

Comparação entre dois métodos experimentais para calibração de uma bobina geradora de campo

Comparison between two experimental methods for calibration of a field-generating coil

Ramon Valls Martin¹, **Diego Joriro Nazarre**¹

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

E-mail: ramon@ipt.br

Resumo: Bobinas com núcleo de ar são usadas como padrões em procedimentos de calibração para prover rastreabilidade em campos de baixa intensidade. A calibração destas bobinas foi feita por método geométrico e por método de medição direta do campo gerado. Os dois métodos foram comparados e mostraram-se compatíveis entre si.

Palavras-chave: Bobinas geradoras, campo magnético, calibração magnética, rastreabilidade magnética.

Abstract: Air core coils are used as standard on calibration procedures to provide traceability from low intensity fields. The calibration of these coils was performed by the method based on geometry and on direct measurement of the generated field. The two methods were compared and the experimental results indicate the compatibility between them.

Keywords: Generating coils, magnetic field, magnetic calibration, magnetic traceability.

1. INTRODUÇÃO

O coeficiente k de uma bobina com núcleo de ar é definido como uma constante que relaciona a indução magnética ou a intensidade do campo magnético gerado por essa bobina e a corrente elétrica que circula em suas espiras.

$$k = \frac{B}{I} \quad (1)$$

Onde:

k : coeficiente da bobina [T/A];

B : densidade de fluxo magnético no centro da bobina [T];

I : corrente elétrica aplicada na bobina [A].

Esta constante pode ser utilizada para caracterizar uma bobina como padrão de geração de campo, ou como padrão para determinação de momento magnético, quando a bobina é acoplada a um

fluxímetro ou integrador eletrônico. Exemplo de utilização: Na determinação do momento magnético de um ímã obtido pelo método de extração, o momento é proporcional ao sinal induzido e à constante da bobina.

A comparação de métodos experimentais completamente distintos para determinar o valor desta constante permite verificar a coerência entre eles, além de possibilitar a detecção de possíveis problemas nos equipamentos utilizados. Para realizar esta comparação foi adotada uma bobina geradora de campo na forma de um solenoide curto. Esta bobina é capaz de gerar campos de até 10 G, sendo muito usada na calibração de medidores de campo. O aspecto da bobina é mostrado na figura 1.



Figura 1: Bobina geradora de campo
($B_{\text{máximo}} = 10 \text{ G}$).

Foram usados dois métodos. O primeiro baseado na medição da geometria da bobina, e o segundo, baseado na medição direta da intensidade do campo e da corrente aplicada.

2. METODOLOGIA

Os métodos adotados são descritos a seguir.

2.1. Método dimensional

Este método é baseado na fórmula analítica do campo magnético gerado por uma espira circular percorrida por uma corrente elétrica, derivada da Lei de Ampere. Como a bobina utilizada no estudo é um solenoide curto onde o raio possui a mesma ordem de grandeza do seu comprimento, optou-se por utilizar uma fórmula aproximada, que consiste na somatória das contribuições de cada uma das espiras que compõem o solenoide, como se fossem espiras circulares independentes, com um espaçamento médio definido como o comprimento total da bobina dividido pelo número total de espiras menos um, conforme (2):

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 I}{2} \frac{r^2}{((x_i \cdot \text{esp})^2 + r^2)^{3/2}} \quad (2)$$

Onde:

B: intensidade do campo magnético [T] no centro da bobina;

μ_0 : permeabilidade magnética do vácuo = $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A}$;

n: número de espiras da bobina = 80 espiras;

I: corrente elétrica aplicada na bobina [A];

r: raio médio da bobina [m];

esp: comprimento da bobina [m] / 79 e

x_i : posição sequencial da espira i em relação ao centro da bobina.

A partir de (1) e de (2), obtém-se o coeficiente dimensional da bobina:

$$k_{\text{dimensional}} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0}{2} \frac{r^2}{\left((x_i \cdot \text{esp})^2 + r^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

Para determinarmos o valor experimental de $k_{\text{dimensional}}$ a partir de (3), são necessários valores experimentais para o raio r e para o espaçamento médio esp . Esses valores foram extraídos de uma inspeção dimensional da bobina realizada por um laboratório pertencente à rede RBC.

2.2. Método NMR

O método NMR (Nuclear Magnetic Resonance) consiste na aplicação direta de (1). A intensidade do campo magnético gerado pela bobina é medida diretamente por um magnetômetro NMR desenvolvido no IPT para operar em campos de baixa intensidade [1]. A corrente elétrica aplicada é medida através da queda de tensão em um resistor padrão, através de um multímetro padrão.

$$k_{\text{NMR}} = \frac{B_{\text{NMR}}}{I_{\text{PADRÃO}}} \quad (4)$$

Onde:

k_{NMR} : coeficiente k determinado pelo método NMR;

B_{NMR} : intensidade do campo magnético gerado pela bobina medido diretamente por um magnetômetro NMR;

$I_{\text{PADRÃO}}$: corrente elétrica medida através de resistor padrão e multímetro padrão.

A determinação da constante k_{NMR} foi realizada para duas correntes elétricas distintas: $I = 0,5 \text{ A}$ ($B = 43 \mu\text{T}$ ou $0,43 \text{ G}$) e $I = 5 \text{ A}$ ($B = 430 \mu\text{T}$ ou $4,3 \text{ G}$). As comparações foram realizadas de forma independente para os coeficientes determinados em cada corrente de operação.

2.3. Comparação dos métodos

Para realizar a comparação entre os dois métodos foi utilizado o conceito de Erro Normalizado (En), como definido a seguir:

$$En = \left| \frac{K_{\text{dimensional}} - K_{\text{NMR}}}{\sqrt{U_{\text{dimensional}}^2 + U_{\text{NMR}}^2}} \right| \quad (5)$$

Onde:

$K_{\text{dimensional}}$ e K_{NMR} : valores do coeficiente k determinados através do método dimensional e do método NMR, respectivamente;

$U_{\text{dimensional}}$ e U_{NMR} : incertezas expandidas de medição na determinação do coeficiente k pelo método dimensional e pelo NMR, respectivamente, consideradas como as incertezas padrões das medições multiplicadas pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com $veff$ graus de liberdade efetivos, corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 [2]. Segundo essa metodologia, o resultado é considerado satisfatório caso En seja menor ou igual a 1 [3].

3. RESULTADOS

As tabelas 1 e 2 apresentam os valores obtidos para o coeficiente k nos dois métodos, assim como as incertezas expandidas e o erro normalizado calculado de acordo com (5), onde o coeficiente k_{NMR} refere-se aos valores obtidos utilizando-se as correntes de 0,5 A e 5,0 A respectivamente.

Tabela 1: En entre K_{NMR} (0,5 A) e $K_{\text{dimensional}}$.

$K_{\text{DIMENSIONAL}}$	K_{NMR}	$U_{\text{DIMENSIONAL}}$	U_{NMR}
(mT/A)	(mT/A)	(mT/A)	(mT/A)
0,086032	0,086063	0,000187	0,000044
ERRO NORMALIZADO		0,70	

Tabela 2: En entre K_{NMR} (5,0 A) e $K_{\text{dimensional}}$.

$K_{\text{DIMENSIONAL}}$	K_{NMR}	$U_{\text{DIMENSIONAL}}$	U_{NMR}
(mT/A)	(mT/A)	(mT/A)	(mT/A)
0,086032	0,086114	0,000187	0,000086
ERRO NORMALIZADO		0,95	

4. CONCLUSÕES

A diferença percentual entre $K_{dimensional}$ e K_{NMR} para $I = 0,5 A$ ($B = 43 \mu T$) foi de 0,036 %, enquanto para $I = 5,0 A$ ($B = 430 \mu T$) foi de 0,095 %. Uma parcela da divergência nos valores encontrados pode ser atribuída às alterações de temperatura durante a execução das calibrações. Temperaturas mais elevadas alteram a geometria pela dilatação dos componentes (enrolamentos, suportes) da bobina. Consequentemente, para a mesma corrente, o campo diminui para temperaturas maiores. As medidas dimensionais podem ser corrigidas para cada temperatura de operação, levando-se em conta os coeficientes de dilatação linear para os diferentes materiais que compõem a bobina. Neste estudo $K_{dimensional}$ calculado foi mantido constante para o cálculo do erro normalizado.

Mesmo considerando-se as incertezas das medições e o critério do erro normalizado, o método dimensional e o método NMR são

compatíveis entre si, pois os valores dos erros normalizados ficaram abaixo de 1 nas duas correntes utilizadas para alimentar a bobina. O resultado desta comparação é mais uma evidência da correta operação do padrão primário NMR desenvolvido pelo IPT para fornecer rastreabilidade não geométrica para campos de baixa intensidade.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Martin R V, Nazarre D J, "Sistema de ressonância magnética com fluxo contínuo de água polarizada para obtenção da rastreabilidade para campos magnéticos estáticos", Metrologia Ouro Preto, nov 2013.
- [2] Expressão da Incerteza de Medição na Calibração, Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02, Inmetro, 1999.
- [3] ISO 13528:2005(E) Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons, ISO, 2005.