

Desenvolvimento de um magnetômetro de ressonância magnética nuclear para campos fracos

Development of a nuclear magnetic resonance magnetometer for weak fields

Ramon Valls Martin, Diogo Joriro Nazarre

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

E-mail: ramon@ipt.br

Resumo: O padrão primário de indução ou intensidade de campo magnético aceito internacionalmente é baseado em magnetômetros de ressonância magnética nuclear ou *RMN*. Equipamentos deste tipo podem ser obtidos comercialmente para medir campos com homogeneidade e intensidades elevadas. Como não estão disponíveis para campos fracos, construímos um magnetômetro para operar nestas condições. Foi adotada a configuração do magnetômetro *RMN* de absorção com fluxo contínuo de água polarizada. Os resultados indicam que o instrumento permite fornecer rastreabilidade para induções entre 1,4 μT a mais de 2 T com resolução de 2 nT, a partir de um pico de absorção com largura típica de 2 Hz.

Palavras-chave: Metrologia magnética, magnetômetro *RMN*, campo magnético.

Abstract: The primary standard of induction or magnetic field intensity accepted internationally is based on nuclear magnetic resonance magnetometers or *NMR*. This kind of equipment can be obtained commercially to measure fields with high intensities and homogeneity. As it isn't available for weak fields, we built a magnetometer to operate under these conditions. It was adopted the configuration of a *NMR* absorption magnetometer with continuous water flow. The results indicate that the instrument can provide traceability for inductions between 1.4 μT to over 2 T, resolution of 2 nT, from an absorption peak with 2 Hz of typical width.

Keywords: Magnetic metrology, *NMR* magnetometer, magnetic field.

1. INTRODUÇÃO

A ressonância magnética nuclear (*RMN*) é o fenômeno adotado mundialmente para prover rastreabilidade para grandezas magnéticas. Magnetômetros baseados neste princípio, usados como padrões primários, podem ser de absorção ou de livre precessão [1]. Magnetômetros

comerciais de absorção com excitação contínua ou pulsada têm uma limitada faixa dinâmica. Tipicamente são empregados para medir intensidades acima de 50 mT. Para os campos menos intensos são usados os magnetômetros de livre precessão. Este modo de operação permite apenas medições em campos de elevada homogeneidade e estabilidade. Com o objetivo

de estender o uso do magnetômetro RMN de absorção para baixas intensidades, e permitir sua utilização em campos com baixa homogeneidade, foi construído um magnetômetro com fluxo de água polarizada [2]. Foi usado um Teslameter Metrolab PT2025 para medir o nível de polarização d'água. Esta configuração foi inicialmente testada num arranjo experimental montado com eletroímãs de laboratório de grande porte [3], [4]. Neste trabalho é detalhada a construção de um equipamento portátil e otimizado para aplicações metrológicas.

A intensidade de campo medida neste tipo de equipamento é sempre expressa em termos de frequência e então convertida para unidades de campo (H em A/m) ou indução magnética (B em T com $B = \mu_0 H$) em função da constante giromagnética do próton. O pico de absorção é obtido a partir da amplitude dos pulsos de RMN, enquanto a frequência de excitação é varrida continuamente entre limites pré-fixados. A frequência central do pico de absorção equivale à intensidade de campo médio no volume da ponta de medição. Ao contrário de medidores vetoriais (gaussímetros Hall, fluxgates, magnetoresistores) o campo medido é sempre o módulo do campo total. A condição mais crítica ocorre na medição de campos de baixas intensidades, quando há uma degradação da relação S/R.

2. MAGNETÔMETROS DE FLUXO CONTÍNUO DE ÁGUA

Num magnetômetro RMN convencional, uma amostra rica em prótons (cilindro de borracha ou ampola de água) é o núcleo da bobina que forma o transdutor responsável pela detecção da precessão dos prótons. No magnetômetro de fluxo contínuo, o material estático do núcleo do detector é substituído por um fluxo contínuo de água em circuito fechado e com alta polarização magnética. O estado de polarização magnética se caracteriza por um grande alinhamento dos spins dos prótons de hidrogênio. Um campo de 8º Congresso Brasileiro de Metrologia, Bento Gonçalves/RS, 2015

excitação na frequência de Larmor é aplicado na região do campo a ser medido e causa uma perda de polarização na água. Esta variação será detectada no retorno d'água ao polarizador. A seguir os componentes principais são detalhados:

2.1. Polarizador

É composto por um circuito hidráulico em que uma bomba de alta pressão pressuriza água pura em um recipiente sujeito a campos magnéticos intensos produzidos por ímãs de NdFeB, como mostrado na figura 1. A relação entre a vazão d'água e o volume do magnetizador deve ser tal que permita um tempo de permanência da água maior que o seu tempo característico de relaxação T1 e T2. Quanto maior for o nível de polarização, maior será o sinal detectado.

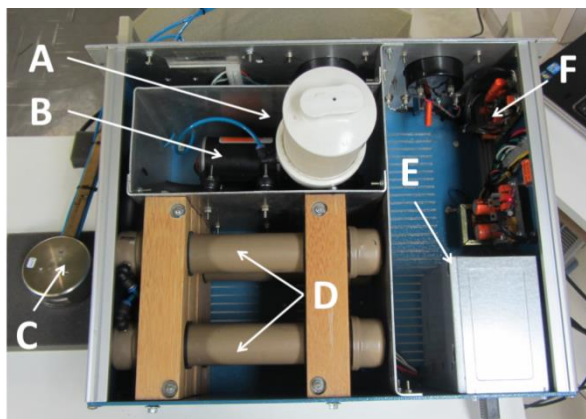


Figura 1. Partes do polarizador: A- Câmara de expansão e filtro; B- Bomba; C- Detector; D- Vasos com ímãs de NdFeB; E- Fonte ajustável da bomba; F- Circuitos do amplificador e detector "lock-in".

2.2. Detector

O detector mede o nível de polarização d'água e foi montado a partir de um "probe" Metrolab 1062-3-10M modificado para a medida de fluxo contínuo de água. O campo de detecção de 0,3 T é produzido por um padrão de ímãs permanentes com alta homogeneidade Metrolab PM-1055-027S. O Teslameter PT2025 de campos intensos fornece pulsos NMR de saída com amplitude proporcional ao nível de polarização. O detector é mostrado na figura 2.

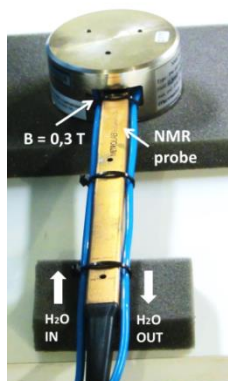


Figura 2. Detector de pulsos NMR com padrão de ímãs permanentes operando em 0,3 T.

2.2. Excitador

A ponta de medição é constituída simplesmente pelo duto e por uma bobina na região do campo magnético a ser medido. Esta bobina é alimentada por um gerador AC, que aplica uma excitação em torno da frequência de Larmor na água polarizada. Sua configuração pode ser alterada para melhorar a relação S/R e resolução do equipamento em função do tipo de campo ou bobina geradora a ser medida. Algumas possibilidades incluem pequenos solenoides enrolados diretamente sobre o duto da água, bobinas em forma de sela, bobinas de Helmholtz e bobinas toroidais.

3. RESULTADOS

O arranjo experimental mostrado na figura 3 foi usado para medir o campo produzido pela bobina de alta homogeneidade (Magnet-Physik MSK-101A) da figura 4. O campo ambiente foi medido otimizando os parâmetros de operação do equipamento (vazão, tensão de excitação, comprimento dos dutos). Na figura 5 são mostrados os pulsos de NMR antes e depois da detecção em $2f$. Um dos parâmetros mais relevantes para definir a qualidade do instrumento é a largura da linha de detecção. A figura 6 indica que a largura típica foi de 2 Hz à meia altura do pico.

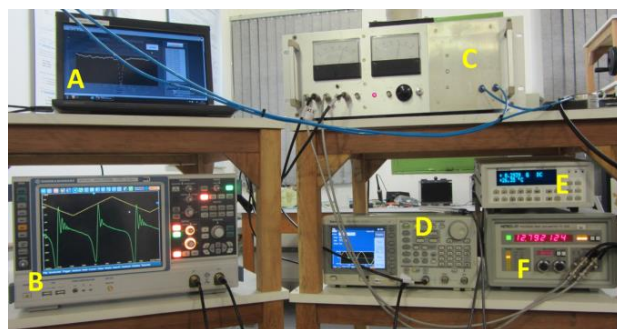


Figura 3. Arranjo experimental: A- Computador (aquisição de dados e controle); B- Osciloscópio (monitoração dos pulsos de RMN); C- Polarizador ("magnetização" da água); D- Gerador de varredura (sinal de excitação); E- Gaussímetro (localização prévia do pico); F- Teslameter (detecção do nível de polarização).

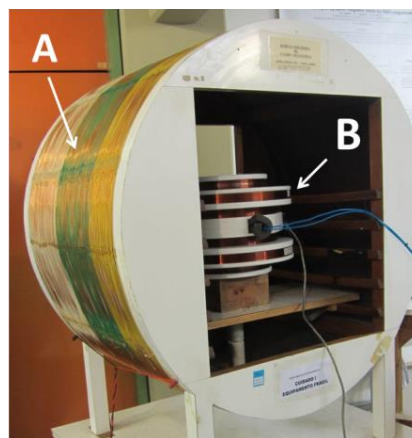


Figura 4. Sistema para geração de campos fracos: A- Solenoide de compensação e radiofrequência; B- Bobina geradora de alta homogeneidade.

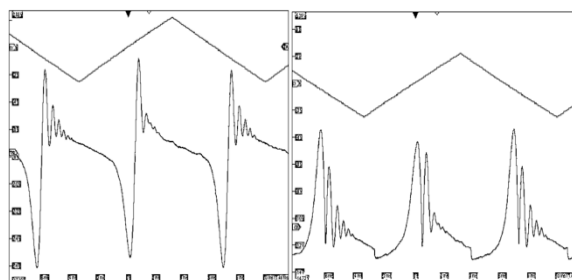


Figura 5. O campo triangular de modulação do detector e os pulsos RMN, à esquerda. O resultado da detecção síncrona sem filtragem (amplificador "lock-in" operando em $2 * f_{modulação}$), à direita.

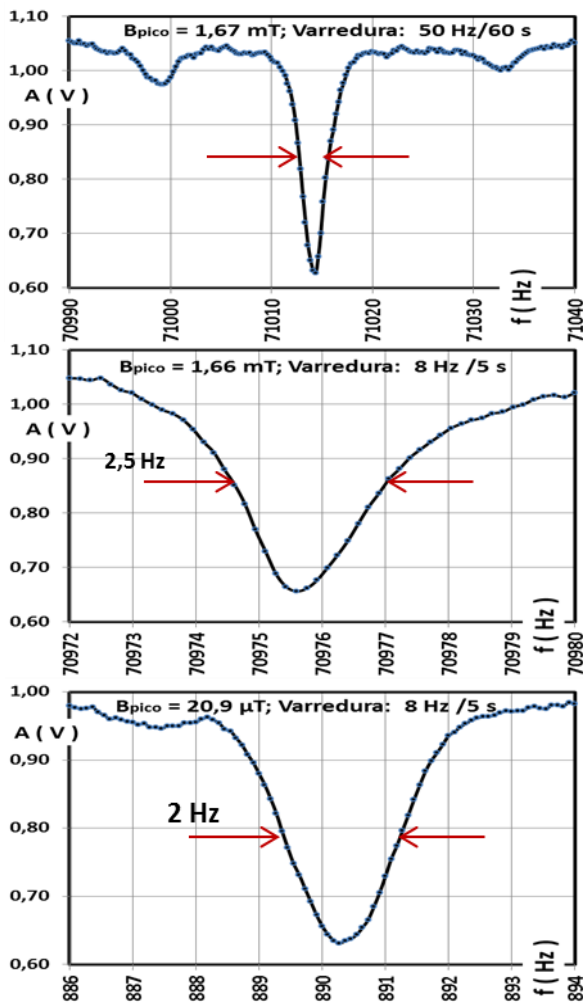


Figura 6. Picos de absorção do magnetômetro RMN em campo de 1,7 mT e no campo ambiente (geomagnético) de 21 μ T.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Foram obtidos picos com larguras típicas de 2 Hz (medidas a 50 % da altura) com resolução da posição central (obtida com auxílio de curvas de ajuste) abaixo de 0,1 Hz. Isto equivale a uma resolução de 2 nT na intensidade do campo. Considerando a determinação da frequência central como a maior fonte de incertezas, o magnetômetro mostrou-se capaz de medir o campo ambiente (21 μ T) com 100 ppm de incerteza relativa e o campo de 1,7 mT com 1,5 ppm. A largura do pico é associada ao gradiente do campo e não diretamente à sua intensidade.

Na prática, porém, as bobinas criam gradientes proporcionais às intensidades dos campos gerados, e a largura do pico de absorção de NMR está diretamente relacionada à homogeneidade destes campos. Outras fontes de incerteza, que podem causar um aparente alargamento do pico, incluem flutuações do campo geomagnético e deriva térmica das bobinas. Há uma lenta dilatação da bobina com a dissipação de calor nos enrolamentos, e consequentemente uma diminuição do campo gerado. O pico desloca-se continuamente no sentido das frequências menores, limitando o tempo de varredura máximo.

Caso campos intensos sejam gerados por bobinas de alta homogeneidade, estabilizadas termicamente, e em ambiente sem ruído magnético, a resolução do instrumento pode chegar a faixa de “sub-ppm”. Estas estimativas mostram o grande potencial do equipamento para aplicações metrológicas. A faixa prática de utilização pode se estender a mais de 2,5 T no limite superior (~100 MHz), sendo limitada a 1,4 μ T no outro extremo. Esta limitação é devida basicamente ao ruído magnético gerado pela rede de alimentação de 60 Hz no ambiente de medição.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Weyand k, Maintenance and Dissemination of the Magnetic Field Unit at PTB, *IEEE I-M*, **50**, 2, pp 470-473, April 2001.
- [2] Woo B C, Kim C G, Po Gyu Park, Kim C S, Low magnetic field measurement by a separated NMR detector using flowing water, *IEEE Transactions on Magnetics*, **33**, 5, pp 4345-4348, sep1997.
- [3] Martin R V, Implementação de Sistema para Obtenção de Rastreabilidade de Grandezas Magnéticas Estáticas, Anais 6º Congresso Brasileiro de Metrologia, Natal, set 2011.
- [4] Martin R V, Nazarre D J, Sistema de ressonância magnética com fluxo contínuo de água polarizada para obtenção da rastreabilidade para campos magnéticos estáticos, Anais 7º Congresso Brasileiro de Metrologia, Ouro Preto/MG, nov 2013.