

## Accreditation and traceability of magnetic quantities in Brazil

### Accreditation and traceability of magnetic quantities in Brazil

**Ramon Valls Martin<sup>1</sup>, Diego Joriro Nazarre<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

E-mail: ramon@ipt.br

**Resumo:** Grandezas magnéticas como intensidade de campo e indução magnética DC e AC não tinham rastreabilidade adequada no Brasil até recentemente. O IPT adquiriu e desenvolveu equipamentos e procedimentos para obter esta rastreabilidade diretamente através de padrões primários, baseados no fenômeno da ressonância magnética nuclear (RMN). O processo de acreditação, submetido à Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro, foi finalizado em maio de 2017 tornando o LME/IPT um dos pioneiros na Rede Brasileira de Calibração (RBC) em serviços de calibração na área de magnetismo.

**Palavras-chave:** magnetismo, campo magnético, rastreabilidade magnética, indução magnética, acreditação em magnetismo.

**Abstract:** Magnetic quantities, such as field strength and magnetic induction DC and AC did not have traceability in Brazil until recently. The IPT acquired and developed equipment and procedures to get traceability directly through primary standards based on the phenomenon of nuclear magnetic resonance (NMR). The accreditation process, submitted to the Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro, was finished in May 2017 making the LME/IPT a pioneer in the Brazilian Network of Calibration (RBC) for services of magnetism-related calibration.

**Keywords:** magnetism, magnetic field, magnetic traceability, magnetic induction, accreditation in magnetism.

## 1. INTRODUÇÃO

Associadas a uma infinidade de atividades industriais e comerciais, as grandezas elétricas (tensão, corrente, resistência dentre outras) sempre tiveram grande destaque na metrologia. As grandezas magnéticas, entretanto, não gozaram da mesma prioridade, mesmo estando

presentes numa ampla gama de aplicações tecnológicas como geração de energia, motores e transportes, orientação e sensoriamento, telecomunicações. A rastreabilidade de grandezas magnéticas não era possível no Brasil até alguns anos atrás. Instrumentos simples como medidores de campo e gaussímetros tinham que ser enviados ao exterior para calibração, num

processo caro e demorado. Para suprir esta demanda, o IPT fez investimentos em infraestrutura e equipamentos, além de formação de recursos humanos. Um pesquisador foi enviado ao exterior (PTB - Alemanha) para estudar os métodos e procedimentos adotados internacionalmente na rastreabilidade magnética. Finalmente em maio de 2017, o Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT (LME/CTMetro) acabou tendo sua acreditação reconhecida nesta área pelo Inmetro, tornando-se pioneiro na oferta de rastreabilidade magnética no Brasil [1]. Os laboratórios do Inmetro já ofereciam a rastreabilidade para o campo magnético AC, mas numa faixa muito limitada de intensidades e frequências (60 Hz). A acreditação contempla grandezas como intensidade de campo magnético (H), densidade de fluxo ou indução magnética (B) e fluxo magnético ( $\Phi$ ), tanto em AC, quanto em DC. A partir destas grandezas principais, a rastreabilidade pode ser estendida para a área de caracterização de materiais magnéticos, através de outras grandezas secundárias, como a permeabilidade magnética, a coercividade, a remanência e as perdas magnéticas. O padrão adotado internacionalmente para medir a intensidade do campo magnético foi desenvolvido a partir do fenômeno físico da ressonância magnética nuclear (RMN). Trata-se de um padrão primário, pois sua realização é baseada numa constante física: A Constante Giromagnética do Próton. Esta constante, determinada experimentalmente, tem seu valor revisto periodicamente num consenso internacional [2].

## 2. GERAÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Grandezas magnéticas como a indução magnética tem um amplo espectro de intensidades nas aplicações tecnológicas. Nestas, medidas da indução magnética podem variar de 0,1 nT (nível de ruído em câmaras blindadas magneticamente) até 10 T (campos magnéticos gerados em bobinas

supercondutoras de equipamentos de ressonância magnética de última geração). Para obter rastreabilidade nesta ampla faixa dinâmica (11 ordens de grandeza), as intensidades foram subdivididas em duas categorias: Abaixo e acima de 10 mT (100 G). Campos magnéticos AC e DC até esta ordem de intensidades podem ser gerados facilmente com bobinas convencionais com núcleos de ar (solenoides curtos e longos, bobinas de Helmholtz, bobinas compensadas). O campo produzido por este tipo de bobina é diretamente proporcional à corrente elétrica circulante em seus enrolamentos (I). O fator de proporcionalidade é conhecido como constante da bobina ( $k = B/I$ ) e pode ser calculado analiticamente a partir da geometria da bobina. Assim, numa primeira tentativa, a rastreabilidade poderia ser obtida pelas medições das dimensões da bobina e da corrente elétrica. Para campos mais intensos são necessárias bobinas especiais refrigeradas à água, bobinas que operam em temperaturas criogênicas ou, mais usualmente, eletroímãs com núcleos sólidos de material ferromagnético (não adequados para operação AC). Se o campo DC não precisa ser variado continuamente, também podem ser usados arranjos de ímãs permanentes. Com exceção das bobinas com núcleo de ar, a inclusão de material ferromagnético ou ímãs introduz características não lineares e histerese ao circuito magnético impedindo a rastreabilidade por meio da geometria. Nestes casos, o padrão deixa de ser a bobina e passa a ser o medidor da intensidade de campo, sendo a rastreabilidade proveniente de sua calibração em relação a um padrão primário.

## 3. PADRÕES DE MEDIÇÃO

### 3.1. Padrão primário – magnetômetro RMN

Medições de campo magnético baseadas neste princípio fornecem uma frequência proporcional à intensidade do campo, cujo fator de proporcionalidade é a própria constante

giromagnética do próton. As incertezas de medição de padrões disponíveis comercialmente são tipicamente de alguns ppm no valor absoluto do campo. O IPT construiu uma família de magnetômetros RMN de operação manual, e acabou adquirindo um equipamento automatizado (Metrolab mod. PT2025) para facilitar a operação em serviços correntes de calibração. Um sistema RMN com fluxo contínuo de água polarizada também foi desenvolvido no IPT para operação abaixo do limite inferior dos equipamentos comerciais ( $B_{\text{mínimo}} = 0,42 \text{ T}$ ) atingindo até  $1 \mu\text{T}$  [3].

### 3.2. Padrões secundários

A partir do padrão primário, são calibrados padrões de trabalho, que por sua vez são usados na calibração dos instrumentos de clientes. Para campos de alta intensidade são usados gaussímetros com sondas Hall (Lake Shore mod. 475) e bobinas “pick-up”. Para campos de baixa intensidade são usados magnetômetros do tipo “fluxgate” (Bartington mod. Mag-03MS100) e bobinas geradoras de campo. No caso de uma bobina com uma constante  $k$  calibrada, usada como padrão, o campo é determinado diretamente pela medição da corrente circulante em seus enrolamentos. O mesmo procedimento é usado para AC e DC, desde que a frequência do campo gerado pela bobina esteja bem abaixo da sua frequência de ressonância [4]. Então:

$$(f_{\text{resson}} > \sim 10 \times f_{\text{máx}}) \Rightarrow (k_{DC} \cong k_{AC})$$

### 4. CAMPO NULO E BLINDAGEM

O primeiro ponto notável no processo de calibração é o “zero” ou campo nulo. Para definir este ponto é necessário cancelar o campo geomagnético estático, além de outras fontes de interferência eletromagnética AC, originadas principalmente na rede de alimentação e na operação próxima de equipamentos e máquinas elétricas. Interferências de radiofrequência podem ser facilmente blindadas com gaiolas de

Faraday. Entretanto, este tipo de blindagem é “transparente” para campos magnéticos de baixa frequência e estáticos. Neste caso, as blindagens devem ser feitas com materiais de alta permeabilidade magnética. Os melhores resultados são obtidos com ligas de Fe e Ni, como o Permalloy, o Supermalloy (adição de molibdênio) e o Mu-metal (adição de Cu). A blindagem passiva mais eficiente é aquela obtida com materiais supercondutores, mas neste caso é necessária uma dispendiosa infraestrutura criogênica.

Além de blindagens passivas, um espaço isento de campos magnéticos pode ser criado através do cancelamento ativo. Neste caso, transdutores sensíveis (magnetômetros tipo fluxgate) medem o campo residual, e fazem parte de uma malha de realimentação. Esta malha é ainda composta por controladores, amplificadores de potência e bobinas geradoras de campo. O cancelamento ativo ainda pode ser combinado com as blindagens passivas para obter uma máxima eficiência.

### 5. ARRANJOS EXPERIMENTAIS

As instalações laboratoriais necessariamente devem prover a geração, a medição e o controle ambiental do campo magnético durante os procedimentos de calibração. Para gerar campos AC e DC de alta homogeneidade e estabilidade na faixa de 0 a 2,2 T foram adquiridas e construídas diversas bobinas com núcleo de ar, além de eletroímãs com núcleos ferromagnéticos. Destacam-se sistemas triaxiais com bobinas de Helmholtz construídas no laboratório, e bobinas compensadas com múltiplos enrolamentos para produção de campos com alta homogeneidade (Magnetic Physic mod. MSK101A). Na geração de campos intensos são utilizados eletroímãs de laboratório com circulação de água para refrigeração. Nestes eletroímãs são instalados os sistemas de realimentação para melhorar a estabilidade do campo. A alimentação dos

enrolamentos é feita por fontes acopladas a controladores PID, sendo o campo monitorado por sensores Hall.

Foram desenvolvidos sistemas de cancelamento ativo de campo e blindagens passivas para minimizar o campo estático ambiente ( $\sim 20 \mu\text{T}$ ). No caso das blindagens passivas foram usadas câmaras monocamada de pequenas dimensões para pontas de gaussímetros (campos residuais da ordem de 10 nT), câmaras multicamada para pontas mais sensíveis, como as “*gama probes*” (campos residuais da ordem de 1 nT), e uma câmara de grandes dimensões com três camadas de Mu-metal, dotadas de bobinas de desmagnetização (campos residuais da ordem de 0,1 nT).

Tabela 1: Escopo de acreditação com faixas de medição e melhor capacidade de medição.

<b>Bobina para Geração de Campo Magnético AC</b>	1 $\mu\text{T}$ até 50 mT (40 Hz até 1 kHz)	0,17 %*
	> 50 mT até 3,4 T (40 Hz até 1 kHz)	0,15 %*
<b>Bobina para Geração de Campo Magnético DC</b>	1 $\mu\text{T}$ até 50 mT	0,069 %*
	> 50 mT até 3,4 T	19 ppm*
	> 3,4 T até 10 T	0,069 %*
<b>Medidor de Campo Magnético AC</b>	1 $\mu\text{T}$ até 500 $\mu\text{T}$ (40 Hz até 400 Hz)	0,43 %*
	1 $\mu\text{T}$ até 500 $\mu\text{T}$ (>400 Hz até 1 kHz)	0,74 %*
<b>Medidor de Campo Magnético DC</b>	1 $\mu\text{T}$ até 50 mT	0,070 %*
	> 50 mT até 2,2 T	81 ppm*
<b>Medidor de Fluxo Magnético AC</b>	10 $\mu\text{Wb}$ até 1 GWb (10 Hz até 1 MHz)	76 ppm até 0,39 %*
<b>Medidor de Fluxo Magnético DC</b>	1 $\mu\text{Wb}$ até 1 GWb	4,7 ppm até 960 ppm*

## 6. ESCOPO DE ACREDITAÇÃO

A Relação Padronizada de Serviços Acreditados para Laboratórios de Calibração (norma NIT-DICLA-012) mostra o escopo completo de acreditação dos laboratórios pertencentes à Rede Brasileira de Calibração – RBC [1]. Nota-se na tabela 1 que a acreditação não é especificada em função das grandezas, mas em relação ao tipo de serviço ou instrumento sob calibração.

## 7. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A realização das unidades básicas do magnetismo, e sua disseminação através de calibração de instrumentos, permite que toda a cadeia de rastreabilidade de grandezas magnéticas nas faixas de interesse tecnológico esteja disponível no Brasil. Para tanto, os procedimentos e as condições experimentais necessárias à operação de padrões primários e à execução de serviços de calibração foram desenvolvidos. Os próximos passos incluem a construção de bobinas refrigeradas com núcleos de ar para campos AC e DC de média intensidade ( $< 200 \text{ mT}$ ), e o desenvolvimento inédito da rastreabilidade AC diretamente por magnetometria NMR e sem uso de métodos indutivos.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] [http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/detalhe\\_laboratorio.asp?num\\_certificado=47&area=ELETRICIDADE%20E%20MAGNETISMO#](http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/detalhe_laboratorio.asp?num_certificado=47&area=ELETRICIDADE%20E%20MAGNETISMO#)
- [2] [http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gammappbar|search\\_for=shielded+proton+gyromagnetic+ratio](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gammappbar|search_for=shielded+proton+gyromagnetic+ratio)
- [3] 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.
- [4] Martin R V, Nazarre D J, ” Rastreabilidade para campos magnéticos alternados até 10 kHz” , Metrologia Ouro Preto, nov. 2013.

