

Avaliação de eletroímãs para uso em procedimentos de calibração

Evaluation of electromagnets for use in calibration procedures

Ramon Valls Martin¹, Diego Joriro Nazarre¹

¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

E-mail: ramon@ipt.br

Resumo: A calibração de transdutores de campo magnético utiliza eletroímãs com núcleos de material ferromagnético para gerar campos de alta intensidade. Neste caso, o procedimento de calibração é feito por comparação direta com um medidor padrão. A homogeneidade e a estabilidade do campo afetam as incertezas do processo, assim a medida do gradiente de campo é necessária para estimar estes níveis de incertezas.

Palavras-chave: Campo magnético, eletroímãs, calibração magnética.

Abstract: The calibration of magnetic field transducers uses electromagnets with cores of ferromagnetic material to generate high intensity fields. In this case the calibration procedure is done by direct comparison with a standard meter. The homogeneity and stability of field affect the uncertainty of the process, so the measurement of field gradient is required to estimate these levels of uncertainty.

Keywords: Magnetic field, electromagnets, magnetic calibration.

1. INTRODUÇÃO

Eletroímãs com armaduras ou núcleos de materiais ferromagnéticos são empregados em laboratórios de calibração para gerar campos magnéticos de alta intensidade. Estes materiais apresentam características magnéticas não lineares e histerese. Assim, o campo gerado no entreferro não pode ser determinado apenas pela medida da corrente circulante, sendo necessário um medidor padrão. A medição da distribuição das intensidades, ou gradiente de campo gerado no interior do entreferro, é essencial para quantificar as incertezas nos procedimentos de calibração, quando a leitura de um instrumento de medição de campo é comparada diretamente com a medida de um padrão de medição.

2. METODOLOGIA

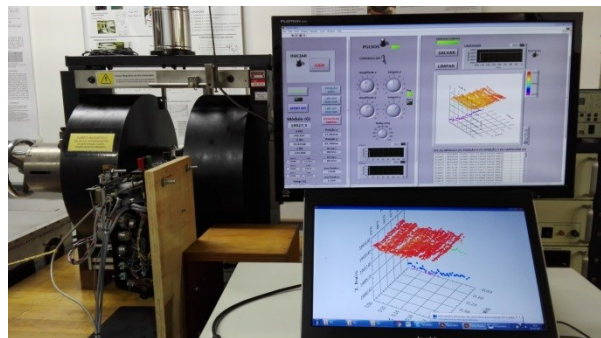
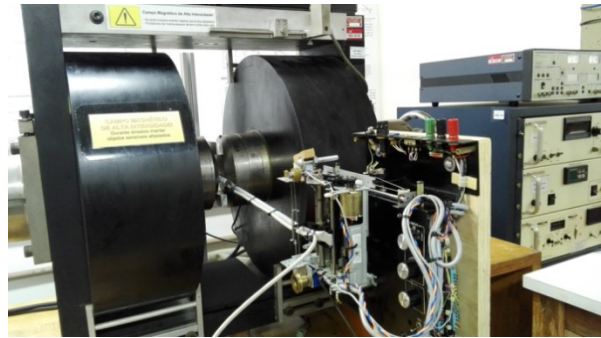
O campo gerado no entreferro dos eletroímãs foi mapeado em duas dimensões no plano intermediário entre as peças polares com um transdutor triaxial tipo Hall. O módulo ou intensidade do campo foi calculado a partir das componentes medidas pelo transdutor triaxial. Posteriormente, foi medido o perfil linear de intensidades na mesma direção em que usualmente são realizados os procedimentos de calibração de medidores de campo. Nesta etapa, foi utilizado um transdutor baseado em magnetometria de ressonância Magnética (NMR) que, além de ser um padrão primário, apresenta uma resolução muito melhor em relação aos sensores do tipo Hall. A partir dos resultados

experimentais foi estimada uma componente de incerteza nos procedimentos de calibração para incluir a contribuição dos erros experimentais decorrentes da presença de gradientes de campo.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente utilizou-se um eletroímã (Laboratório Eletrofísico mod. LEP/100-4S) sem refrigeração forçada. O mesmo mostrou-se inadequado à realização de estudos para o mapeamento em campos de alta intensidade. Houve superaquecimento provocado pela energia dissipada nos seus enrolamentos em operação prolongada, e grande deriva de intensidades. Este eletroímã foi substituído por outro refrigerado a água (KJS Associates mod. 6H2-4S). Foram utilizadas peças polares na forma de cones truncados com diâmetro de base de 152 mm e diâmetro mínimo de 100 mm. A varredura adotada para o mapeamento de campo em duas dimensões tem cerca de 2500 pontos experimentais com um tempo de aquisição total de aproximadamente uma hora. O longo período de aquisição exige uma estabilidade temporal do campo, que foi obtida com um sistema de realimentação: Uma ponta Hall associada a um gaussímetro (Lake Shore mod. 475 DSP) operando em modo PID, e controlando a fonte de alimentação do eletroímã para estabilizar o campo gerado.

No mapeamento foi utilizado um sensor triaxial Hall (Sennis tipo F3A-03AO2F-AO2T2K5M), com resposta dinâmica de DC até 15 kHz. Para diminuir o ruído, a resposta foi limitada analogicamente a 1 Hz. Para posicionar a sonda e gerar a varredura, foi construído um mecanismo com componentes reciclados, mostrado na figura 1. Um software desenvolvido em plataforma LabVIEW foi usado para controlar a varredura e a aquisição de dados.



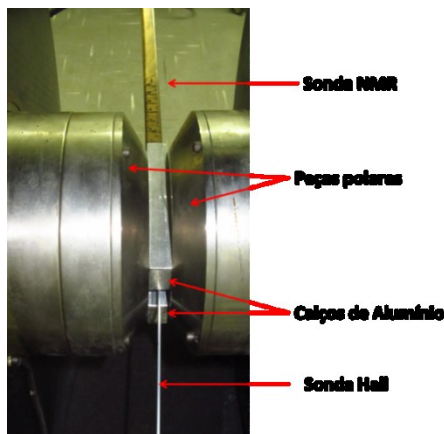
Figuras 1: Detalhes do mecanismo de varredura e telas de controle para posicionamento dos transdutores de campo.

A seguir, o perfil linear de intensidades foi medido ao longo da direção paralela à superfície das peças polares usando um *probe* NMR (Metrolab 1062-5-10M do Teslameter Metrolab PT 2025). Esta técnica permite uma resolução muito melhor do que a obtida anteriormente com a sonda Hall triaxial, mas é limitada principalmente pela presença de gradientes de campo. Calços de alumínio com espessura (12 mm) ligeiramente maior do que a da sonda NMR foram empregados para melhorar o paralelismo das superfícies das peças polares. Isto contribuiu com a homogeneidade do campo gerado. Pela mesma razão, também foram acrescentados espaçadores de borracha (espessura = 2 mm) entre as bases maiores das peças polares e seus assentos. Estes elementos flexíveis permitem uma melhor acomodação das peças polares com os calços de separação. As figuras 2 e 3 mostram o posicionamento dos sensores num arranjo colinear usado num procedimento de calibração

de uma sonda Hall em relação a uma sonda de padrão NMR. Verifica-se uma distância típica de 8 mm entre os elementos ativos das duas sondas.

4. RESULTADOS

A figura 4 mostra a distribuição do módulo do campo numa região de 34 mm x 34 mm próxima ao centro das peças polares, e para três intensidades de campo. Com o início da saturação das peças polares nos campos mais intensos, nota-se uma diminuição das intensidades na região mais próxima ao centro das peças polares, além da deterioração da homogeneidade.



Figuras 2: Configuração colinear dos sensores num procedimento de calibração de uma sonda Hall (instrumento sob calibração) em relação a uma sonda NMR (padrão de referência).

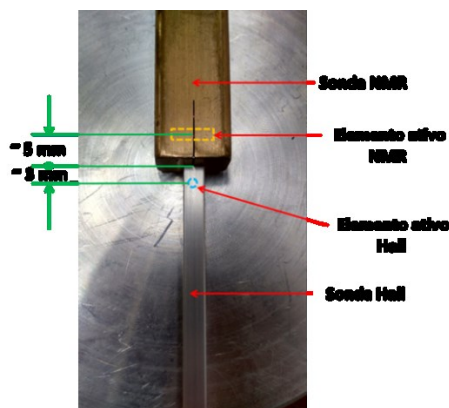


Figura 3: Detalhe do posicionamento colinear dos sensores NMR e Hall.

Os gráficos resultantes da varredura biaxial dão apenas o aspecto geral da distribuição do campo, mas não permitem visualizar detalhes devido ao ruído gerado pelo próprio sensor Hall. Para quantificar o efeito do gradiente ao longo da direção de calibração foram medidos os perfis de intensidades com sondas NMR, que são mostrados na figura 5 para $B_{\text{médio}} = 1,5 \text{ T}$ e 2 T. Nesta figura também se observa o efeito do uso dos espaçadores de borracha.

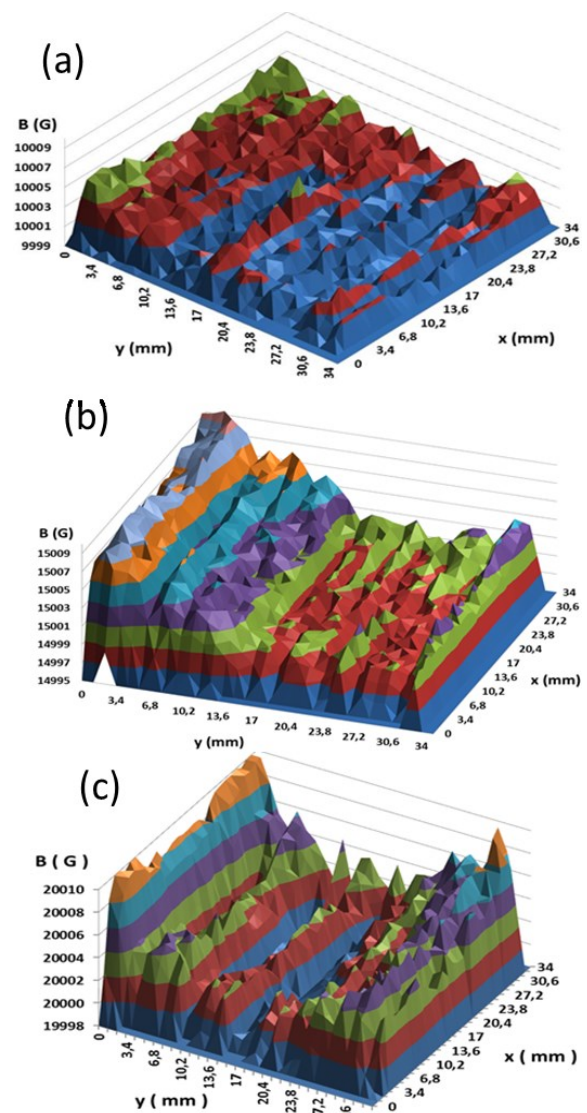


Figura 4: Distribuição das intensidades de campo no plano médio entre as peças polares (entreferro): (a) 1 T; (b) 1,5 T; (c) 2 T.

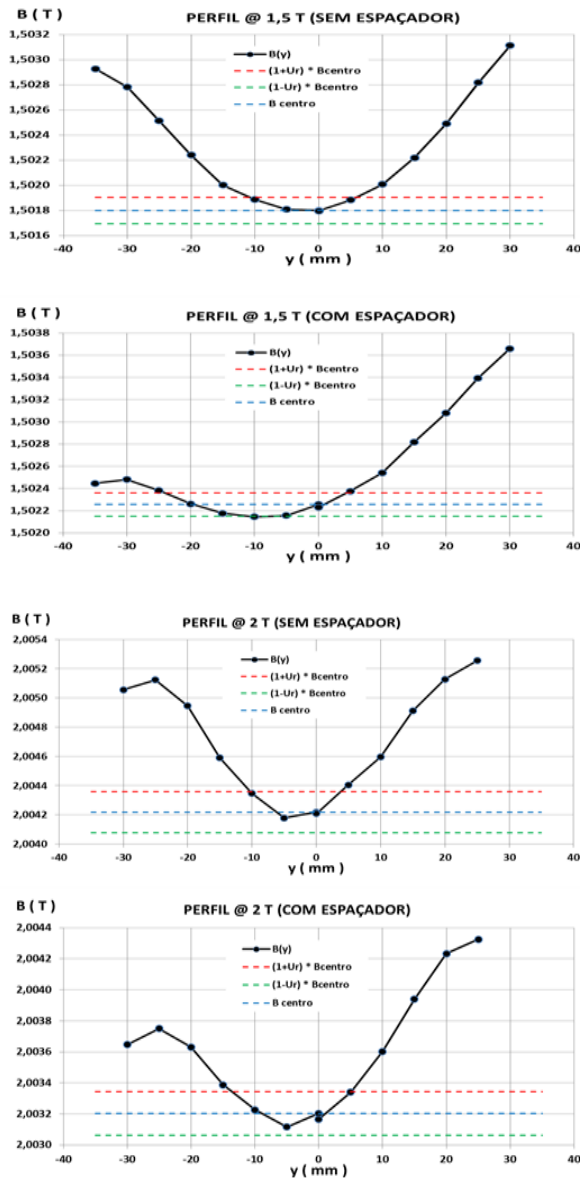


Figura 5: Perfis de intensidades medidos com NMR, com e sem espaçadores de borracha, e $B_{\text{médio}}=1,5$ T e 2 T. As linhas tracejadas indicam a incerteza estimada em 70 ppm em torno do ponto central.

5. CONCLUSÃO

Estabilidade e homogeneidade são atributos essenciais do campo magnético empregado em procedimentos de calibração. A homogeneidade está relacionada diretamente com a geometria do eletroímã, sendo influenciada principalmente pelo paralelismo entre as peças polares.

Eletroímãs sem refrigeração forçada não são adequados nestes procedimentos, devido ao superaquecimento e deriva em campos de alta intensidade. Mesmo em eletroímãs refrigerados à água é necessária a utilização de sistemas de realimentação para garantir a estabilidade do campo, diminuindo a variabilidade das medidas.

Os resultados obtidos com o mapeamento em duas dimensões, ao longo do plano médio entre as peças polares do eletroímã refrigerado, mostraram a existência de gradientes no módulo do campo, que aumentam com a intensidade do campo gerado. O início da saturação das peças polares contribui decisivamente neste efeito. Observa-se também uma assimetria no campo, provavelmente provocada por inclinações residuais das peças polares. As limitações de resolução e o ruído intrínseco do transdutor Hall triaxial, exigiram o uso de magnetometria NMR para avaliar os perfis de campo. O uso de calços de alumínio contribuiu para uma melhora significativa da homogeneidade. Acoplamentos flexíveis de borracha posicionados entre as peças polares e o corpo do eletroímã também melhoraram a homogeneidade, apesar do consumo de corrente adicional.

Num procedimento típico de calibração, com arranjo colinear de sensores, os elementos ativos devem estar tão próximos, quanto possível - neste caso, aproximadamente 8 mm - para minimizar o efeito do gradiente. Uma componente de incerteza foi definida para levar em conta o distanciamento dos sensores. Com base nos perfis de intensidades de campo medidos com NMR foi estimado um valor para esta componente de incerteza: $U_r = 70$ ppm. Este valor é compatível com os procedimentos de calibração realizados em torno da região central do entreferro do eletroímã, considerando todas as intensidades e configurações estudadas. Nota-se que esta é a principal contribuição no cálculo da incerteza total, sendo muito maior do que a incerteza do padrão NMR (5 ppm).

