

30/06/2013

DETECÇÃO DE CORPOS ESTRANHOS METÁLICOS NÃO-MAGNÉTICOS POR TRANSDUTORES GMR

Gabriel Drummond de Mendonça Simonsen



DETECÇÃO DE CORPOS ESTRANHOS METÁLICOS NÃO-MAGNÉTICOS POR TRANSDUTORES GMR

Aluno: Gabriel Drummond de Mendonça Simonsen

Orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa

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

Primeiramente, gostaria de agradecer não somente ao meu orientador Carlos Roberto Hall Barbosa, mas também ao professor Luiz Antônio Pereira de Gusmão e ao doutorando Eduardo Costa da Silva por toda a ajuda e orientação ao longo do semestre para o desenvolvimento do projeto final de graduação.

Gostaria de agradecer também a todos os professores do curso de Engenharia de Controle e Automação que estiveram presentes na minha caminhada até a conclusão desta graduação, transmitindo todo o conhecimento necessário.

Tão importantes foram meus pais, Heloísa e Marcos, por terem me dado todo o apoio necessário para ter uma boa formação tanto profissional quanto pessoal, e ainda minha namorada Paula, por ter dado todoo apoio e compreensão em diversos momentos ao longo da caminhada na PUC, ajudando em decisões acadêmicas e profissionais e dando apoio emocional.

Obrigado a todos, vocês fazem parte desta importante conquista.

Resumo

O presente projeto de graduação consiste na aplicação de transdutores GMR (Magneto-resistência Gigante), em configuração gradiométrica, à detecção de corpos metálicos não-magnéticos inseridos no corpo humano, como projéteis de armas de fogo, usualmente de chumbo. A técnica utilizada, além de não invasiva, reduz o tempo de cirurgia para extração do corpo estranho, bem como o risco de insucesso na operação, vantagens significativas em relação às técnicas convencionais atuais.

Corpos metálicos não ferromagnéticos, como o chumbo, por não possuírem magnetização remanente, não podem ser medidos diretamente com um sensor magnético. Neste caso, deve-se aplicar ao material um campo magnético primário alternado que irá gerar correntes elétricas parasitas no metal (*eddy currents*), as quais, por sua vez, irão gerar um campo secundário que pode ser medido por um magnetômetro suficientemente sensível, sendo capaz de fornecer informações sobre a posição e massa do objeto estranho.

O projeto engloba a descrição teórica e modelagem física do problema, explicando o funcionamento dos transdutores GMR; a definição dos parâmetros do solenóide, necessário para produzir o campo magnético primário; bem como a simulação e implementação prática de um circuito de leitura, seguido de sua caracterização.

Palavras-chave: detecção, campo, solenóide, GMR, circuito.

Sumário

1. Introdução.....	1
a. Objetivo e motivação.....	1
b. Estrutura do documento.....	1
2. Transdutor GMR.....	2
a. Princípio de funcionamento.....	2
b. GMR AA005-02.....	2
3. Modelagem Teórica.....	4
a. Descrição do problema.....	4
b. Projeto do solenóide.....	5
c. Campo secundário.....	6
4. Circuito de Leitura.....	9
a. Esquemático.....	9
b. Simulações TopSPICE.....	10
c. Implementação em protoboard.....	15
d. Caracterização.....	19
5. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	26
6. Referências Bibliográficas.....	27

1. Introdução

a. Objetivo e motivação

Atualmente, existem diversos magnetômetros disponíveis no mercado, como SQUIDs (*Superconducting Quantum Interference Devices*), *fluxgates*, sensores de efeito Hall e bobinas de indução. O SQUID, por exemplo, é o magnetômetro que apresenta maior sensibilidade como transdutor de campo magnético em tensão elétrica, mas em contrapartida possui altos custos de aquisição, instalação e operação, o que torna inviável a utilização do mesmo em larga escala. Em paralelo, os sensores de efeito Hall não apresentam sensibilidade satisfatória para aplicações biomédicas, enquanto os *fluxgates* possuem uma faixa de frequência de operação muito pequena.

Já foi comprovado que o magnetômetro SQUID mostra-se eficiente para localização de corpos estranhos magnéticos no corpo humano, como por exemplo, agulhas. Os resultados mostram que a técnica desenvolvida reduz o tempo de cirurgia para extração do corpo estranho, bem como o risco de insucesso na operação. O problema das técnicas de imageamento convencionais é que elas são muitas vezes invasivas, expondo o paciente à radiação ionizante ou à inserção de diversos marcadores radiopacos em várias partes do corpo, além de possuírem certas limitações, como não informarem a profundidade e projeção do objeto em relação a pele [1-4].

Diante das limitações de utilização do SQUID, foi projetado neste trabalho uma técnica utilizando magnetômetros GMR para detecção de corpos estranhos metálicos não magnéticos no corpo humano, como projéteis de armas de fogo. O presente projeto objetiva estudar esta técnica não invasiva, que apresenta os mesmos benefícios práticos da técnica baseada em SQUID, já citados. Além disso, devido aos menores custos de aquisição e operação do transdutor GMR, a expectativa é de difundir esta técnica de localização, que tem evidente aplicabilidade e relevância para a área da saúde.

b. Estrutura do documento

O capítulo seguinte aborda o funcionamento do transdutor GMR, contendo uma descrição do componente que foi adotado para este projeto e mostrando suas principais características. Em seguida, há um capítulo destinado a explicar como o problema foi modelado, explicitando as variáveis e fórmulas envolvidas, e ainda informando os parâmetros que foram definidos para o solenóide. Na sequência, há um capítulo sobre o circuito de leitura do transdutor GMR, passando pelo esquemático e sua descrição, por simulações obtidas no software TopSPICE, pelo circuito montado em *protoboard* e finalmente mostrando os resultados da caracterização do circuito físico.

2. Transdutor GMR

a. Princípio de funcionamento

A sigla GMR advém do inglês - *Giant Magnetoresistance* - ou em português, Magnetorresistência Gigante. Um sensor GMR, sujeito a um campo magnético, possui sua resistência nominal alterada significativamente (tipicamente entre 10% e 20%), uma alteração grande quando comparada à de outros sensores magnéticos. Essa modificação é causada devido a sua estrutura em forma de sanduíche, na qual as camadas externas são compostas de material magnético (ferro, por exemplo), enquanto a camada interna ultrafina é formada de material condutor não-magnético (cobre, por exemplo). Sem nenhum campo magnético aplicado, as camadas externas possuem momentos magnéticos em direções opostas, produzindo uma alta resistência elétrica. Quando a amostra é sujeita a um campo magnético, os momentos se alinham, diminuindo a resistência elétrica.

b. Transdutor GMR AA005-02

O transdutor GMR utilizado no projeto foi o AA005-02, da fabricante NVE Corporation.

Na Figura 1 abaixo, pode-se observar a pinagem do transdutor, com encapsulamento SOIC8, e o diagrama de blocos mostrando o funcionamento em ponte de Wheatstone, para proporcionar compensação de temperatura:

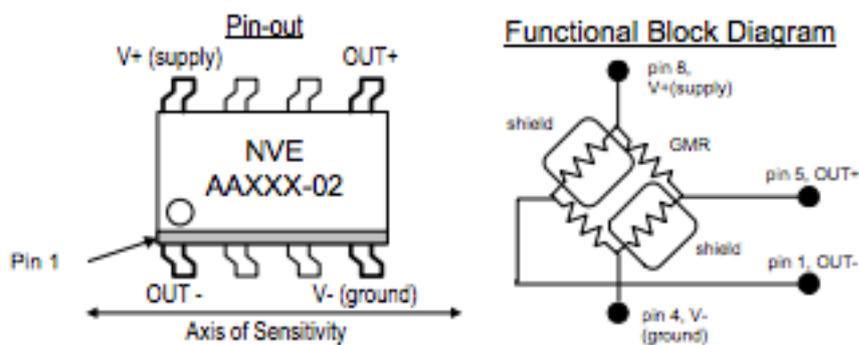


Figura 1: À esquerda, pinagem do GMR modelo AA005-02. À direita, diagrama de funcionamento do transdutor.

No esquema de ponte, quando os resistores GMR não-blindados estão sujeitos a um campo magnético nulo, e portanto apresentam valor nominal, a ponte está em equilíbrio e a tensão de saída é nula. Quando um campo magnético é aplicado, os sensores apresentam variação na resistência de acordo com sua sensibilidade, desequilibrando a ponte e gerando uma diferença de tensão entre os pinos 5 e 1.

Seguem as características mais importantes do transdutor em questão. O *datasheet* completo encontra-se em anexo:

- Faixa linear de operação: 10 a 70 Oe
- Sensibilidade média: $0,55 \text{ mV}/(\text{V} \cdot \text{Oe})$
- Campo de saturação: 100 Oe
- Frequência de operação: CC até aproximadamente 1 MHz
- Resistência nominal: $5 \text{ k}\Omega$

É importante mencionar que, como indicado na Figura 1 acima, o eixo de sensibilidade do transdutor é o eixo ao longo do seu comprimento e não o eixo perpendicular ao transdutor.

O *datasheet* (folha de características) ainda informa que o transdutor pode operar alimentado por corrente (1mA) ou tensão (5V), com os gráficos (tensão de saída x campo magnético aplicado) referentes ao modelo AA002 mostrados na Figura 2 abaixo para cada alternativa de alimentação.

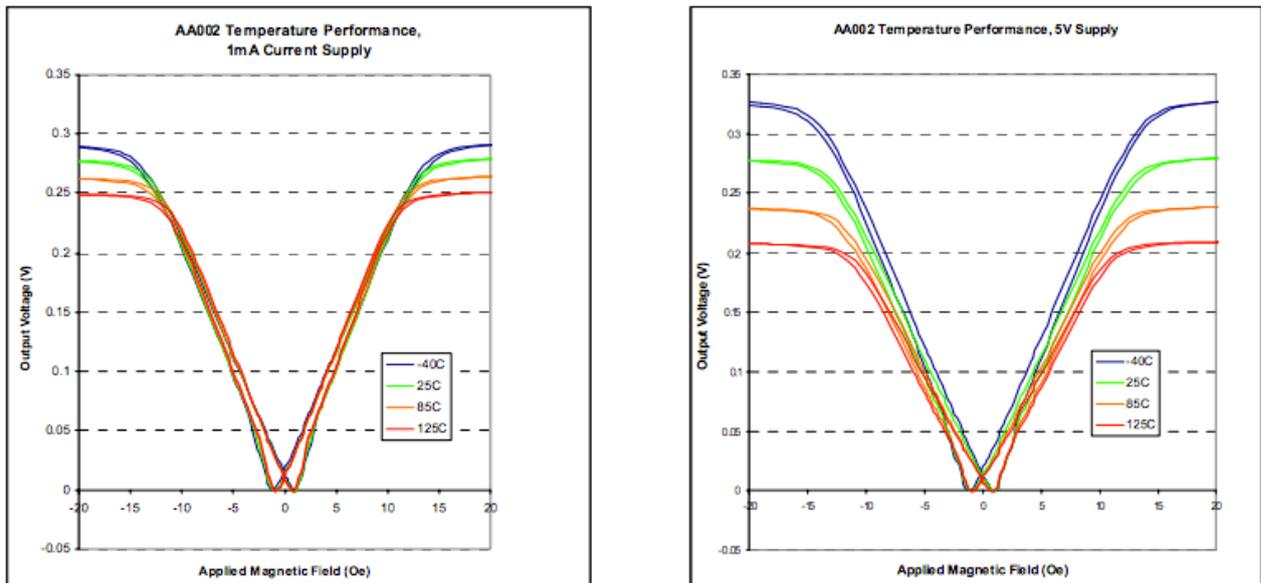


Figura 2: Gráficos com curvas de comportamento Campo aplicado (Oe) x Tensão de saída (V), de acordo com a temperatura, para o transdutor AA002. À esquerda o gráfico considera alimentação por corrente de 1mA, e à direita alimentação por tensão de 5V.

Apesar dos gráficos serem referentes ao modelo AA002 e não ao modelo AA005 que foi escolhido, pode-se concluir que o comportamento resultante ao se alimentar por corrente é mais preciso e com menor histerese, o que foi fundamental para optar por esta forma de alimentação do componente.

3. Modelagem Teórica

a. Descrição do problema

Corpos metálicos não-magnéticos, por não possuírem magnetização remanente, não podem ser medidos diretamente com um sensor magnético. Um campo magnético alternado deve ser aplicado no material, ocasionando correntes elétricas parasitas no metal (*eddy currents*), as quais, por sua vez, irão gerar um campo secundário que pode ser medido por um magnetômetro GMR suficientemente sensível, sendo capaz de fornecer informações sobre a posição e massa do objeto estranho.[6-30]

Assim, diante da necessidade de aplicar um campo magnético primário alternado no corpo estranho, é preciso projetar um solenóide cujos parâmetros (comprimento l , raio a , número de espiras N , corrente I e frequência de excitação f) sejam suficientes para produzir um campo magnético primário de amplitude não prejudicial ao corpo humano mas, ao mesmo tempo, grande o suficiente para gerar um campo magnético secundário que possa ser percebido pelo transdutor GMR especificado para a aplicação.

Além dos parâmetros do solenóide, outros parâmetros necessários para análise do problema são o raio r da esfera de chumbo, definida no estudo como o objeto metálico não-magnético que representa um projétil e o *liftoff* h , que é a distância entre a base do solenóide e o centro da esfera. Estes parâmetros são relevantes no que diz respeito à magnitude do campo secundário.

Outra questão importante é relativa à implementação de configuração gradiométrica. Genericamente, neste tipo de configuração são utilizados dois sensores de comportamento idêntico, um localizado próximo à fonte de interesse, e outro a uma distância que seja suficiente para que não seja afetado pelo sinal. Realiza-se então uma leitura diferencial entre os dois, obtendo-se um sinal livre de ruído magnético gerado por fontes distantes, pois este tende a ter distribuição espacial uniforme.

Na estrutura deste projeto, foi definido que cada transdutor GMR ficará localizado nas extremidades do solenóide, coaxial ao mesmo. Desta maneira, ambos sentirão o campo primário alternado da mesma forma, além dos sinais de ruído presentes. O transdutor localizado próximo ao objeto metálico não-magnético fará uma leitura do campo secundário resultante, enquanto a leitura do segundo transdutor será tão pequena devido à distância entre os dois, que afetará muito pouco o sinal resultante. O resultado da leitura diferencial entre os dois transdutores é um campo magnético secundário alternado, livre de ruído, cuja amplitude é proporcional ao volume do corpo estranho metálico presente.

Na Figura 3 a seguir apresenta-se uma ilustração do problema modelado:

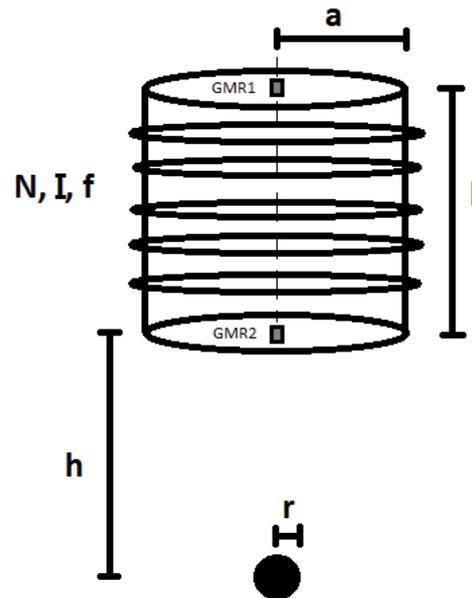


Figura 3: Modelagem física do problema, incluindo as variáveis envolvidas.

Para o estudo, admitiu-se que o campo magnético alternado aplicado pelo solenóide possui intensidade uniforme na região do objeto. Para isso, foi levado em consideração que a esfera e o solenóide são concêntricos, e ainda que as dimensões da esfera são muito menores que as do solenóide.

Diante disso, o campo magnético vertical no eixo do solenóide, a uma distância h , será:

$$(1) \quad B_z(h,t) = B_o(h) \cdot \cos(\omega t)$$

onde $B_o(h)$, pela Lei de Bio-Savart, é dado por [5] :

$$(2) \quad B_o(h) = \frac{\mu_0 N I}{2l} \left[\frac{l+h}{\sqrt{a^2 + (l+h)^2}} - \frac{h}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right]$$

sendo μ_0 a permeabilidade magnética no ar, e N, I, l, a, h os parâmetros destacados acima.

b. Projeto do solenóide

Para definir os parâmetros do solenóide foi utilizado como auxílio um conjunto de algoritmos anteriormente desenvolvidos em Matlab. Estes arquivos possuem funções que permitem, depois de inseridos os parâmetros do solenóide (comprimento, raio, número de espiras, corrente e frequência de excitação), bem como o *liftoff* e o raio da esfera:

- calcular o campo primário percebido na distância h ;
- calcular o campo secundário que a esfera produz na base do solenóide;

- levantar curvas Campo x Frequência para diferentes raios de esfera, dado um liftoff h fixo;
- levantar curvas Campo x Frequência para diferentes valores de h , dado um raio de esfera r fixo.

A questão mais relevante para definir os parâmetros do solenóide é encontrar um conjunto de parâmetros que seja fisicamente viável. Por exemplo, não é factível construir um solenóide pequeno, de forma que, para ter o número ideal de espiras, utilize-se um fio de diâmetro que não suporta a corrente necessária.

O primeiro passo foi analisar as limitações do próprio transdutor GMR. O modelo AA005-02 trabalha com uma faixa linear de operação entre 10 e 70 Oe, como já mostrado. Assim, foi preciso estabelecer um nível CC e um nível CA que permita ao campo magnético excursionar por esta faixa. Diante destes dados, foi definido um nível CC de 40 Oe e um nível CA de 25 Oe, fazendo o campo magnético excursionar entre 15 e 65 Oe. Posteriormente, foi utilizada a tabela AWG para incluir na análise o diâmetro do fio a ser utilizado para as espiras do solenóide, bem como a corrente suportada por cada diâmetro de fio.

Após vários cálculos e simulações no software Matlab, chegou-se a conclusão que é necessário um solenóide com 5 camadas concêntricas, cada uma com os parâmetros a seguir, para produzir um campo magnético primário que esteja dentro da faixa de operação linear do transdutor:

- Comprimento $l = 5$ cm ;
- Raio $a = 1.5$ cm ;
- número de espiras $N = 55$;
- diâmetro do fio (bitola) = 0,9116 mm;
- frequência de excitação $f = 100$ kHz ;
- corrente de excitação: $I_{CC} = 1,212$ A , $I_{CA} = 0,757$ A .

c. Campo secundário

Definidos os parâmetros do solenóide, foi preciso realizar uma análise da influência das variáveis liftoff h e raio da esfera r na magnitude do campo secundário.

Sabe-se que a intensidade máxima da densidade de fluxo magnético secundário segue a fórmula [5]

$$(3) \quad B_{\max}(h, f) = \left[\frac{B_0}{h^3} \right] V(r, f)$$

onde

$$(4) \quad V(f) = \frac{(2\mu_r + 1) - (2\mu_r + v(r, f)^2 + 1) \frac{\tanh v(r, f)}{v(r, f)}}{(\mu_r - 1) - (\mu_r - v(r, f)^2 - 1) \frac{\tanh v(r, f)}{v(r, f)}} r^3$$

$$(5) \quad v = (1 + j) \frac{r}{\delta}$$

sendo δ a profundidade de penetração das *eddy currents* no objeto condutor (*skin depth*), dada por:

$$(6) \quad \delta = \sqrt{\frac{1}{f \pi \mu_r \mu_0 \sigma}}$$

Onde f é a frequência de excitação, σ é a condutividade elétrica do material, e μ_r é a permeabilidade magnética relativa.

Para o caso do chumbo tem-se:

$$\begin{aligned} \sigma &= 4,55 \times 10^6 \text{ S/m} \\ (7) \quad \mu_r &= (1 - 1,7 \times 10^{-5}) \\ \mu &= \mu_r \cdot \mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m/A} \end{aligned}$$

Pode-se calcular, ainda, o campo magnético secundário como:

$$(8) \quad H_{\max}(h,f) [\text{Oe}] = B_{\max}(h,f) [\text{T}] \times 10^4$$

As Figuras 4 e 5 apresentam alguns gráficos resultantes de simulações feitas no Matlab.

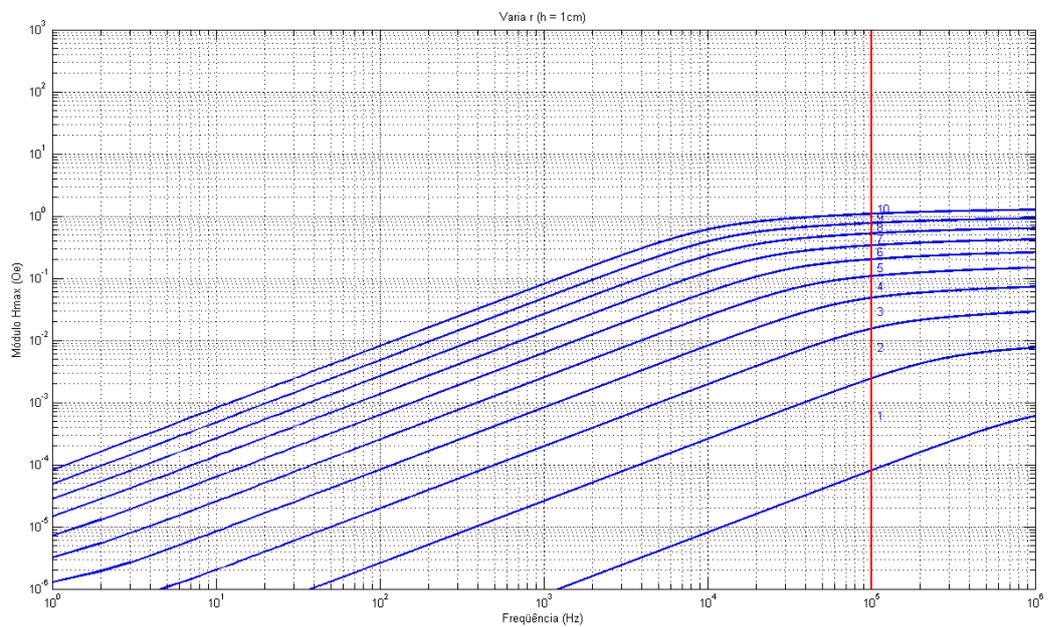


Figura 4: Comportamento Frequência (Hz) x Módulo H_{\max} (Oe) com curvas relativas de 1 a 10mm de diâmetro e um *liftoff* de 1cm.

a esferas

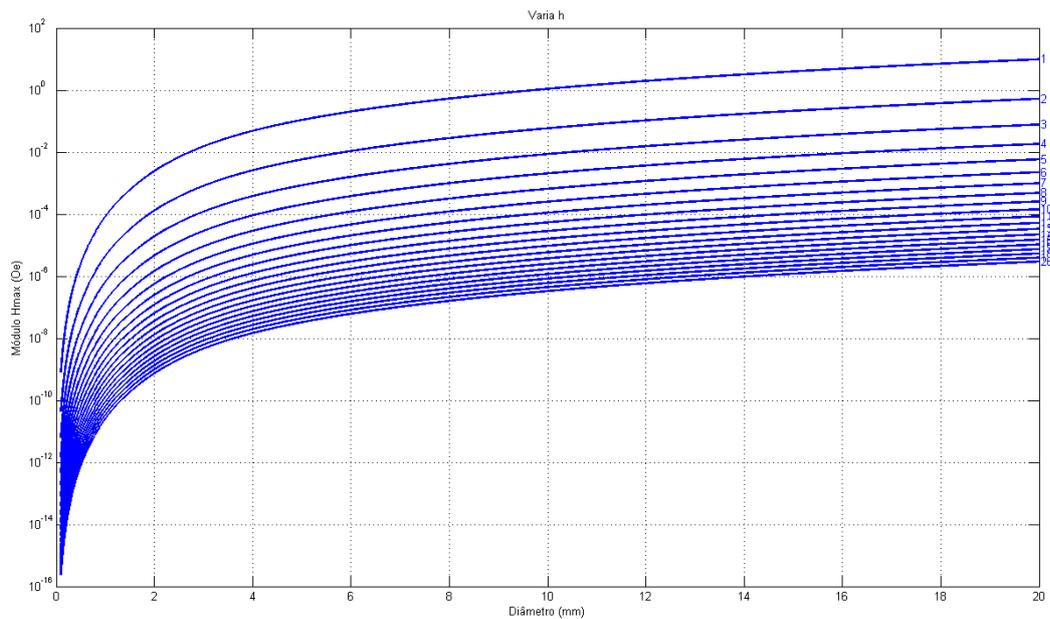


Figura 5: Comportamento Diâmetro (mm) x Módulo H_{\max} (Oe) com curvas relativas a distâncias h de 1 a 20cm, para frequência = 100kHz.

Na Figura 4, as curvas azuis são referentes ao comportamento do campo magnético secundário em função da frequência de excitação, para cada diâmetro de esfera, indo de 1 até 10 mm, considerando uma distância h fixada em 1 cm. A reta vermelha vertical mostra a frequência de excitação utilizada, 100kHz.

Na Figura 5, as curvas azuis são referentes ao comportamento do campo magnético secundário em função do diâmetro da esfera de chumbo, para cada distância h , indo de 1 até 20 cm de distância.

4. Circuito de Leitura
a. Esquemático

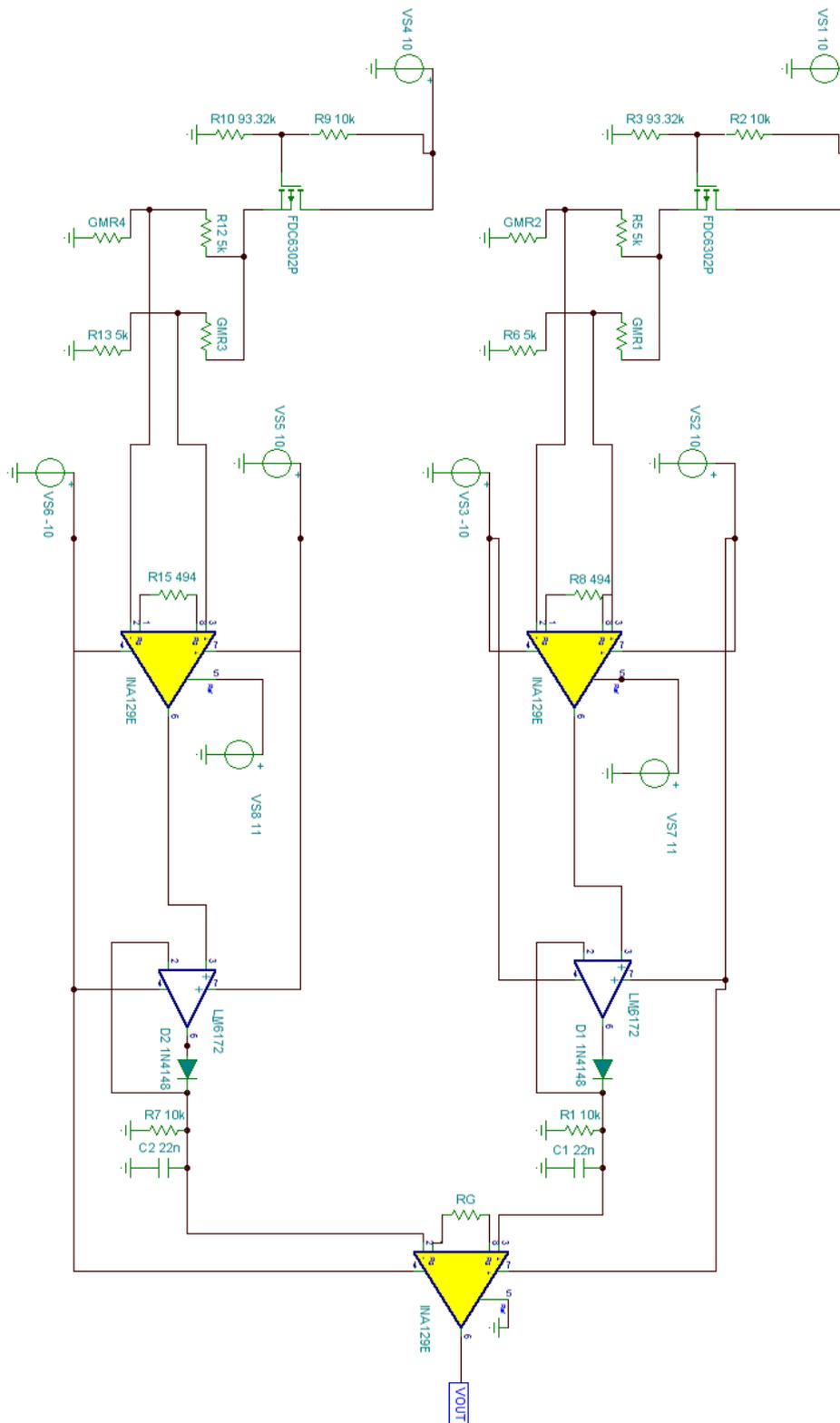


Figura 6: Esquemático idealizado para o circuito de leitura.

O FET pnp FDC6302P, na configuração utilizada, trabalha como uma fonte de corrente de 1mA para o transdutor GMR, estando polarizado com $V_{DS} = -5$ V.

O transdutor GMR, como detalhado anteriormente, é uma ponte de Wheatstone, com duas resistências de $5k\Omega$ blindadas e duas resistências GMR nominais em $5k\Omega$, mas que alteram seu valor conforme o campo magnético a que são sujeitas.

Posteriormente, há um amplificador de instrumentação INA129, que faz a leitura diferencial dos terminais da ponte, aplicando um ganho que depende do valor da resistência externa entre seus terminais 1 e 8. O ganho G segue a fórmula especificada no *datasheet*: $G=1+(49,4k\Omega/R_G)$.

Conforme descrito na seção a seguir, inicialmente analisou-se a ordem de grandeza das tensões típicas na saída da ponte, devido principalmente ao campo primário, encontrando-se valores na faixa de 68mV de amplitude. Assim, decidiu-se por utilizar $R_G=494 \Omega$, o que implica em um ganho de aproximadamente 100, gerando um sinal esperado de aproximadamente 6,8 V de amplitude na saída deste INA129.

Na sequência, pode-se observar uma configuração de detector de pico, onde o sinal passa por um super-diodo, que faz a retificação de meia onda, e em seguida o capacitor, junto ao resistor, é responsável por carregar e descarregar em torno do valor de pico do sinal, resultando em uma onda praticamente constante neste valor. Este detector de pico tem constante de tempo de 220 μ s.

Este grande bloco é replicado abaixo devido à configuração gradiométrica. Ou seja, a primeira metade do circuito realiza a leitura de um transdutor GMR localizado na base do solenóide e a outra metade realiza a leitura do segundo transdutor GMR localizado na outra extremidade. Ambas as partes convergem para um outro amplificador de instrumentação INA129, que faz a leitura diferencial entre os dois transdutores, aplicando um ganho determinado pelo valor de R_G . O valor de R_G foi mantido literal no esquemático, pois seu valor irá depender da amplitude do campo secundário sentido pelos transdutores. Quanto menor for a amplitude deste campo secundário, maior precisará ser o ganho G.

É importante mencionar que, buscando refinar a saída do circuito, pode-se acrescentar futuramente filtros passa-banda, centrados em 100 kHz, para eliminar ruído de outras frequências. Este filtro devem ser implementados antes dos detectores de pico.

b. Simulações TopSPICE

Sabe-se que, quando o circuito não está sujeito a nenhum campo magnético, a ponte de cada transdutor está em equilíbrio, ou seja, todos os GMRs, sejam os blindados ou os não blindados, estão com sua resistência nominal de $5k\Omega$. Nesta situação a saída do circuito completo deve ser nula.

Além disso, quando os transdutores GMR estão sujeitos apenas ao campo magnético primário, sem presença de corpos estranhos, a saída total do circuito também deve ser nula, pois não há campo magnético secundário. Neste caso, a leitura de cada transdutor será exatamente igual, pois eles estão submetidos ao mesmo campo primário (devido ao seu posicionamento simétrico em relação ao solenóide).

No software TopSPICE, na definição dos resistores GMR não-blindados da ponte, foi utilizada uma linha de código onde os mesmos variam senoidalmente. Essa senoide, de frequência 100kHz, possui nível CC de 40 Oe * S e nível CA de 25 Oe * S, onde S é a sensibilidade do transdutor, de valor 5,5 V/Oe.

A Figura 7 a seguir apresenta um gráfico da simulação, supondo os transdutores submetidos ao mesmo campo primário.

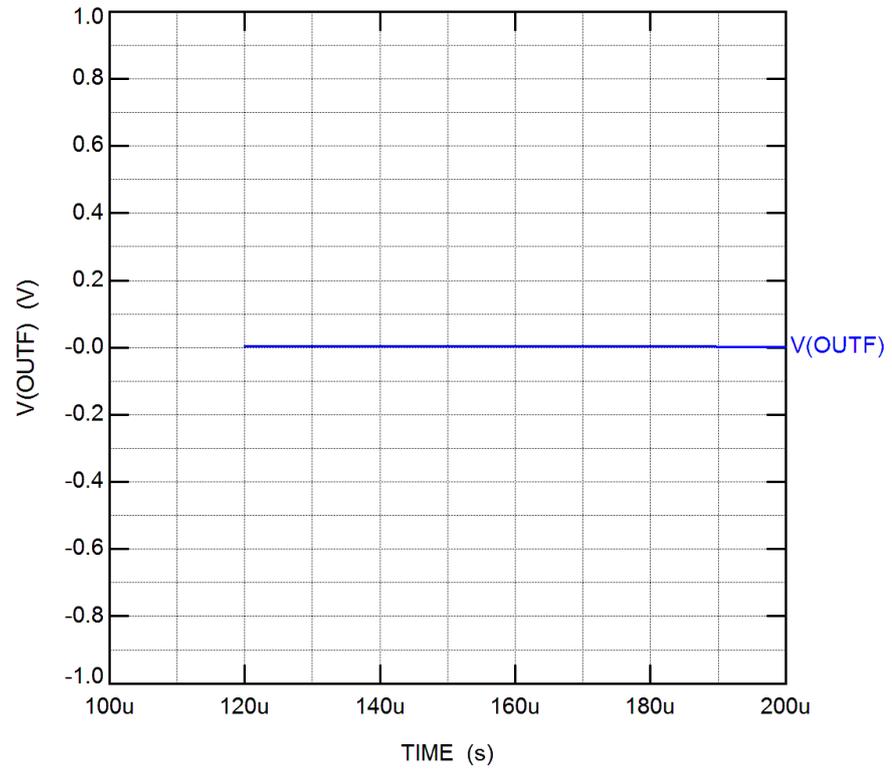
CIRCUITO DE LEITURA GMR (COMPLETO)

TopSPICE 7.17e

25-JUN-2013

22:45:12

— V(OUTF)



File: C:\Users\Gabriel\Desktop\proj_final\CIRCUITO LEITURA GMR COMPLETO.OUT

Figura 7: Gráfico de saída do circuito global, considerando os transdutores submetidos ao mesmo campo primário.

Após essas constatações, foi preciso analisar a ordem de grandeza da tensão na saída da ponte (antes da entrada no amplificador de instrumentação INA129) quando o transdutor está submetido ao campo magnético primário. Isto é fundamental para determinar o ganho que o INA129 tem que dar ao sinal, bem como se alguma tensão deve ser aplicada ao pino de referência do componente, para retirar algum *offset*. Esta tensão é apresentada na Figura 8 a seguir.

CIRCUITO DE LEITURA GMR (COMPLETO)

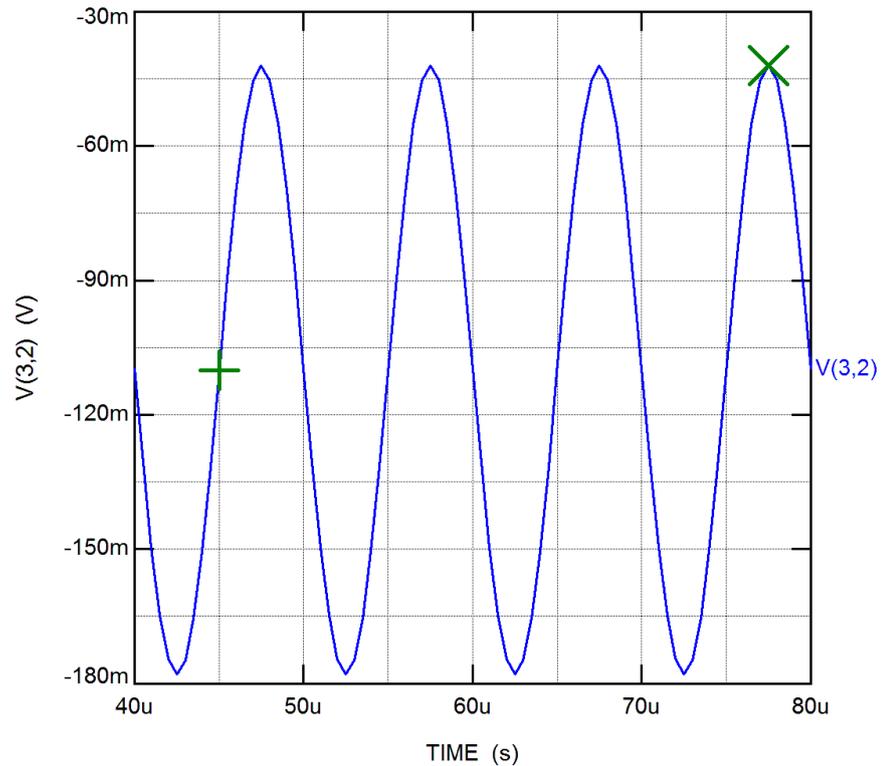
TopSPICE 7.17e

25-JUN-2013

19:20:32

— V(3,2)

Cursor 1 (+):
TIME=45.012046u
V(3,2)=-110.09213m
Cursor 2 (x):
TIME=77.5u
V(3,2)=-42.07m



File: C:\Users\Gabriel\Desktop\proj_final\CIRCUITO LEITURA GMR COMPLETO.OUT

Figura 8: Gráfico da tensão diferencial entre os terminais da ponte.

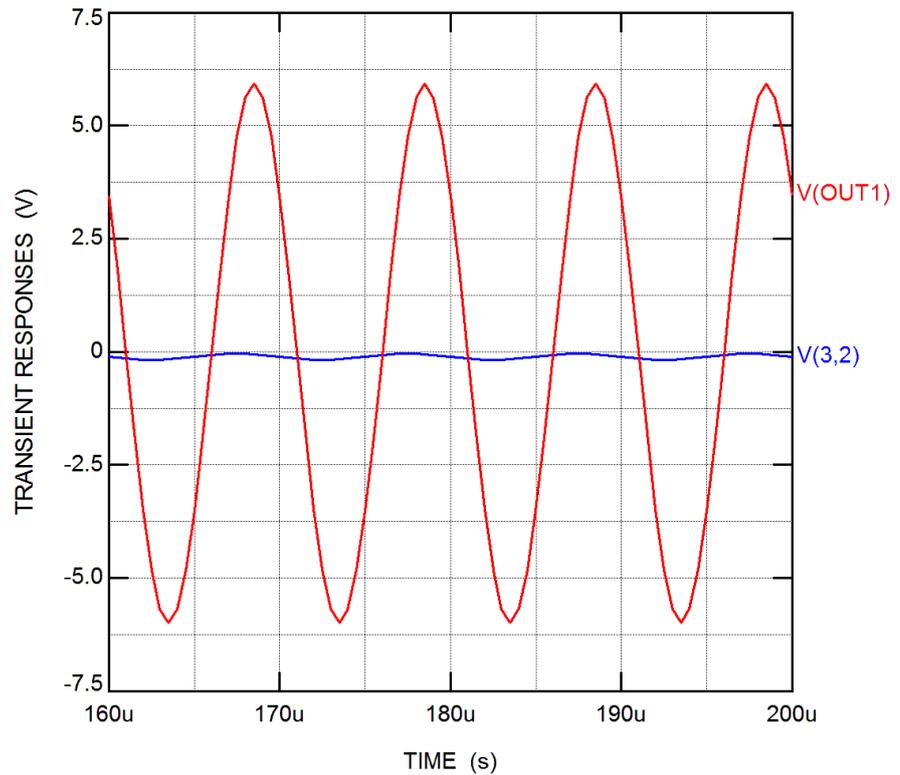
O gráfico na saída da ponte mostra uma onda centrada em aproximadamente -110 mV, com amplitude de aproximadamente 68 mV. A partir disso, decidiu-se por utilizar um ganho $G=100$ nos amplificadores INA129 que vêm imediatamente após os transdutores e por aplicar uma tensão de 11 V ($110 \text{ mV} * G$) no pino de referência para retirar o *offset*, centrando o sinal em 0 V. Como já mencionado, o ganho destes amplificadores é ajustado por meio de uma resistência de ajuste R_G e segue a fórmula $G=1+(49,4\text{k}\Omega/R_G)$, portanto para aplicar um ganho de aproximadamente 100 é necessário utilizar $R_G=494 \Omega$.

A Figura 9 a seguir apresenta a tensão antes da entrada no INA129 (onda azul) e o sinal na saída do INA129 (onda vermelha).

CIRCUITO DE LEITURA GMR (COMPLETO)

TopSPICE 7.17e
25-JUN-2013
19:44:47

— V(3,2)
— V(OUT1)



File: C:\Users\Gabriel\Desktop\proj_final\CIRCUITO LEITURA GMR COMPLETO.OUT

Figura 9: Gráfico que apresenta o sinal de tensão diferencial dos terminais da ponte (em azul), e o sinal após a passagem pelo amplificador de instrumentação INA129 (em vermelho).

A presença de um corpo estranho produz um campo magnético secundário que altera a amplitude do campo magnético percebido pelo transdutor GMR. Desta forma, com o código Matlab foram feitas simulações para calcular a magnitude do campo secundário para diferentes combinações de h e r , que resultaram na seguinte tabela de valores:

		r	
		0,005 m	0,0005 m
h	0,1 m	0,00001594 Oe	0,000000001189 Oe
	0,01 m	1,08556775 Oe	0,00008093 Oe

Observa-se que os campos secundários possuem amplitudes muito pequenas. Por causa disso, quando utilizados na simulação do TopSPICE, os sinais de tensão resultantes são muito afetados por erros de quantização, que acabam sendo amplificados na saída do último INA129.

A estratégia de simulação foi analisar a tensão diferencial antes da entrada do último INA129 para valores de campo secundário mais próximos do maior valor na tabela. A partir das tensões obtidas, o objetivo foi traçar a curva Campo secundário (Oe) x Tensão diferencial (mV), para então calcular a sensibilidade estática nominal do circuito. De posse desta sensibilidade, pode-se extrapolar e calcular a sensibilidade do circuito completo, multiplicando a sensibilidade encontrada pelo ganho dado pelo último INA129.

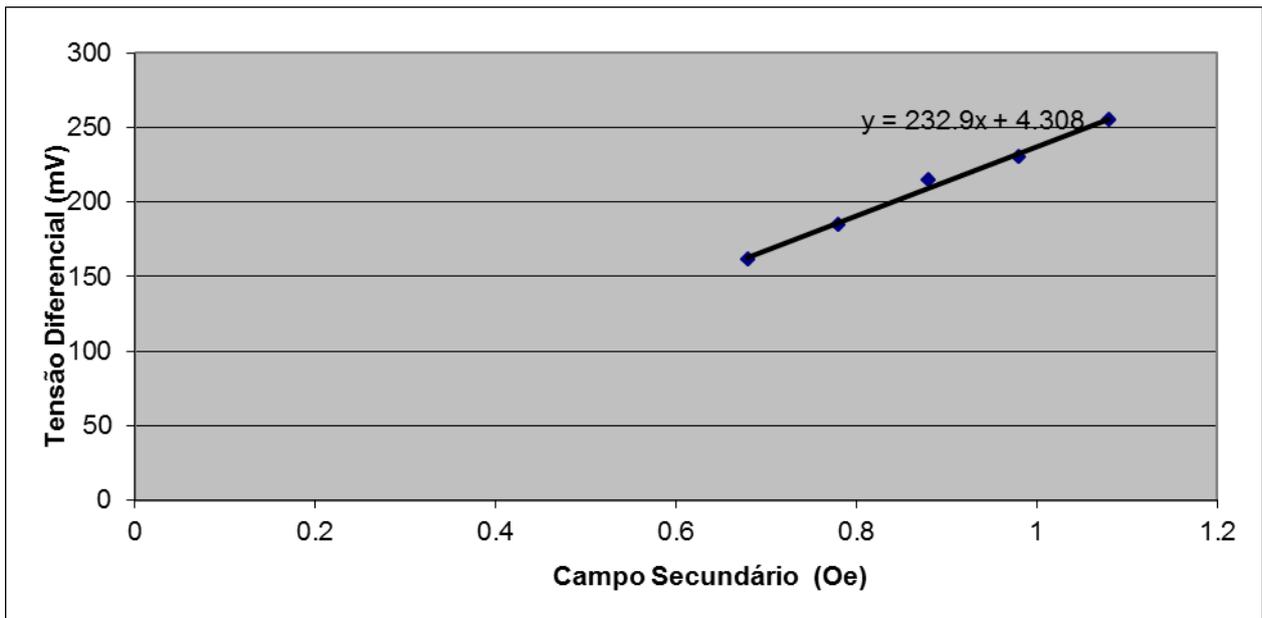


Figura 10: Curva Tensão diferencial (mV) x Campo Secundário (Oe) interpolada a partir das simulações no TopSpice.

A partir da Figura 10, a sensibilidade encontrada foi de aproximadamente 233 mV/Oe o que, supondo um ganho de 1000 no último INA129, resultaria em uma sensibilidade do circuito completo de 233V/Oe.

Esta sensibilidade pode ser usada juntamente com as Figuras 4 e 5 para calcular aproximadamente qual seria a tensão de saída do circuito completo de acordo com o raio r da esfera de chumbo e com o *liftoff*, conforme pode ser visto nas Figuras 11 e 12 abaixo.

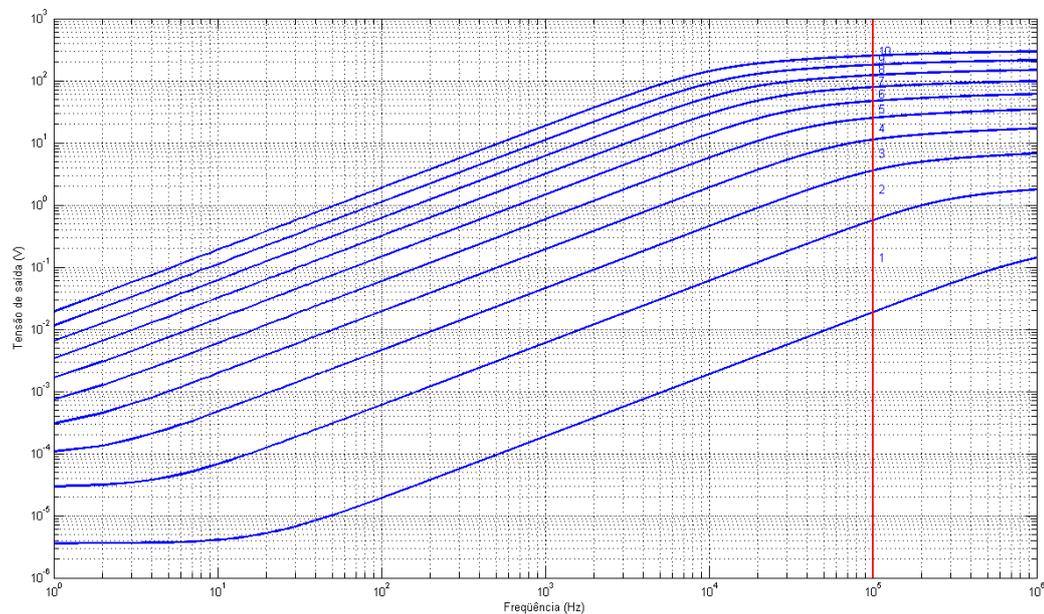


Figura 11: Comportamento Frequência (Hz) x Tensão de saída (V) obtido a partir da Figura 4, com eixo y multiplicado pela sensibilidade estimada de 233V/Oe.

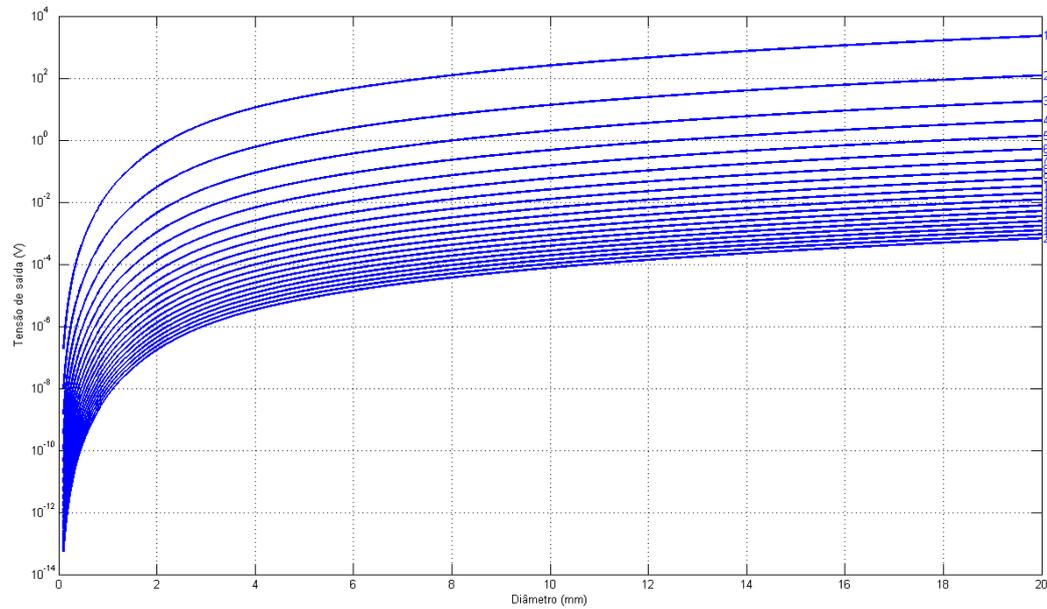


Figura 12: Comportamento Diâmetro (mm) x Tensão de saída (V) obtido a partir da Figura 5, com eixo y multiplicado pela sensibilidade estimada de 233V/Oe.

Posteriormente neste relatório, esta sensibilidade será utilizada para estimar a resolução analógica em oersteds do transdutor completo.

O código utilizado nas simulações do TopSpice segue em anexo.

c. Implementação em protoboard

O circuito implementado em protoboard pode ser visto na Figura 13.

Como não foi possível finalizar a construção do solenóide, o circuito foi testado com uma Bobina de Helmholtz. Para que os transdutores GMR pudessem ser colocados dentro da bobina, foi necessário soldá-los em uma placa separada (Figuras 14 e 15).

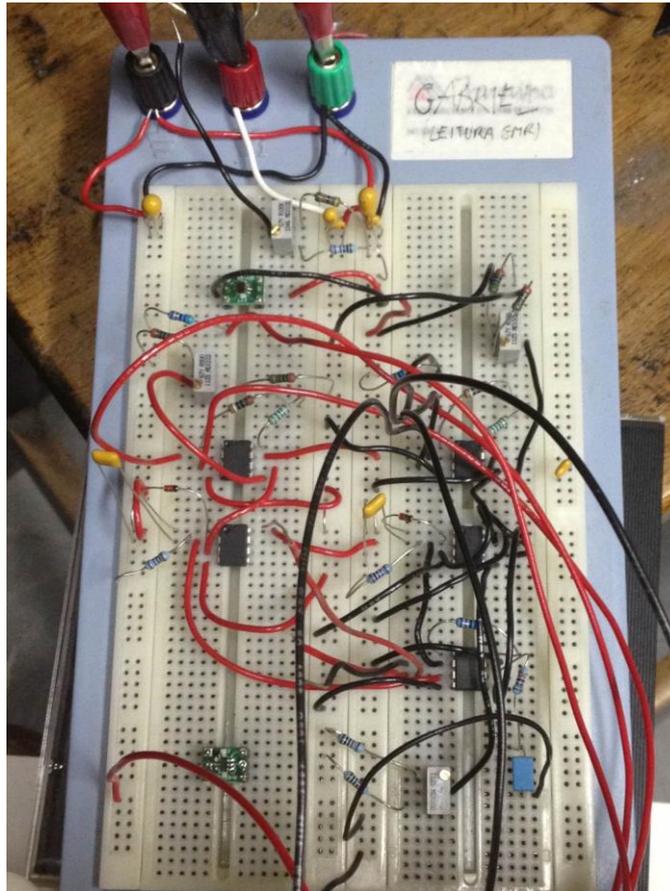


Figura 13: Circuito de leitura implementado em protoboard.

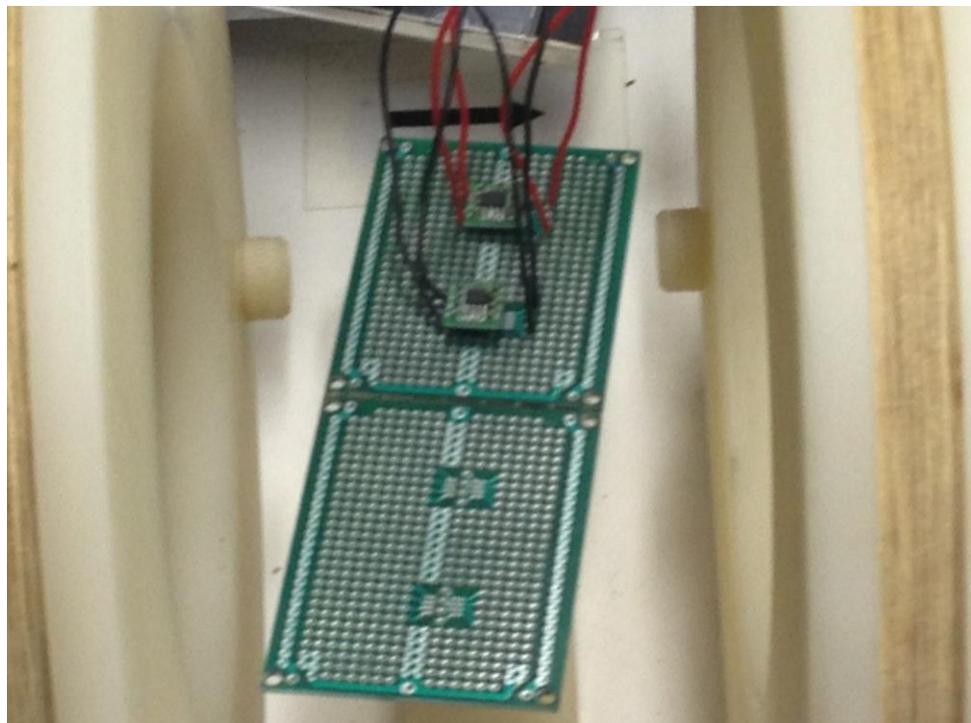


Figura 14: Placa com os transdutores GMR soldados.

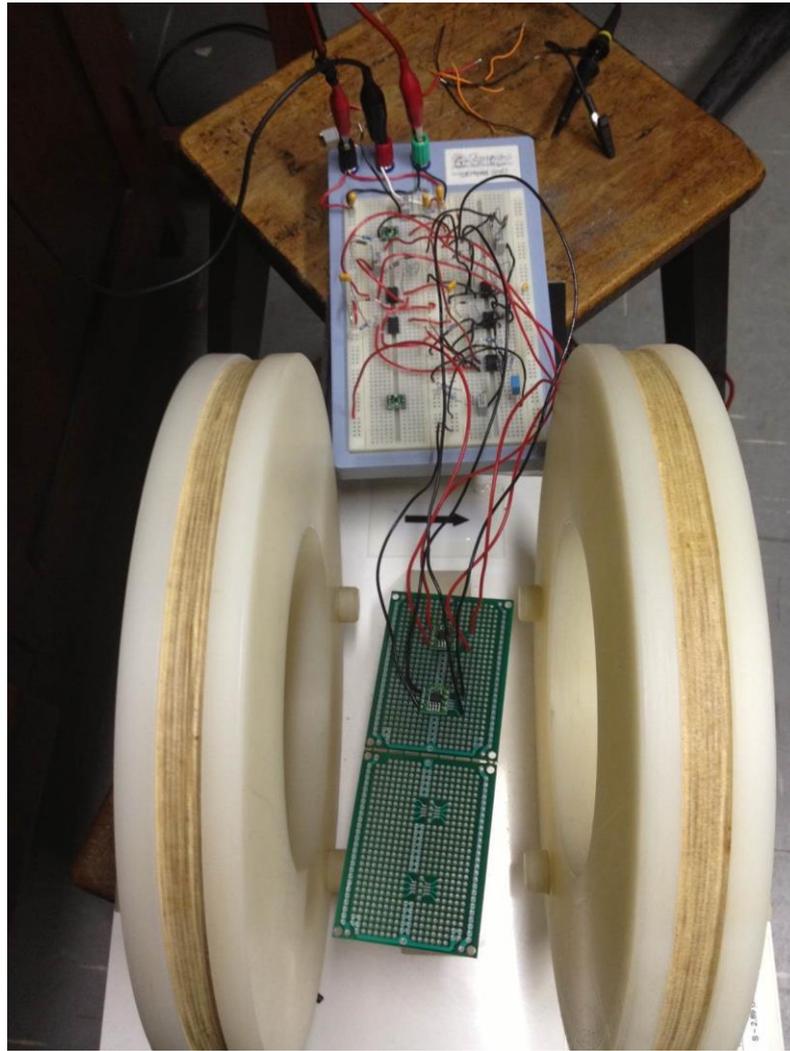


Figura 15: Circuito completo, com a placa dos transdutores posicionada na região central da Bobina de Helmholtz.

A Figura 16 mostra o esquemático do circuito que foi de fato implementado, e possui algumas pequenas diferenças em relação ao esquemático que havia sido idealizado, mostrado na Figura 6.

Em primeiro lugar, no pino de referência dos INA129 intermediários, foi utilizado um potenciômetro para permitir o ajuste fino do *offset*. Os capacitores de 22nF dos detectores de pico foram substituídos por capacitores de 1 μ F, aumentando a constante de tempo, e possibilitando ondas mais constantes na saída dos detectores. Além disso, foi implementado um filtro passa-baixa na saída do circuito, com frequência de corte de 100Hz buscando filtrar ruídos em alta frequência (FM, por exemplo). O ganho aplicado no último INA129 neste estágio de desenvolvimento foi de 10, ou seja, foi utilizado um R_G de aproximadamente 5k Ω .

d. Caracterização

A caracterização do circuito foi realizada com o auxílio de uma Bobina de Helmholtz, ligada em série a uma resistência de 100Ω , alimentada por uma fonte de tensão senoidal ajustada para gerar um sinal de frequência 100kHz e amplitude 10V (máximo da fonte). Esta configuração faz com que a bobina produza um campo de aproximadamente 0,3 Oe, campo que foi utilizado para a caracterização do circuito.

Os gráficos a seguir foram feitos em Matlab a partir da aquisição realizada pelo osciloscópio.

Na Figura 17 abaixo, encontra-se o sinal de tensão diferencial na entrada do INA129 relativo à leitura do primeiro transdutor.

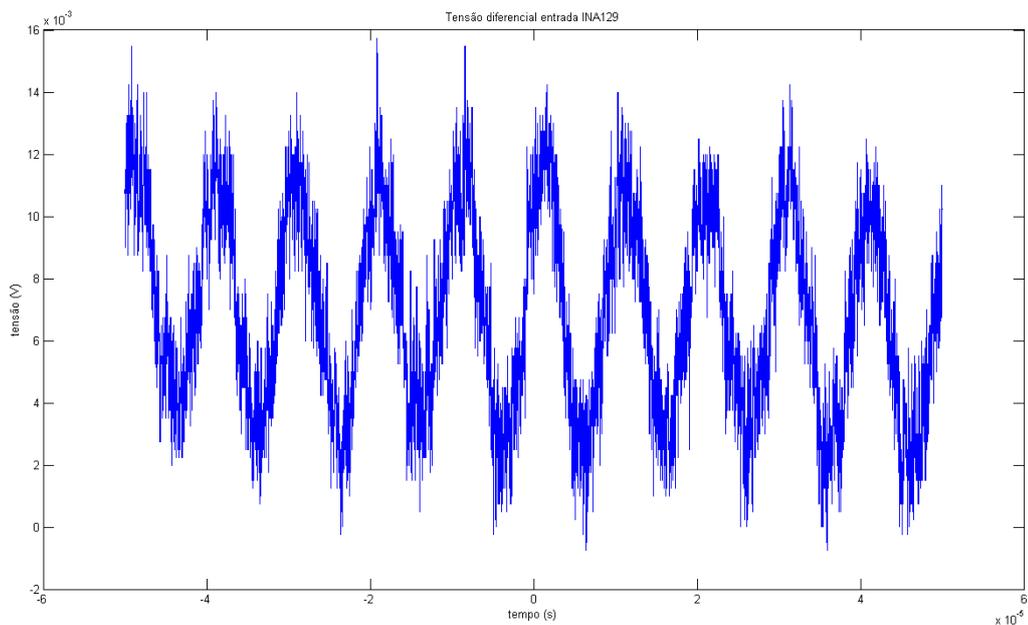


Figura 17: Tensão diferencial na entrada do INA129 relativo à leitura do primeiro transdutor.

Pode-se observar que a onda está com offset de aproximadamente 8mV, e com amplitude de aproximadamente 3,5 mV a 4mV. Esta tensão de offset provavelmente é causada por algum campo magnético ambiente, já que, como a tensão aplicada no transdutor não possui nível CC era esperado que a tensão diferencial também não possuísse *offset*.

Na Figura 18 abaixo, encontra-se a onda na saída do mesmo INA129. O *offset* visto anteriormente foi retirado através do potenciômetro no pino de referência, assim como a amplitude de aproximadamente 0,35 V confirma o ganho de 100.

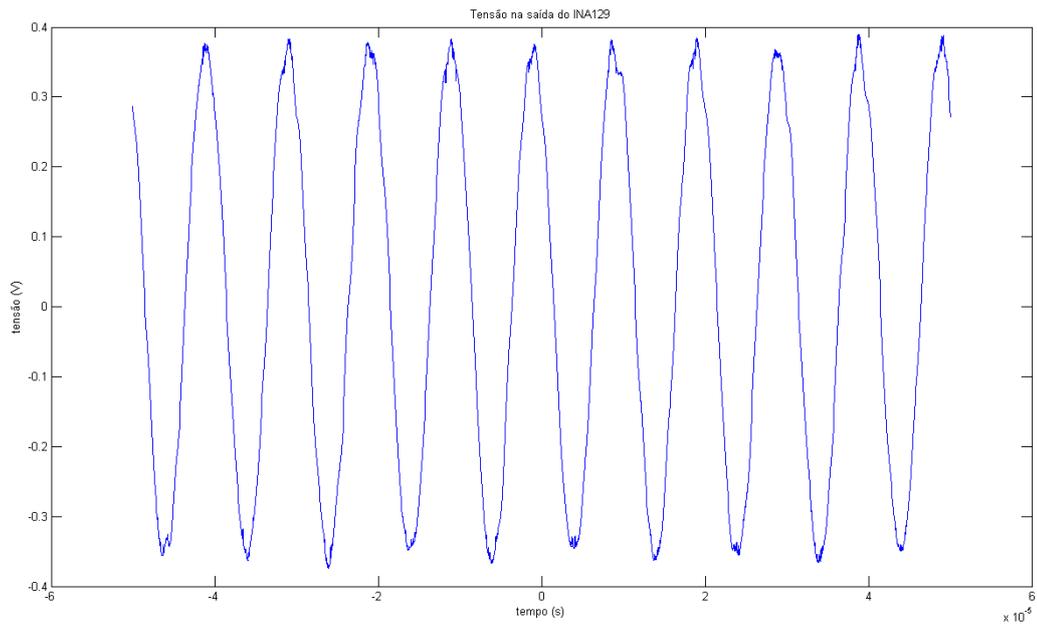


Figura 18: Tensão na saída do INA129 relativo à leitura do primeiro transdutor.

Segue na Figura 19 abaixo a saída do detector de pico que vem na sequência do mesmo INA129:

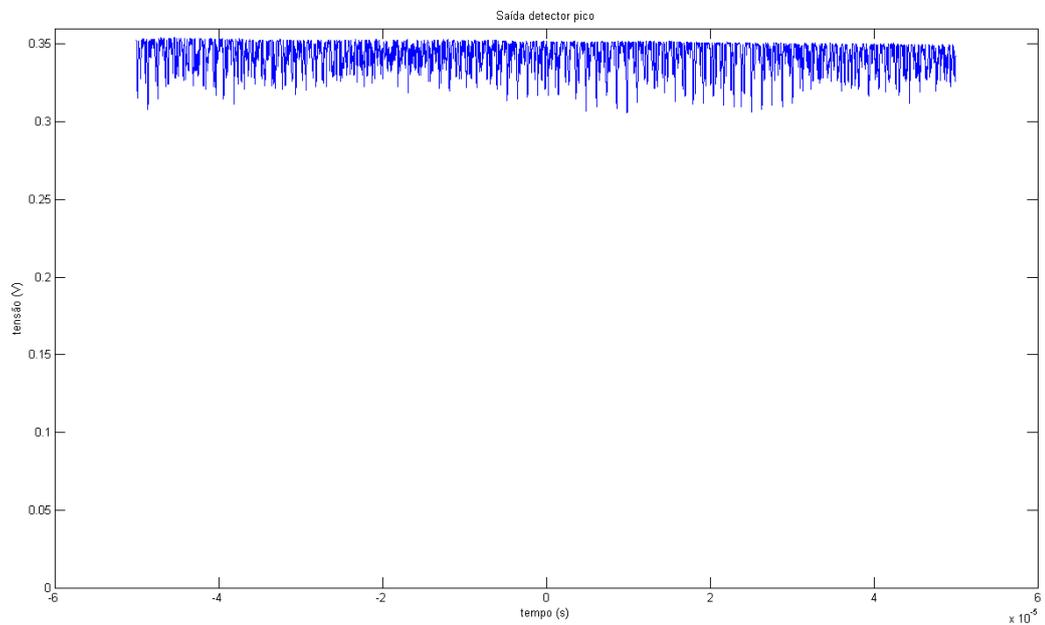


Figura 19: Saída do detector de pico relativo à leitura do primeiro transdutor.

Pode-se notar uma onda com pequenas variações, mas com nível CC próximo a 0,34 V, confirmando o comportamento de detector de pico que era esperado.

Na Figura 20 abaixo, segue o sinal de tensão diferencial na entrada do INA129 relativo à leitura do segundo transdutor.

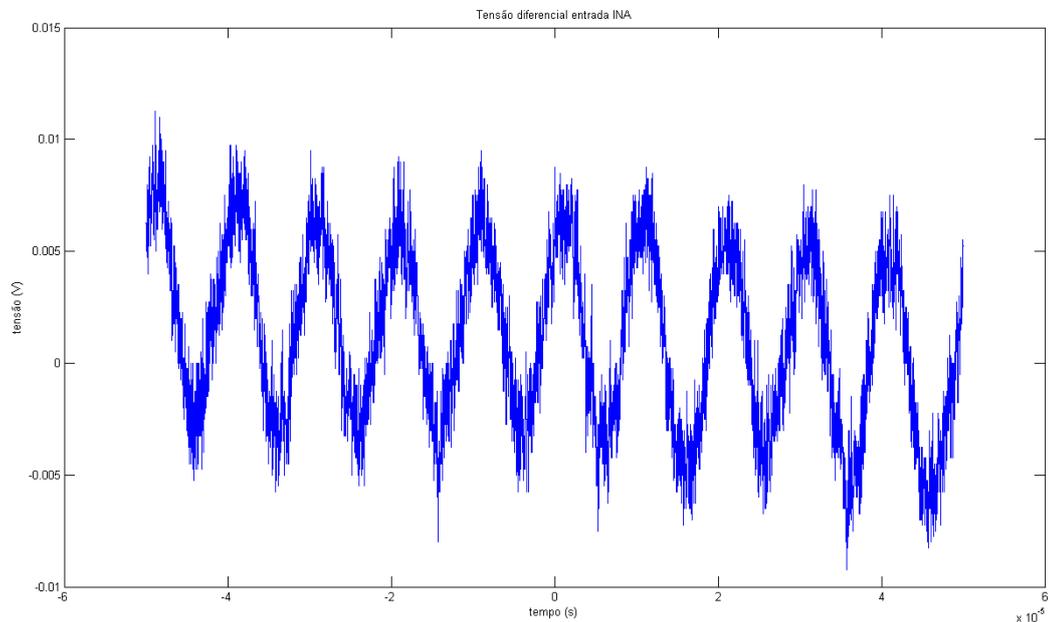


Figura 20: Tensão diferencial na entrada do INA129 relativo à leitura do segundo transdutor.

Pode-se observar que a onda está com offset de aproximadamente 3mV, e com amplitude de aproximadamente 6mV.

Na figura 21 abaixo, encontra-se a onda na saída do mesmo INA129. É possível notar o ganho de 100 aplicado pelo INA129 em questão (neste caso, o *offset* não foi retirado).

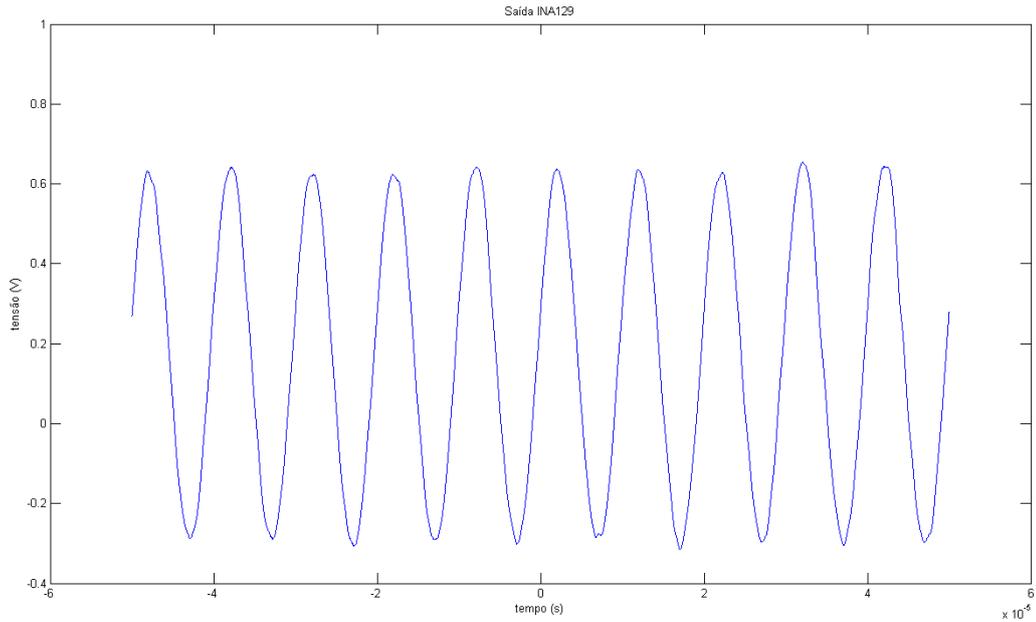


Figura 21: Tensão na saída do INA129 relativo à leitura do segundo transdutor.

Segue abaixo, na Figura 22, a saída do detector de pico que vem na sequência do mesmo INA129.

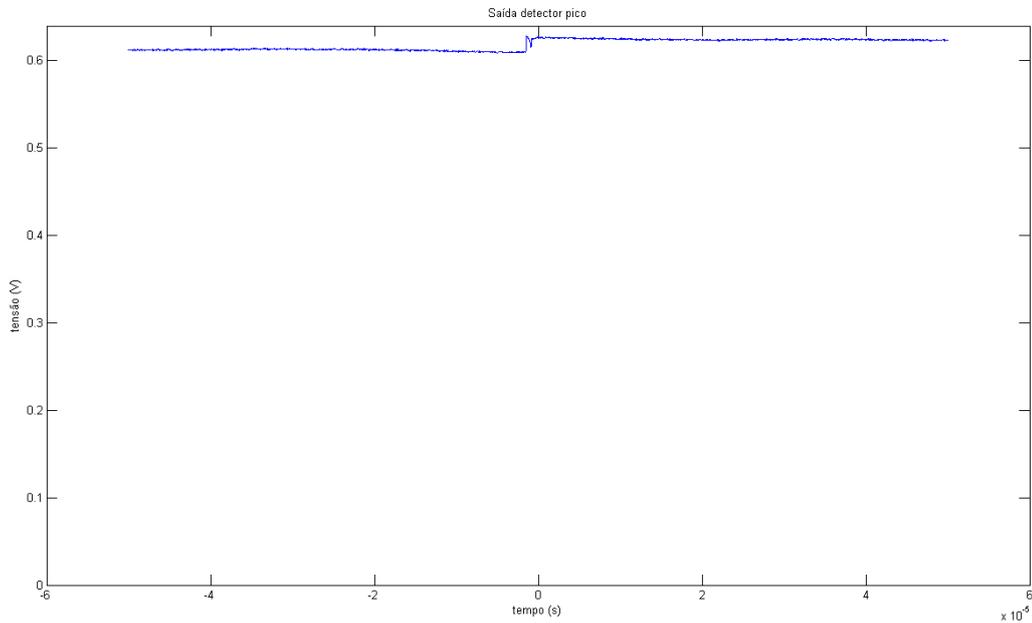


Figura 22: Saída do detector de pico relativo à leitura do segundo transdutor.

Percebe-se novamente uma onda com pequena variação (causada pela carga e descarga do capacitor) e com valor médio de aproximadamente 0,62 V, confirmando o comportamento de detector de pico que era esperado.

Na figura 23 abaixo, segue o gráfico referente à tensão diferencial na entrada do último INA129, resultado da diferença entre as duas ondas na saída dos detectores de pico, mostradas acima.

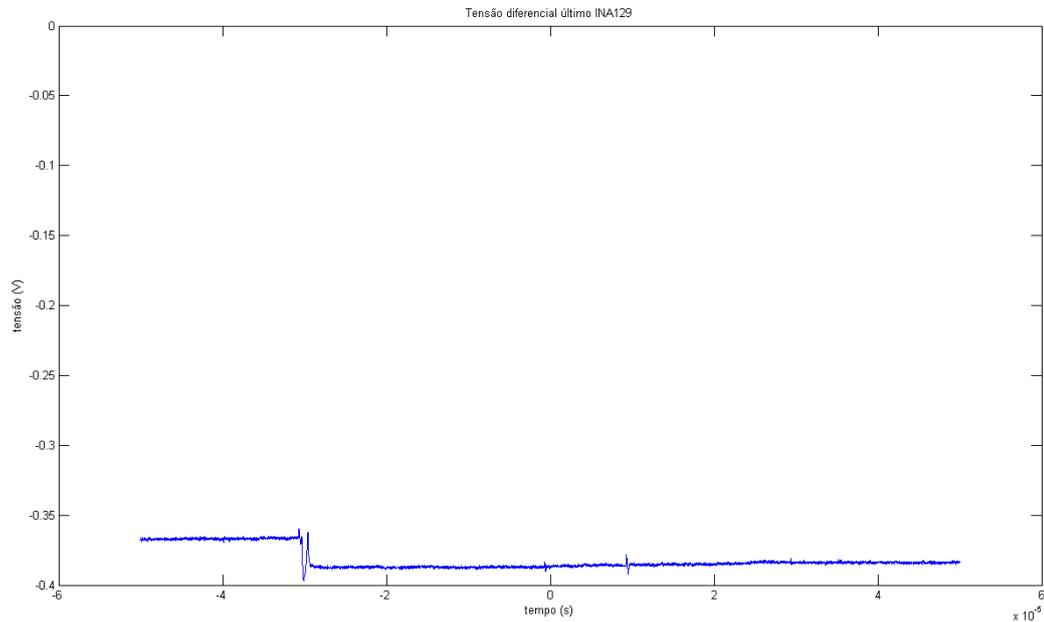


Figura 23: Tensão diferencial na entrada do último INA129.

O sinal apresenta o comportamento esperado, uma vez que os valores são coerentes com a diferença entre as ondas mostradas anteriormente.

Segue na Figura 24 o gráfico de saída do último INA129, que é a saída global do circuito. Pode-se observar claramente o ganho de 10 aplicado pelo amplificador de instrumentação no sinal mostrado imediatamente acima.

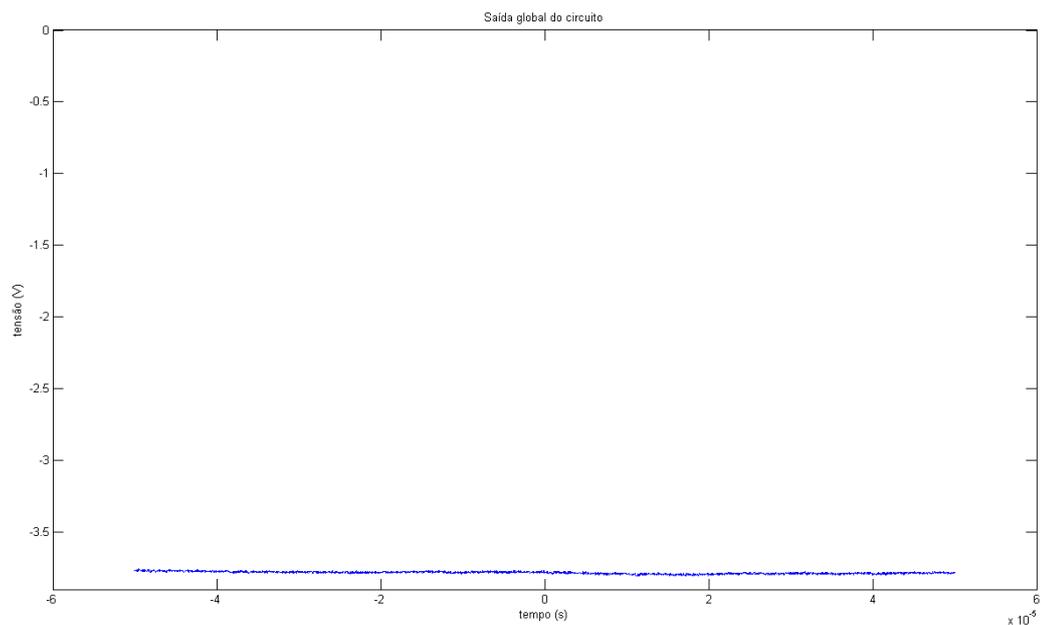


Figura 24: Saída global do circuito.

O gráfico de ruído é mostrado na Figura 25. Para obter este gráfico, foi zerado o offset no sinal de saída e visualizou-se a saída na menor escala possível para verificar a amplitude do sinal, que é na verdade causado pelo ruído intrínseco do circuito eletrônico, além de eventuais sinais de ruído magnético ambiente que não tenham sido completamente removidos pelo gradiômetro. Com isso, sabendo-se este valor, pode-se voltar de forma retroativa ao começo do circuito para estimar a resolução analógica em Oe do mesmo.

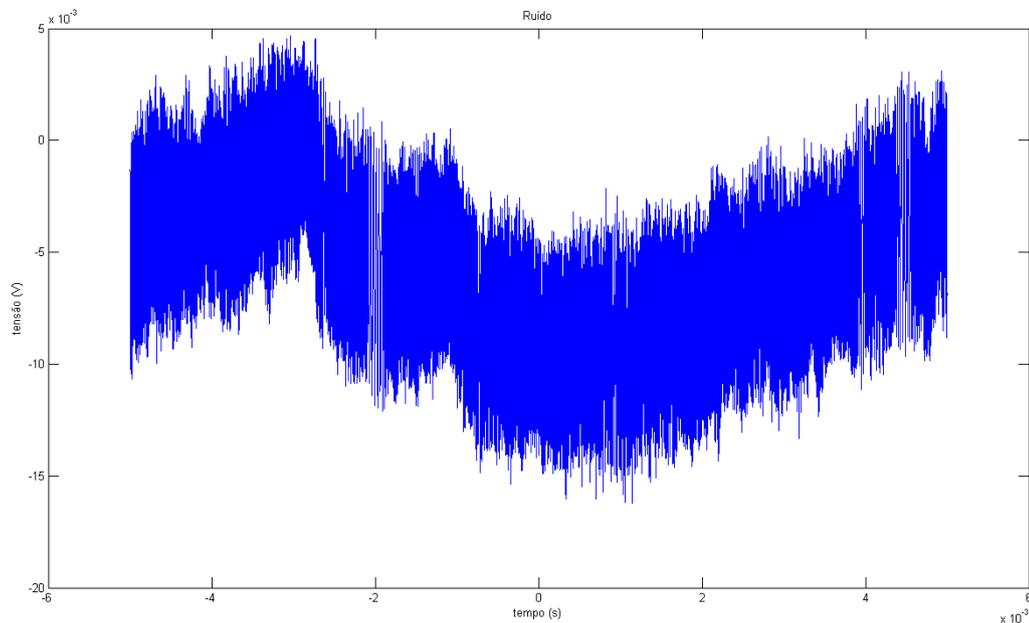


Figura 25: Ruído.

O valor de amplitude pico-a-pico desta onda é de aproximadamente 10 mV. Desta forma, dividindo-se pela sensibilidade aproximada calculada no item 4.b, de 2,33V/Oe (considerando ganho de 10 no último INA129), obtém-se uma resolução de 0,0043 Oe.

Considerando-se o ganho máximo de 1000 no último INA, ter-se-ia uma resolução analógica total de 0,000043 Oe, ou 43 μ Oe.

Este valor pode ser combinado à Figura 5, conforme indicado na Figura 26 a seguir, indicando os limites de detecção teórica do circuito idealizado.

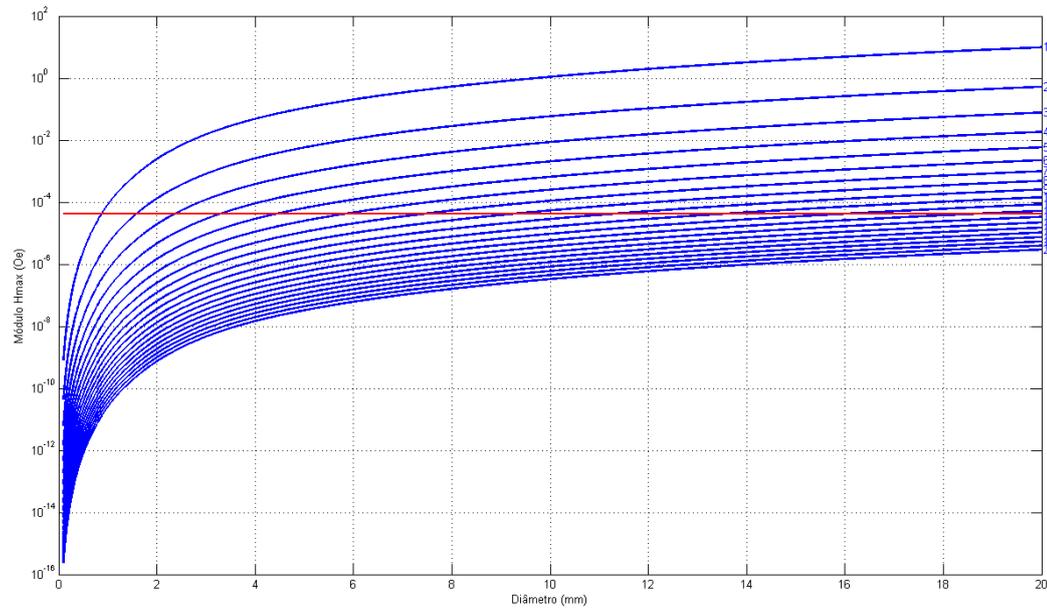


Figura 26: Figura 5 acrescentada de reta vermelha horizontal indicativa da resolução de $43\mu\text{Oe}$.

Na Figura 26 acima, a reta horizontal vermelha indica a resolução estimada de $43\mu\text{Oe}$. Para ser possível detectar o corpo estranho, discriminando-o do ruído eletrônico e magnético, o campo secundário precisa ser maior do que este valor.

Por exemplo, para um diâmetro de esfera de 10mm, a distância máxima para a qual é possível detectar o corpo estranho é aproximadamente 8cm. Já para uma esfera com 1mm de diâmetro, a distância máxima é de 1cm.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este relatório apresentou o estudo teórico e prático para detecção de corpos estranhos metálicos não-magnéticos por transdutores GMR como Projeto de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

O projeto foi concluído com sucesso, atingindo o objetivo inicial. Além de ter-se definido os parâmetros para construção do solenóide de excitação dos transdutores GMR, foi projetado um circuito para leitura dos mesmos, em configuração gradiométrica, com sensibilidade de 233V/Oe e resolução estimada em 43 μ Oe.

O próximo passo, em continuação a este Projeto de Graduação, será a construção do solenóide com base no projeto descrito na seção 3.b. Os transdutores GMR serão acoplados a este solenóide, e o circuito de leitura poderá ser reajustado às novas condições de operação (notadamente, campo primário CC de 40 Oe e CA de 25 Oe, conforme descrito na seção 3.b).

Em seguida, dever-se-á projetar e implementar um circuito eletrônico de excitação do solenóide, que forneça as correntes CC de 1,212 A e CA de 0,757 A, conforme descrito na seção 3.b. Sugere-se que este circuito seja baseado em um oscilador de 100kHz de modo a se ter a estabilidade de frequência necessária para o melhor funcionamento do circuito de detecção.

6. Referências Bibliográficas

1. Costa Monteiro, E. et al. Magnetic Measurement Techniques for Locating Foreign Bodies in Humans. In: AINE. C. J. et al. (Eds) **Biomag 96: Proceedings of the Tenth International Conference on Biomagnetism**, Springer, 1999. p. 28.
2. Costa Monteiro, E. et al. Locating Steel Needles in the Human Body Using a SQUID Magnetometer, **Physics in Medicine and Biology**, v. 45, n. 8, p. 2389, 2000.
3. Hall Barbosa, C., Costa Monteiro, E. et al. Improvement of a Technique for Localization of Steel Needles in Humans Using a SQUID Magnetometer, **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v.11, n. 1, p. 1299, 2001.
4. Hall Barbosa, C.; Costa Monteiro, E. Localization of Curved Steel Needles In Humans Using a SQUID Magnetometer, **Proc. 13th International Conference on Biomagnetism**, VDE Verlag GMBH, 2002. p. 1132
5. Hall Barbosa, C. Localization of Firearm Projectiles in the Human Body Using a Superconducting Quantum Interference Device Magnetometer: A Theoretical Study, **Review of Scientific Instruments**, v. 75, n. 6, p. 2098-2106, 2004
6. Tao, K. et al. Small metal soft tissue foreign body extraction by using 3D CT guidance: A reliable method. **Eur. J. Radiol.**, doi:10.1016/j.ejrad.2012.01.002, 2012 (in press)
7. Stockmann, P. et al. Conventional radiographs: are they still the standard in localization of projectiles?, **Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod.**, v. 104, n. 4, p. 71-75, 2007
8. Finkelstein, M.; Legmann, A.; Rubin, P.A. Projectile metallic foreign bodies in the orbit: a retrospective study of epidemiologic factors, management, and outcomes. **Ophthalmology**. 1997 Jan;104(1):96-103.
9. Höllerhage, H.G.; Dorfmueller, G. Extensive brain injury caused by attempted suicide with an airgun and ultrasound controlled removal of the deep intracranial projectile, **Nervenarzt** 1992 Oct;63(10):641-3.
10. Weissman, M.N.; Green, B.A.; Morse, B. In-utero gunshot wound to the head. Use of intraoperative ultrasonography for localization of an intracerebral projectile. **SurgNeurol**. 1984 Apr;21(4):347-50.
11. Roubal, P.; Korger, J.; Ondrůšková, O.; Kratochvíl, D.; Holý, M. An unusual embolization of a projectile in the superficial femoral artery, **RozhlChir**. 1997 Nov;76(11):557-9.
12. Miranda, J.A.; Borges, M.H.C.; Mendes, E.A. Firearm Projectile as Nasal Foreign Body: Case Report, **International archives of otorhinolaryngology**, Year: 2006 Vol. 10 Num. 4 - Out/Dez - (9º).
13. Fried, M.P.; Hsu, L.; Topulos, G.P.; Jolesz, F.A. Image-Guided Surgery in a New Magnetic Resonance Suite: Preclinical Considerations, **Laryngoscope**. 106(4):411-417, 1996.
14. Muensterer, O.; Joppich, I. Identification and topographic localization of metallic foreign bodies by metal detector, **Journal of Pediatric Surgery**, v. 39, n. 8, p. 1245-1248
15. Salvati, M.; Cervoni, L.; Rocchi, G.; Rastelli, E.; Delfini, R. Spontaneous movement of metallic foreign bodies.: Report. **J NeurosurgSci**, 1997, 41 (4): 423 - 5.
16. Ilkko, E.; Reponen, J.; Ukkola, V.; Koivukangas, J. Spontaneous migration of foreign bodies in the central nervous system. **ClinRadiol**, 1998, 53 (3): 221 - 5.
17. Bassett, K.E.; Schunk, J.E.; Logan, L. Localizing ingested coins with a metal detector. **Am J Emerg Med** 17:338-341, 1999
18. Gooden, E.A.; Forte, V.; Papsin, B. Use of a commercially available metal detector for the localization of metallic foreign body ingestion in children. **J Otolaryngol** 29:218-220, 2000
19. Moore, U.J.; Fanibunda, K.; Gross M.J. The use of a metal detector for localization of a metallic foreign body in the floor of the mouth. **Br J Oral Maxillofac Surg** 31:191-192, 1993
20. Mary, W.; Sigrist, T. Simple projectile localization in the cadaver using a new metal detector. **Arch Kriminol** 192:149-152, 1993
21. Turletti, M.; Tappero, P. Use of a metal detector in the search for bullets during autopsy. **Panminerva Med** 35:237-239, 1993

22. Ros, S.P.; Cetta, F. Metal detectors: An alternative approach to the evaluation of coin ingestions in children? **PediatrEmerg Care** 8:134-136, 1992
23. Younger, R.M.; Darrow, D.H. Handheld metal detector confirmation of radiopaque foreign bodies in the esophagus. **Arch Otolaryngol Head Neck Surg** 127:1371-1374, 2001
24. Tidey, B.; Price, G.J.; Perez-Avilla, C.A. et al The use of a metal detector to locate ingested metallic foreign bodies in children. **J AccidEmerg Med** 13:341-342, 1996
25. Doraiswamy, N.V.; Baig, H.; Hallam, L; Metal detector and swallowed metal foreign bodies in children. **J AccidEmerg Med** 16:123-125, 1999
26. Seikel, K.; Primm, P.A.; Elizondo, B.J. et al Handheld metal detector localization of ingested metallic foreign bodies—Accurate in any hands? **Arch PediatrAdolesc Med** 153:853-857, 1999
27. Dahiya, M.; Denton, J.S. Esophagoaortic perforation by foreign body (coin) causing sudden death in a 3-year-old child. **Am J Forensic Med Pathol** 20:184-188, 1999
28. Boutin, R.D.; Briggs, J.E.; Williamson, M.R. Injuries associated with MR imaging: Survey of safety records and methods used to screen patients for metallic foreign bodies before imaging.,**Am J Roentgenol** 162:195-199, 1994
29. Gustavsson, P.; Gerhardsson, L. Intoxication from an accidentally ingested lead shot retained in the gastrointestinal tract,**Environ Health Perspect**,v. 113, p. 491-3, 2005
30. Mcquirter, J.L.; Rothenberg, S.J.; Dinkins, G.A.; Norris, K.; Kondrashov, V.; Manalo, M. et al. Elevated blood lead resulting from maxillofacial gunshot injuries with lead ingestion,**J Oral MaxillofacSurg**,v. 61, p. 593-603, 2003