

OSCILADOR ELETRÔNICO DE ALTA SENSIBILIDADE CONTROLADO POR CAMPO MAGNÉTICO

Mateus Ribeiro de Castro

Projeto de Graduação



OSCILADOR ELETRÔNICO DE ALTA SENSIBILIDADE CONTROLADO POR CAMPO MAGNÉTICO

Aluno: Mateus Ribeiro de Castro

Orientador: Eduardo Costa da Silva

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

Agradecimentos

Aos meus pais por sempre acreditarem em mim e me apoiarem em toda minha trajetória.

Ao meu irmão, pelas conversas e conselhos dados ao longo dos anos.

À minha família por oferecer suporte e apoio em todos os momentos.

Aos amigos por ajudarem na caminhada e por estarem presentes nos momentos difíceis e felizes.

À população brasileira, que, mesmo sem saber, financiou esse meu projeto de vida.

Ao meu orientador, Eduardo Costa da Silva, pela tutoria oferecida ao longo dos dois anos e meio de projeto.

Resumo

Este projeto objetiva o desenvolvimento de um oscilador eletrônico de alta sensibilidade, cuja frequência de oscilação é dependente do campo magnético. O circuito proposto baseia-se na topologia de osciladores de Colpitts, substituindo o elemento indutivo da configuração original por uma amostra GMI (Magnetoeimpedância Gigante). Tais amostras, em certas condições, podem ser eletricamente modeladas por indutâncias, cujos valores variam em função do campo magnético.

A frequência de oscilação de um oscilador de Colpitts é dependente da indutância utilizada no circuito. Consequentemente, ao se utilizar elementos sensores GMI, tem-se que esta frequência irá variar em função do campo magnético. Dessa forma, consegue-se implementar um transdutor de campo magnético em frequência, sendo possível inferir o campo magnético por meio da medição da frequência de oscilação. Por sua vez, tem-se que quanto maior for a variação da frequência de oscilação em função de variações no campo magnético, maior será a sensibilidade do transdutor. Pretende-se utilizar o circuito aqui projetado em medições de campos magnéticos ultra-fracos em possíveis aplicações biomédicas.

O circuito eletrônico projetado é apresentado e discutido ao longo do texto. Os valores especificados para cada componente, tanto no projeto teórico quanto na montagem experimental, são explicitados e discutidos. O projeto teórico desenvolvido foi comparado com o protótipo montado e as discrepâncias apresentadas foram avaliadas. Foi desenvolvido um sistema de caracterização do circuito com o propósito de otimizar seu desempenho, objetivando a maximização de sua sensibilidade e linearidade, buscando a minimização de distorções harmônicas na forma de onda senoidal gerada pelo oscilador.

Palavras-chave: Oscilador Eletrônico; Magnetoeimpedância Gigante; Oscilador de Colpitts; Sensores Magnéticos; Alta Sensibilidade; Linearidade; Distorção Harmônica.

High Sensitivity Electronic Oscillator Controlled by Magnetic Field

Abstract

This work aims at developing a high sensitivity electronic oscillator, that shows a dependency between its oscillation frequency and the magnetic field. The proposed circuit is based on the Colpitts Oscillators topology, replacing the inductive element of the original configuration by a GMI (Giant Magnetoimpedance) sample. Such samples, under certain conditions, can be electrically modeled by inductances, that vary their values as a function of the magnetic field.

The oscillation frequency of a Colpitts Oscillator is dependent of the inductance used in the circuit. Consequently, by using GMI sensor elements, this frequency will vary according to the magnetic field. In this way, it is possible to implement a transducer of magnetic field in frequency, which can be used to infer the magnetic field by measuring the oscillation frequency. In turn, the transducer sensitivity is enhanced by increasing the variation of the oscillation frequency in function of magnetic field variations. It is intended to use the circuit herein designed in ultra-weak magnetic field measurements, related to biomedical applications.

The designed electronic circuit is presented and discussed throughout the text. The values specified for each component, on the theoretical design and on the experimental implementation, are highlighted and discussed. The designed theoretical circuit was compared to the assembled prototype and the observed discrepancies were presented and evaluated. It was developed a characterization system of the circuit with the purpose of optimizing its performance, aiming the maximization of its sensitivity and linearity, seeking at minimizing the harmonic distortions in the sinusoidal wave generated by the oscillator.

Keywords: Electronic Oscillator; Giant Magnetoimpedance; Colpitts Oscillator; Magnetic Sensors; High Sensitivity; Linearity; Harmonic Distortion.

Sumário

1.	Introdução.....	9
1.1.	Magnetoimpedância Gigante.....	9
2.	Materiais e Métodos Experimentais.....	11
2.1.	Caracterização Experimental da Amostra GMI	11
2.2.	Modelagem Matemática do Comportamento da Amostra.....	13
3.	Projeto do Circuito de Oscilação	15
3.1.	Circuito Inicial.....	15
3.2.	Oscilador de Colpitts	15
3.3.	Sistema Matemático Obtido	17
4.	Simulação, Montagem e Sistema de Caracterização.....	19
4.1.	Simulações Computacionais.....	19
4.2.	Circuito Experimental	21
4.3.	Sistema de Caracterização Automática do Circuito	23
5.	Resultados Experimentais e Discussões.....	25
6.	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	28
7.	Referências Bibliográficas	29

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de medição do efeito GMI.....	10
Figura 2 – Sistema de Caracterização.....	12
Figura 3 – Comportamento de (a) módulo e (b) fase da amostra para cada uma das 5 frequências aplicadas.....	12
Figura 4 – Comportamento da componente (a) resistiva e (b) indutiva da impedância da amostra, para cada uma das frequências aplicadas.	13
Figura 5 – Superfície polinomial de aproximação dos dados da caracterização em um polinômio que define LA em função de H e f.	14
Figura 6 – Topologia de um circuito oscilador, que emprega uma amostra GMI a fim de obter uma frequência de oscilação controlada pelo campo magnético.	15
Figura 7 – Topologia de um oscilador de Colpitts genérico.....	16
Figura 8 – Circuito do Oscilador GMI, em vermelho está destacado o modelo elétrico da amostra GMI e em azul os elementos da fonte de corrente.....	17
Figura 9 – Gráfico de frequência x campo magnético com dois pontos selecionados para cálculo da sensibilidade.....	18
Figura 10 – Curvas de (a) tensão de saída do oscilador e (b) corrente na amostra em função do tempo.....	19
Figura 11 – Transformada de Fourier de Vout, para diferentes campos magnéticos.....	20
Figura 12 – Montagem do circuito oscilador na protoboard.....	21
Figura 13 – Circuito soldado diretamente em uma placa universal.....	22
Figura 14 – Frequência de oscilação obtida para cada valor de campo magnético aplicado ao circuito experimental, com dois pontos destacados para verificar a sensibilidade.....	22
Figura 15 – Interface do programa LabVIEW com captura das frequências de saída e exportação para o Excel.....	24
Figura 16 – Curva Média (esquerda) e de Histerese (direita) da frequência de oscilação, em Hz, em função do campo magnético, em Oe.....	25
Figura 17 – Tensão de saída do oscilador, para $H_{pol} = 1,2 \text{ Oe}$	26
Figura 18 – FFT do sinal de saída apresentado na Figura 17.....	26

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores de indutância da amostra GMI correspondentes a cada valor de campo magnético analisado.....	20
--	----

1. Introdução

Sensores baseados no efeito da Magnetoimpedância Gigante (GMI) são uma das famílias mais recentes de dispositivos destinados ao sensoriamento magnético de alta resolução. Sensores magnéticos GMI apresentam uma grande variação de sua impedância em função do campo magnético H , quando excitados por uma corrente alternada (CA). Estudos atuais, descritos na literatura, indicam que tais sensores apresentam alta sensibilidade, baixo custo e capacidade de operar a temperatura ambiente. Consequentemente, verifica-se que os mesmos possuem grande potencial para medições de campos magnéticos ultra-fracos [1].

O presente trabalho objetiva estudar o efeito da Magnetoimpedância Gigante (GMI) e desenvolver um transdutor de campo magnético em frequência, com as características necessárias a adequada excitação e leitura de um elemento sensor GMI. Tendo em vista a medição de campos magnéticos ultra-fracos, tal circuito foi projetado objetivando a maximização de sua sensibilidade, ou seja, das variações da frequência de excitação f_0 em função de H .

Os trabalhos de pesquisa realizados envolveram a caracterização do comportamento experimental da impedância da amostra GMI utilizada, em função do campo magnético, para diversas combinações dos parâmetros (nível CC, amplitude e frequência) da corrente de excitação. Também foram avaliadas e simuladas computacionalmente topologias de osciladores senoidais que empregam a amostra analisada como parte de seu circuito. Na sequência, uma primeira versão do circuito eletrônico foi montada e testada experimentalmente.

Deseja-se que tal circuito seja capaz de gerar uma forma de onda senoidal, com baixa distorção harmônica total e com alta sensibilidade, isto é, que a frequência de oscilação f_{osc} varie intensamente em função das variações no campo magnético H . A sensibilidade do oscilador desenvolvido pode ser otimizada por meio de ajustes no circuito, porém, tais ajustes também podem acarretar em incrementos da distorção harmônica. Dessa forma, as pesquisas desenvolvidas no projeto, objetivaram, além de estudar o efeito GMI e desenvolver um circuito eletrônico de transdução, aprimorar o desempenho do transdutor de campo magnético em frequência. Em particular, focou-se no desenvolvimento de um sistema de caracterização automática do oscilador eletrônico, a fim de se poder determinar o ponto ótimo de operação do oscilador, ou seja, a configuração do circuito onde verifica-se uma boa relação de compromisso entre sensibilidade e distorção harmônica.

1.1. Magnetoimpedância Gigante

Fitas e fios de ligas ferromagnéticas moles têm atraído considerável atenção devido a suas propriedades físicas e aplicações tecnológicas. Um dos fenômenos mais interessantes observados nesses elementos é a Magnetoimpedância Gigante (GMI), presente, por exemplo, em amostras da família $\text{Co}_{75-x}\text{Fe}_x\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ – as quais possuem baixa magnetostricção [1].

Em geral, a impedância de um condutor depende da distribuição de corrente dentro do material. Devido ao efeito pelicular (*skin effect*), quando a frequência da corrente aplicada aumenta é comum a corrente se concentrar na superfície do condutor. Em materiais magnéticos, o valor da profundidade de penetração de corrente (*skin depth*) não depende apenas da frequência da corrente aplicada, mas, também, da geometria e permeabilidade magnética do condutor, a qual, por sua vez, pode variar em função do campo magnético externo e da amplitude da corrente que atravessa o condutor. Isso faz com que, em amostras de materiais de alta permeabilidade, mesmo em uma faixa intermediária de frequências, possa-se esperar uma variação da impedância desses condutores em função do campo magnético aplicado [1].

No efeito GMI, a corrente alternada aplicada ao longo do comprimento da amostra produz um campo magnético transversal. Esse campo magnetiza a amostra, aumentando sua permeabilidade transversal. A permeabilidade cresce até atingir a condição de saturação do material em questão, na qual o campo magnético externo é suficientemente elevado a ponto de rotacionar os domínios magnéticos, reorientando-os completamente ao longo de sua direção. A dependência da permeabilidade magnética com o campo magnético externo e com a corrente aplicada na amostra modifica a profundidade de penetração da corrente dentro do material e, conseqüentemente, sua impedância [1].

O efeito GMI é induzido no material por meio da aplicação de uma corrente alternada I na direção longitudinal das amostras, as quais são submetidas a um campo magnético externo H . A impedância das amostras GMI varia em função do campo H . Dessa forma, H pode ser inferido pela medição da diferença de potencial V entre as extremidades da amostra, conforme mostrado na Figura 1.

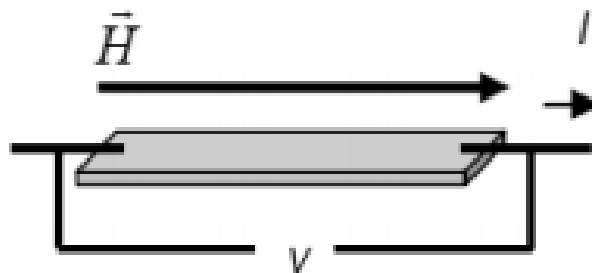


Figura 1 – Exemplo de medição do efeito GMI.

As curvas de GMI, que indicam a variação da impedância das amostras com o campo magnético H , são geralmente simétricas em relação a este campo. Porém, certas condições favorecem o surgimento de assimetria nas curvas GMI, denominada Magnetimpedância Gigante Assimétrica (AGMI) [1,2]. Embora nem todas as causas da AGMI sejam conhecidas, três fatores são destacados na literatura. São eles: corrente CC, campos magnéticos CA e "Exchange bias" [1]. Por meio do efeito AGMI é possível maximizar a sensibilidade das amostras sensoras. Conseqüentemente, tendo em vista a otimização do desempenho do transdutor desenvolvido, no presente trabalho, induziu-se este por meio de uma corrente CC aplicada à amostra utilizada no oscilador.

2. Materiais e Métodos Experimentais

2.1. Caracterização Experimental da Amostra GMI

No presente trabalho, utilizou-se uma amostra sensora GMI no projeto e desenvolvimento de um oscilador eletrônico, capaz de variar a sua frequência de oscilação f_{osc} em função do campo magnético externo. Para a faixa de frequências inspecionada, a impedância Z_A da amostra pode ser eletricamente modelada por um resistor R_A em série com um indutor L_A , ambos dependentes do campo magnético H . Consequentemente, a impedância Z_A da amostra pode ser definida por

$$Z_A(H) = R_A(H) + j \cdot \omega \cdot L_A(H) \quad (1)$$

onde ω é a frequência angular da corrente de excitação.

A amostra utilizada foi caracterizada experimentalmente a fim de se obter as curvas que descrevem o comportamento de R_A e L_A com H , para diversas frequências da corrente de excitação [3].

O processo de caracterização consiste em excitar a amostra com a corrente desejada (nível CC, amplitude e frequência), variar o campo magnético H e verificar as variações correspondentes de módulo e fase da impedância Z_A da amostra para cada valor de H arbitrado. A amostra GMI utilizada é da família LMI (Magnetoimpedância Gigante Longitudinal), sendo mais sensível a campos magnéticos aplicados no sentido longitudinal ao seu comprimento. O campo magnético ao qual a amostra é submetida é controlado por uma bobina de Helmholtz. A fim de minimizar a influência do campo magnético terrestre nas medições, com o auxílio de uma bússola, o comprimento da amostra é posicionado perpendicularmente a direção deste campo.

A bobina de Helmholtz utilizada é excitada por uma fonte de corrente, sendo que controlando-se esta corrente, controla-se o campo magnético gerado pela bobina. Há uma relação linear entre tal corrente e o campo magnético H gerado. Em particular, para a bobina utilizada nas medições aqui descritas tem-se que

$$H = 2,89 \cdot I \quad (2)$$

onde: H é expresso em oersteds (Oe) e I é expresso em amperes (A).

Por sua vez, a excitação da amostra sensora é feita por meio de um medidor RLC de precisão (4285A, *Agilent*), o qual também é responsável por ler os valores de módulo e fase da amostra. A Figura 2 apresenta uma representação simplificada do sistema de caracterização empregado.

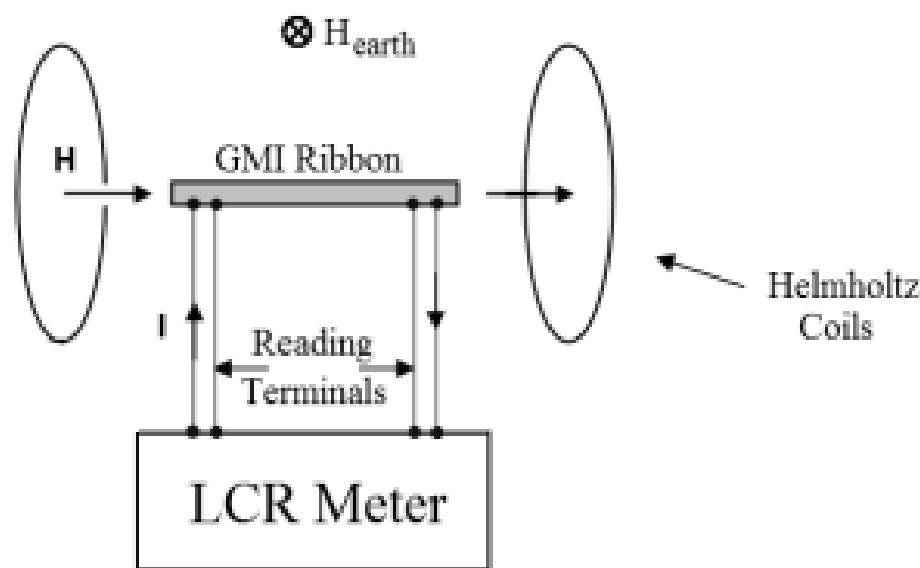


Figura 2 – Sistema de Caracterização.

As medições de módulo e fase da impedância da amostra são feitas a fim de se avaliar se as mesmas apresentam histerese. A caracterização é realizada partindo de um campo de 0 Oe, o qual é variado em incrementos de 0,1 Oe até 2 Oe. Na sequência, o campo é reduzido com decrementos de 0,1 Oe até -2 Oe. Finalmente, retorna-se a 0 Oe com o mesmo passo. Os resultados obtidos indicaram que as amostras analisadas não apresentam histerese significativa, o que é extremamente desejável tendo em vista sua aplicação como elemento sensor.

A Figura 3 apresenta os resultados experimentais obtidos para a situação na qual a amostra é excitada com uma corrente senoidal com amplitude de 15 mA e nível CC de 80 mA. Foram feitas caracterizações para cinco valores distintos de frequência.

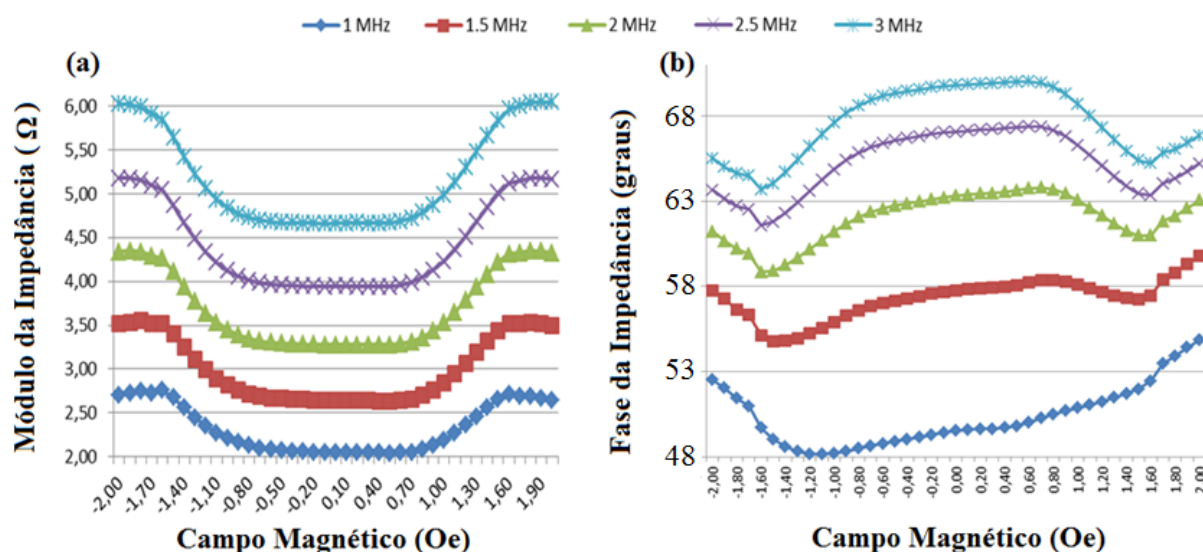


Figura 3 – Comportamento de (a) módulo e (b) fase da amostra para cada uma das 5 frequências aplicadas.

Com base nos resultados apresentados na Figura 3, por meio do modelo elétrico da impedância da amostra, apresentado na eq. (1), é possível calcular os valores correspondentes da componente resistiva $R_A(H)$ e indutiva $L_A(H)$. A Figura 4 apresenta tais curvas características.

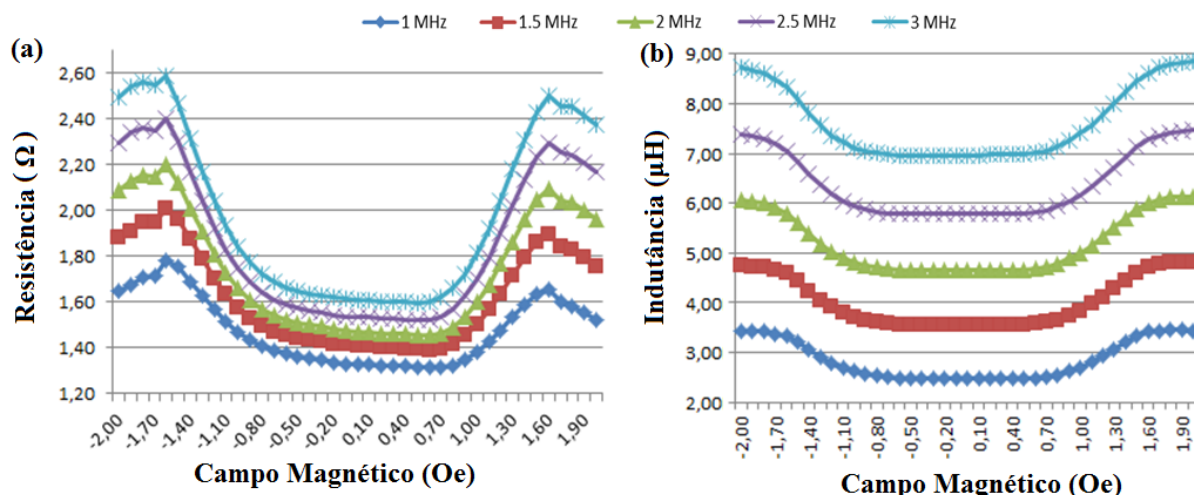


Figura 4 – Comportamento da componente (a) resistiva e (b) indutiva da impedância da amostra, para cada uma das frequências aplicadas.

A partir dos resultados obtidos verificou-se a existência de uma boa região linear, para a frequência de 2 MHz, na vizinhança de 1,2 Oe. Assim, o oscilador foi projetado a fim de apresentar uma frequência de oscilação de 2 MHz, quando polarizado por um campo magnético de 1,2 Oe. Este campo de polarização é gerado por um solenoide, no qual a amostra GMI é inserida. Dessa forma, quando a amostra estiver sujeita apenas ao campo de polarização, deseja-se que o oscilador oscile em 2 MHz. Por outro lado, na presença de outras fontes de campo, o campo resultante sobre a amostra irá variar e, consequentemente, a frequência de oscilação será alterada.

2.2. Modelagem Matemática do Comportamento da Amostra

No processo de caracterização experimental são obtidos dados discretos, em frequências e campos magnéticos específicos. As topologias de osciladores eletrônicos estudadas possuem frequência de oscilação dependente de um dado valor de indutância. Ou seja, ao se variar o valor desta indutância a frequência de oscilação do circuito também varia. Consequentemente, tendo em vista que as amostras GMI podem ser modeladas por um resistor em série com um indutor, tem-se por objetivo substituir o indutor destas topologias de osciladores pela amostra GMI. Portanto, para fins de projeto, se faz necessária uma expressão analítica da qual fosse possível obter o valor da indutância L_A da amostra para quaisquer valores de campo magnético H e frequência f . Note que, é importante que a amostra GMI se comporte quase como um indutor ideal, ou seja, sua componente indutiva deve ser muito maior do que sua componente resistiva. Para frequências em torno de 2 MHz, a componente resistiva da amostra é, de fato, desprezível em relação a sua componente indutiva. Consequentemente, R_A não afeta significativamente o comportamento do oscilador.

Assim, foi utilizado o software matemático MATLAB para gerar o polinômio que melhor aproximasse o comportamento da componente indutiva da amostra, para $-2 \text{ Oe} < H < 2 \text{ Oe}$ e $1 \text{ MHz} < f < 3 \text{ MHz}$. A Figura 5 apresenta melhor a superfície de aproximação obtida.

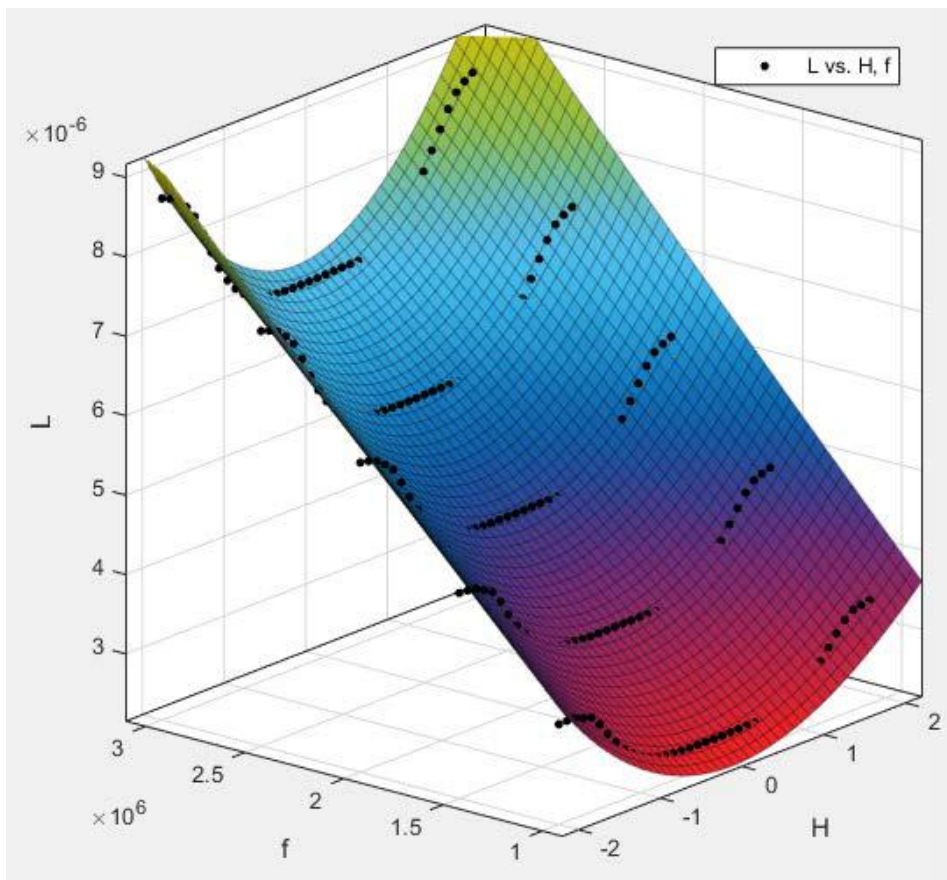


Figura 5 – Superfície polinomial de aproximação dos dados da caracterização em um polinômio que define L_A em função de H e f .

Por sua vez, a expressão analítica da superfície polinomial apresentada na Figura 5 é dada por

$$L_A(H, f) = p_{00} + p_{10} \cdot H + p_{01} \cdot f + p_{20} \cdot H^2 + p_{11} \cdot H \cdot f + p_{02} \cdot f^2 + p_{30} \cdot H^3 + p_{21} \cdot H^2 \cdot f + p_{12} \cdot H \cdot f^2 \quad (3)$$

Onde:

$$\begin{cases} p_{00} = 3,567 \cdot 10^{-7} \\ p_{10} = 4,102 \cdot 10^{-8} \\ p_{01} = 2,02 \cdot 10^{-12} \\ p_{20} = 1,905 \cdot 10^{-7} \\ p_{11} = 3,855 \cdot 10^{-14} \\ p_{02} = 4,672 \cdot 10^{-20} \\ p_{30} = -2,043 \cdot 10^{-8} \\ p_{21} = 1,214 \cdot 10^{-13} \\ p_{12} = -2,159 \cdot 10^{-21} \end{cases}$$

Dessa forma foi obtido um polinômio generalizado que permite a obtenção do valor de L_A para dados contínuos de f e H , de modo que utilizando quaisquer dois valores de entrada, contidos no espaço amostral, a saída será o valor da indutância L_A da amostra GMI.

3. Projeto do Circuito de Oscilação

3.1. Circuito Inicial

Inicialmente, tendo em vista a necessidade de um circuito no qual a amostra possa ser utilizada, estudou-se o circuito proposto em [4], o qual é apresentado na Figura 6.

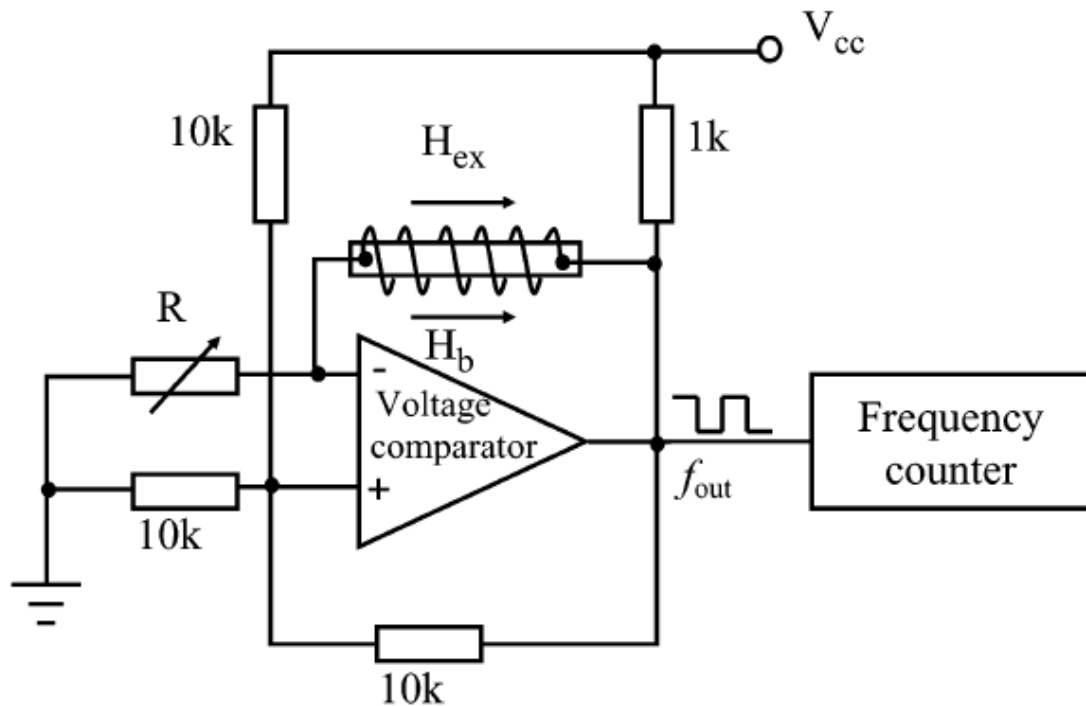


Figura 6 – Topologia de um circuito oscilador, que emprega uma amostra GMI a fim de obter uma frequência de oscilação controlada pelo campo magnético.

O circuito consiste em um comparador de tensão e a amostra a ser analisada, onde H_b é o campo de polarização utilizado. O resistor R e a amostra funcionam como um elemento temporizador no circuito oscilador [4].

Para o circuito apresentado na Figura 6, a frequência de oscilação f_{osc} é dada por

$$f_{out} \propto \frac{R}{L_A(H)} \quad (4)$$

O circuito proposto na Figura 6 torna difícil o controle da corrente de excitação que flui pela amostra GMI. Consequentemente, optou-se por investigar outra topologia de oscilador.

3.2. Oscilador de Colpitts

Dada a necessidade de adaptação do circuito a fim de se alcançar o objetivo desejado, optou-se por implementar uma topologia eletrônica de oscilador senoidal baseado no Oscilador de Colpitts [5], apresentado na Figura 7.

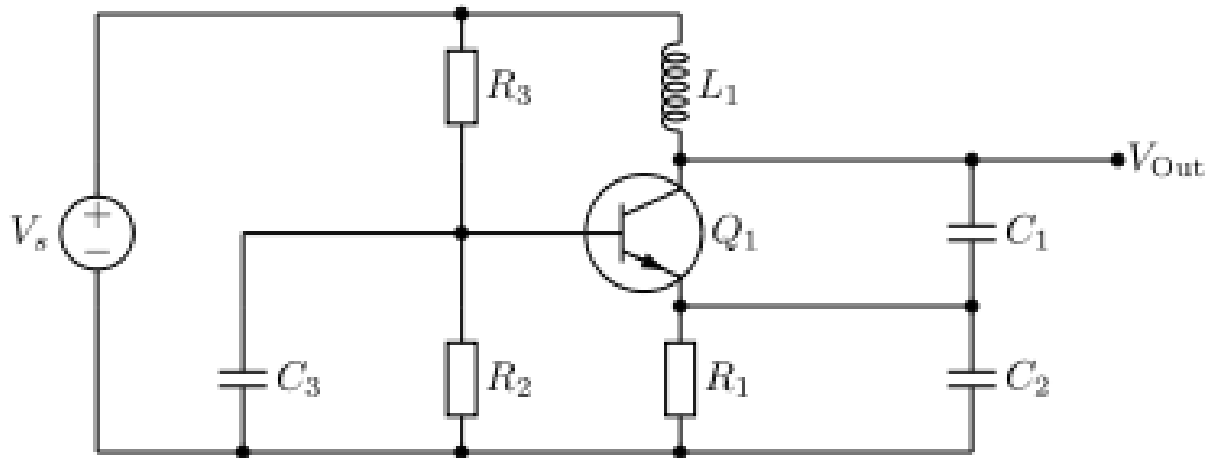


Figura 7 – Topologia de um oscilador de Colpitts genérico.

Para o circuito apresentado na Figura 7 a frequência de oscilação f_0 é dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (5)$$

No circuito o indutor L_1 será substituído pela amostra, pois sua impedância é admitida como $R_A \ll j \cdot \omega \cdot L_A$. Assim pode-se assumir que na vizinhança de 2 MHz, a componente resistiva da amostra GMI é desprezível frente ao módulo da componente indutiva. Logo, o comportamento do circuito não sofre grandes alterações, pois a amostra pode ser modelada por um indutor quase ideal.

Tendo em vista os dados obtidos nas curvas de caracterização, optou-se por projetar o circuito a fim de se garantir que a frequência de oscilação, no campo magnético de polarização ($H_{pol} = 1,2 \text{ Oe}$), fosse de 2 MHz. Na vizinhança de H_{pol} as características da amostra GMI apresentam um comportamento satisfatoriamente linear (vide Figuras 3 e 4). Ainda, destaca-se que para frequências de oscilação muito altas as capacitâncias C_1 e C_2 devem ser valores muito baixos, sendo que as capacitâncias internas do transistor Q_1 passam a afetar a frequência de oscilação. Por outro lado, para frequências muito baixas a sensibilidade (df_0/dH) é reduzida e, também, a componente indutiva (L_A). Dessa forma, a frequência de 2 MHz é uma solução de compromisso, tendo em vista as condições de contorno impostas.

Na Figura 8, apresenta-se o circuito proposto para o oscilador GMI, com os valores de todos os componentes especificados. A saída do oscilador V_{out} é medida no coletor de Q_1 ou de Q_2 . Ressalta-se que se fez necessária a adição de um módulo adicional destacado em azul na Figura 8, para o ajuste do nível CC de corrente que flui pela amostra GMI.

Com a frequência de 2 MHz e H_{pol} aplicados a amostra sensora GMI tem-se que: $L_A = 5,31 \mu\text{H}$ e $R_A = 1,77 \Omega$.

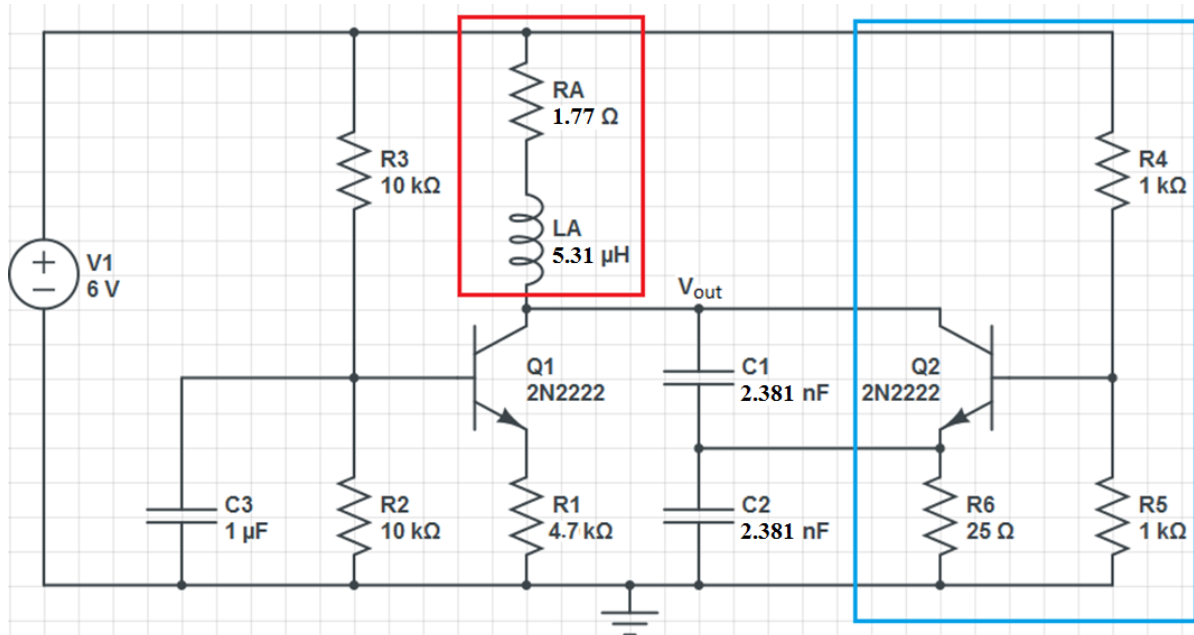


Figura 8 – Circuito do Oscilador GMI, em vermelho está destacado o modelo elétrico da amostra GMI e em azul os elementos da fonte de corrente.

Os capacitores C_1 e C_2 foram calculados fixando os valores da frequência (2 MHz) e da indutância ($L_A = 5,31 \mu\text{H}$). Consequentemente, aplicando esses valores na equação (5), que define a frequência do oscilador de Colpitts e assumindo, para simplificar os cálculos, que C_1 é igual a C_2 , foi obtido $C_1 = C_2 = 2,381 \text{ nF}$.

A fonte de corrente possibilita que se forneça o nível CC adequado para a amostra (80 mA) sem interferir no funcionamento do circuito oscilador. A fonte de corrente implementada por Q_2 drena uma corrente CC de cerca de 80 mA por seu coletor, o qual é conectado ao coletor de Q_1 e a um dos terminais da amostra. A corrente CC drenada pelo coletor de Q_1 é desprezível em relação a 80 mA. Consequentemente, por meio de Q_2 , garante-se que os 80 mA fluam quase que inteiramente pela amostra GMI. Por sua vez, por meio de ajustes em R_1 , é possível ajustar a amplitude da corrente CA que flui pela amostra. A fim de garantir que uma corrente com nível CC de 80 mA e amplitude de 15 mA flua pela amostra, definiu-se que $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$ e $R_6 = 25 \Omega$.

Tendo em vista aspectos discutidos nesta seção, percebe-se que variações em L_A implicarão em mudanças na frequência de oscilação f_0 . Por sua vez, sabe-se que a indutância da amostra L_A varia em função do campo magnético H . Consequentemente, infere-se que f_0 irá variar em função do campo magnético, conforme pretendido.

3.3. Sistema Matemático Obtido

Com base nos dados obtidos a partir da modelagem matemática, que estabelecem a dependência da indutância da amostra em função da frequência e do campo magnético, eq. (3), e conhecendo-se a eq. (5) que define a dependência da frequência do oscilador de Colpitts em função da indutância da amostra, obtém-se um sistema composto por duas funções: $L_A(f_0, H)$ e $f_0(L_A)$. Consequentemente, variações no campo H , implicarão em alterações na indutância L_A que por sua vez alterará a frequência de oscilação do circuito. A Figura 9 apresenta a estimativa matemática da dependência de f_0 com o campo magnético H , sendo que a partir destes dados pode-se estimar a sensibilidade do circuito (df_0/dH).

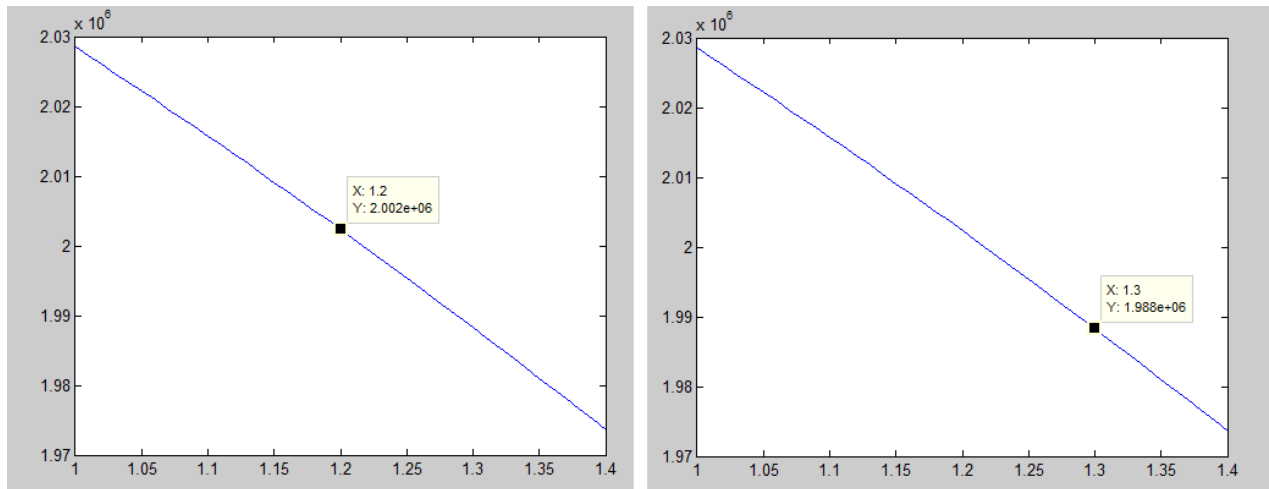


Figura 9 – Gráfico de frequência x campo magnético com dois pontos selecionados para cálculo da sensibilidade.

Os resultados apresentados na Figura 9 indicam que, conforme esperado, a frequência de oscilação varia na vizinhança de 2 MHz, para campos magnéticos em torno de H_{pol} . A sensibilidade pode ser calculada a partir dos pontos observados. Como a região é aproximadamente linear pode-se encontrar a sensibilidade fazendo:

$$\frac{df_0}{dH} = \frac{\Delta f_0}{\Delta H} = \frac{2,002 \cdot 10^6 - 1,988 \cdot 10^6}{0,1} = 140 \text{ kHz/Oe} \quad (6)$$

Dessa forma, verifica-se que a sensibilidade teórica obtida, com base nos dados matemáticos, é de aproximadamente 140 kHz/Oe.

4. Simulação, Montagem e Sistema de Caracterização

4.1. Simulações Computacionais

Com o circuito devidamente projetado e equacionado, o último passo antes de realizar sua montagem experimental foi simulá-lo por meio de um *software* SPICE, a fim de verificar se é obtido um resultado satisfatório e compatível com as projeções teóricas.

Como a componente resistiva da impedância da amostra GMI é muito menor que a indutiva, o valor R_A da mesma será fixado no valor obtido para frequência e campo de polarização, $R_A = 1,77 \, \Omega$, pois variações de R_A não afetarão significativamente o comportamento do oscilador. A Figura 10 apresenta a tensão de saída do oscilador V_{out} e a corrente I_A que flui pela amostra GMI, quando $H = H_{pol} = 1,2 \, \text{Oe}$.

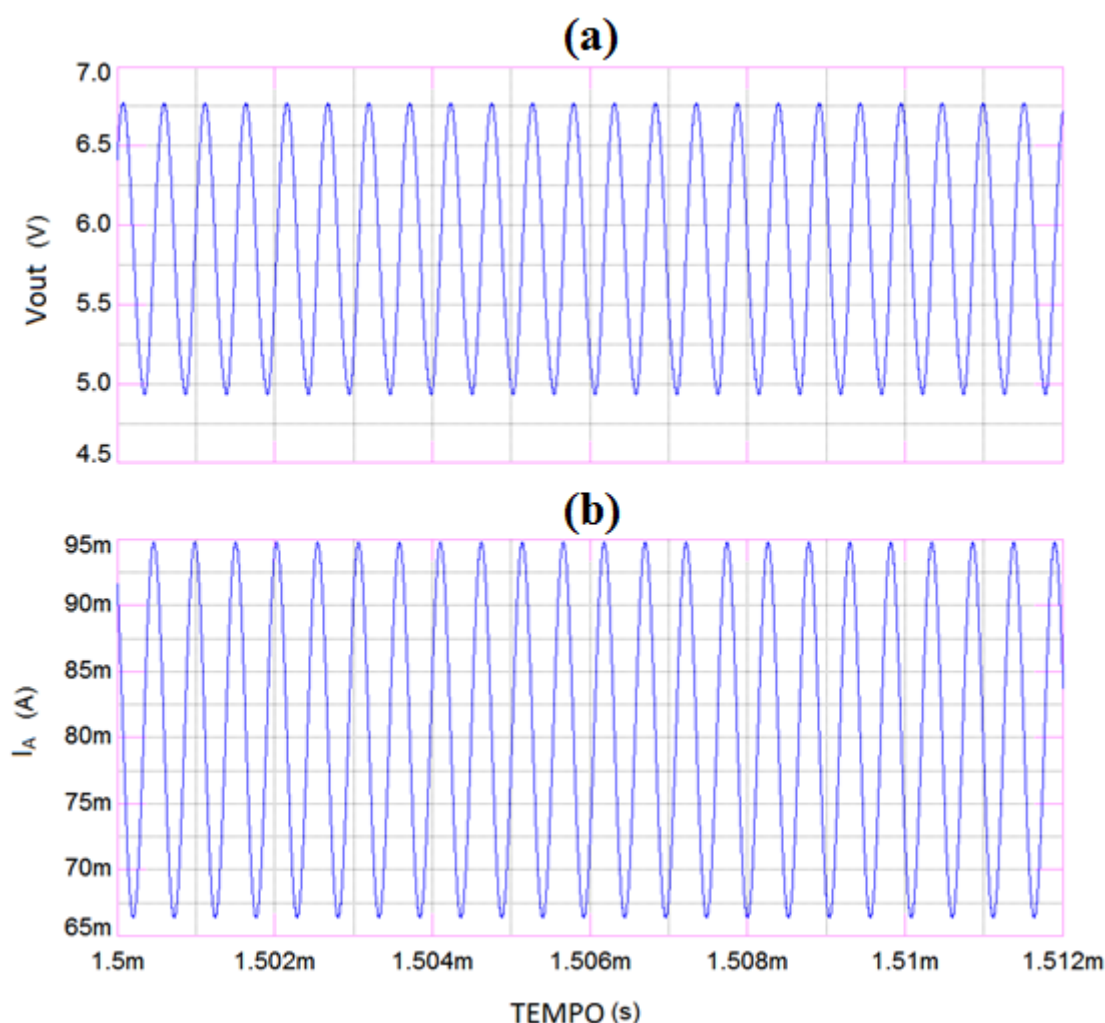


Figura 10 – Curvas de (a) tensão de saída do oscilador e (b) corrente na amostra em função do tempo.

Observando-se a Figura 10 percebe-se que, conforme esperado, o nível CC da corrente que flui pela amostra está próximo de 80 mA e sua amplitude é de aproximadamente 15 mA. Por sua vez, a tensão de saída V_{out} oscila de forma satisfatória, com uma frequência de 1,923 MHz, satisfatoriamente próxima do valor teórico (2 MHz), e com uma amplitude de 0,8 V, que é um nível de tensão adequado para medição com os instrumentos disponíveis.

Por sua vez, a fim de se verificar como a frequência de oscilação é afetada por variações do campo magnético H , variou-se a indutância L_A para seus valores equivalentes aos referidos campos, de acordo com o sistema de equações discutido ao se obter o sistema matemático utilizado para encontrar a sensibilidade da amostra. A variação do campo foi feita em passos de 0,05 Oe, de 1 Oe até 1,4 Oe, de tal forma que não se saísse da região linear dos gráficos obtidos nas Figuras 3 e 4. A Tabela 1 explicita os valores utilizados.

Tabela 1 – Valores de indutância da amostra GMI correspondentes a cada valor de campo magnético analisado.

H (Oe)	L_A (μH)
1,00	5,173
1,05	5,205
1,10	5,239
1,15	5,273
1,20	5,309
1,25	5,346
1,30	5,385
1,35	5,424
1,40	5,465

A Figura 11 apresenta a transformada de Fourier das tensões de saída V_{out} obtidas para cada um dos valores de campo magnético apresentados na Tabela 1.

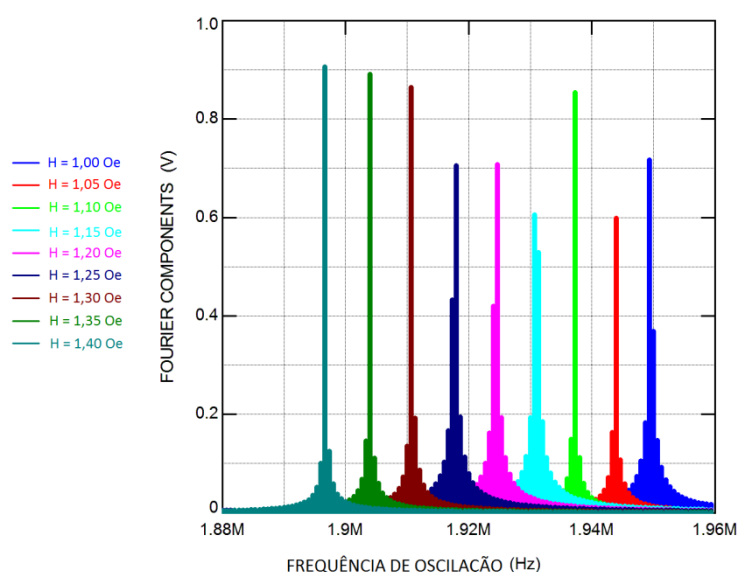


Figura 11 – Transformada de Fourier de V_{out} para diferentes campos magnéticos.

Tendo em vista a análise apresentada na Figura 11, pode-se verificar que a sensibilidade (df_0/dH) obtida está em torno de 135 kHz/Oe. Também percebe-se que, conforme esperado, as variações de frequência em função do campo magnético são aproximadamente lineares para a faixa de campos analisada, $1,0 \text{ Oe} < H < 1,4 \text{ Oe}$. O valor de sensibilidade obtido é bastante próximo daquele previsto pela modelagem matemática, que foi de 140 kHz/Oe. A pequena diferença é admissível, visto que o *software* considera certos aspectos dos componentes presentes no circuito que, por simplicidade, foram desconsiderados na modelagem matemática.

4.2. Circuito Experimental

Após as análises dos resultados das simulações foi possível constatar que o circuito estava coerente com a teoria e poderia ser testado experimentalmente. Assim, na Figura 12, é ilustrada a primeira versão da montagem experimental do circuito, a qual foi feita numa *protoboard*.

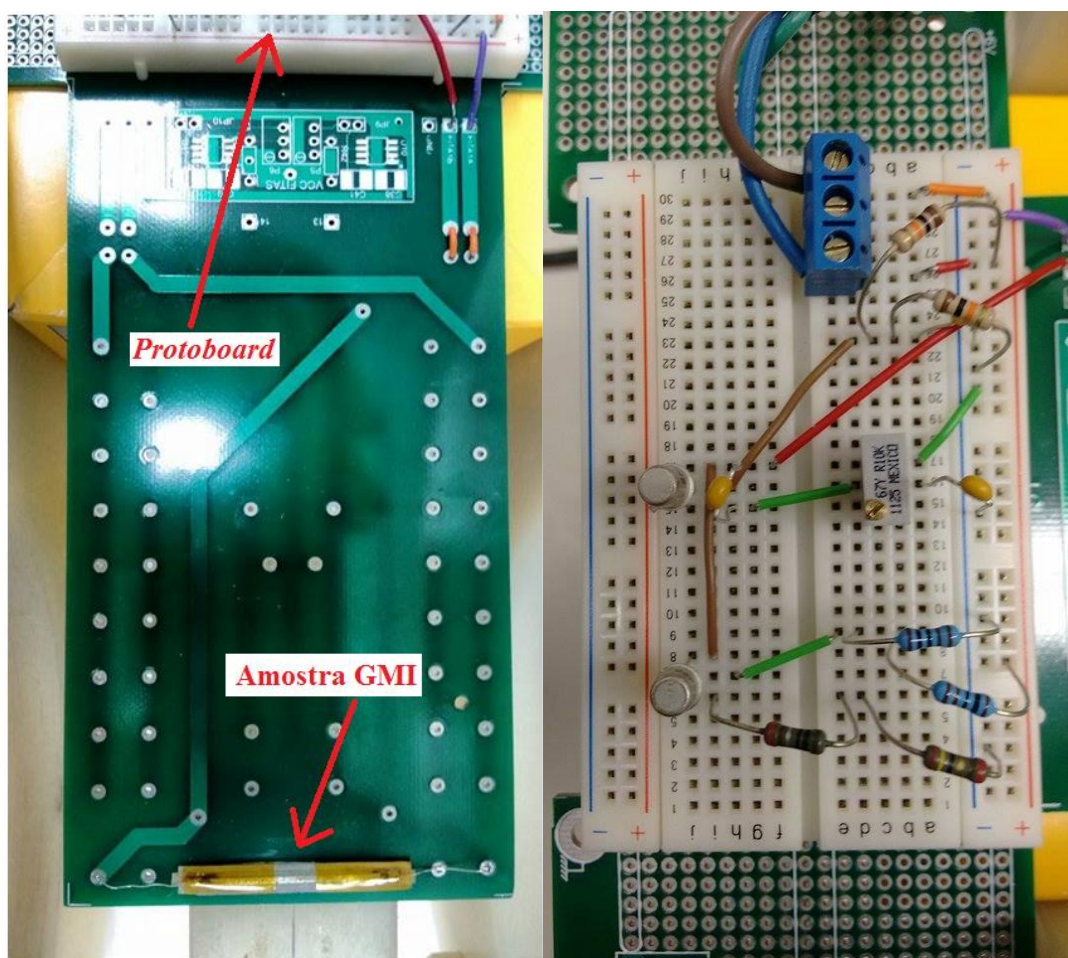


Figura 12 – Montagem do circuito oscilador na *protoboard*.

Porém, os resultados experimentais obtidos para esta implementação indicaram discrepâncias em relação às previsões teórico-computacionais, devido às capacitâncias espúrias da própria *protoboard* e de indutâncias introduzidas pelos *jumpers* utilizados para conexão da amostra GMI à *protoboard*, além de outras imperfeições.

Consequentemente, a fim de minimizar a influência de tais aspectos indesejáveis, o circuito foi montado diretamente em uma placa universal conforme apresentado na Figura 13.

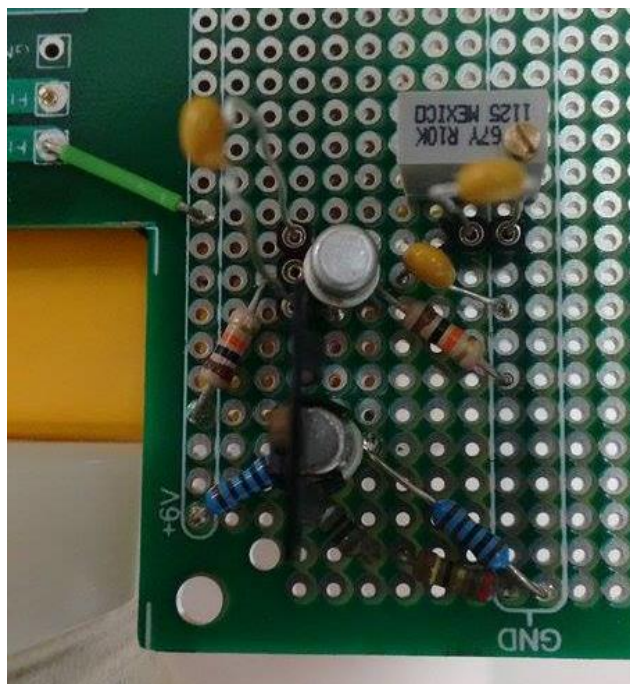


Figura 13 – Circuito soldado diretamente em uma placa universal.

Com a montagem do circuito foi visto que o mesmo funciona como oscilador, porém utilizando-se os valores teórico de alguns componentes a frequência de oscilação se deslocou de seu valor teórico de 2 MHz. Para compensar tal deslocamento, foi necessária a mudança dos valores das capacitâncias C_1 e C_2 para 10 nF, a fim de obter a oscilação em torno do valor desejado de frequência.

Este circuito foi analisado experimentalmente, variando-se o campo magnético H ao qual a amostra GMI é submetida, por meio da excitação da bobina de Helmholtz por uma fonte de corrente. Para cada valor de campo magnético testado, mediu-se a frequência de oscilação do sinal de saída do oscilador V_{out} . Tal análise propicia que se infira a sensibilidade do circuito frente ao campo gerado pela bobina. A Figura 14 apresenta os resultados experimentais obtidos.

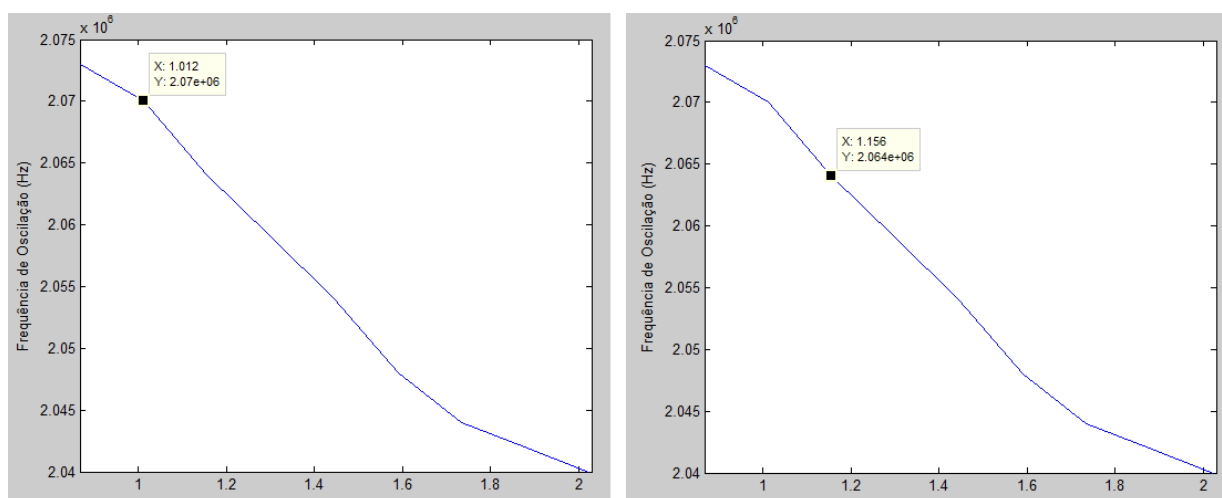


Figura 14 – Frequência de oscilação obtida para cada valor de campo magnético aplicado ao circuito experimental, com dois pontos destacados para verificar a sensibilidade.

Na bobina de Helmholtz a cada variação de 0,05 A de corrente representa aproximadamente uma variação de 0,1445 Oe. Assim a partir dos gráficos da Figura 14 foi obtida uma sensibilidade de 41,5 kHz/Oe, dentro da região linear, que é uma sensibilidade bem menor do que a prevista nas simulações. Porém, sabe-se que a impedância das amostras GMI é afetada pela temperatura, sendo que variações das condições térmicas entre o dia em que a amostra foi caracterizada e o dia que o circuito foi analisado, podem impactar em alterações no valor de L_A , e consequentemente na frequência de oscilação. Além disso, o *layout* da placa, em especial a interconexão da amostra GMI ao circuito pode afetar significativamente a resposta prevista, visto que a amostra possui baixa impedância, sendo significativamente afetada por resistências e indutâncias espúrias. Ainda, os aspectos não ideais dos componentes utilizados também contribuem para tais discrepâncias.

4.3. Sistema de Caracterização Automática do Circuito

Visando definir qual o ajuste do circuito que propicia a otimização da relação de compromisso entre sensibilidade e distorção harmônica, foi desenvolvido um sistema de caracterização automática destes parâmetros. O sistema aqui desenvolvido é composto por uma bobina de Helmholtz excitada por uma fonte de corrente (E3648, *Agilent*), um frequencímetro de precisão (53220A, *Agilent*), um osciloscópio de alta resolução (HRO 64Zi, *Lecroy*) e um PC, rodando um programa de controle desenvolvido em LabVIEW.

O oscilador eletrônico projetado é inserido no centro da Bobina de Helmholtz, a qual é utilizada para variar o campo magnético ao qual o sensor GMI, inserido no oscilador, é submetido. O campo magnético é variado por meio da variação da corrente gerada pela fonte de alimentação da bobina. Esta fonte é controlada pelo program LabVIEW, por meio de uma interface GPIB. A bobina de Helmholtz disponível no laboratório possui 48 espiras em cada bobina e um raio de 15 cm. Logo, o campo magnético em oersteds, $H[\text{Oe}]$, no centro da bobina de Helmholtz, em função da corrente em amperes, $I[\text{A}]$, que atravessa a bobina é dado pela eq. 2.

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

$$1 \text{ Oe} = \frac{1}{4\pi} \cdot 10^3 \text{ A/m} \quad (7)$$

Por sua vez, para cada valor de campo magnético, a frequência de saída do oscilador é lida por meio do frequencímetro, cujas leituras são passadas ao programa LabVIEW, por meio de uma interface GPIB. Com base nestes dados é possível construir uma curva relacionando cada frequência de oscilação com seu respectivo valor de campo magnético. Estas curvas são extremamente importantes para a avaliação experimental da sensibilidade e da linearidade do circuito, em torno do ponto de polarização.

No início do programa, escolhe-se a faixa de campos magnéticos que se deseja analisar e o tamanho do passo. Com estes valores devidamente ajustados pelo usuário e com o circuito devidamente posicionado no centro da Bobina de Helmholtz, clica-se no botão "Ajustado?", para se dar início ao processo de caracterização. Assume-se que a faixa de campos é sempre simétrica em torno de 0 Oe, ou seja $|H_{\min}| = |H_{\max}|$. O campo magnético, gerado pela bobina de Helmholtz, varia gradativamente, de acordo com o tamanho de passo definido, de zero até o limite superior arbitrado para a faixa de campos (H_{\max}). A partir deste ponto (H_{\max}), o campo começará a decrescer em direção a H_{\min} . Finalmente, em seguida, campo passa a aumentar até retornar a 0 Oe. Este procedimento é realizado a fim de se evidenciar a curva de histerese da amostra, tendo em vista que materiais magnéticos habitualmente exibem tal efeito.

Ao final do processo de caracterização, o programa exporta para o Excel os dados obtidos, permitindo que os mesmos sejam salvos para processamento e análises futuras. Com base nos dados adquiridos, são gerados gráficos descrevendo o comportamento de histerese e o comportamento médio do circuito de oscilação. A Figura 15 apresenta a interface gráfica atual do programa, a qual será aprimorada em versões futuras.

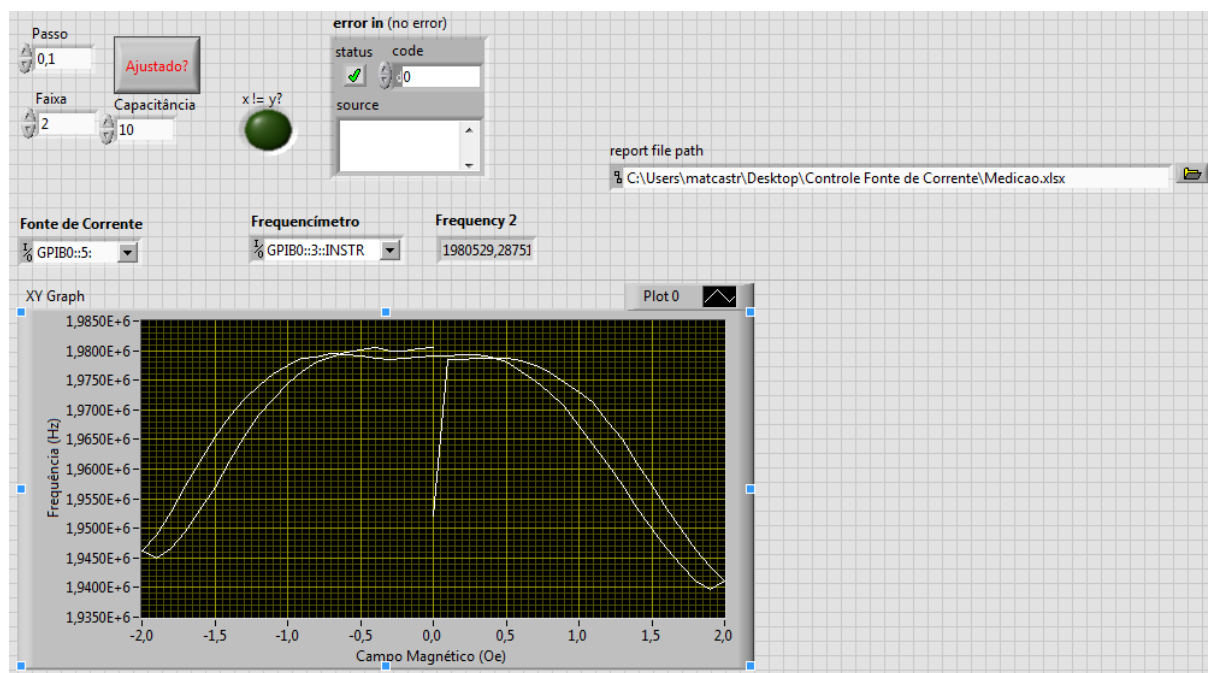


Figura 15 – Interface do programa LabVIEW com captura das frequências de saída e exportação para o Excel.

Por sua vez, destaca-se um segundo módulo que foi desenvolvido a fim de avaliar a distorção harmônica das formas de onda geradas, o qual será futuramente incorporado ao programa original. Tal módulo permite a captura da tensão de saída do oscilador GMI, para um dado campo magnético de interesse. A captura é feita por meio de um osciloscópio conectado, via porta USB, a um PC rodando um programa de controle e análise, baseado em LabVIEW. Por sua vez, este programa processa o sinal adquirido e calcula a sua respectiva FFT (*Fast Fourier Transform*), de modo a se poder avaliar as componentes harmônicas, e demais componentes espectrais, presentes no sinal. Tendo em vista que o sinal de saída ideal é uma senoide pura, qualquer componente espectral em outra frequência, diferente da frequência de oscilação, é indesejável e estará associada a distorções na forma de onda de saída.

5. Resultados Experimentais e Discussões

A Figura 16 apresenta a curva de caracterização da frequência de oscilação em função do campo magnético, obtida para o circuito de oscilação GMI desenvolvido, fazendo-se $C_1 = C_2 = 10$ nF e definindo-se $|H_{\min}| = |H_{\max}| = 2,0$ Oe, bem como um tamanho de passo de 0,1 Oe. Nesta Figura, a esquerda é evidenciada a curva média e, a direita, a curva de histerese.

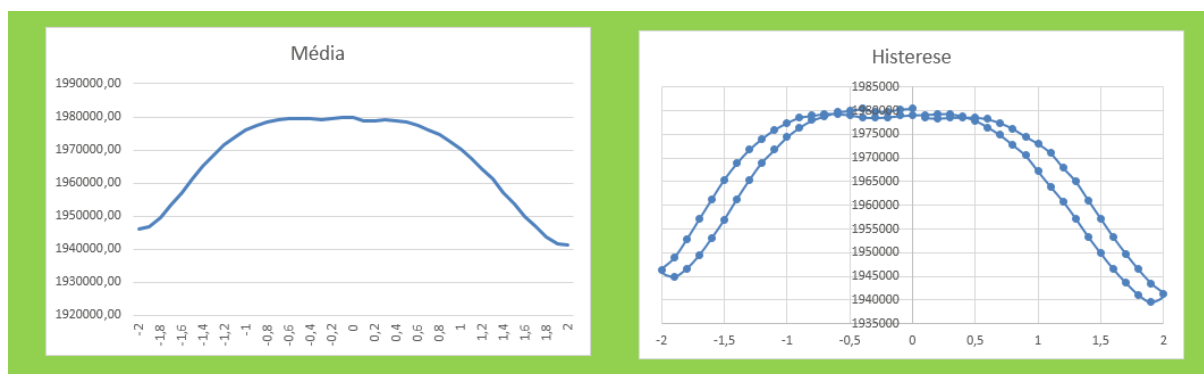


Figura 16 – Curva Média (esquerda) e de Histerese (direita) da frequência de oscilação, em Hz, em função do campo magnético, em Oe.

Avaliando-se os resultados explicitados na Figura 16, percebe-se a histerese e afeta as leituras de frequência. Também, nota-se que existem faixas de alta linearidade e alta sensibilidade, para campo magnético entre 0,8 Oe e 1,6 Oe; bem como entre -1,6 Oe e -1,0 Oe. Por sua vez, no caso analisado a sensibilidade máxima obtida foi de aproximadamente 33 kHz/Oe, consideravelmente abaixo do valor previsto – cerca de 140 kHz/Oe. Adicionalmente, é importante destacar que no campo de polarização ($H_{pol} = 1,2$ Oe), a frequência de oscilação experimentalmente observada foi cerca de 1,965 MHz. Esta frequência é aproximadamente igual a frequência teórica de 2 MHz, entretanto, na prática, ela foi atingida para $C_1 = C_2 = 10$ nF, enquanto que na teoria, ela deveria ocorrer para $C_1 = C_2 = 2,381$ nF.

Na sequência por meio do segundo módulo desenvolvido em LabVIEW, adquiriu-se a forma de onda de saída do circuito, no campo de polarização ($H_{pol} = 1,2$ Oe), a qual é apresentada na Figura 17. O programa processa a forma de onda adquirida, a fim de calcular sua FFT, a qual é mostrada na Figura 18.

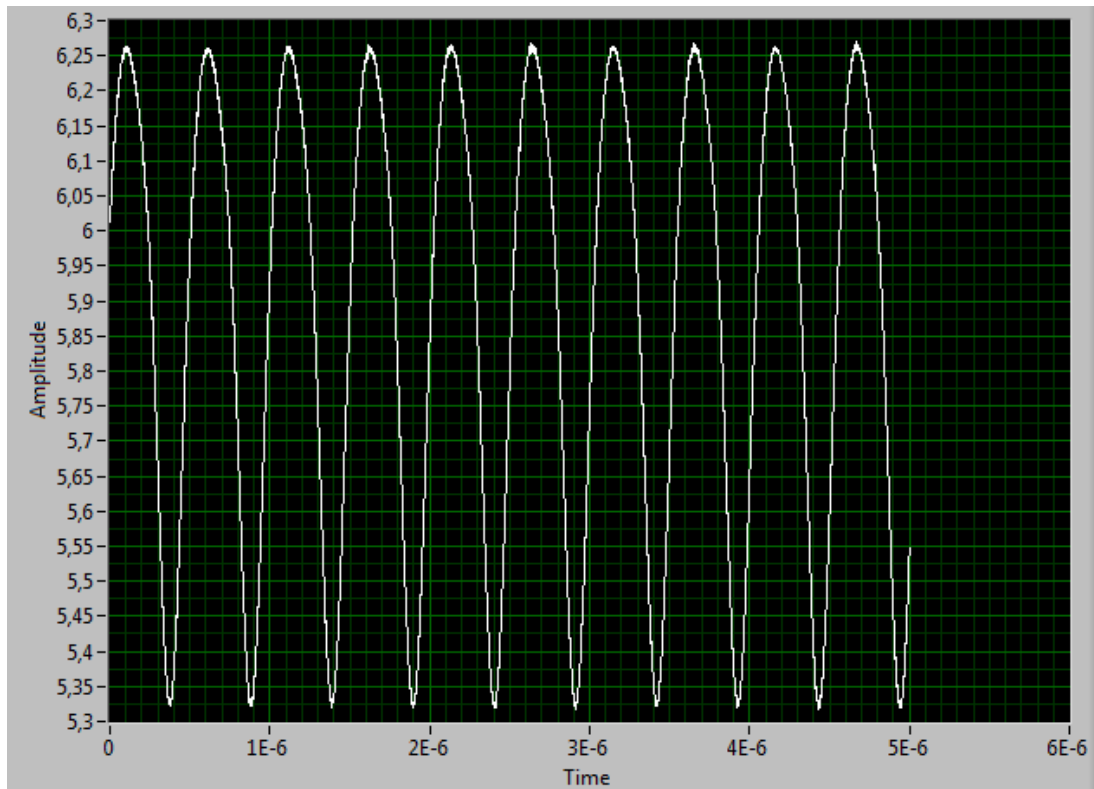


Figura 17 – Tensão de saída do oscilador, para $H_{pol} = 1,2$ Oe.

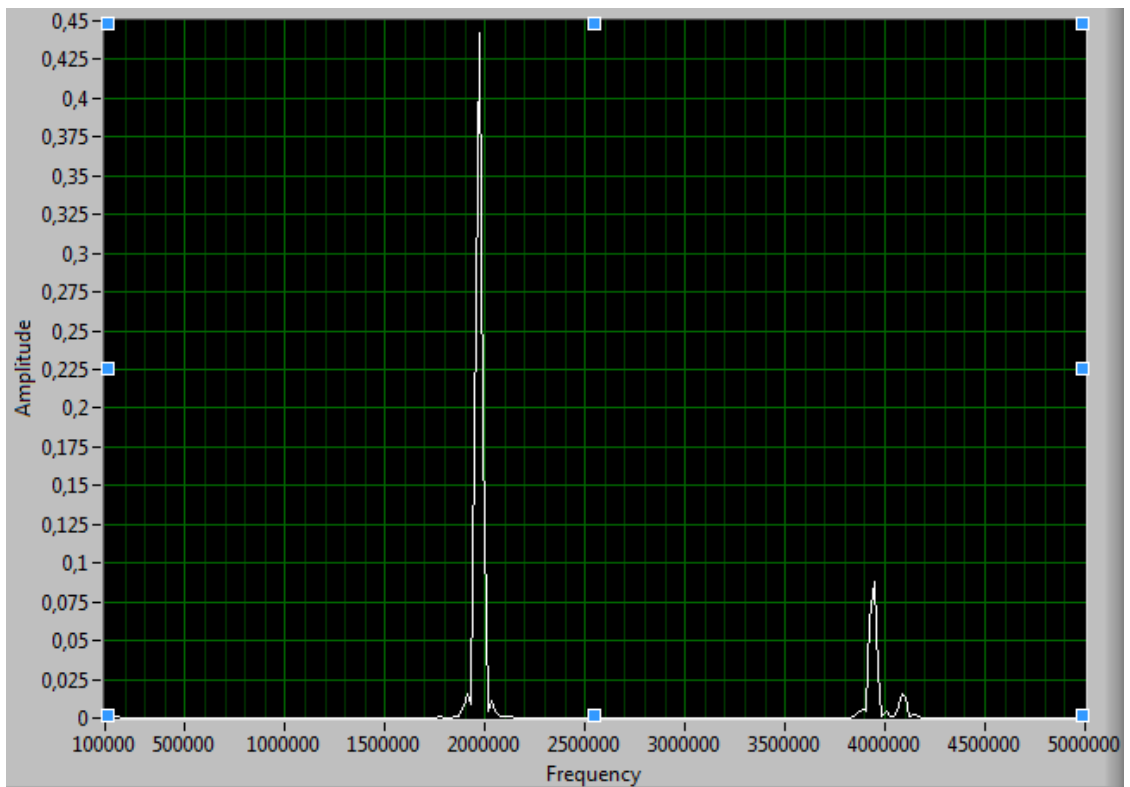


Figura 18 – FFT do sinal de saída apresentado na Figura 17.

Observando-se a Figura 17, verifica-se que, conforme esperado, a tensão de saída do circuito oscila em torno de um nível CC de cerca de 5,8 V. Por sua vez, sua componente alternada possui cerca de 0,9 V pico a pico. Por meio de uma inspeção da forma de onda no domínio do tempo, é possível perceber distorções na morfologia da senoide, indicando que a FFT deverá apresentar componentes espectrais com amplitudes significativas em outras frequências, diferentes da harmônica fundamental (frequência de oscilação).

Por sua vez, a inspeção da Figura 18, indica que a frequência de oscilação é efetivamente cerca de 2 MHz e também, conforme esperado, evidencia a presença de componentes espectrais espúrias. Em particular, verifica-se a presença de distorção harmônica em torno de 4 MHz. A componente fundamental possui amplitude cerca de cinco vezes maior que esta componente espúria. A presença de componentes espectrais espúrias deteriora o funcionamento de circuito e, conseqüentemente, afeta a resolução do transdutor. Destaca-se ainda que existe uma componente espectral CC, visto que o circuito oscila em torno de um nível CC de 5,8 V. Entretanto esta componente não aparece no gráfico da Figura 18, pois o limite inferior de frequências foi limitado em 100 kHz.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foi projetado e avaliado o circuito eletrônico de um oscilador senoidal cuja frequência de oscilação é função do campo magnético, por meio da utilização de elementos sensores GMI. Na situação de equilíbrio teórica o circuito oscila em 2 MHz e apresenta uma sensibilidade de 140 kHz/Oe. Os resultados obtidos, por simulações computacionais, indicam que o circuito se comporta de forma compatível com as características previstas em seu projeto teórico.

Por sua vez, a caracterização experimental do circuito indicou que o mesmo funciona efetivamente como oscilador controlado por campo magnético. Porém, utilizando-se os valores teóricos de seus componentes, a frequência de oscilação se deslocou de 2 MHz. Para compensar tal deslocamento, foi necessária a mudança dos valores das capacitâncias C_1 e C_2 para 10 nF, indicadas na Figura 8, a fim de obter a oscilação em torno do valor desejado de frequência. Por sua vez, por meio da análise experimental, verificou-se que o circuito apresenta uma sensibilidade de 33 kHz/Oe, abaixo do valor previsto 140 kHz/Oe, e comportamento satisfatoriamente linear entre 0,8 Oe e 1,6 Oe.

A impedância das amostras GMI é afetada pela temperatura, sendo que variações das condições térmicas, entre o dia em que a amostra foi caracterizada e o dia que o circuito foi analisado, podem impactar em alterações no valor da impedância equivalente do sensor GMI (L_A) e consequentemente na frequência de oscilação. Além disso, o *layout* da placa, em especial a interconexão da amostra GMI ao circuito pode afetar significativamente a resposta prevista, visto que a amostra possui baixa impedância, sendo significativamente afetada por resistências e indutâncias espúrias. Ainda, os aspectos não ideais dos componentes utilizados também contribuem para tais discrepâncias.

Dessa forma, conclui-se que o circuito eletrônico proposto apresentou comportamento satisfatório, porém também se constatou que seu desempenho ainda pode ser otimizado, a fim de se operá-lo num ponto de elevada sensibilidade e baixa distorção harmônica. Dessa forma, em trabalhos futuros, o comportamento do circuito eletrônico será avaliado de forma mais abrangente, em função de variações na capacitância de ajuste.

O circuito será aprimorado de modo a se minimizar a influência dos problemas aqui evidenciados. Serão estudadas formas de otimizar o desempenho do circuito aqui projetado e de se obter uma melhor adequação dos resultados experimentais com os simulados. Neste intuito, serão avaliadas novas técnicas de conexão da amostra sensora ao circuito eletrônico, objetivando-se reduzir a influência de impedâncias espúrias. Adicionalmente, serão implementados ajustes a fim de se minimizar a presença de harmônicos indesejáveis no sinal de saída.

7. Referências Bibliográficas

- [1] PHAN, Manh-Huong; PENG, Hua-Xin Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications. Progress in Materials Science, v. 53, p. 323-420, 2008.
- [2] Costa Silva, E.; Velasco, M.M.B.R.; Barbosa, C.R.H.; Monteiro, E.C.; Gusmão, L.A.P. Modelagem da sensibilidade de amostras GMI por redes neurais. Sba Controle & Automação, v. 23, n. 5, Campinas, 2012.
- [3] Costa Silva, E.; Carneiro, J.H.C.C.; Gusmão, L.A.P.; Barbosa, C.R.H.; Monteiro, E.C. Development of a fast and reliable system for the automatic characterization of Giant magnetoimpedance samples. Acta IMEKO, v. 2, n. 1, p. 21-26, 2013.
- [4] Wu, Z.M.; Zhao, Z.J.; Liu, L.P.; Yang, J.X.; Yang, X.L. A New Frequency-Modulation-Type MI Sensor. IEEE Transactions on Magnetics, v. 41, n. 10, 2005.
- [5] Sedra, A. S.; Smith, K. C. Microelectronic Circuits. 6th Ed. New York: Oxford University Press, 2010.