

3 Transdutor MIG de Campo Magnético em Tensão

3.1. Elemento Sensor

3.1.1. Análise da Impedância para Sinais Magnéticos de Baixa Intensidade

O objetivo desta pesquisa é desenvolver um transdutor capaz de detectar campos magnéticos muito fracos, da ordem de 1 mOe (0,1 A/m). Sendo assim, será utilizada uma faixa muito pequena da curva de impedância. Pode-se supor, portanto, que a variação da impedância com o campo aplicado longitudinalmente à fita é linear em torno de um ponto de polarização (H_0, Z_0), como ilustrado na Fig.3.1.

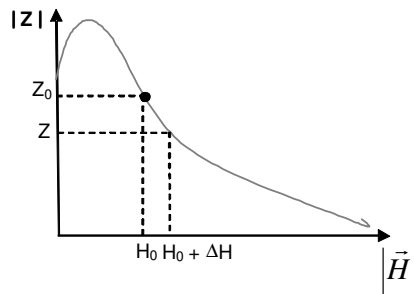


Figura 3.1 - Pequena variação da impedância para uma pequena variação do campo, em torno de um ponto de polarização (Z_0, H_0).

Por facilidade de notação, considera-se a partir deste ponto $H = |\vec{H}|$ e $Z = |Z|$. Supondo uma pequena variação de H , tem-se

$$H = H_0 + \Delta H \quad \Rightarrow \quad Z = f(H_0 + \Delta H) \quad (3.1)$$

Expandindo Z em série de Taylor em torno de H_0

$$Z = f(H_0 + \Delta H) = f(H_0) + f'(H_0)\Delta H + f''(H_0)\frac{(\Delta H)^2}{2!} + \dots \quad (3.2)$$

Considerando ΔH pequeno o suficiente, tem-se $(\Delta H)^2 \approx 0$ e, portanto,

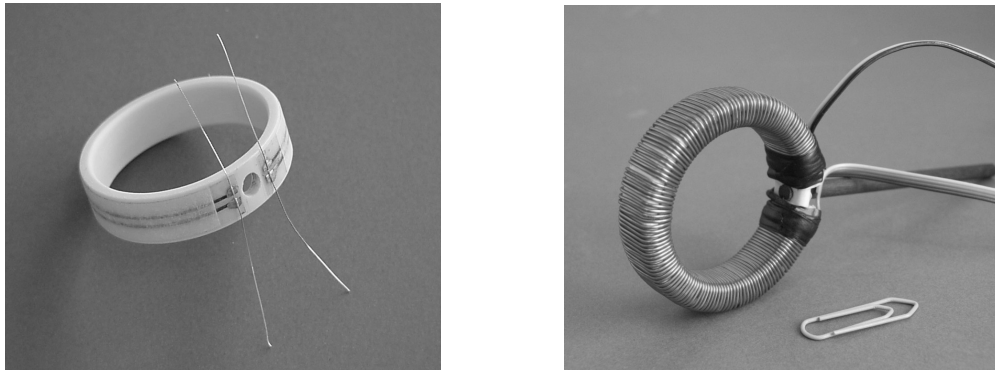
$$Z = Z_0 + f'(H_0)\Delta H, \text{ onde } Z_0 = f(H_0) \quad (3.3)$$

$$\Delta Z = Z - Z_0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta Z = f'(H_0)\Delta H} \quad (3.4)$$

O ponto de polarização (H_0 , Z_0) deve ser escolhido como aquele correspondente à maior derivada $f'(H_0)$, ou seja, aquele que possibilita a maior sensibilidade para o sensor. Este ponto será determinado a partir da análise da curva de caracterização $Z \times H$ do elemento sensor completo, conforme apresentado na seção 3.1.4.

3.1.2. Configuração do Elemento Sensor

O elemento sensor do transdutor foi idealizado como uma ponte resistiva composta por duas fitas MIG - colocadas em braços opostos da ponte – e por dois resistores de filme metálico. Para reduzir a influência de campos remotos sobre elas, as duas fitas foram montadas como duas espiras paralelas fixadas sobre um anel, conforme ilustra a foto do protótipo parcialmente completo apresentada na Fig. 3.2a. A espira tem raio de 2,5 cm, o que significa que as fitas têm um comprimento de aproximadamente 14,3 cm, existindo ainda um *gap*, de aproximadamente 0,7 cm, entre suas extremidades. Para completar o dispositivo, um anel externo foi acrescentado para proteção das fitas, bem como um enrolamento toroidal de 125 espiras, com o propósito de gerar o campo de polarização longitudinal (Fig. 3.2b).



(a) (b)
 Figura 3.2 - Protótipo do sensor : (a) fitas MIG fixadas ao anel interno; (b) com anel de proteção e as espiras para gerar o campo de polarização.

3.1.3. Integração do Campo Magnético na Fita MIG em Forma de Anel

Para o caso geral, em que a magnitude do campo é variável em relação ao comprimento l da fita, é necessário examinar a variação de Z devida às componentes tangenciais de \vec{H} que são aplicadas a trechos infinitesimais da fita. Considerando-se a equação (3.4), e que a variação de Z com H é linear, ou seja, $f'(H_0)$ é constante, tem-se que a expressão para a variação da impedância, para um determinado comprimento de fita, gerada pelo campo tangencial a esta, é

$$d\Delta Z = f'(H_0) \frac{\Delta \vec{H} \cdot d\vec{l}}{l}, \tag{3.5}$$

ou seja,

$$\Delta Z = \int_0^l d\Delta Z = \frac{f'(H_0)}{l} \int_0^l \Delta \vec{H} \cdot d\vec{l}. \tag{3.6}$$

Para a fita no formato de espira, como ilustrado na Fig. 3.3, tem-se $l = 2\pi r$ e, $d\vec{l} = r d\phi \hat{\phi}$, o que fornece como expressão para a variação da impedância

$$\boxed{\Delta Z = \frac{f'(H_0)}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\Delta \vec{H} \cdot \hat{\phi}) d\phi} \tag{3.7}$$

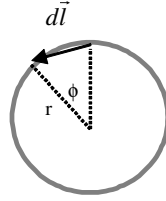


Figura 3.3 – Espira.

Se o campo em questão for espacialmente uniforme (como ocorre para fontes magnéticas distantes do ponto de observação), por exemplo $\Delta\vec{H} = \Delta H \hat{x}$, então

$$\hat{\phi} = -\sin \phi \hat{x} + \cos \phi \hat{y} \quad \Rightarrow \quad \Delta\vec{H} \cdot \hat{\phi} = -\Delta H \sin \phi, \quad (3.8)$$

$$\Delta Z = -\Delta H \frac{f'(H_0)}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin \phi d\phi = 0 \quad (3.9)$$

O que confirma a hipótese de que a configuração em anel é intrinsecamente diferencial e não deverá detectar campos uniformes ao longo do espaço. Entretanto, deve-se ressaltar que esse resultado só será obtido se a variação ΔH for tal que a característica $Z \times H$ seja mantida em uma região linear.

3.1.4. Medidas de Caracterização do Elemento Sensor de Campo Magnético

A primeira medição de caracterização para o elemento sensor, apresentada na Fig. 3.4, foi realizada variando-se a corrente no toróide (e, conseqüentemente, o campo aplicado tangencialmente à fita, H_ϕ), e medindo-se a impedância de somente uma das fitas, com o auxílio do equipamento descrito na seção 2.4.1. Analogamente à medição realizada para a fita reta apresentada no capítulo 2, a faixa de variação do campo aplicado foi de 0 Oe a 12 Oe.

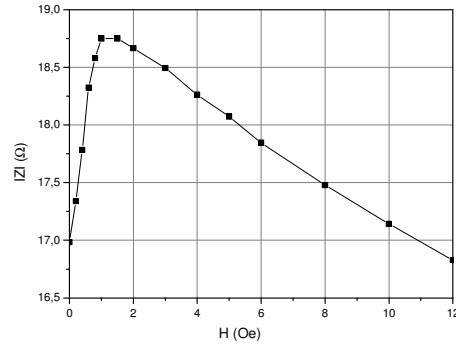


Figura 3.4 - Curva $|Z|_x|\vec{H}|$ para o anel sensor, com corrente de alimentação de 10 mA de amplitude e 1 MHz de frequência.

Na Fig. 3.5 pode-se observar a diferença entre as curvas $|Z|_x|\vec{H}|$ para a fita MIG retilínea e a fita MIG em forma de anel.

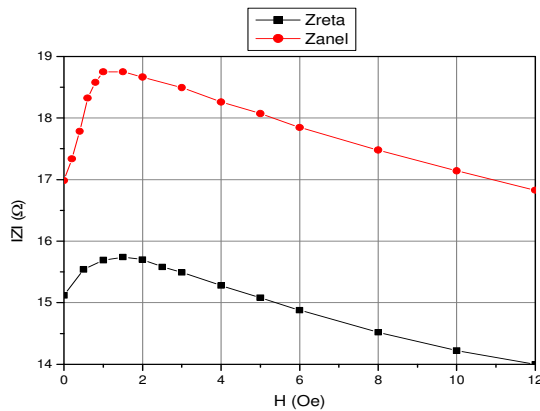


Figura 3.5 - Curvas $|Z|_x|\vec{H}|$ para a configuração retilínea da fita MIG (Zreta) e para a configuração da fita em formato de espira (Zanel).

Esta diferença atribui-se ao fato de que inicialmente, na caracterização da fita reta, estava sendo utilizada cola de prata para se realizar os contatos com a fita. Porém, este método se mostrou frágil e inconveniente, pois a tinta oxidava, o que resultava não só em variação da resistência de contato, como também no descolamento da amostra. Portanto, foi necessário o emprego de nova técnica, e passou-se a utilizar solda de ponta (elétrica), que se mostrou muito mais eficiente. No entanto, este tipo de solda implica numa descarga elétrica na amostra que,

mesmo sendo pontual, pode ter alterado a configuração dos domínios do material, causando a diferença entre as curvas apresentadas.

Outra possível explicação para a variação entre as curvas é o fato de a nova geometria implicar em uma auto-indutância não nula das fitas, além de poder existir uma indutância mútua entre elas, e ainda uma interação entre a indutância das fitas e a do toróide.

A partir da curva da impedância em função do campo magnético externo para o elemento sensor, pôde-se estabelecer o campo de polarização a ser utilizado. Primeiramente, optou-se por trabalhar com um campo de polarização de aproximadamente 5 Oe, apesar deste ponto não apresentar o maior $\Delta Z/\Delta H$ da curva. Esta tentativa se deveu a dois fatores: primeiro porque, com um campo desta ordem, o sensor teria uma maior imunidade a campos espúrios; segundo porque muitas vezes as curvas $Z \times H$ para campos muito baixos apresentam uma intensa histerese. Contudo, testes preliminares mostraram que o sensor é muito pouco sensível para esta faixa de campo de polarização, provavelmente devido à proximidade da saturação do material. Mediante este fato, a opção seguinte foi definir o campo de polarização como sendo aquele que possuísse o maior $f'(H_0)$, o que foi obtido em $H_0 = 0,3$ Oe e $Z_0 = 17,5 \Omega$, sendo $f'(H_0) = 3 \Omega/\text{Oe}$ ($0,04 \Omega(\text{A/m})^{-1}$). Com isso, foi realizada uma série de medições para se analisar o efeito de histerese no elemento sensor para esta faixa de campo de polarização.

Na Fig. 3.6 são apresentados dois ciclos de histerese. Em linha tracejada, tem-se o ciclo iniciado em 0,5 Oe, variando o campo do toróide de 0 Oe a 1 Oe. Em linha cheia, tem-se o ciclo iniciado em 0,3 Oe, variando o campo magnético externo de 0,05 Oe a 0,55 Oe. Os campos iniciais em cada medição são indicados pelos pontos marcados nos gráficos. Observando estas curvas, verifica-se que realmente o material possui histerese em relação ao campo, e que esta diminui com a redução da variação do campo. Supondo que o sensor pretende detectar campos de muito baixa intensidade, assume-se que a histerese não será um problema significativo.

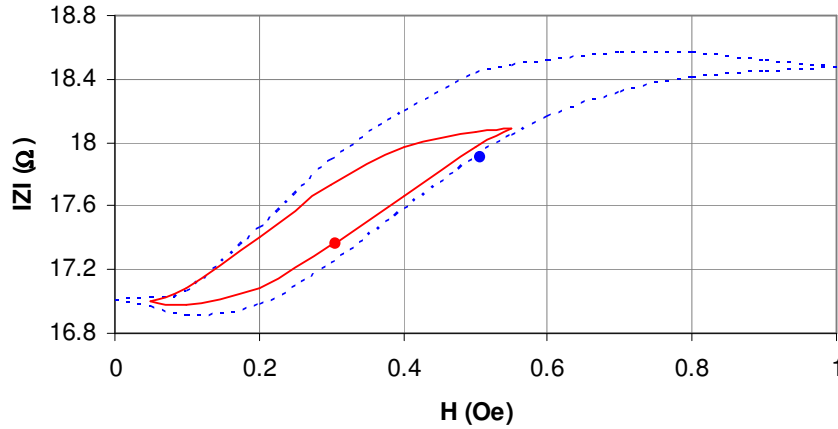


Figura 3.6 - Curvas de histerese da relação da impedância com o campo magnético, para o anel sensor.

3.2. Circuito Eletrônico

O circuito eletrônico que compõe o transdutor, desenvolvido pela Equipe do Laboratório de Biometrologia, possui as funções de alimentar com uma corrente alternada de amplitude constante a ponte formada pelas fitas, e de condicionar o sinal gerado pelo desbalanceamento da ponte, fornecendo em sua saída uma tensão contínua proporcional ao campo medido. O diagrama em blocos do circuito idealizado para realizar essas funções é apresentado na Figura 3.7, podendo o seu ganho total ser ajustado até o valor de 1000.

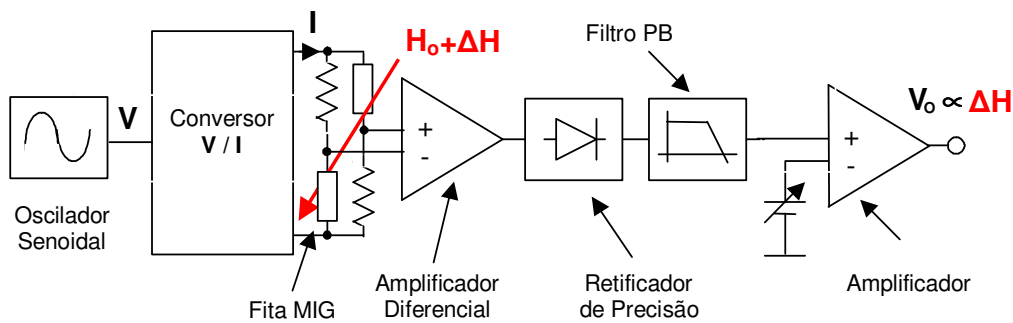


Figura 3.7 - Diagrama do circuito eletrônico de alimentação e leitura.

O circuito consiste em um oscilador senoidal a cristal, que gera uma tensão senoidal com amplitude 600 mV e frequência 1 MHz, seguido por um conversor de tensão em corrente, uma vez que as fitas devem ser alimentadas com corrente alternada. Esta corrente tem amplitude de 20 mA, permitindo assim que se aplique 10 mA a cada braço da ponte e, conseqüentemente, a cada fita MIG.

A ponte utiliza, além das fitas que têm impedância de aproximadamente $17,5 \Omega$ ($H_0 = 0,3 \text{ Oe}$), dois resistores de precisão com resistência 16Ω . A tensão medida entre os braços da ponte, que indica o desbalanceamento associado à variação de impedância das fitas MIG, é medida por um amplificador diferencial com ganho 10, que gera em sua saída uma tensão alternada com 1 MHz de frequência e amplitude proporcional ao campo magnético longitudinal às fitas MIG. Esse sinal é processado por um conjunto formado pelo retificador de precisão e pelo filtro PB (passa-baixa) de primeira ordem que opera como um demodulador AM de ganho 2. Finalmente, um amplificador de instrumentação de ganho 50 gera a tensão de saída do circuito do transdutor, havendo ainda um ajuste de *offset* por meio de um potenciômetro de precisão.

Para avaliar o desempenho do circuito em relação à variação da impedância das fitas, análises com diferentes cargas RL foram realizadas em um simulador SPICE [47], admitindo-se inicialmente que apenas a indutância da fita é afetada pelo campo. Os resultados obtidos indicaram que o circuito, operando a 1 MHz e 10 mA e com ganho total de 1000, é bastante sensível a variações da impedância das fitas, com $\Delta V/\Delta|Z| \approx 8 \text{ V}/\Omega$. No entanto, medições de histerese com o transdutor completo, que foram realizadas posteriormente e são apresentadas na próxima seção, indicaram que esta sensibilidade não estava de acordo com os resultados experimentais obtidos utilizando-se o circuito montado. Novas simulações foram realizadas no SPICE, agora considerando que a variação na impedância se dá através da indutância e da resistência, obtendo-se um novo valor de $\Delta V/\Delta|Z| \approx 4 \text{ V}/\Omega$, que concorda razoavelmente com os resultados medidos.

3.3. Transdutor Completo

Após a montagem completa do transdutor, para analisar seu comportamento foram realizadas diversas medições que se encontram descritas a seguir.

3.3.1. Variação do Sinal de Saída do Transdutor com a Frequência da Corrente de Alimentação das Fitas

Mantendo-se constante a amplitude da corrente de alimentação das fitas MIG em 10 mA, foi realizada a medição da tensão de saída em função do campo magnético aplicado, para diferentes valores de frequência da corrente. A faixa de frequências testadas foi limitada pelo circuito utilizado. O resultado é apresentado na Fig. 3.8.

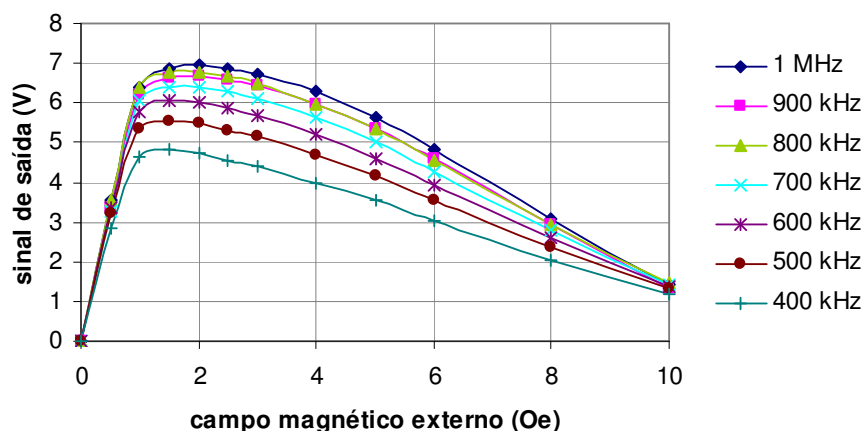


Figura 3.8 - Variação da amplitude do sinal de saída do transdutor em função do campo magnético aplicado, para diferentes frequências da corrente de alimentação das fitas MIG.

Observando o gráfico da Fig. 3.8 verifica-se que o comportamento geral de todas as curvas, ou seja, para todas as frequências, é bastante similar. Confirmando a teoria (ver capítulo 2), o transdutor apresenta um aumento da amplitude à medida que cresce a frequência, e este aumento vai se tornando cada vez mais suave, sugerindo que para 1 MHz se está próximo ao pico da curva. Este

comportamento fica mais evidente observando a Fig. 3.9, que mostra a amplitude máxima do sinal em função da frequência da corrente de alimentação.

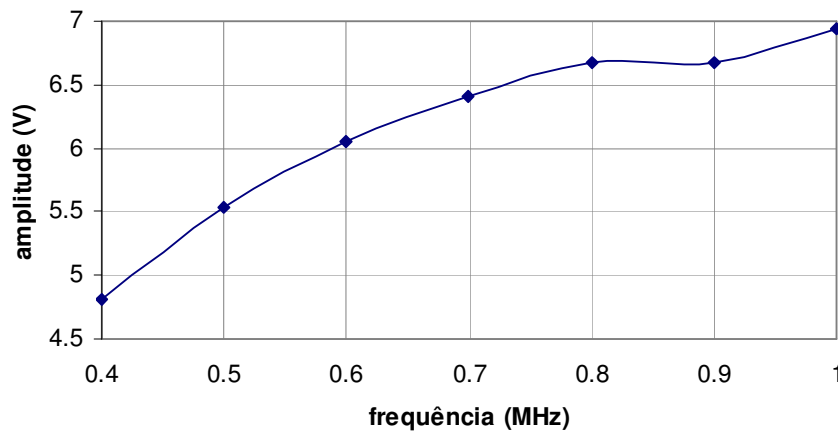


Figura 3.9 - Amplitude máxima do sinal de saída do transdutor em função da frequência da corrente de alimentação das fitas MIG.

Em função desses resultados, todas as medições apresentadas a seguir foram realizadas com 1 MHz e 10 mA.

3.3.2. Histerese

A segunda medição de caracterização do transdutor foi realizada para analisar sua histerese. Apesar da curva de histerese já ter sido obtida para o elemento sensor (Fig. 3.6), optou-se por refazê-la para o transdutor completo, pois os demais componentes dos circuitos eletrônicos (em particular a leitura em ponte mista) poderiam introduzir fatores adicionais de influência nessa caracterização.

O gráfico da Fig. 3.10 apresenta as curvas de histerese para o elemento sensor isolado, e para o transdutor completo. A curva para o elemento sensor foi originalmente obtida em termos da impedância e, portanto, para se fazer esta comparação, foi necessária uma conversão de $|Z|$ para V , utilizando a sensibilidade teórica do circuito. Como dito na seção 3.2, inicialmente se supunha que a sensibilidade do circuito era $8 \text{ V}/\Omega$, de acordo com as simulações realizadas. No entanto, com este valor as curvas de histerese ficavam completamente diferentes.

Voltando à etapa de simulação do circuito, chegou-se a uma nova sensibilidade de $4 \text{ V}/\Omega$, que gerou o gráfico da Fig. 3.10 (linha tracejada).

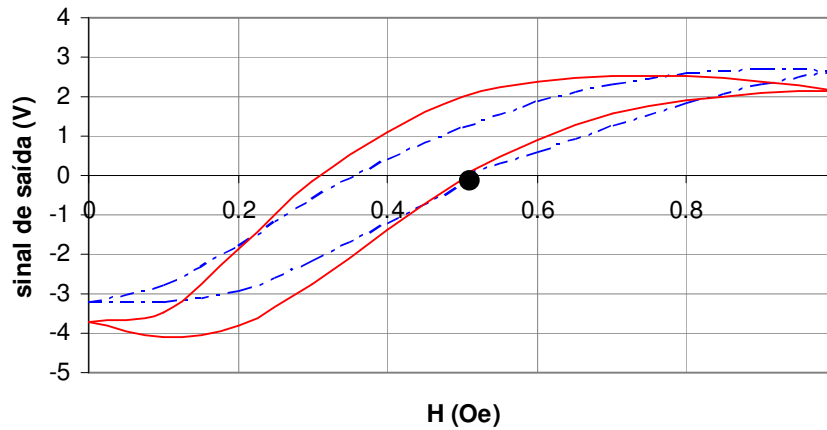


Figura 3.10 - Curvas de histerese para o elemento sensor, em linha cheia, e para o transdutor em linha tracejada.

Tendo a sensibilidade do circuito bem definida e uma estimativa da sensibilidade da fita, pode-se estimar a sensibilidade do transdutor completo. Combinando ambas as sensibilidades, obtém-se

$$\Delta V/\Delta H \approx 12 \text{ V/Oe} \cong 0,15 \text{ V/(A/m)}$$

A sensibilidade estimada já se apresenta bastante alta comparada a outros sensores. Um sensor magnético do tipo *fluxgate* possui sensibilidades típicas variando entre 5 V/Oe (na escala menos sensível) até 5 V/mOe (na escala mais sensível), enquanto que um sensor de efeito Hall típico possui sensibilidade máxima de 1 V/Oe . Percebe-se, portanto, que o protótipo aqui apresentado tem uma sensibilidade estimada comparável com um sensor *fluxgate*, e melhor que um sensor de efeito Hall.

Ainda avaliando o efeito de histerese do transdutor, foram realizadas mais duas medições, apresentadas na Fig. 3.11, ambas partindo de $H = 0,3 \text{ Oe}$, porém uma com o campo inicialmente crescente (linha sólida) e outra com o campo inicialmente decrescente (linha tracejada).

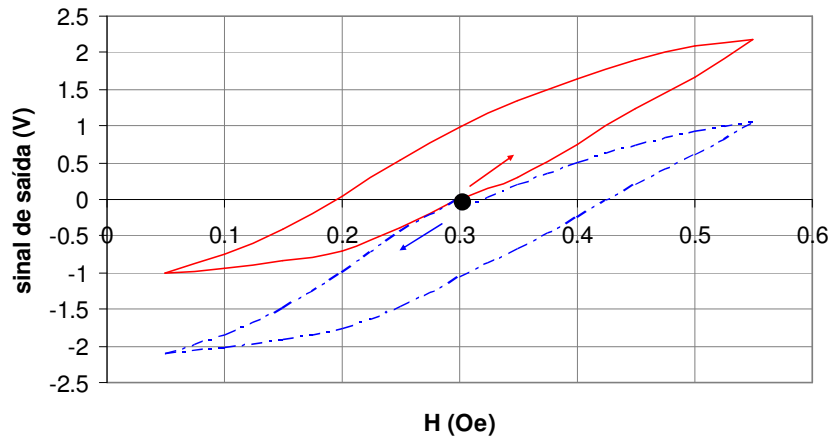


Figura 3.11 – Curvas de histerese para o transdutor.

Observando as curvas da Fig. 3.11, verifica-se que, dependendo do histórico do campo externo aplicado, o sinal do transdutor irá seguir uma ou outra curva.

3.3.3. Rejeição a Campos Uniformes

A configuração em anel do sensor foi escolhida de forma a se obter uma redução dos efeitos de campos uniformes sobre o elemento sensor, conforme descrito na seção 3.1.2. Para verificar esta suposição foram realizadas duas medições. A primeira foi em relação à orientação com o campo da Terra. A medição foi feita, para o caso do anel na vertical, partindo-se de um ângulo de 90° entre o plano do anel e a direção do campo da Terra. A partir desse ponto, em que a saída do transdutor foi zerada, o ângulo foi sendo reduzido em passos de 10° , até o plano da espira ficar paralelo ao campo terrestre. No caso para o anel na horizontal, a referência foi o *gap*, que inicialmente é posicionado perpendicularmente ao campo da Terra, e o anel é girado até estes estarem alinhados. Os esquemas da Fig. 3.12 ajudam a visualizar o experimento, e os resultados são apresentados na Fig. 3.13.

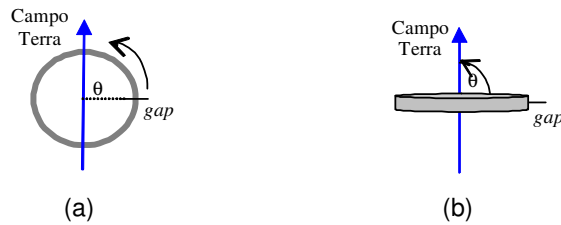


Figura 3.12 - Diagrama esquemático do experimento da variação do sinal do transdutor com a direção do campo da Terra, (a) anel na horizontal, (b) anel na vertical.

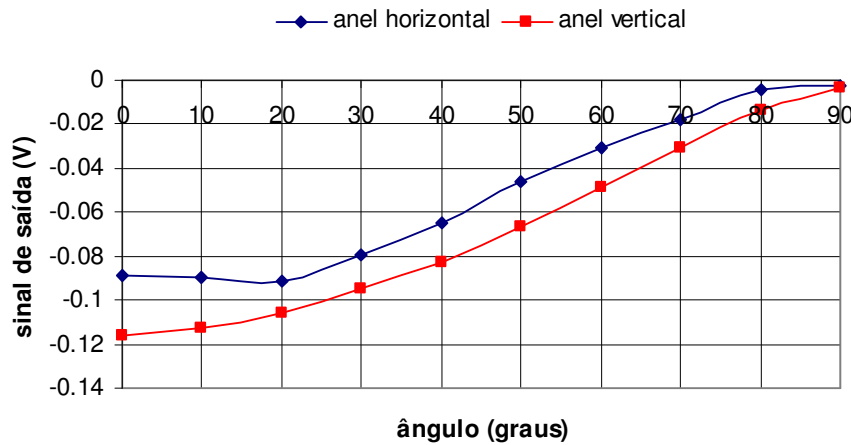


Figura 3.13 - Variação do sinal do transdutor com a direção do campo da Terra.

Constata-se que existe uma pequena variação do sinal com a orientação do transdutor em relação ao campo da Terra, na ordem de 0,12 V, que corresponde a 0,01 Oe, fato que pode ser explicado por não uniformidade das fitas e também pela existência do *gap*. De qualquer maneira, quando da utilização do transdutor, este estará em uma direção fixa em relação ao campo da Terra, sendo assim possível zerar a saída do circuito antes de iniciar as medições.

O segundo experimento visando a analisar o comportamento do transdutor mediante um campo externo uniforme consistiu em se colocar o sensor no centro de um par de bobinas de Helmholtz, e variar o campo gerado por este. As diferentes posições do sensor em relação às bobinas são ilustradas na Fig. 3.14.

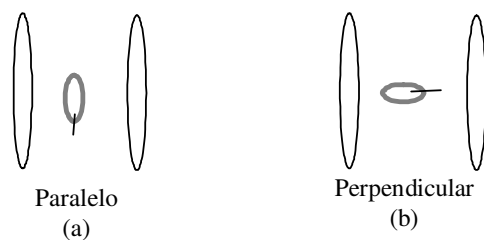


Figura 3.14 - Configurações do experimento para se medir a influência de campos uniformes sobre o transdutor. (a) Plano do anel sensor paralelo ao plano das bobinas de Helmholtz; (b) Plano do anel sensor perpendicular ao plano das bobinas de Helmholtz.

A Fig. 3.15 apresenta os resultados obtidos com a medição do sinal de saída do transdutor em função do campo magnético gerado pelo par de Helmholtz, variando-se a configuração do anel e o campo de polarização da fita. Para a situação do plano da bobina de Helmholtz posicionada paralelamente ao plano do anel sensor (Fig. 3.14a), com campo de polarização de 0,3 Oe (Fig. 3.15, curva contínua), verifica-se que a influência do campo magnético gerado pela bobina é mínima. Este resultado está de acordo com a teoria de MIG, uma vez que nesta configuração o campo da bobina é perpendicular ao plano constituído pelo comprimento das fitas.

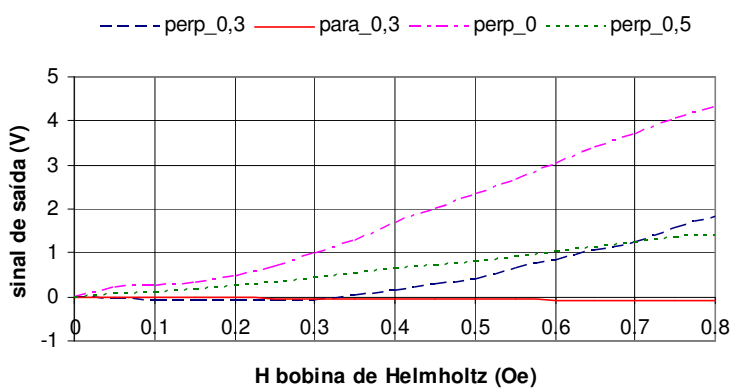


Figura 3.15 - Curvas do sinal de saída do transdutor em função do campo gerado pela bobina de Helmholtz, para diferentes configurações e campos de polarização.

A curva para o sensor na posição perpendicular e com um campo de polarização de 0,3 Oe apresenta pouca influência do campo externo, até este

atingir o valor do campo de polarização utilizado. A partir daí, a grande variação do campo faz com que a hipótese de linearidade não seja mais satisfeita, deixando de ser nula a integral do campo ao longo do anel.

Para avaliar se a variação com campos uniformes realmente dependia do campo de polarização utilizado, como sugeriu a medida anterior, foram feitas duas medições: uma com o campo do toróide nulo e outra com este igual a 0,5 Oe. O resultado obtido utilizando-se o campo interno nulo apresentou maior variação com o campo externo do que ao aplicar-se um campo de polarização de 0,5 Oe. Este último, por sua vez, apresentou um comportamento diferente do que fora observado ao aplicar-se um campo de 0,3 Oe. Esperava-se que o sinal de saída da fita se mantivesse constante em função do campo externo da bobina até este atingir o valor do campo de polarização. No entanto, o sinal de saída varia com o campo da bobina desde a origem. Este fato possivelmente se dá porque, com este campo, a fita não está mais operando na faixa linear desde o início (ver Fig. 3.4).

Como o objetivo principal do transdutor aqui proposto é a localização de corpos estranhos magnéticos no corpo humano, o capítulo seguinte se dedica a simular o sinal captado pelo transdutor devido ao campo magnético associado a uma agulha, e analisar todos os aspectos envolvidos no problema.