Original', 'Fita REF+', 'Fita REF', 'Fita REF-')
%axis([-2 2 10 25])
xlabel('Campo Magnético (Oe)')
ylabel('Fase da Impedância (°)')

figure(12);

plot(HC,EgradC,HA,Eintervalo,HC,EintervaloC,HA,Ederivada,HC,EderivadaC,Hf,EorigC)
legend('Fita B Homogeneizada (GRAD / REF)', 'Fita B Homogeneizada (INT / REF+)', 'Fita B Homogeneizada (INT / REF-)', 'Fita B Homogeneizada (DP / REF+)', 'Fita B Homogeneizada (DP / REF-)', 'Fita B Original')
xlabel('Campo Magnético (Oe)')
ylabel('Erro da Variação de Fase com Relação ao Campo Magnético (°/Oe)')

% Erro Médio
EMgradC = mean(EgradC(2:22))
EMintervalo = mean(Eintervalo(2:22))
EMintervaloC = mean(EintervaloC(2:22))
EMderivada = mean(Ederivada(2:22))
EMderivadaC = mean(EderivadaC(2:22))
EMorigC = mean(EorigC(2:22))

% Desvios Padrão
DPEgradC = std(EgradC(2:22))
DPEintervalo = std(Eintervalo(2:22))
DPEintervaloC = std(EintervaloC(2:22))
DPEderivada = std(Ederivada(2:22))
DPEderivadaC = std(EderivadaC(2:22))
DPEorigC = std(EorigC(2:22))

% Medianas
EMdgradC = median(EgradC(2:22))
EMdintervalo = median(Eintervalo(2:22))
EMdintervaloC = median(EintervaloC(2:22))
```

```

EMdderivada = median(Ederivada(2:22))
EMdderivadaC = median(EderivadaC(2:22))
EMdorigC = median(EorigC(2:22))

%Erro Percentual

ERorig = 100.*abs((polyval(Dorig,HA)- polyval(DH1,HA))./polyval(DH1,HA));
ERorigC = 100.*abs((polyval(Dorig,HC)- polyval(DH1,HC))./polyval(DH1,HC));
ERgrad = 100.*abs((polyval(DH,HA)- polyval(DH1,HA))./polyval(DH1,HA));
ERgradC = 100.*abs((polyval(DHC,HC)- polyval(DH1,HC))./polyval(DH1,HC));
ERderivada = 100.*abs((polyval(DHderiv,HA) - polyval(DA,HA))./polyval(DH1,HA));
ERderivadaC = 100.*abs((polyval(DHCderiv,HC) -
polyval(DC,HC))./polyval(DH1,HC));
ERintervalo = 100.*abs((polyval(DHint,HA) - polyval(DA,HA))./polyval(DH1,HA));
ERintervaloC = 100.*abs((polyval(DHCint,HC) -
polyval(DC,HC))./polyval(DH1,HC));

figure(13);

plot(HC,ERgradC,HA,ERintervalo,HC,ERintervaloC,HA,ERderivada,HC,ERderivadaC,Hf,
ERorigC)
legend('Fita B Homogeneizada (GRAD / REF)','Fita B Homogeneizada (INT /
REF+)', 'Fita B Homogeneizada (INT / REF-)', 'Fita B Homogeneizada (DP /
REF+)', 'Fita B Homogeneizada (DP / REF-)', 'Fita B Original')
xlabel('Campo Magnético (Oe)')
ylabel('Erro Percentual da Variação de Fase com Relação ao Campo Magnético
(%) ')

% Erro Percentual Médio
ERMgradC = mean(ERgradC(2:22))
ERMintervalo = mean(ERintervalo(2:22))
ERMintervaloC = mean(ERintervaloC(2:22))
ERMderivada = mean(ERderivada(2:22))
ERMderivadaC = mean(ERderivadaC(2:22))
ERMorigC = mean(ERorigC(2:22))

% Desvios Padrão
RDPEgradC = std(ERgradC(2:22))
RDPEintervalo = std(ERintervalo(2:22))
RDPEintervaloC = std(ERintervaloC(2:22))
RDPEderivada = std(ERderivada(2:22))
RDPEderivadaC = std(ERderivadaC(2:22))
RDPEorigC = std(ERorigC(2:22))

% Medianas
ERMdgradC = median(ERgradC(2:22))
ERMdintervalo = median(ERintervalo(2:22))

```

```

ERMdintervaloC = median(ERintervaloC(2:22))
ERMdderivada = median(ERderivada(2:22))
ERMdderivadaC = median(ERderivadaC(2:22))
ERMdorigC = median(ERorigC(2:22))

% No intervalo entre -0,80 Oe e -0,60 Oe

% Erro Percentual Médio
ERMgradC2 = mean(ERgradC(11:15))
ERMintervalo2 = mean(ERintervalo(11:15))
ERMintervaloC2 = mean(ERintervaloC(11:15))
ERMderivada2 = mean(ERderivada(11:15))
ERMderivadaC2 = mean(ERderivadaC(11:15))
ERMorigC2 = mean(ERorigC(11:15))

% Desvios Padrão
RDPEgradC2 = std(ERgradC(11:15))
RDPEintervalo2 = std(ERintervalo(11:15))
RDPEintervaloC2 = std(ERintervaloC(11:15))
RDPEderivada2 = std(ERderivada(11:15))

RDPEderivadaC2 = std(ERderivadaC(11:15))
RDPEorigC2 = std(ERorigC(11:15))

% Medianas
ERMdgradC2 = median(ERgradC(11:15))
ERMdintervalo2 = median(ERintervalo(11:15))
ERMdintervaloC2 = median(ERintervaloC(11:15))
ERMdderivada2 = median(ERderivada(11:15))
ERMdderivadaC2 = median(ERderivadaC(11:15))
ERMdorigC2 = median(ERorigC(11:15))

```

10.3. Arquivo do MatLab para resultados do método do gradiente a partir das simulações

```

clear all
clc

w = 2*pi*100000;

% TA é para REF+
cont = 1;
for i = -1.3:0.05:-0.2
    TA(cont,1) = -36*i-3;
    cont = cont + 1;
end

% TB é para REF-
cont = 1;
for i = -1.3:0.05:-0.2
    TB(cont,1) = -36*i-13;
    cont = cont + 1;
end

% TC é para REF
cont = 1;
for i = -1.3:0.05:-0.2

```

```

TC(cont,1) = -36*i-8;
cont = cont + 1;
end

ZH =
[1.00514;1.00659;1.00830;1.01017;1.01197;1.01290;1.01357;1.01731;1.02412;1.0249
1;1.02343;1.01958;1.01591;1.01097;1.00572;1.00005;0.99287;0.98561;0.97829;0.969
69;0.96112;0.95298;0.94489;0.93618;0.92808;0.92089;0.91380;0.90760;0.90172;0.89
558;0.89017;0.88502;0.88069;0.87610;0.87188;0.86771;0.86442;0.86123;0.85797;0.8
5524;0.85285;0.85092;0.84831;0.84687;0.84520;0.84372;0.84214;0.84048;0.83929;0.
83828;0.83834;0.83824;0.83891;0.83977;0.84103;0.84277;0.84516;0.84755;0.85069;0.
85355;0.85683;0.85946;0.86267;0.86624;0.86968;0.87350;0.87588;0.87878;0.88149;
0.88405;0.88545;0.88677;0.88752;0.88768;0.88700;0.88399;0.87908;0.87754;0.87722
;0.87653;0.87649];

TH =
[23.80480;23.78250;23.70960;23.64415;23.56110;23.44910;23.39725;23.34370;23.292
85;23.10320;22.82625;22.59115;22.27605;21.97305;21.61810;21.24995;20.87020;20.4
7785;20.06980;19.67790;19.29585;18.92390;18.59060;18.20690;17.90655;17.61440;17.
34865;17.09345;16.82725;16.60795;16.38350;16.15130;15.94925;15.72300;15.53995;
15.35365;15.19225;15.02030;14.87150;14.75400;14.63817;14.44855;14.31725;14.2280
0;14.13845;14.10555;13.99825;13.94045;13.88900;13.87550;13.87390;13.89175;13.91
000;14.00995;14.04920;14.14860;14.32950;14.49975;14.67420;14.89700;15.11245;15.
33065;15.59305;15.82895;16.07050;16.31665;16.54425;16.73935;16.95255;17.12425;17.
30315;17.47780;17.61995;17.79020;17.84385;17.68450;17.45690;17.35965;17.35065
17.43235;17.40190];

% Valores teóricos sem simulação

R1 = 1000;
R2 = 43;
R3 = 226;

Rc1 = 8.5;
C1 = 10.*(10^(-9));
Rc2 = 0.1;
C2 = 10.*(10^(-9));

Rr = R2.*(Rc1.*Rc2.*(w.^2).*(C1.*C2-1)./(R1.*R3.*(w.^2).*(C1.*C2)));
Cr = (C1.*C2.*R1.*R3)./(R2.*(Rc1.*C1+Rc2.*C2));
Xr = - 1/(w.*Cr);

Rpot1 = 3.931061729;
Rpot2 = 4.121434689;

%Valores de fase em graus tirados da simulação do TopSpice

% Homogeneização Gradiente - Valores Teóricos com AmpOp Ideal

Z1HT = [252.56182e-3;245.73657e-3;239.39038e-3;232.15854e-3;225.04492e-
3;216.81178e-3;208.77614e-3;201.33818e-3;194.05854e-3;182.49712e-3;179.50879e-
3;173.55552e-3;167.7657e-3;162.96576e-3;158.6775e-3;154.0806e-3;150.33803e-
3;147.04303e-3;144.44608e-3;141.9219e-3;139.55426e-3;137.3811e-3;135.8757e-3];

T1HT =[24.166035;22.733503;21.203473;19.548101;-342.25612+360;-344.10033+360;-
346.01092+360;-347.97922+360;-349.8782+360;-352.17896+360;-354.17323+360;-
356.18708+360;1.8275973;-125.8655e-3;-2.2016798;-4.151299;-6.1267859;-
8.1874221;-10.019051;-12.087728;-13.909297;-15.789961;-17.387309];

```

% Homogeneização Gradiente - Valores Utilizados na Montagem OPA2822

```
Z1HM = [276.81793e-3;271.85766e-3;265.56316e-3;259.36828e-3;253.34905e-3;246.21305e-3;239.27446e-3;232.92009e-3;226.64937e-3;220.24681e-3;214.22129e-3;209.18533e-3;204.25517e-3;200.25006e-3;196.75304e-3;192.86016e-3;189.78059e-3;187.12704e-3;185.05925e-3;183.08681e-3;181.16761e-3;179.41884e-3;178.24309e-3];
```

```
T1HM = [-343.86209+360;-345.32487+360;-346.9133+360;-348.60879+360;-350.42712+360;-352.31071+360;-354.23951+360;3.8104985;1.9345559;-279.51839e-3;-2.2014597;-4.0877438;-5.9300294;-7.6942287;-9.5221446;-11.244376;-12.940085;-14.670914;-16.184706;-17.866801;-19.340374;-20.841737;-22.098696];
```

% Homogeneização Gradiente - Valores Utilizados na Montagem LM6172

```
Z1HLM = [349.45976e-3;345.77134e-3;340.81738e-3;335.98371e-3;331.3447e-3;325.57124e-3;319.94004e-3;314.81485e-3;309.64762e-3;304.4375e-3;299.3631e-3;295.17559e-3;291.00018e-3;287.64642e-3;284.75327e-3;281.36903e-3;278.7291e-3;276.46433e-3;274.68824e-3;272.98788e-3;271.26299e-3;269.66994e-3;268.59208e-3];
```

```
T1HLM = [-353.8082+360;-355.08549+360;3.5124518;2.0429148;498.46575e-3;-1.1098806;-2.729131;-4.3303325;-5.8570271;-7.6114413;-9.1255424;-10.572963;-11.969691;-13.276884;-14.60421;-15.851744;-17.05471;-18.263837;-19.309484;-20.459316;-21.461294;-22.473666;-23.314825];
```

```
H = -2:0.05:2;  
Hf = -1.3:0.05:-0.2;
```

```
inic = 1;
```

```
for numb=1:size(H,2)  
    if(abs(H(numb)-Hf(1))< 1e-5)  
        break  
    else  
        inic = inic +1;  
    end  
end
```

```
fim = inic + size(Hf,2)- 1;
```

```
RH = ZH.*cos(TH.*pi./180);  
LH = ZH.*sin(TH.*pi./180)./w;  
XH = ZH.*sin(TH.*pi./180);
```

```
Rt1 = Rr + RH + Rpot1;  
Xt1 = Xr + XH;
```

```
Zt1 = sqrt(Rt1.^2+Xt1.^2);  
Tt1 = (180./pi).*atan2(Xt1,Rt1);
```

```
Rt2 = Rr + RH + Rpot2;  
Xt2 = Xr + XH;
```

```
Zt2 = sqrt(Rt2.^2+Xt2.^2);  
Tt2 = (180./pi).*atan2(Xt2,Rt2);
```

```

RHT = Z1HT.*cos(T1HT.*pi./180);
XHT = Z1HT.*sin(T1HT.*pi./180);

RHM = Z1HM.*cos(T1HM.*pi./180);
XHM = Z1HM.*sin(T1HM.*pi./180);

RHLM = Z1HLM.*cos(T1HLM.*pi./180);
XHLM = Z1HLM.*sin(T1HLM.*pi./180);

figure(1);
plot(Hf,Zt2(inic:fim),Hf,Z1HT,Hf,Z1HM,Hf,Z1HLM,Hf,ZH(inic:fim))
legend('Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - Teórico','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - AmpOp Ideal','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - OPA2822','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - LM6172','Fita B Original')
xlabel('Campo Magnético (Oe)')
ylabel('Módulo da Impedância Equivalente em função do Campo Magnético (ohms)')

figure(2);
plot(Hf,Tt2(inic:fim),Hf,T1HT,Hf,T1HM,Hf,T1HLM,Hf,TH(inic:fim),Hf,TC)
legend('Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - Teórico','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - AmpOp Ideal','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - OPA2822','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - LM6172','Fita B Original','Fita REF')
xlabel('Campo Magnético (Oe)')
ylabel('Fase da Impedância Equivalente em função do Campo Magnético (graus)')

figure(3);
plot(Hf,Rt2(inic:fim),Hf,RHT,Hf,RHM,Hf,RHLM,Hf,RH(inic:fim))
legend('Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - Teórico','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - AmpOp Ideal','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - OPA2822','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - LM6172','Fita B Original')
xlabel('Campo Magnético (Oe)')

ylabel('Resistência Série Equivalente em função do Campo Magnético (ohms)')

figure(4);
plot(Hf,Xt2(inic:fim),Hf,XHT,Hf,XHM,Hf,XHLM,Hf,XH(inic:fim))
legend('Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - Teórico','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - AmpOp Ideal','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - OPA2822','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - LM6172','Fita B Original')
xlabel('Campo Magnético (Oe)')
ylabel('Reatância Série Equivalente em função do Campo Magnético (ohms)')

Porig = polyfit(Hf',TH(inic:fim),10);
% Forig = polyval(Porig,H);
Dorig = polyder(Porig);

PA = polyfit(Hf',TA,10);
% FA = polyval(PA,HA);
DA = polyder(PA);

PB = polyfit(Hf',TB,10);
% FB = polyval(PB,Hf);
DB = polyder(PB);

PC = polyfit(Hf',TC,10);
% FC = polyval(PC,HC);
DC = polyder(PC);

```

```

Pht1 = polyfit(Hf',Tt1(inic:fim),10);
% Fht1 = polyval(Pht1,Hf);
DHt1 = polyder(Pht1);

Pht2 = polyfit(Hf',Tt2(inic:fim),10);
% Fht2 = polyval(Pht2,Hf);
DHt2 = polyder(Pht2);

PHT = polyfit(Hf',T1HT,10);
% FHT = polyval(PHT,Hf);
DHT = polyder(PHT);

PHM = polyfit(Hf',T1HM,10);
% FHM = polyval(PHM,Hf);
DHM = polyder(PHM);

PHLM = polyfit(Hf',T1HLM,10);
% FHLM = polyval(PHLM,Hf);
DHLM = polyder(PHLM);

EorigA = polyval(Dorig,Hf)- polyval(DA,Hf);

EorigB = polyval(Dorig,Hf)- polyval(DB,Hf);

EorigC = polyval(Dorig,Hf)- polyval(DC,Hf);

%Egradt1 = polyval(DHt1,Hf)- polyval(DC,Hf);

Egradt2 = polyval(DHt2,Hf)- polyval(DC,Hf);

EgradT = polyval(DHT,Hf)- polyval(DC,Hf);

EgradM = polyval(DHM,Hf) - polyval(DC,Hf);

EgradLM = polyval(DHLM,Hf) - polyval(DC,Hf);

figure(5);

plot(Hf,polyval(DHt2,Hf),Hf,polyval(DHT,Hf),Hf,polyval(DHM,Hf),Hf,polyval(DHLM,
Hf),Hf,polyval(Dorig,Hf),Hf,polyval(DC,Hf))
    legend('Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - Teórico','Fita B homogeneizada
(GRAD / REF) - AmpOp Ideal','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - OPA2822','Fita
B homogeneizada (GRAD / REF) - LM6172','Fita B Original', 'Fita REF')
    xlabel('Campo Magnético (Oe)')
    ylabel('Derivada de Fase da Impedância em Relação ao Campo Magnético (°/Oe)')

figure(6);
plot(Hf,Egradt2,Hf,EgradT,Hf,EgradM,Hf,EgradLM,Hf,EorigC)
    legend('Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - Teórico','Fita B homogeneizada
(GRAD / REF) - AmpOp Ideal','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - OPA2822','Fita
B homogeneizada (GRAD / REF) - LM6172','Fita B Original')
    xlabel('Campo Magnético (Oe)')
    ylabel('Erro Absoluto da Variação de Fase com Relação ao Campo Magnético
(°/Oe)')

ERorigA = 100.*abs((polyval(Dorig,Hf)- polyval(DA,Hf))./polyval(DA,Hf));

```

```

ERorigB = 100.*abs((polyval(Dorig,Hf)- polyval(DB,Hf))./polyval(DB,Hf));

ERorigC = 100.*abs((polyval(Dorig,Hf)- polyval(DC,Hf))./polyval(DC,Hf));

%ERgradt1 = 100.*abs((polyval(DHt1,Hf)- polyval(DC,Hf))./polyval(DC,Hf));

ERgradt2 = 100.*abs((polyval(DHt2,Hf)- polyval(DC,Hf))./polyval(DC,Hf));

ERgradT = 100.*abs((polyval(DHT,Hf)- polyval(DC,Hf))./polyval(DC,Hf));

ERgradM = 100.*abs((polyval(DHM,Hf) - polyval(DC,Hf))./polyval(DC,Hf));

ERgradLM = 100.*abs((polyval(DHLM,Hf) - polyval(DC,Hf))./polyval(DC,Hf));

figure(13);
plot(Hf,ERgradt2,Hf,ERgradT,Hf,ERgradM,Hf,ERgradLM,Hf,ERorigC)
legend('Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - Teórico','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - AmpOp Ideal','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - OPA2822','Fita B homogeneizada (GRAD / REF) - LM6172','Fita B Original')
xlabel('Campo Magnético (Oe)')
ylabel('Erro Percentual da Variação de Fase com Relação ao Campo Magnético (%)')

% Erros Percentuais

% Erro médio
ERMgradt = mean(ERgradt2(2:22))
ERMgradT = mean(ERgradT(2:22))
ERMgradM = mean(ERgradM(2:22))
ERMgradLM = mean(ERgradLM(2:22))
ERMorigC = mean(ERorigC(2:22))

% Desvios Padrão
RDPEgradt = std(ERgradt2(2:22))
RDPEgradT = std(ERgradT(2:22))
RDPEgradM = std(ERgradM(2:22))
RDPEgradLM = std(ERgradLM(2:22))
RDPEorigC = std(ERorigC(2:22))

% Medianas
ERMdgradt = median(ERgradt2(2:22))
ERMdgradT = median(ERgradT(2:22))
ERMdgradM = median(ERgradM(2:22))
ERMdgradLM = median(ERgradLM(2:22))
ERMdorigC = median(ERorigC(2:22))

% No intervalo entre -0,80 Oe e -0,60 Oe

% Erro Percentual Médio
ERMgradt2 = mean(ERgradt2(11:15))
ERMgradT2 = mean(ERgradT(11:15))
ERMgradM2 = mean(ERgradM(11:15))
ERMgradLM2 = mean(ERgradLM(11:15))
ERMorigC2 = mean(ERorigC(11:15))

% Desvios Padrão
RDPEgradt2 = std(ERgradt2(11:15))

```



```
RDPEgradT2 = std(ERgradT(11:15))
RDPEgradM2 = std(ERgradM(11:15))
RDPEgradLM2 = std(ERgradLM(11:15))
RDPEorigC2 = std(ERorigC(11:15))

% Medianas
ERMdgradt2 = median(ERgradt2(11:15))
ERMdgradT2 = median(ERgradT(11:15))
ERMdgradM2 = median(ERgradM(11:15))
ERMdgradLM2 = median(ERgradLM(11:15))
ERMdorigC2 = median(ERorigC(11:15))
```

10.4. Folhas de características dos amplificadores operacionais utilizados: OPA2822 e LM6172:



OPA2822

www.ti.com

SBOS188E – MARCH 2001 – REVISED AUGUST 2008

Dual, Wideband, Low-Noise Operational Amplifier

FEATURES

- **LOW INPUT NOISE VOLTAGE:** $2.0\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- **HIGH UNITY GAIN BANDWIDTH:** 500MHz
- **HIGH GAIN BANDWIDTH PRODUCT:** 240MHz
- **HIGH OUTPUT CURRENT:** 90mA
- **SINGLE +5V TO +12V OPERATION**
- **LOW SUPPLY CURRENT:** 4.8mA/ch

APPLICATIONS

- **xDSL DIFFERENTIAL LINE RECEIVERS**
- **HIGH DYNAMIC RANGE ADC DRIVERS**
- **LOW NOISE PLL INTEGRATORS**
- **TRANSIMPEDANCE AMPLIFIERS**
- **PRECISION BASEBAND I/Q AMPLIFIERS**
- **ACTIVE FILTERS**

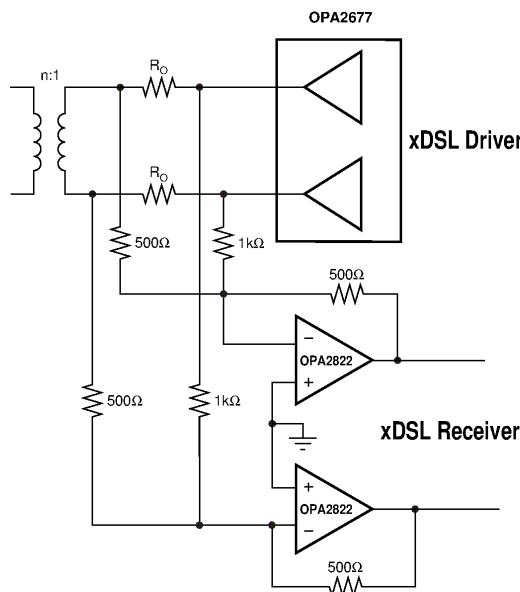
DESCRIPTION

The OPA2822 offers very low $2.0\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ input noise in a wideband, unity-gain stable, voltage-feedback architecture. Intended for xDSL receiver applications, the OPA2822 also supports this low input noise with exceptionally low harmonic distortion, particularly in differential configurations. Adequate output current is provided to drive the potentially heavy load of a passive filter between this amplifier and the codec. Harmonic distortion for a $2V_{PP}$ differential output operating from +5V to +12V supplies is $\leq -100\text{dBc}$ through 1MHz input frequencies. Operating on a low 4.8mA/ch supply current, the OPA2822 can satisfy all xDSL receiver requirements over a wide range of possible supply voltages—from a single +5V condition, to $\pm 5V$, up to a single +12V design.

General-purpose applications on a single +5V supply will benefit from the high input and output voltage swing available on this reduced supply voltage. Low-cost precision integrators for PLLs will also benefit from the low voltage noise and offset voltage. Baseband I/Q receiver channels can achieve almost perfect channel match with noise and distortion to support signals through 5MHz with > 14-bit dynamic range.

OPA2822 RELATED PRODUCTS

FEATURES	SINGLES	DUALS	TRIPLES
High Slew Rate	OPA690	OPA2690	OPA3690
R/R Input/Output	OPA353	OPA2353	—
1.3nV Input Noise	OPA846	OPA2686	—
1.5nV Input Noise	—	THS6062	—



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.



Copyright © 2001-2008, Texas Instruments Incorporated



LM6172

www.ti.com

SNOS792D – MAY 1999 – REVISED MARCH 2013

LM6172 Dual High Speed, Low Power, Low Distortion, Voltage Feedback Amplifiers

Check for Samples: [LM6172](#)

FEATURES

- (Typical Unless Otherwise Noted)
- Easy to Use Voltage Feedback Topology
- High Slew Rate 3000V/μs
- Wide Unity-Gain Bandwidth 100MHz
- Low Supply Current 2.3mA/Channel
- High Output Current 50mA/channel
- Specified for ±15V and ±5V Operation

APPLICATIONS

- Scanner I-to-V Converters
- ADSL/HDSL Drivers
- Multimedia Broadcast Systems
- Video Amplifiers
- NTSC, PAL and SECAM Systems
- ADC/DAC Buffers
- Pulse Amplifiers and Peak Detectors

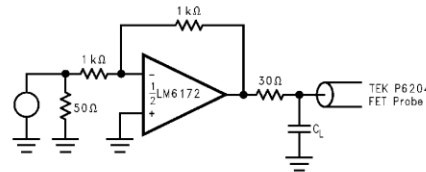
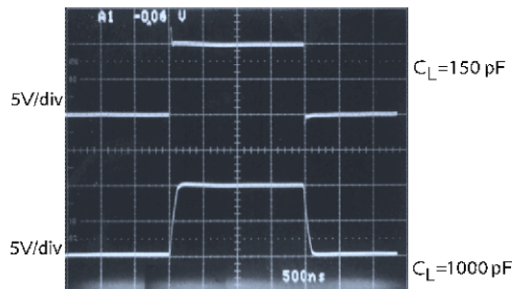
DESCRIPTION

The LM6172 is a dual high speed voltage feedback amplifier. It is unity-gain stable and provides excellent DC and AC performance. With 100MHz unity-gain bandwidth, 3000V/μs slew rate and 50mA of output current per channel, the LM6172 offers high performance in dual amplifiers; yet it only consumes 2.3mA of supply current each channel.

The LM6172 operates on ±15V power supply for systems requiring large voltage swings, such as ADSL, scanners and ultrasound equipment. It is also specified at ±5V power supply for low voltage applications such as portable video systems.

The LM6172 is built with TI's advanced VIP III (Vertically Integrated PNP) complementary bipolar process. See the LM6171 datasheet for a single amplifier with these same features.

LM6172 Driving Capacitive Load



Connection Diagram

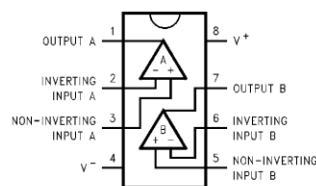


Figure 1. Top View 8-Pin
See Package Numbers P (PDIP) and D (SOIC)



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1999–2013, Texas Instruments Incorporated