

4

Transdutor de pressão baseado no efeito de Magnetoimpedância Gigante (MIG).

Antes de propriamente entrar-se nas discussões sobre fenômeno da magnetoimpedância gigante (MIG) e o transdutor, é conveniente fazer uma breve revisão a respeito de algumas características magnéticas relevantes ao seu fenômeno.

4.1.

Materiais Magnéticos.

Pode-se classificar diferentes materiais pela forma como estes se comportam quando expostos a um campo magnético externo.

Se for observada a susceptibilidade magnética (χ), existem três classes principais de materiais magnéticos: os materiais paramagnéticos ($\chi \geq 0$), os Diamagnéticos ($\chi < 0$) e os Ferromagnéticos ($\chi \gg 0$) [15].

No presente trabalho não é feito uso de materiais paramagnéticos nem diamagnéticos, portanto, não abordaremos tais características.

Os materiais ferromagnéticos apresentam magnetização espontânea, ou seja, possuem uma magnetização não nula, mesmo na ausência de campos magnéticos externos. Em geral, podem ser classificados como duros (ímãs permanentes) ou doces. Essa classificação está geralmente associada às respostas do material quando submetido a um campo magnético externo. Uma das propriedades que se utiliza para se distinguir dois materiais ferromagnéticos é a coercividade, ou seja, o campo magnético externo necessário para levar a magnetização de um material à zero.

- Ferromagnético Duro – Apresentam, em geral, alta coercividade ($> 10^4 A/m$).

- Ferromagnético Doce – Apresentam, em geral, baixa coercividade ($< 500 A/m$).

4.1.1.

Estrutura magnética interna de materiais ferromagnéticos (domínios magnéticos).

O processo de magnetização de um material ferromagnético está intimamente relacionado com a sua estrutura magnética interna, ou seja, com a forma na qual a sua magnetização está distribuída pelo seu volume.

No interior de um material ferromagnético pode haver subdivisões magnéticas distinguindo-se por suas direções [16]. Cada subdivisão dessas é chamada de domínio magnético. Esses domínios podem ser alinhados quando o material está submetido a um campo magnético externo. O processo de alinhamento, chamado de magnetização, é apresentado na figura 20.

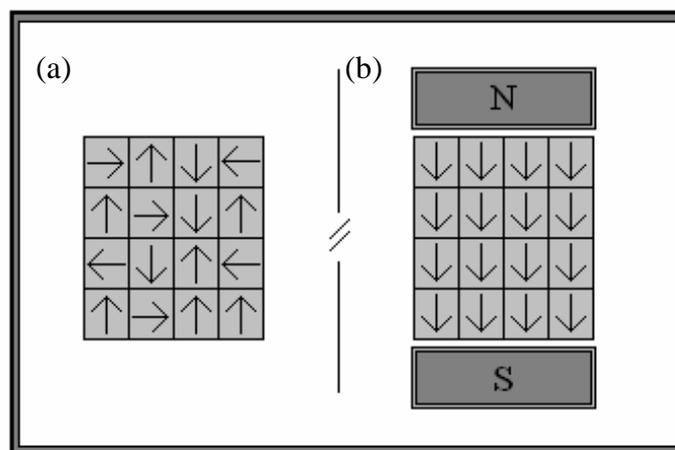


Figura 20 - Representação da magnetização de um material ferromagnético, (a) desmagnetizado e (b) magnetizado.

A magnetização de um material ferromagnético pode ocorrer basicamente de duas formas distintas: pelo realinhamento da magnetização nos domínios magnéticos e /ou pelo deslocamento das suas paredes.

4.1.2. Ligas ferromagnéticas amorfas.

Materiais amorfos são ótimos para se observar o fenômeno de magnetoimpedância gigante (MIG), pois possuem alta permeabilidade magnética, baixo campo coercivo e alta magnetização de saturação. Sua estrutura atômica se apresenta distribuída aleatoriamente, contudo, apresenta uma ordem magnética de longo alcance, mesmo que essa ordem não se estenda na distribuição dos seus átomos. Alguns exemplos dessa classe de materiais são as ligas de metais de transição (Fe, Co, Ni) combinadas com elementos metalóides (B, C, Si, Ge, P).

Outra característica que os tornam interessantes, sob o ponto de vista do fenômeno MIG, é seu alto grau de anisotropia magnética, ou seja, a existência de uma orientação preferencial para a sua magnetização espontânea, ao longo de certas direções. Essa anisotropia pode ser uma característica intrínseca do material ou obtida durante a sua fabricação através de tratamentos térmicos e está relacionada com o campo de anisotropia \vec{H}_a .

Esses materiais não existem naturalmente, uma vez que para a sua obtenção são necessárias altas taxas de resfriamento, da ordem de $10^6 K/s$. Tais taxas de resfriamento podem ser obtidas por algumas técnicas como o *melt spinning* (a partir da fase líquida) e o *sputtering* (a partir da fase gasosa).

A técnica mais utilizada é a de resfriamento a partir da fase líquida, que normalmente se caracteriza pela ejeção do material amorfo fundido sobre uma roda de cobre que gira a alta velocidade, havendo a solidificação em forma de fita ou fio [17].

4.2. Magneto Impedância Gigante – O fenômeno.

O fenômeno da magnetoimpedância gigante, ou em inglês como é mais conhecido “*Giant Magnetoimpedance*” (*GMI*), foi originalmente observado em 1935 [18]. Mas somente recentemente, a partir de 1993, é que o fenômeno tem atraído fortemente a atenção de pesquisadores [22,23], que enxergam nele potencial para muitas aplicações, como o desenvolvimento de novos sensores para aplicação em diversas áreas, como a biomédica e a petrolífera.

O fenômeno MIG consiste de basicamente em uma enorme variação da impedância elétrica de determinado material alimentado por uma corrente elétrica AC quando submetido a variações do campo magnético externo. O MIG tem sido estudado com campos aplicados de forma perpendicular à amostra (MIP – magnetoimpedância perpendicular), transversalmente (MIT – magnetoimpedância transversal) ou longitudinalmente (MIL – magnetoimpedância longitudinal). Nessa dissertação, sempre que estivermos nos referindo ao efeito MIG, o estaremos fazendo para o do tipo longitudinal (MIL), porque o MIL é o tipo que apresenta maior variação com o campo externo aplicado [23-26]

Dentre os materiais usados para a observação do efeito MIG, observa-se que as ligas de metais amorfos descritas anteriormente, por apresentarem ótimos resultados, têm servido como material base para fim de estudo, registro e uso do fenômeno.

Uma forma de se avaliar a liga quanto a sua eficiência, é através do cálculo do *fator MIG*. O fator MIG é definido como a medida relativa da variação da impedância da amostra com o campo aplicado [19-21].

$$Fator\ MIG = \frac{\Delta Z}{Z} = \left| \frac{Z(H) - Z(H_{ref})}{Z(H_{ref})} \right| \times 100\% \quad (2)$$

onde $Z(H_{ref})$ é o campo externo tomado como referência para o cálculo do fator.

Embora a fita que usamos no presente trabalho (quando calculado para uma frequência de 1MHz e a 10mA) possua um fator MIG de 50%, existem estudos mostrando a existência de materiais que apresentam um fator MIG de até 700% [22-27].

Os primeiros modelos criados para descrever os resultados obtidos com a observação do fenômeno foram baseados no efeito magnetoindutivo e no efeito *skin* (*skin effect*), que se refere à variação da profundidade de penetração da corrente elétrica na amostra. Entretanto, os materiais de alta permeabilidade magnética que eram usados nos experimentos deveriam “sentir” o efeito *skin* em frequências algumas ordens de grandeza menores em comparação com materiais condutores não magnéticos. Dessa forma, foi sugerido que a variação da profundidade de penetração com a corrente deveria ter relação com a

permeabilidade magnética do material, a qual está intrinsecamente relacionada com as estruturas dos domínios magnéticos, que por sua vez são determinados pela relação entre o campo induzido pela corrente AC, o campo externo aplicado e o campo de anisotropia [25]. Assim, um modelo mais realista para o efeito MIG deveria tentar descrever a relação da permeabilidade magnética com a estrutura dos domínios sob o efeito da corrente aplicada (corrente de excitação) e ao campo magnético externo.

A relação entre a frequência da corrente de excitação e o efeito MIG é tão forte, que se faz uma separação do MIG em 3 regimes de frequência diferentes. O regime de baixas frequências, o de frequências moderadas e o regime de altas frequências.

- Regime de Baixas Frequências – Corresponde a frequências que variam de aproximadamente de $0,01Hz$ a $100kHz$. Nessa região o efeito MIG é causado principalmente pelo efeito magnetoindutivo (no caso de fios).
- Regime de Frequências Moderadas – Corresponde a frequências que variam de aproximadamente de $100kHz$ a $10MHz$. Nessa região verifica-se que ambas as componentes da impedância apresentam contribuições significativas em decorrência da variação da profundidade de penetração magnética (*magnetic skin depth*).
- Regime de Altas Frequências – Corresponde a frequências acima de $10MHz$. Verifica-se que o material se comporta como um elemento basicamente resistivo, e que o efeito de ressonância magnética deve ser considerado. [26]

4.2.1. Magnetoimpedância gigante do tipo Longitudinal MIL.

Como já foi dito anteriormente o efeito da magnetoimpedância longitudinal (MIL) é induzido através da aplicação de uma corrente elétrica AC (I) ao longo de um fio ou fita, com um campo externo H_{ext} paralelo ao mesmo (figura 21).

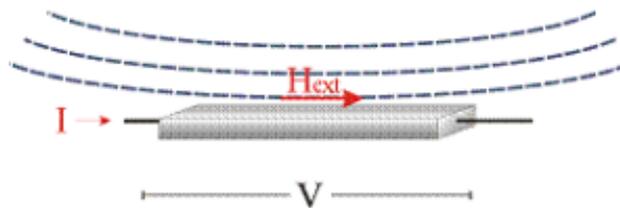


Figura 21 - Representação do campo magnético externo atuando sobre uma amostra metálica, em forma de fita, submetida a uma corrente elétrica AC.

Através da lei de Ohm, e lembrando que I é uma corrente alternada, temos que a impedância fica determinada como:

$$Z = V/I = \frac{|V|\exp(j\phi_v)}{|I|\exp(j\phi_i)}. \quad (3)$$

Por simplificação, pode-se impor que a fase da corrente, ϕ_i , seja nula. Dessa forma,

$$Z = \frac{|V|}{|I|}\exp(j\phi) = |Z|\exp(j\phi). \quad (4)$$

Pode-se observar, através da eq. 4, que a impedância tem uma componente real e outra imaginária. A componente real é a resistência R e a imaginária é a reatância indutiva X ,

$$Z = R + jX, \quad (5)$$

onde $R = |Z|\cos(\phi)$ e $X = |Z|\sin(\phi)$.

Como não é necessário se estudar nenhuma das componentes da impedância individualmente, pode-se tratar a impedância como Z , e a seguir observar como ela é descrita de forma a apresentar explicitamente a sua relação com a profundidade de penetração de cargas em um condutor (efeito *skin*).

Pode-se mostrar, através de manipulação matemática das equações de Maxwell e da Lei de Ohm, que a impedância tem a forma [19]

$$Z = \left(\frac{L(1-i)}{2W\sigma\delta} \right) \frac{1}{1 - \exp(-(1-i) \cdot t/2\delta)} \quad (6)$$

onde L é o comprimento da fita (amostra), t é a espessura da fita, W é a largura da fita, σ é a condutividade do material, e δ é a profundidade de penetração da corrente, dada por

$$\delta = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2\omega\mu\sigma}} \quad (7)$$

com c sendo a velocidade da luz no vácuo, ω é a frequência da corrente de polarização, e μ a permeabilidade magnética da amostra.

Assim, pode-se observar que o aumento da frequência ω acarreta uma imediata redução de δ (efeito *skin*). Em outras palavras, frequências de corrente de polarização mais altas provocam uma redução no volume que a mesma usa para percorrer o condutor e, por conseguinte, elevam o valor da impedância da amostra.

Como já foi mencionado anteriormente no início do capítulo 4.2, o efeito *skin* sozinho não é capaz de explicar o fenômeno da magnetoimpedância gigante quando se emprega o uso de materiais magnéticos. Nesse caso, espera-se que exista uma dependência entre a permeabilidade μ , o campo magnético externo \vec{H}_{ext} , e a corrente de polarização I , que aja como principal mecanismo controlador do efeito MIG.

Para isso, deve-se considerar cuidadosamente a configuração inicial dos domínios magnéticos na amostra, e analisar o seu processo de magnetização. Para tal, supõe-se uma amostra com domínios orientados alternadamente na direção transversal ao comprimento da amostra, todos com comprimentos iguais, como mostrado na figura 22(a).

Quando se aplica um campo longitudinal crescente $|\vec{H}|$ na amostra, os seus domínios tendem a girar em ângulos semelhantes e também crescentes até atingirem um máximo em 90° , o que acontece quando $|\vec{H}| = |\vec{H}_a|$ (figura 22(b)).

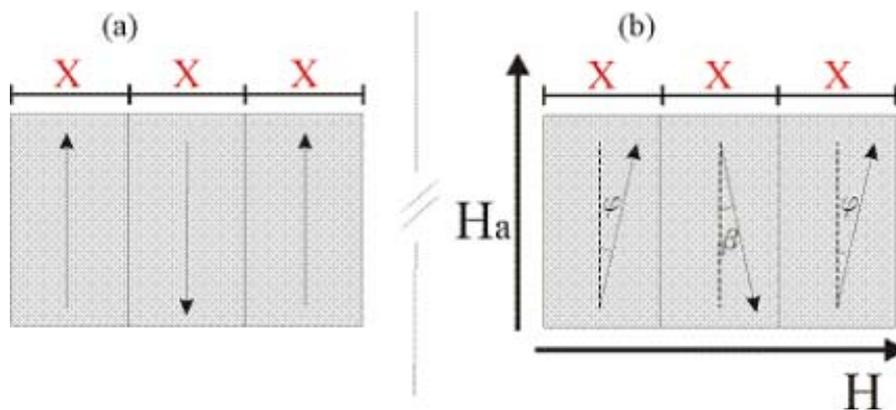


Figura 22 - A ilustração (a) exemplifica a distribuição dos domínios magnéticos em uma amostra. Já a ilustração (b) mostra como fica a configuração dos momentos magnéticos quando aplicado um campo magnético longitudinal.

Assim, a magnetização longitudinal cresce linearmente com \vec{H} , enquanto que a magnetização transversal mantém-se nula, não havendo também nenhum deslocamento das paredes dos domínios.

Entretanto, a aplicação de uma corrente alternada longitudinalmente à fita provoca a indução de um campo magnético transversal $|\vec{h}| = I/2$ na superfície, que desequilibra a rotação dos momentos magnéticos, provocando um maior aumento do ângulo β comparado com φ . Esse desequilíbrio tem o efeito de deslocar as paredes dos domínios em uma distância d , provocando uma magnetização resultante diferente de zero, como mostrado na figura 23.

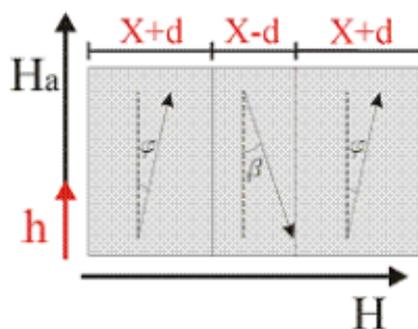


Figura 23 - Configuração dos domínios magnéticos numa fita MIG com a aplicação de um campo magnético externo longitudinal, e de um campo induzido pela corrente de medição.

Dessa forma, pode-se evidenciar que a magnetização da amostra é obtida por dois processos distintos: através da rotação da magnetização de cada domínio, e pelo movimento das suas paredes. Sendo que o primeiro caso se dá principalmente devido à ação do campo \vec{H} , e o segundo devido à ação do campo

\vec{h} . Assim, a magnetização da amostra se apresenta sensível à frequência da corrente de medição, uma vez que, para frequências baixas e moderadas, os dois processos apresentam contribuições significativas, enquanto que para frequências mais elevadas, o processo de deslocamento das paredes é fortemente reduzido, diminuindo o valor da sua contribuição na magnetização.

4.2.2.

MIL – Curvas típicas ($Z \times \vec{H}$).

Quando se traçam as curvas de $Z \times \vec{H}$, pode-se observar dois comportamentos distintos. Um mostra um gráfico com um único pico, e o outro apresenta dois picos característicos. Na maioria dos casos esses picos são simétricos, entretanto, algumas pesquisas já mostraram a existência de picos não simétricos [28-30].

Para compreender esses dois comportamentos distintos, é necessário considerar a anisotropia magnética da fita MIG em questão. Se na fita existe um eixo de fácil polarização e o campo magnético externo for aplicado no mesmo sentido, a magnetização se dará por completo por rotação dos domínios provocando uma redução na impedância a partir de $H_{ext} = 0$ (figura 24(a)). Entretanto, se o campo externo for aplicado perpendicularmente ao campo de anisotropia magnética da amostra, existirá a tendência da impedância de ficar maior com o aumento do campo externo H_{ext} , até um máximo de $\pm H_a$ (campo de anisotropia). Quando o campo externo compensa o campo de anisotropia, a impedância tende a se tornar mais baixa à medida que o campo externo aumenta, apresentando um gráfico como o da figura 24(b).

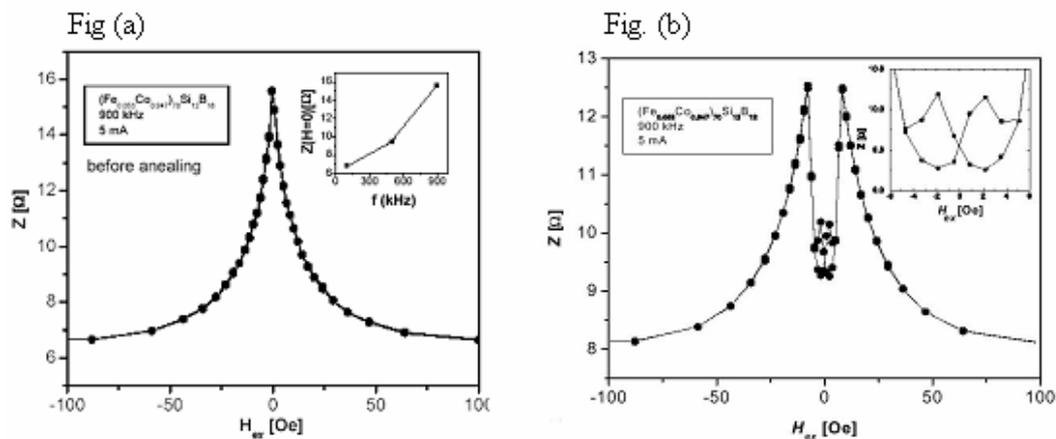


Figura 24 - Dependência da impedância Z com o campo magnético externo H_{ext} para uma fita de $(Fe_{0.947}Co_{0.053})_{70}Si_{12}B_{18}$, na faixa de frequência mediana (900 kHz), com corrente de excitação de 5 mA. (a) antes de sofrer tratamento térmico, (b) depois de passar por tratamento térmico. [27]

4.3. Transdutor de pressão MIG.

O transdutor desenvolvido para fins dessa dissertação pode ser descrito como um transdutor de pressão de alta sensibilidade para aplicação biomédica, com um sensor baseado no efeito da MIG. A seguir será conduzido o seu detalhamento.

4.3.1. Sensor MIG.

O sensor é composto por duas fitas MIG dispostas perpendicularmente entre si sobre uma membrana elástica como mostra a figura 25.

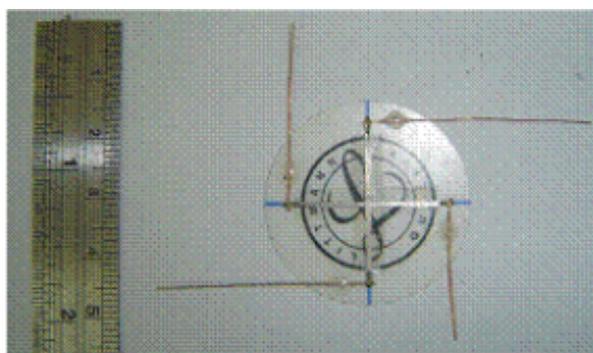


Figura 25 - Elemento sensor MIG do transdutor de pressão desenvolvido.

No ponto de interseção entre as fitas, no centro da membrana, existe um material isolante que impede o contato de uma com a outra. Elas foram cedidas pelo Departamento de Física da UFPE, são feitas de $Co_{70,4}Fe_{4,6}Si_{15}B_{10}$, e produzidas pela técnica *melt-spinning* que cria tensões internas no material causando anisotropia. Possuem 1mm de largura, $30\mu m$ de espessura e comprimento de 2,5 cm cada. A membrana sobre a qual estão dispostas é uma membrana típica de estetoscópios comerciais.

As fitas são montadas como dois braços opostos de uma estrutura em ponte, a qual é completada por dois resistores de filme metálico de $3,6\Omega$ cada, como mostra a seqüência de fotos da figura 26.

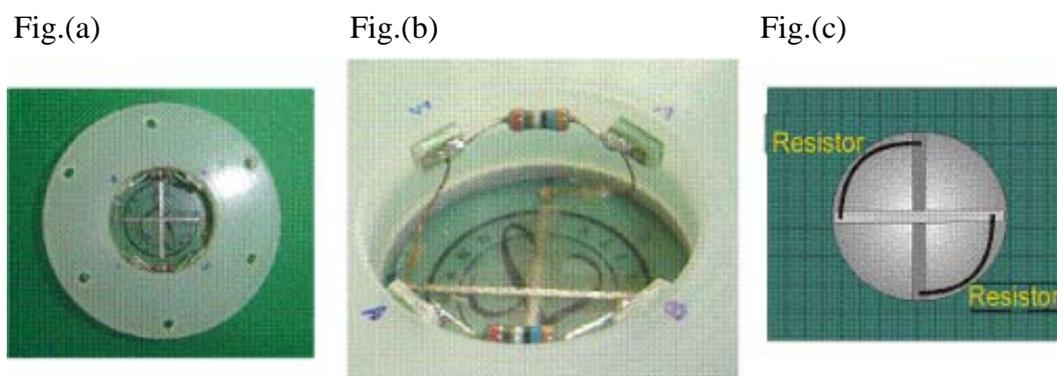


Figura 26 - a) O sensor MIG pronto para ser colocado no transdutor. b) Pode-se observar as pontes que ligam as fitas MIG. c) Desenho esquemático das pontes mostradas.

O sensor funciona detectando pequenas vibrações na membrana, que são transmitidas às fitas MIG. Essas vibrações alteram a distância relativa das fitas a um ímã permanente localizado na parte inferior do transdutor (não mostrado), provocando assim uma variação da sua impedância, conforme a teoria MIG.

A alimentação das fitas com uma corrente elétrica AC é feita através de um circuito eletrônico, desenvolvido no Laboratório de Biometrologia da PUC-Rio. O circuito fornece uma corrente de $15mA$ a uma frequência de $2MHz$. Além da função de alimentação das fitas com uma corrente de medição, o circuito registra a diferença de potencial elétrico nas fitas (uma vez que há mudança na sua impedância), condiciona e retifica esse sinal e o envia a uma placa de aquisição (conversora *A/D LabPC+ da National Instruments*) ou a um osciloscópio, de forma que podemos assim observar o seu registro em tempo real.

4.3.2. Transdutor completo – Descrição.

Na figura 27a é apresentada a campânula do transdutor, que é constituída por um compartimento oco. A campânula deve ser fechada pelo elemento sensor para se proceder as medições, figura 27(b).

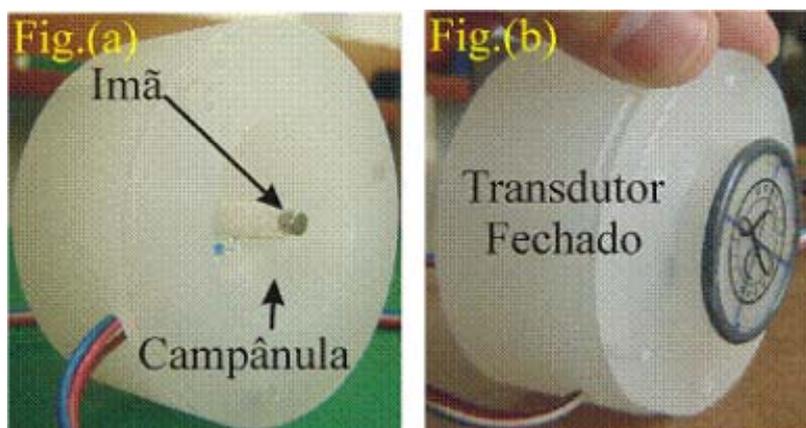


Figura 27 – Figura do Transdutor aberto (a), e do transdutor fechado (b).

No centro da campânula há um parafuso (figura 28), em cuja extremidade está colocado um ímã circular permanente, como pode ser observado na figura 27(a). Desta forma, pode-se variar a distância entre o ímã e as fitas, definindo assim a intensidade do campo magnético de polarização mais adequado.

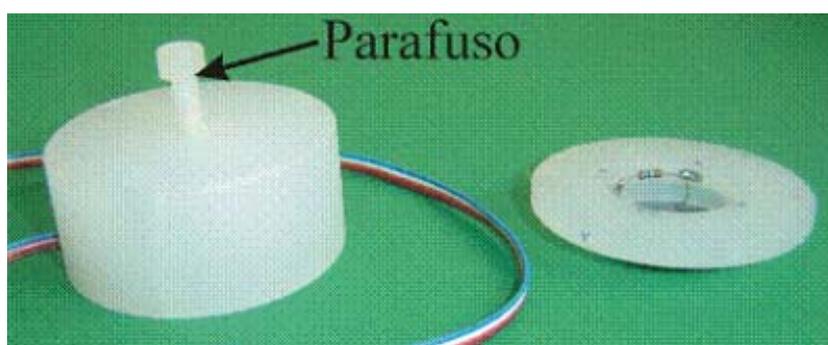


Figura 28 - Foto do transdutor com o parafuso em evidência.

4.3.3. Circuito Eletrônico.

O circuito eletrônico que compõe o transdutor possui as funções de alimentar eletricamente as fitas MIG, amplificar e condicionar o sinal gerado pelo

desbalanceamento das pontes, fornecendo em sua saída uma tensão contínua proporcional à variação do campo magnético aplicado. Ele foi desenvolvido no Laboratório de Biometrologia da PUC-Rio especialmente para ser usado no transdutor em questão. O diagrama em blocos do circuito é apresentado na figura 29, podendo o seu ganho total ser ajustado até o valor de 1500.

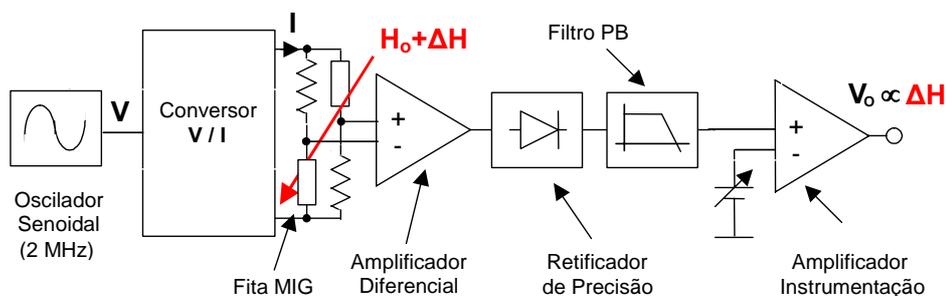


Figura 29 - Diagrama em blocos do circuito eletrônico.

O circuito consiste em um oscilador senoidal a cristal, que gera uma tensão senoidal com amplitude *600 milivolt* e frequência *2 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 *30mA*, permitindo assim que se aplique *15mA* a cada braço da ponte.

A ponte utiliza, além da impedância das fitas, dois resistores de $3,6\Omega$. 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 *2MHz* de frequência e amplitude proporcional à variação do campo magnético longitudinal às fitas MIG. Esse sinal é processado por um conjunto formado pelo retificador de precisão e pelo filtro PB (passa-baixo), que operam como um demodulador AM de ganho 2. Finalmente, um amplificador de instrumentação de ganho 75 gera a tensão de saída do circuito do transdutor, havendo ainda um ajuste de offset por meio de um potenciômetro de precisão.

Todo o circuito foi envolto em folha de latão e instalado em uma caixa plástica, com o objetivo de reduzir os efeitos de IEM (interferência eletromagnética) de alta frequência e melhorar o desempenho térmico do transdutor. Na figura 30 pode-se ter uma visão do circuito eletrônico já encapsulado.



Figura 30 - Vista do circuito elétrico já encapsulado.