

5 Resultados Experimentais

Para avaliar o comportamento do transdutor de campo magnético em tensão baseado no efeito MIG, foram realizadas diversas medições da tensão associada ao campo gerado por uma agulha retilínea de 4,5 cm. Primeiramente foram feitas medições unidimensionais, isto é, com a agulha sendo movida ao longo de uma linha reta, a uma distância h fixa do sensor. A linha ao longo da qual a agulha é movida foi definida de acordo com as simulações, correspondendo àquela que contém os picos do campo magnético. Em seguida foram realizadas medições bidimensionais para elaboração de mapas de tensão.

Todas as medições foram executadas utilizando-se uma corrente de alimentação das fitas com 10 mA de amplitude e 1 MHz de frequência, bem como um campo de polarização de 0,3 Oe. Antes de iniciar a medição o sinal de saída do transdutor é zerado e, entre uma medição e outra, aguarda-se o tempo necessário para que este sinal de saída estabilize. Este procedimento é necessário, uma vez que foi constatado que o transdutor apresenta um processo de relaxação, isto é, após uma medição ele apresenta um sinal de saída diferente de zero, que decresce com o tempo. Esse comportamento, indicativo de que a fita possui uma magnetização residual que decai com o tempo, é comumente observado neste tipo de material [23, 48].

Para se obter o sinal mais intenso possível, a agulha foi remagnetizada ao início de cada série de medição. Assim, os valores dos sinais apresentados para cada série de medição não podem ser comparados entre si, já que existe uma aleatoriedade associada ao processo de magnetização (ver Fig. 4.8). Posteriormente, descobriu-se que o processo de magnetização utilizado não gerava uma magnetização uniforme na agulha, o que prejudica a análise dos resultados, mas não impede a avaliação do comportamento do transdutor.

Como ilustrado na Fig. 5.1, o aparato experimental utilizado nas medições de deslocamento foi uma mesa milimetrada, sobre a qual a agulha pode ser deslocada em relação ao sensor, que é mantido fixo sobre um suporte de altura

variável. O circuito do transdutor é conectado ao computador através de uma placa conversora A/D LabPC+ da National Instruments, permitindo que os dados sejam adquiridos e armazenados a cada posição da agulha.

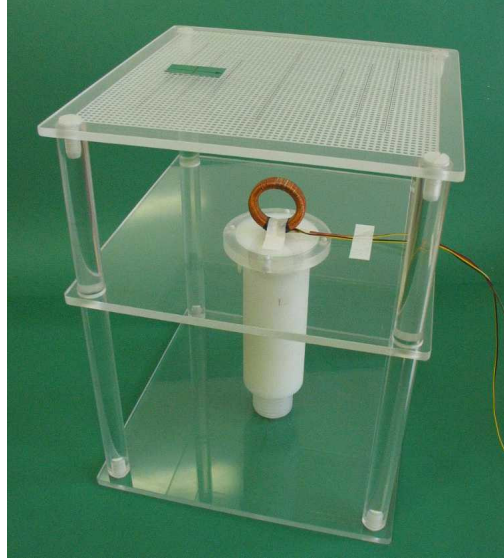


Figura 5.1 - Foto do aparato experimental utilizado para realizar as medições com a agulha.

5.1. Medições Unidimensionais

As medições em uma dimensão foram sempre realizadas fazendo-se o centro da agulha se deslocar ao longo de uma linha de 20cm, em passos de 0,5 cm, a uma altura $h = 2\text{cm}$, conforme o esquema apresentado na Fig. 5.2.



Figura 5.2 – Diagrama do experimento em uma dimensão, (a) anel sensor na configuração vertical, (b) anel sensor na configuração horizontal.

5.1.1. Anel na Configuração Vertical

A Fig. 5.3 apresenta uma ilustração do esquema experimental utilizado nas medições para o anel na vertical. Observa-se que o posicionamento do anel foi escolhido de forma que o campo magnético terrestre incidisse transversalmente às fitas, minimizando assim o seu efeito sobre as medidas.

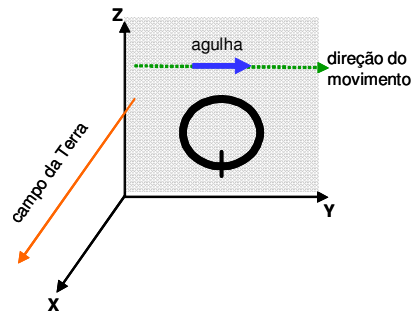


Figura 5.3 – Diagrama do experimento geral com o anel na configuração vertical.

- Repetitividade

Para avaliar a repetitividade das medidas geradas pelo transdutor, foi realizada uma série de 3 varreduras sob as mesmas condições de medição. Os resultados dessa série de medições são apresentados na Fig. 5.4 e indicam que as leituras feitas pelo transdutor apresentam boa repetitividade, sendo o desvio máximo observado correspondente à cerca de 8% da amplitude média do sinal de saída.

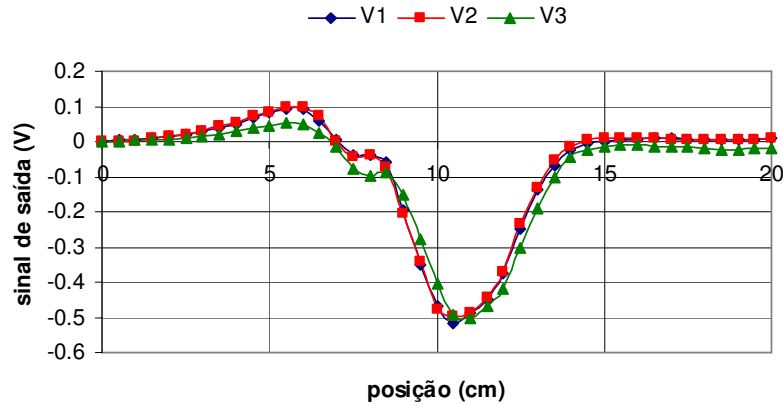


Figura 5.4 - Avaliação da repetitividade dos resultados das medições do sinal de saída em função da posição da agulha, utilizando o transdutor com o anel posicionado na configuração vertical.

Ainda observando as medidas da Fig. 5.4, verifica-se que o sinal para a agulha não é simétrico, o que pode ser explicado pela geometria assimétrica da agulha e/ou pelos efeitos de histerese do transdutor. Isso quer dizer que, ao passar por um dos pólos magnéticos da agulha, as fitas que compõem o elemento sensor se magnetizam e, ao atingirem o outro pólo, são sensibilizadas de forma diferente da que foram pelo primeiro. Presume-se que o orifício da agulha seja responsável pelo pico do sinal de saída observado na posição correspondente a aproximadamente 8 cm.

- Variação do sinal de saída do transdutor em função do sentido do movimento da agulha

O objetivo desta medição é avaliar se a posição inicial e o sentido do movimento da agulha têm influência sobre o sinal obtido. Como simplesmente mudar a posição inicial de medição não altera o sinal a ser detectado, este experimento pode ser considerado como uma avaliação da reprodutibilidade do transdutor. Para isso foi realizada a leitura do sinal com a agulha partindo da posição 0 e seguindo até 20 cm, e depois iniciando em 20 cm e seguindo até a posição 0, como ilustrado na Fig. 5.5. A Fig. 5.6 apresenta os sinais detectados ao longo da linha de medição para ambos os casos.

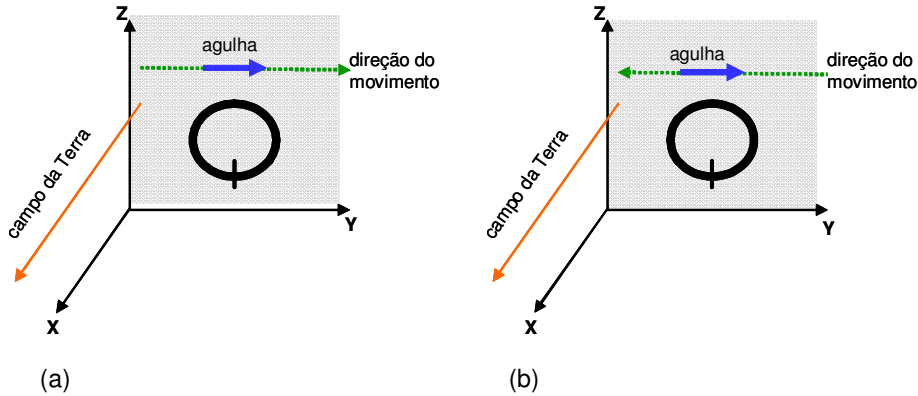


Figura 5.5 - Diagrama esquemático do experimento para avaliar a variação do comportamento da curva da Fig. 5.4 com o sentido do movimento da agulha, utilizando o anel sensor na configuração vertical. (a) movimento da esquerda para direita, (b) da direita para esquerda.

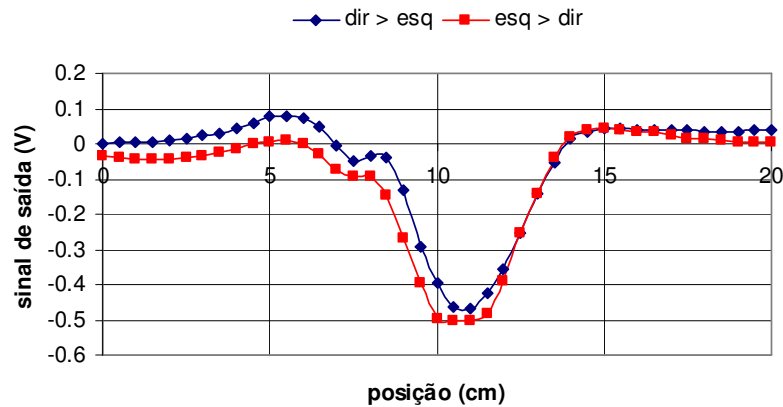


Figura 5.6 - Medidas do sinal de saída do transdutor com anel sensor na configuração vertical, em função da posição da agulha, para sentidos opostos de movimentação da agulha.

Aqui, percebe-se uma pequena diferença entre os dois resultados, com um desvio máximo entre os sinais de aproximadamente 13% da amplitude. Uma vez que, nessas medições, a polaridade da agulha não é modificada, e que a configuração do sensor gera uma resposta simétrica (ver Fig. 4.19), essa diferença é atribuída à assimetria da agulha. Isto é, pode-se concluir que o formato assimétrico da agulha gera uma diferença entre as intensidades de campo relativas a cada pólo, fazendo com que as duas posições iniciais de medição correspondam a campos iniciais diferentes e, portanto, a percursos sobre curvas de histerese distintas.

- Variação do sinal de saída do transdutor em função da inversão dos pólos da agulha

Inicialmente foi feita a medição com os pólos da agulha orientados em uma direção, e depois a medição foi repetida com a agulha girada de 180°, conforme ilustrado no esquema da Fig. 5.7. Os resultados dessas medições são apresentados na Fig. 5.8.

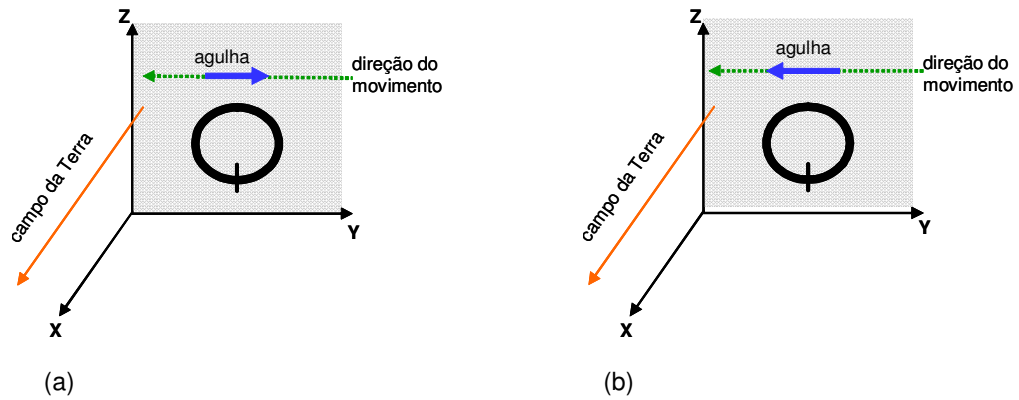


Figura 5.7 - Esquema do experimento para avaliar a variação do sinal de saída do transdutor com a posição do pólo da agulha, utilizando o anel sensor na configuração vertical. (a) pólos com sentido normal, (b) pólos girados de 180°.

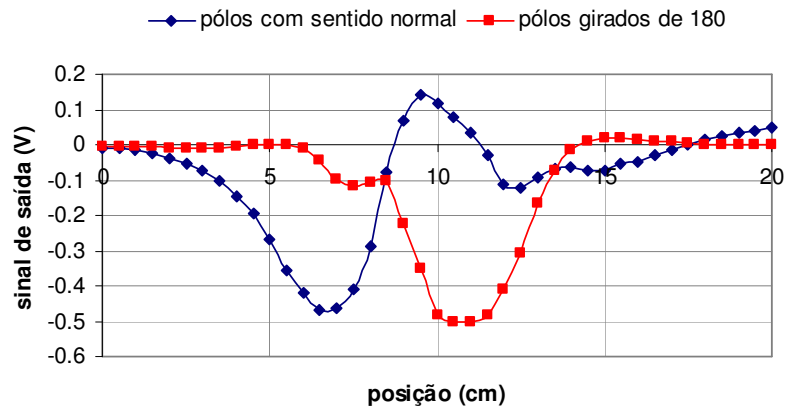


Figura 5.8 - Medidas do sinal de saída do transdutor com anel sensor na configuração vertical, em função da posição da agulha, para sentidos opostos de posição do pólo da agulha.

A princípio, a inversão dos pólos da agulha deveria resultar em uma simples inversão de sinal na leitura do transdutor. Entretanto, deve-se lembrar que a característica assimétrica do campo da agulha gera também uma inversão na curva original de leitura em relação ao seu ponto médio ($x = 10$ cm): pode-se observar que o pico positivo da curva normal e o pico negativo da curva invertida ocorrem em posições simétricas em relação a esse ponto médio. A diferença entre as amplitudes dos picos pode ser explicada por uma assimetria nas curvas de sensibilidade (não linearidade na dependência da impedância com o campo magnético externo) e pela histerese do transdutor, fatos que também justificariam, na curva invertida da Fig. 5.8, o valor elevado do pico de mínimo próximo da posição de 7 cm.

- Variação do sinal de saída do sensor em função da direção do campo da Terra

Como foi verificado que o transdutor apresentava uma pequena variação de seu sinal de saída com a direção do campo magnético da Terra (seção 3.3.3), foram realizadas medições com duas posições relativas ao mesmo: a primeira com o plano do anel perpendicular ao campo da Terra e outra com o plano paralelo, como ilustrado na Fig. 5.9. De forma análoga ao que foi feito nas medições anteriores, a posição da agulha em relação ao transdutor não é variada. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 5.10.

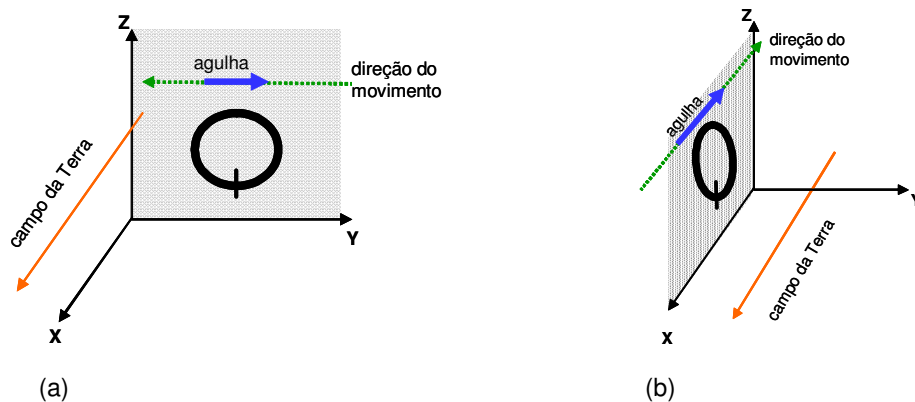


Figura 5.9 - Esquema do experimento para analisar o comportamento do transdutor em função da direção do campo magnético da Terra, com o anel na configuração vertical. (a) anel perpendicular ao campo magnético terrestre, (b) anel paralelo ao campo magnético terrestre.

Além de um nítido deslocamento entre os sinais, também pode-se identificar uma significativa diferença entre as amplitudes dos sinais da Fig. 5.10. Considerando que as fitas MIG sofrem influência somente dos campos tangenciais a elas, então a situação em que o plano do anel está perpendicular ao campo terrestre é a que sofre menos influência do mesmo. Quando o plano do anel está paralelo ao campo magnético terrestre, este pode estar alterando o sinal de saída do transdutor, como já sugerido anteriormente, por efeitos de não-homogeneidade da fita e pelo fato de nesta posição o comprimento do *gap* estar também paralelo ao campo da Terra, deixando de anulá-lo no trecho em que ele se localiza. Se o campo terrestre é detectado pelo anel sensor, então seu ponto de operação é deslocado, e a diferença entre as amplitudes, para cada direção do campo relativa ao sensor, indica que a dependência do sinal de saída com o campo não é linear.

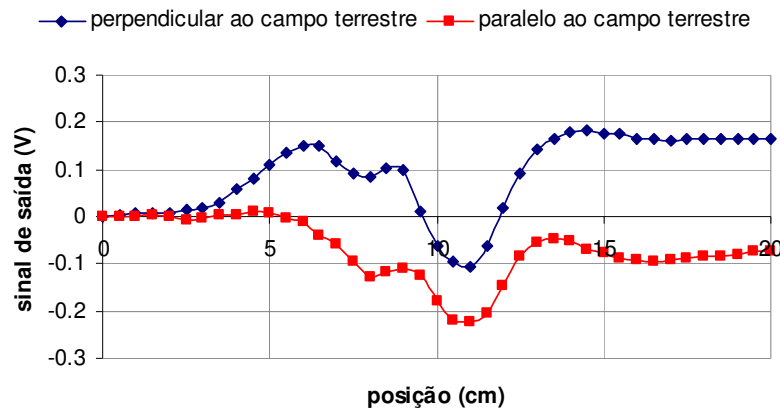


Figura 5.10: Esquema do experimento para analisar o comportamento do transdutor em função da direção do campo da Terra, com anel na configuração vertical. (a) anel sensor perpendicular ao campo magnético terrestre, (b) anel sensor paralelo ao campo magnético terrestre.

- Variação do sinal de saída com a distância entre o sensor e a agulha

Neste experimento, a distância entre o sensor e a agulha (h) foi variada na faixa de 2 cm a 5 cm, escolhida de forma a atender às características de sensibilidade do transdutor e de dimensionamento do aparato experimental utilizado. As Figs. 5.11 e 5.12 apresentam, respectivamente, os sinais lidos para cada altura e o gráfico da amplitude máxima do sinal em função da altura.

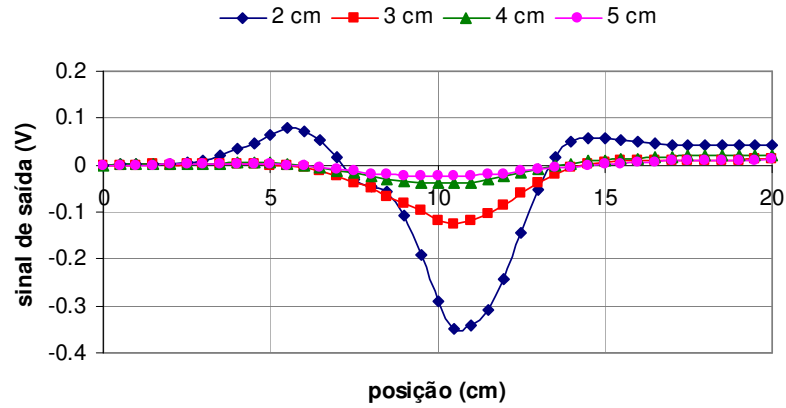


Figura 5.11 - Variação do sinal de saída do transdutor com anel sensor na configuração vertical, em função da posição da agulha, para distâncias entre o sensor e a agulha de 2 cm a 5 cm.

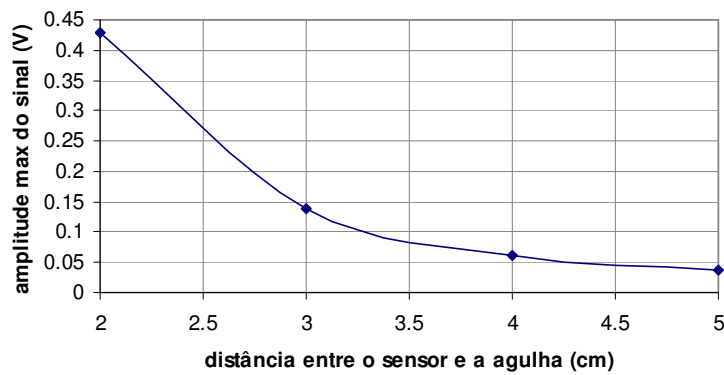


Figura 5.12 - Amplitude máxima do sinal de saída em função da distância entre o sensor e a agulha, para o anel na configuração vertical.

Analisando a variação da amplitude do sinal com a distância do sensor em relação à agulha, verifica-se que, em conformidade com os resultados da simulação apresentados na seção 4.5.2., a amplitude varia aproximadamente com o inverso do quadrado da distância. Além disso, também se observa que o sinal gerado pela agulha se torna mais simétrico quanto mais distante se está dela.

5.1.2. Anel na Configuração Horizontal

A Fig. 5.13 apresenta uma ilustração do esquema experimental utilizado nas medições para o anel na horizontal. Todas as medições realizadas para o anel na configuração vertical, apresentadas na seção anterior, foram repetidas para o anel na configuração horizontal.

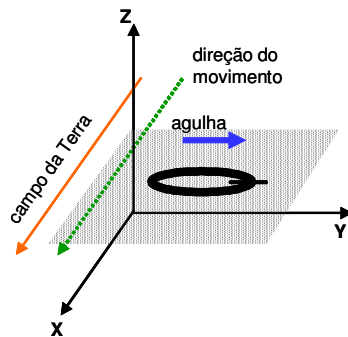


Figura 5.13 - Esquemático do experimento geral com anel na configuração horizontal.

- Repetitividade

A Fig. 5.14 apresenta os resultados da série de medições realizadas para avaliar a característica de repetitividade do sinal de saída do transdutor.

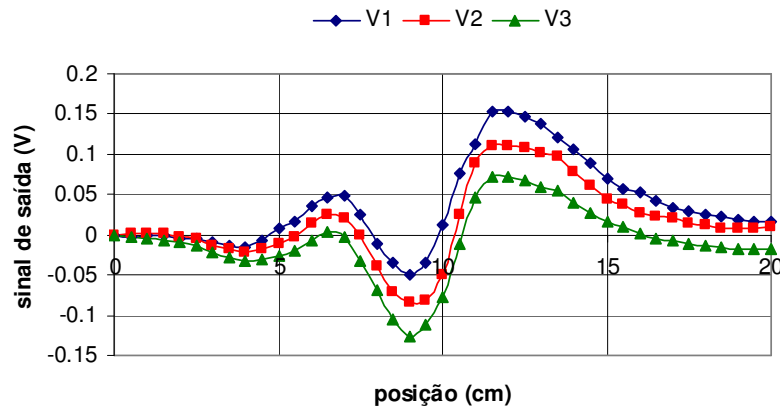


Figura 5.14 - Avaliação da repetitividade dos resultados das medições do sinal de saída em função da posição da agulha, utilizando o transdutor com o anel posicionado na configuração horizontal.

Apesar de apresentarem um progressivo deslocamento entre eles, os gráficos das medidas possuem morfologias e amplitudes bastante semelhantes, sendo essas as características mais relevantes para a aplicação que se pretende fazer do transdutor. Como podia ser antecipado por um exame da Fig. 4.11, o resultado para a leitura do anel na horizontal é o de um sinal dipolar. Da mesma forma que no caso do anel na configuração vertical, a assimetria das curvas pode aqui ser explicada pelas assimetrias do campo da agulha, da curva de sensibilidade e da curva de histerese. O orifício da agulha também é detectado, e aparece indicado pelo pico na posição correspondente a 6 cm.

- Variação do sinal de saída do sensor em função do sentido de movimento da agulha

Repetindo o procedimento utilizado para o anel na vertical, foi também examinada a dependência do sinal de saída do anel na configuração horizontal com o sentido do movimento da agulha. Um esquema do experimento é mostrado na Fig. 5.15. Os resultados são apresentados na Fig. 5.16 e indicam, de forma semelhante ao caso anterior, um efeito devido à assimetria geométrica da agulha e aos efeitos de histerese do transdutor.

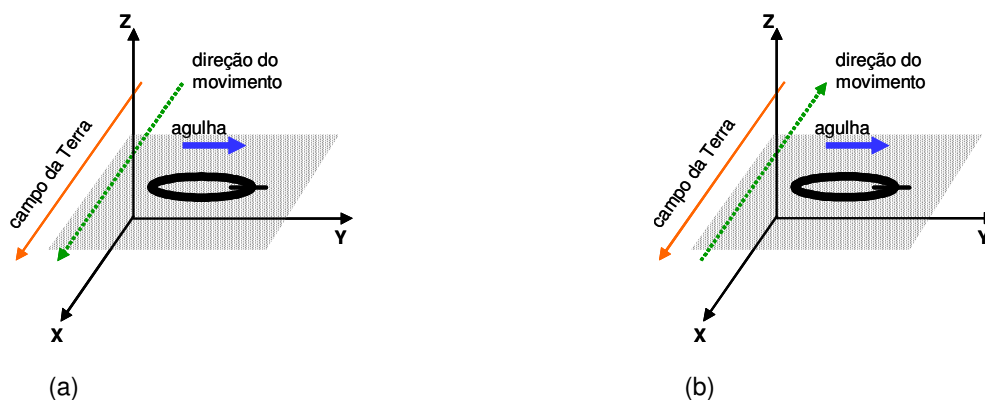


Figura 5.15 - Esquema do experimento para avaliar a variação do comportamento da curva do sinal de saída com a posição da agulha, para sentidos opostos do movimento da agulha, utilizando o anel sensor na configuração horizontal: (a) movimento de ida, (b) movimento de retorno.

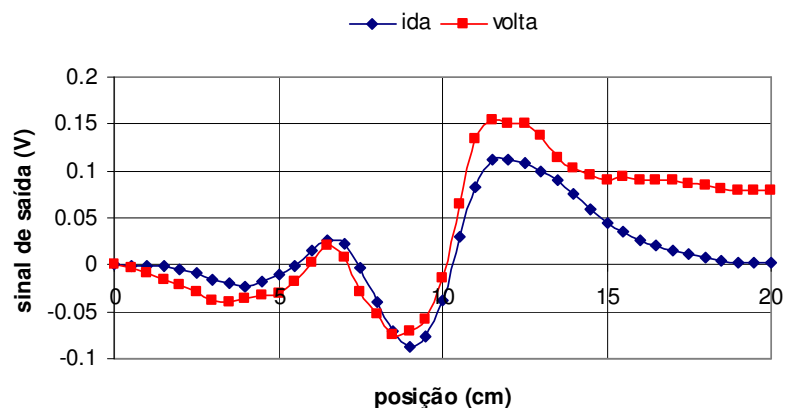


Figura 5.16 - Medidas do sinal de saída do transdutor com anel sensor na configuração horizontal, em função da posição da agulha, para sentidos opostos de movimentação da agulha.

O efeito de histerese para a configuração horizontal se apresenta mais intenso que na configuração anterior, sendo o desvio máximo entre as curvas de aproximadamente 35% da amplitude do sinal. Este comportamento provavelmente está relacionado ao fato de o sinal para esta configuração do anel sensor ser assimétrico (ver Fig. 4.20), de forma que ao se trocar a posição inicial de medição, inverte-se também a polaridade do campo a ser primeiramente detectado pelo transdutor, o que justificaria uma maior variação entre os sinais para esta configuração em comparação com a configuração vertical.

- Variação do sinal de saída do transdutor em função da inversão dos pólos da agulha

Utilizando a configuração horizontal do anel sensor, foram feitas medições do campo magnético realizando-se a varredura da agulha ao longo de uma mesma direção e sentido de movimento, mas com sentidos opostos dos pólos, ou seja, a agulha foi girada de 180° e a medição repetida (Fig. 5.17).

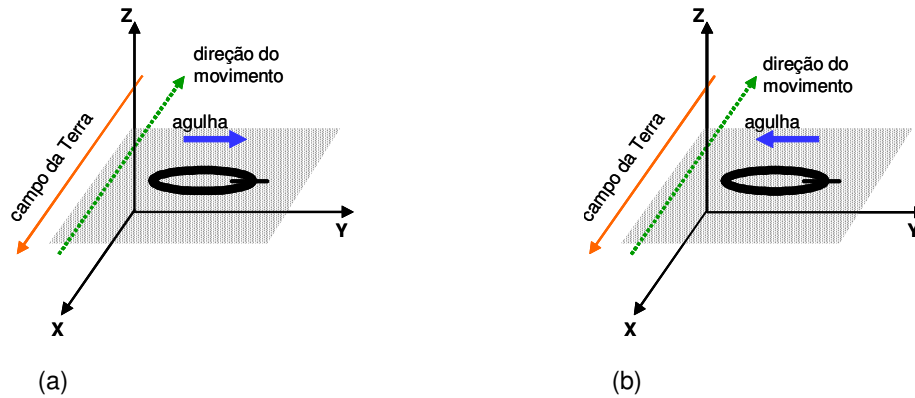


Figura 5.17 - Esquema do experimento para avaliar a variação com a posição do pólo da agulha, com anel na horizontal. (a) sentido normal dos pólos, (b) pólos girados de 180°.

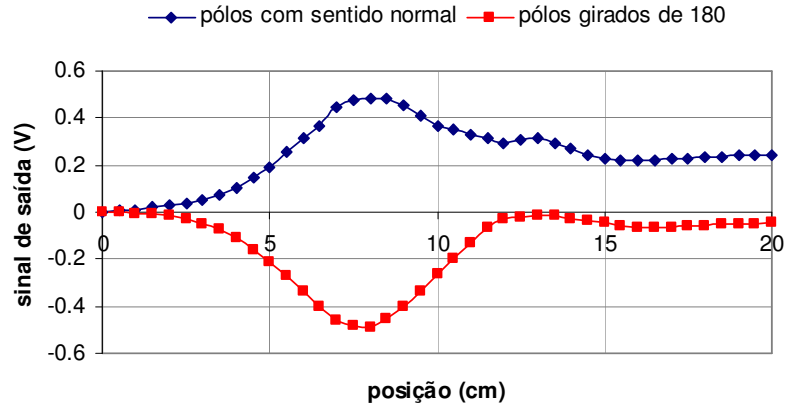


Figura 5.18 - Medidas do sinal de saída do transdutor com anel sensor na configuração horizontal, em função da posição da agulha, para sentidos opostos de posição do pólo da agulha.

Observando os sinais da Fig. 5.18 verifica-se que eles parecem estar refletidos em relação ao eixo do sinal de saída. No entanto, teoricamente eles também deveriam estar refletidos em relação ao eixo de posição, como se apresentaram os sinais para a configuração vertical. Mas, observando as amplitudes dos sinais para esta série de medição, verifica-se que são bem maiores do que as obtidas nas demais séries de medição com o anel na configuração horizontal. Este fato certamente está relacionado à aleatoriedade do processo de magnetização, como mencionado no início do capítulo. Logo, acredita-se que o comportamento dos sinais apresentados na Fig. 5.18 esteja relacionado à grande

amplitude do campo magnético da agulha apresentada nesta série de medição, associada aos fortes efeitos de histerese desta configuração.

- Variação com o campo da Terra

Com o anel na horizontal, foi analisado o comportamento do sinal de saída do transdutor fazendo-se variar a posição relativa do campo magnético da Terra com a posição da agulha e o *gap* do anel. Na primeira configuração, o comprimento da agulha foi posicionado perpendicularmente ao campo da Terra e alinhado com o *gap* (Fig. 5.19a). Na segunda configuração a agulha está paralela ao campo e permanece alinhada ao *gap* (Fig. 5.19b).

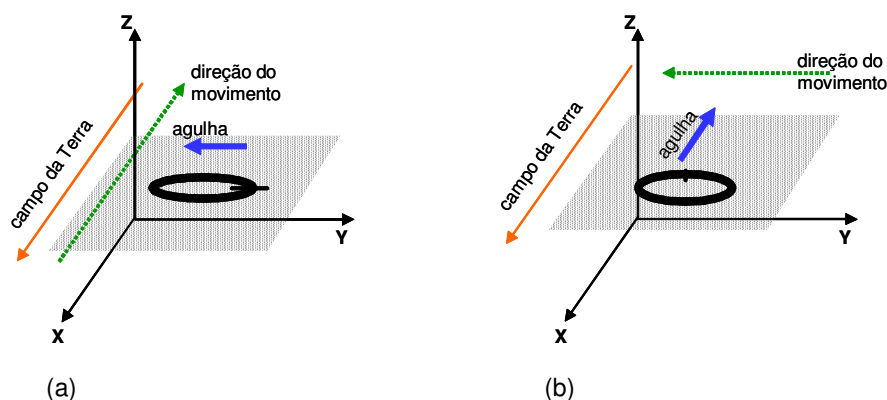


Figura 5.19 - Esquema do experimento para analisar o comportamento do transdutor em função da direção do campo da Terra, com anel na configuração horizontal. (a) agulha perpendicular ao campo magnético terrestre, (b) agulha paralela ao campo magnético terrestre.

O resultado apresentado na Fig. 5.20 indica um deslocamento entre as medidas, reflexo do efeito combinado da influência do campo da Terra sobre o campo da agulha e da posição do *gap* relativa ao campo terrestre. Quando o comprimento do *gap* se encontra paralelo ao campo da Terra (Fig. 5.19a), este deixa de ser anulado em todo anel, e conseqüentemente esta é a situação em que o campo terrestre exerce maior influência sobre o sinal do transdutor. Quando o comprimento do *gap* está perpendicular ao campo da Terra (Fig. 5.19b), a configuração circular do elemento sensor, bem como o fato de as fitas serem

sensíveis somente a campo tangenciais, reduz significativamente o efeito do campo terrestre sobre o transdutor.

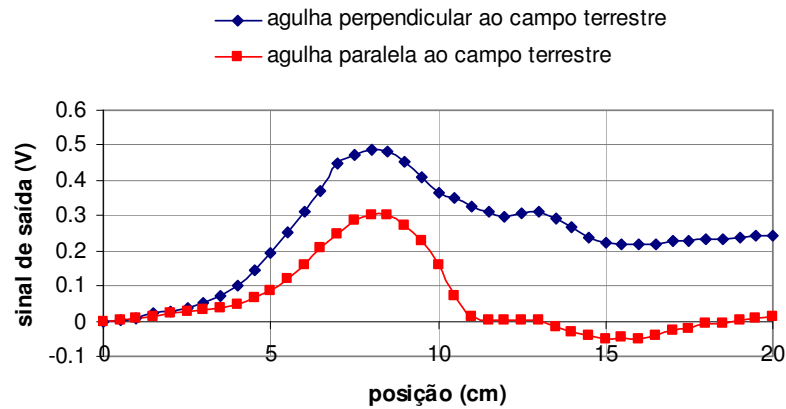


Figura 5.20 - Medidas do sinal de saída do transdutor com anel sensor na configuração horizontal, em função da posição da agulha, variando-se a direção relativa ao campo magnético da Terra.

- Variação do sinal de saída com a distância entre o sensor e a agulha

A medição foi realizada da mesma forma que para o caso do anel na vertical. Os sinais obtidos para alturas (h) variando de 2cm a 5 cm são apresentados na Fig. 5.21, e a Fig. 5.22 apresenta a variação da amplitude máxima de cada curva em função da distância entre o sensor e a agulha. Também aqui, a amplitude máxima cai aproximadamente com o quadrado da distância. Analogamente aos resultados obtidos com a configuração vertical, o sinal para a configuração horizontal tende a se apresentar mais simétrico conforme se aumenta a distância entre o sensor e a agulha.

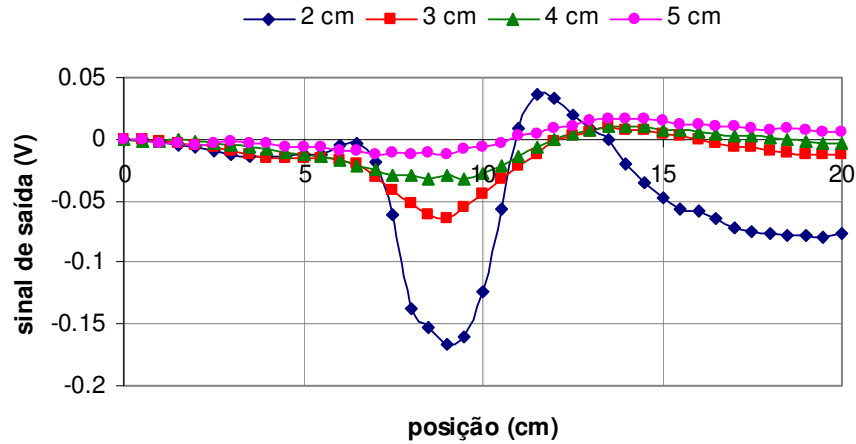


Figura 5.21 - Variação do sinal de saída do transdutor com anel sensor na configuração horizontal, em função da posição da agulha, para distâncias entre o sensor e a agulha de 2 cm a 5 cm.

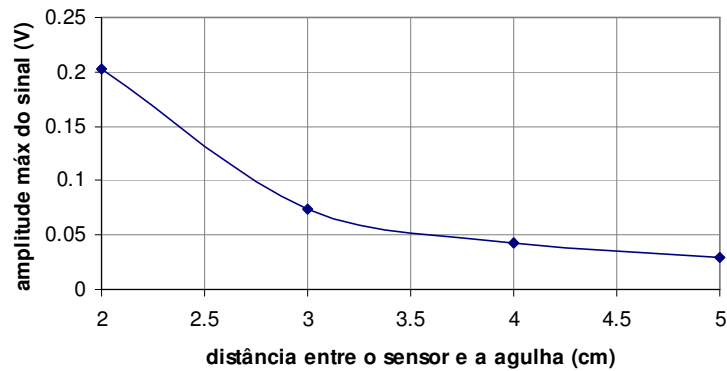


Figura 5.22 - Amplitude máxima do sinal de saída em função da distância entre o sensor e a agulha, para o anel na configuração horizontal.

5.2. Medições Bidimensionais

As medições bidimensionais foram realizadas empregando-se o mesmo aparato utilizado nas medições unidimensionais (Fig. 5.1), ou seja, a mesa milimetrada sobre a qual a agulha é deslocada de 1 cm em 1 cm num plano de 15 cm x 15 cm. Como este é um procedimento manual, demorado e trabalhoso, levando aproximadamente duas horas por medição com o aparato experimental

utilizado, foi realizada apenas uma varredura para cada configuração do anel sensor, vertical e horizontal.

5.2.1. Anel na Configuração Vertical

O mapa de tensão (sinal de saída do transdutor) para uma agulha de 4,5 cm de comprimento, localizada a 2 cm de distância da superfície mais próxima do anel sensor, para o anel na configuração vertical, é apresentado na Fig. 5.23. Para efeito de comparação qualitativa, a Fig. 5.24 apresenta a simulação realizada sob as mesmas condições da medição, apenas com o momento magnético m sendo um fator ajustável.

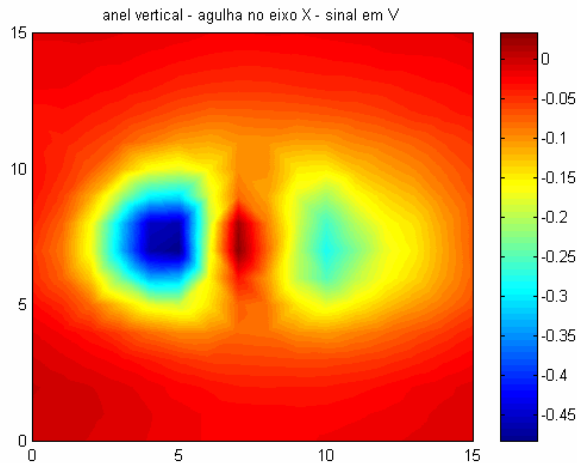


Figura 5.23 - Mapa do sinal de saída do transdutor para o anel na configuração vertical, com a distância entre o sensor e a agulha de 2 cm, em relação à extremidade mais próxima do anel.

Amplitude máxima = 0,5170 V.

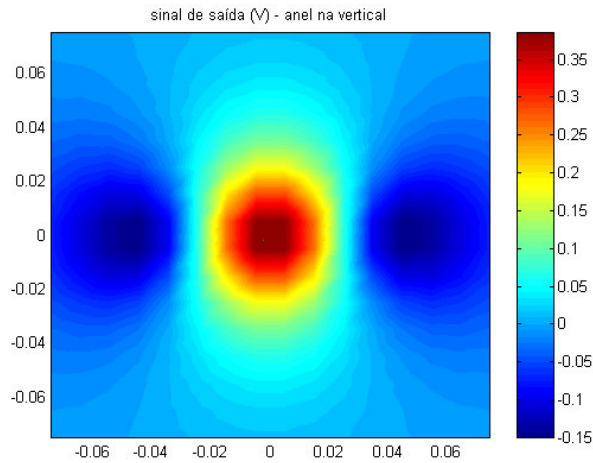


Figura 5.24 - Simulação feita com $\Delta V/\Delta H = 12$, $m = 0,35 \text{ Am}^2$.
Amplitude máxima = 0,5577 V.

O mapa de tensão medido experimentalmente apresenta, assim como na simulação, uma configuração “tripolar”. No entanto, o resultado experimental não é simétrico. Como nas medidas unidimensionais, atribui-se esse comportamento à forma assimétrica da agulha e aos efeitos de histerese das fitas MIG que compõem o anel sensor.

5.2.2. Anel na Configuração Horizontal

Repetindo o procedimento anterior, com a mesma agulha e distância, foi realizada a medição para o anel na configuração horizontal. Os resultados são apresentados na Fig. 5.25. A Fig. 5.26 mostra o mapa obtido para a simulação feita sob as mesmas condições experimentais e com o momento magnético m ajustável.

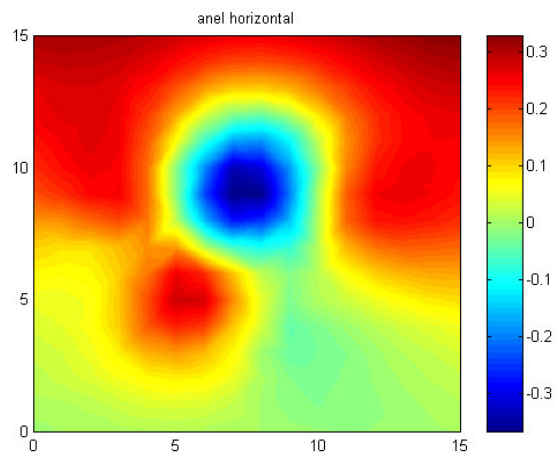


Figura 5.25 - Mapa do sinal de saída do transdutor para o anel na configuração horizontal, com a distância entre o sensor e a agulha de 2 cm. Amplitude máxima = 0,697 V.

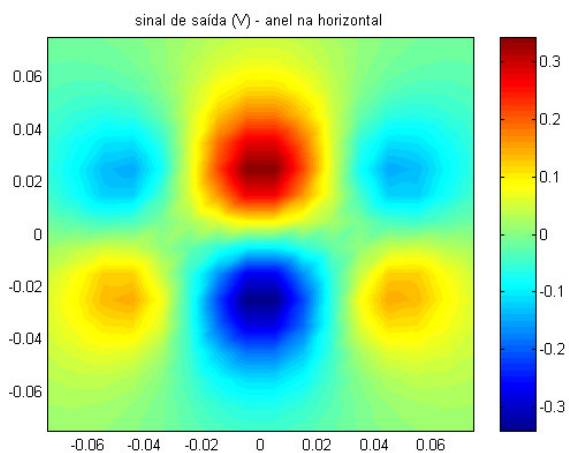


Figura 5.26 - Simulação feita com $\Delta V/\Delta H = 12$, $m = 0,28 \text{ Am}^2$. Amplitude máxima = 0,685 V.

O mapa de tensão para o anel na posição horizontal apresenta uma configuração dipolar razoavelmente bem definida, porém girada em relação ao eixo Y. Além disso, o mapa apresenta uma variação do zero da medida, comportamento que é atribuído à variação da temperatura ambiente durante a medição.

As medições realizadas, bem como as simulações, não permitiram uma definição quanto à melhor orientação do anel sensor em relação ao corpo estranho, uma vez que em ambos os casos o campo magnético associado à agulha pode ser detectado com facilidade e apresenta um sinal de amplitude semelhante.