

Ressonância magnética nuclear de bancada baseada em arranjos Halbach aplicada à agricultura: Uma revisão da literatura

Benchtop nuclear magnetic resonance based on Halbach arrays applied to agriculture: A literature review

Resonancia magnética nuclear de sobremesa basada en matrices Halbach aplicada a la agricultura: Una revisión de la literatura

Recebido: 09/01/2026 | Revisado: 30/01/2026 | Aceitado: 31/01/2026 | Publicado: 01/02/2026

Mardoqueu Martins da Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4395-3069>

Universidade Brasil, Brasil

E-mail: mardoqueu.costa@ub.edu.br

André Martins

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6272-9037>

Universidade Brasil, Brasil

E-mail: anndreh@gmail.com

Tiago Bueno de Moraes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4941-6264>

Universidade de São Paulo, Brasil

E-mail: tiago.moraes@usp.br

Resumo

A Ressonância Magnética Nuclear (RMN) de baixo campo baseada em magnetos permanentes tem emergido como uma alternativa promissora aos sistemas convencionais de alto campo, especialmente para aplicações fora do ambiente laboratorial. Neste contexto, os arranjos de ímãs do tipo Halbach destacam-se por sua capacidade de gerar campos magnéticos intensos, homogêneos e auto-blindados em dispositivos compactos e de baixo custo operacional. O objetivo deste artigo é revisar de forma crítica o estado da arte da RMN de bancada baseada em arranjos Halbach e suas aplicações no setor agrícola e agroalimentar. A metodologia adotada consistiu em uma revisão sistemática da literatura científica publicada nas últimas décadas, abordando desde os fundamentos físicos da RMN de baixo campo, princípios de relaxometria e engenharia de magnetos Halbach, até estratégias avançadas de homogeneização de campo, estabilidade térmica e processamento de sinais. São discutidas aplicações relevantes em fenotipagem e fisiologia vegetal in vivo, monitoramento hídrico de solos, avaliação da qualidade de sementes e grãos, ciência da carne, controle de qualidade de alimentos e monitoramento de nutrientes e biocombustíveis. Os estudos analisados demonstram que sensores RMN baseados em Halbach possibilitam análises rápidas, não destrutivas e volumétricas diretamente em campo ou em linhas de processamento, superando limitações de métodos ópticos superficiais. Conclui-se que a integração de arranjos Halbach com técnicas avançadas de processamento de sinais, quimiometria e inteligência artificial representa um caminho estratégico para a democratização da RMN e para o avanço da agricultura de precisão e do controle de qualidade agroindustrial.

Palavras-chave: Ressonância Magnética Nuclear de baixo campo; Arranjos magnéticos de Halbach; Análise não destrutiva; Aplicações agrícolas e alimentares.

Abstract

Low-field Nuclear Magnetic Resonance (NMR) based on permanent magnets has emerged as a promising alternative to conventional high-field systems, especially for applications outside the laboratory environment. In this context, Halbach-type magnet arrays stand out for their ability to generate intense, homogeneous, and self-shielded magnetic fields in compact devices with low operating costs. The objective of this article is to critically review the state of the art of benchtop NMR based on Halbach arrays and its applications in the agricultural and agri-food sector. The methodology adopted consisted of a systematic review of the scientific literature published in recent decades, covering topics ranging from the physical fundamentals of low-field NMR, principles of relaxometry and Halbach magnet engineering, to advanced strategies for field homogenization, thermal stability, and signal processing. Relevant applications in phenotyping and in vivo plant physiology, soil water monitoring, seed and grain quality assessment, meat science, food quality control, and nutrient and biofuel monitoring are discussed. The analyzed studies demonstrate that Halbach-based NMR sensors enable rapid, non-destructive, and volumetric analyses directly in the field or in processing lines, overcoming limitations of surface optical methods. It is concluded that the

integration of Halbach arrays with advanced signal processing techniques, chemometrics, and artificial intelligence represents a strategic path for the democratization of NMR and for the advancement of precision agriculture and agro-industrial quality control.

Keywords: Low-field Nuclear Magnetic Resonance; Halbach magnetic arrays; Non-destructive analysis; Agricultural and food applications.

Resumen

La resonancia magnética nuclear (RMN) de bajo campo basada en imanes permanentes se ha convertido en una alternativa prometedora a los sistemas convencionales de alto campo, especialmente para aplicaciones fuera del laboratorio. En este contexto, los arreglos magnéticos tipo Halbach destacan por su capacidad para generar campos magnéticos intensos, homogéneos y autoprottegidos en dispositivos compactos con bajos costos operativos. El objetivo de este artículo es realizar una revisión crítica del estado del arte de la RMN de sobremesa basada en arreglos Halbach y sus aplicaciones en el sector agrícola y agroalimentario. La metodología adoptada consistió en una revisión sistemática de la literatura científica publicada en las últimas décadas, abarcando temas que abarcan desde los fundamentos físicos de la RMN de bajo campo, los principios de la relaxometría y la ingeniería magnética de Halbach, hasta estrategias avanzadas de homogeneización de campo, estabilidad térmica y procesamiento de señales. Se discuten aplicaciones relevantes en fenotipado y fisiología vegetal in vivo, monitoreo de agua en el suelo, evaluación de la calidad de semillas y granos, ciencias de la carne, control de calidad de alimentos y monitoreo de nutrientes y biocombustibles. Los estudios analizados demuestran que los sensores de RMN basados en Halbach permiten análisis rápidos, no destructivos y volumétricos directamente en campo o en líneas de procesamiento, superando las limitaciones de los métodos ópticos de superficie. Se concluye que la integración de los arrays de Halbach con técnicas avanzadas de procesamiento de señales, quimiometría e inteligencia artificial representa una vía estratégica para la democratización de la RMN y el avance de la agricultura de precisión y el control de calidad agroindustrial.

Palabras clave: Resonancia Magnética Nuclear de bajo campo; Matrices magnéticas Halbach; Análisis no destructivo; Aplicaciones agrícolas y alimentarias.

1. Introdução

A Ressonância Magnética Nuclear (RMN) consolidou-se, ao longo das últimas décadas, como uma técnica analítica versátil e poderosa para a investigação não invasiva da matéria em escala molecular (Danieli et al., 2010; Telfah et al., 2023a). Sua capacidade de fornecer informações detalhadas sobre a estrutura química, dinâmica de fluidos e relaxometria permitiu avanços em campos que variam da medicina diagnóstica à engenharia química e ciência dos materiais (Balthazar et al., 2021; Castaing-Cordier et al., 2021; Zaleskiy et al., 2014). No entanto, a aplicação convencional da RMN enfrenta um "gargalo tecnológico": a dependência de campos magnéticos intensos e ultra-homogêneos, tradicionalmente gerados por magnetos supercondutores massivos. Tais sistemas exigem infraestruturas laboratoriais complexas, incluindo blindagem contra radiofrequência e manutenção criogênica de alto custo com hélio e nitrogênio líquidos, o que restringe o uso da técnica a ambientes controlados e inviabiliza sua aplicação direta em locais de produção ou no campo (Castaing-Cordier et al., 2021; Danieli et al., 2010; Kirtil et al., 2017; Silva Terra et al., 2024).

Em resposta a essas limitações, surgiu a Ressonância Magnética Nuclear de baixo campo (LF-NMR), fundamentada no uso de magnetos permanentes (Blümich, 2019; Blümmler & Soltner, 2023; Grootveld et al., 2019; Kirtil et al., 2017). O foco central desta revisão são os arranjos de ímãs de Halbach, uma inovação em engenharia magnética proposta originalmente por John Mallinson e Klaus Halbach (Blümmler & Soltner, 2023; Grootveld et al., 2019). O princípio consiste em uma magnetização que oscila espacialmente de tal forma que o fluxo magnético se reforça em um lado da estrutura enquanto é cancelado quase totalmente no lado oposto (Blümmler & Soltner, 2023). Em geometrias cilíndricas, essa topologia gera um campo magnético estático (B_0) altamente intenso e homogêneo em seu interior, transversal ao eixo axial, permitindo a utilização de bobinas solenoides que possuem maior sensibilidade e fator de preenchimento do que outras geometrias (Blümmler & Soltner, 2023; Telfah et al., 2023b).

A justificativa para esta revisão reside na crescente necessidade de transpor a precisão laboratorial para o contexto da Agricultura e do Controle de Processos Analíticos (PAC) (Colnago et al., 2021; Janvrin et al., 2025; Soyler et al., 2021b). Os

arranjos Halbach permitem a democratização da RMN por meio de dispositivos portáteis e de baixo custo operacional, dispensando energia externa para a manutenção do campo e eliminando riscos de segurança associados a grandes campos de dispersão (Blümmler & Soltner, 2023; Chen et al., 2025; Mandal, 2026a). Recentemente, inovações no design, como o conceito NMR-CUFF (magnetos articulados que podem ser abertos sem força excessiva), permitiram o monitoramento in vivo de plantas e árvores sem a necessidade de destruição da amostra (Blümmler & Soltner, 2023; Windt et al., 2011). Além disso, a capacidade desses sistemas de distinguir populações de água livre e ligada por relaxometria no domínio do tempo (TD-NMR) oferece uma ferramenta diagnóstica única para avaliar o estresse hídrico em solos, a qualidade de sementes e a autenticidade de alimentos diretamente no local de origem (Blümmler & Soltner, 2023; Colnago et al., 2021; Santos et al., 2016).

Este artigo está organizado de forma a prover uma visão integrada desta tecnologia. Primeiramente, serão abordados os fundamentos físicos e os mecanismos de ação da RMN de baixo campo, incluindo os princípios de relaxometria. Em seguida, a seção de engenharia discutirá técnicas de construção, designs multicamadas e estratégias avançadas de homogeneização de campo (shimming). Posteriormente, a revisão detalhará as aplicações biofísicas no setor agrícola, subdivididas em fenotipagem de sementes, fisiologia vegetal e física de solos. Por fim, a discussão sintetizará os resultados mais promissores, apontando os desafios técnicos e as tendências futuras, como o uso de inteligência artificial no processamento de sinais e a integração com sensores IoT.

O objetivo deste artigo é revisar de forma crítica o estado da arte da RMN de bancada baseada em arranjos Halbach e suas aplicações no setor agrícola e agroalimentar.

2. Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura (Fernandes, Vieira & Castelhana, 2023; Casarin et al., 2020; Rother, 2007) e num estudo exploratório e de natureza quantitativa (Pereira et al., 2018; Gil, 2017). A busca bibliográfica foi conduzida nas bases de dados Scopus, Web of Science e Google Scholar, utilizando combinações dos seguintes descritores em inglês: "low-field NMR", "Halbach magnet", "TD-NMR", "benchtop NMR", "portable NMR", combinados com termos aplicados como "agriculture", "food quality", "seed analysis", "plant physiology" e "soil moisture".

Os critérios de inclusão abrangeram: (a) artigos originais e revisões publicados em periódicos indexados com revisão por pares; (b) estudos que abordassem fundamentos teóricos da RMN de baixo campo; (c) trabalhos sobre engenharia e construção de arranjos magnéticos Halbach; (d) publicações sobre técnicas de homogeneização de campo (shimming) e estabilidade térmica; e (e) aplicações práticas em fenotipagem vegetal, análise de sementes, monitoramento de solos, ciência de alimentos e biocombustíveis. Foram excluídos estudos que tratassem exclusivamente de RMN de alto campo sem aplicabilidade portátil, bem como resumos de congressos e literatura cinzenta sem dados experimentais.

O levantamento bibliográfico contemplou publicações das últimas duas décadas, com ênfase no período de 2015 a 2025, devido à intensificação das pesquisas em miniaturização de sistemas de RMN e sua aplicação em contextos agrícolas. A seleção inicial identificou aproximadamente 150 publicações potencialmente relevantes, das quais 47 foram incluídas na síntese final após leitura crítica dos títulos, resumos e textos completos.

A análise do material selecionado seguiu uma abordagem temática, organizando os achados em três eixos principais: (i) fundamentação teórica e mecanismos físicos da RMN de baixo campo; (ii) engenharia de magnetos Halbach, incluindo materiais, topologias e técnicas de shimming; e (iii) aplicações no setor agrícola e agroalimentar, subdivididas por área de aplicação. Esta estruturação permitiu uma síntese crítica que integra os avanços tecnológicos aos desafios práticos da implementação da RMN portátil em ambientes de produção.

3. Fundamentação Teórica e Mecanismos de Ação

3.1 Princípios físicos e efeito Zeeman

A RMN fundamenta-se nas propriedades magnéticas intrínsecas de núcleos atômicos que possuem um número ímpar de prótons ou nêutrons, o que lhes confere um spin nuclear não nulo (Mandal, 2026b). Classicamente, tais núcleos podem ser visualizados como minúsculos loops de corrente que possuem um momento de dipolo magnético (μ) e precessão em torno de um campo magnético externo aplicado (B_0), de forma análoga ao movimento de um giroscópio em um campo gravitacional (Mandal, 2026b). Sob a perspectiva da mecânica quântica, a exposição a B_0 induz a divisão dos níveis de energia nuclear em estados discretos, fenômeno conhecido como efeito Zeeman (Mandal, 2026b). A transição entre esses níveis ocorre na frequência de Larmor (ω_0), definida pela relação fundamental $\omega_0 = \gamma B_0$, onde γ representa a razão giromagnética característica de cada isótopo (Balthazar et al., 2021; Mandal, 2026b; Miao et al., 2024). O próton (1H) é o núcleo mais explorado em aplicações agrícolas e biofísicas devido à sua alta abundância natural e elevada sensibilidade magnética (Colnago et al., 2021).

3.2 Magnetização macroscópica e equações de Bloch

Em equilíbrio térmico, a dominância da energia térmica sobre a interação Zeeman resulta em uma orientação quase aleatória dos spins; contudo, a pequena diferença populacional entre os estados de energia gera uma magnetização líquida macroscópica (M) alinhada ao campo estático (Huang et al., 2025; Mandal, 2026b). A evolução temporal de M sob a influência de campos magnéticos externos é descrita pelas equações de Bloch (Mandal, 2026b; Miao et al., 2024). Quando o sistema é perturbado por um campo de radiofrequência (B_1) ressonante, a magnetização é rotacionada para o plano transversal, iniciando o fenômeno de precessão que induz uma força eletromotriz detectável em bobinas de recepção pelo princípio da reciprocidade (Mandal, 2026b; Michal, 2020).

3.3 Dinâmica de relaxometria (T_1 e T_2)

O retorno de M ao equilíbrio térmico ocorre por meio de dois processos de relaxação distintos:

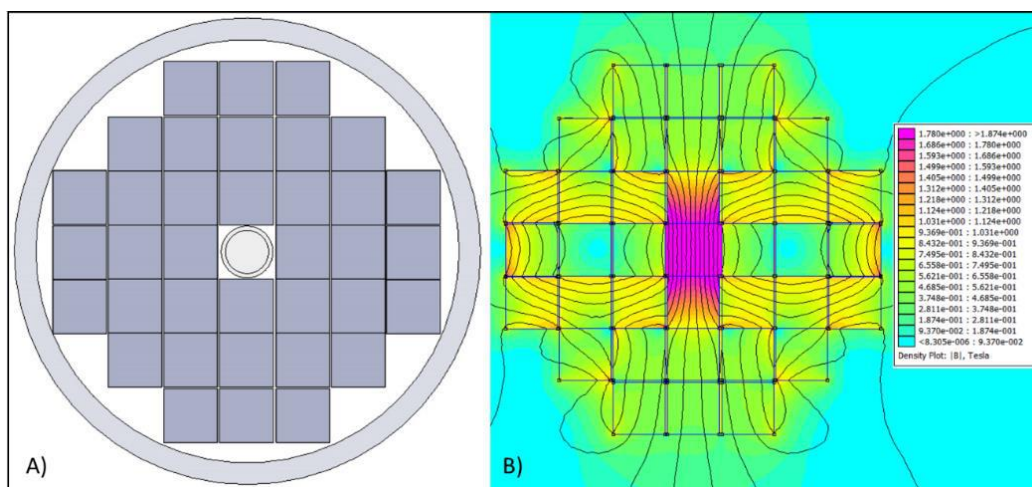
Relaxação Longitudinal (T_1): Também chamada de relaxação spin-rede, descreve a recuperação da componente de magnetização ao longo do eixo z através da troca de energia com o ambiente térmico circundante (Balthazar et al., 2021; Mandal, 2026b).

Relaxação Transversal (T_2): Ou relaxação spin-spin, refere-se ao desfasamento da magnetização no plano xy devido a interações dipolares locais entre spins vizinhos, sem perda líquida de energia para a rede (Balthazar et al., 2021; Chen et al., 2025; Clarke et al., 2025). A relaxometria no domínio do tempo (TD-NMR) é a base de sensores portáteis, onde o decaimento transversal observado é frequentemente dominado por inomogeneidades de campo, resultando em uma constante de tempo efetiva T_2 (Mandal, 2026b; Miao et al., 2024). A teoria de Bloembergen-Purcell-Pound (BPP) estabelece que essas taxas de relaxação são intrinsecamente ligadas ao tempo de correlação rotacional (τ_c), permitindo inferir propriedades como viscosidade, porosidade e dinâmica molecular de tecidos vegetais e solos (Chen et al., 2025).

3.4 Teoria dos arranjos de Halbach e topologia de campo

Os arranjos magnéticos de Halbach, são configurações de ímãs permanentes projetadas para concentrar o fluxo magnético em uma região específica enquanto o cancelam quase totalmente no lado oposto (Chen et al., 2025; Giberson et al., 2021). Uma implementação prática deste conceito pode ser observada na Figura 1 que apresenta A) o Projeto mecânico do magneto Halbach com ímã quadrado com 36 unidades e B) a Simulação dos campos Magnéticos, evidenciando a alta densidade de fluxo no centro do arranjo.

Figura 1 – A) Projeto mecânico do magneto Halbach construído com 36 unidades de ímãs quadrados discretos. B) Simulação dos campos Magnéticos (mapa de cores e linhas de fluxo), demonstrando a homogeneidade e intensidade do campo na região central e o cancelamento do campo externo.



Fonte: Autoria própria (2026).

Em um cilindro de Halbach ideal ($k=1$), a magnetização (M) dos segmentos gira continuamente de tal forma que a orientação segue a relação $\alpha=2\theta$, onde θ é o ângulo azimutal geométrico (Blümli & Soltner, 2023). Este design gera um campo B_0 transversal ao eixo axial do cilindro (Blümli & Soltner, 2023). Diferente de magnetos supercondutores axiais, o campo transversal de Halbach permite o uso de bobinas solenoides que envolvem a amostra, resultando em uma sensibilidade e fator de preenchimento significativamente superiores (Huang et al., 2025). Além disso, a eficiência de campo por unidade de massa em topologias Halbach permite que sistemas compactos alcancem campos estáveis entre 0,5 T e 1,5 T, viabilizando a transição da RMN para ambientes de campo (Blümli & Soltner, 2023).

3.5 Mecanismo de ecos de spin e sequência CPMG

Devido à inhomogeneidade inerente dos campos gerados por magnetos permanentes portáteis, a detecção direta do sinal de decaimento por indução livre (FID) é dificultada pelo rápido desfasamento dos spins (Keating et al., 2020; Mandal, 2026b; Miao et al., 2024). Para mitigar este efeito, aplica-se a técnica de eco de spin, na qual pulsos de refocalização de 180° invertem a distribuição de isocromatos (pacotes de spins com a mesma frequência), permitindo que spins "rápidos" e "lentos" se realinhem em momentos específicos (Janvrin et al., 2025; Mandal, 2026b). A sequência Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) é o padrão-ouro em LF-NMR, utilizando trens de pulsos de 180° para gerar uma série de ecos cuja curva de amplitude decai puramente com a constante T_2 (Colnago et al., 2021; Janvrin et al., 2025; Keating et al., 2020). Esta robustez contra gradientes de campo é o que permite a aplicação da RMN em amostras complexas e heterogêneas, como solos com alto conteúdo mineral ou sementes (Janvrin et al., 2025; Keating et al., 2020; Miao et al., 2024).

4. Magnetos Halbach e técnicas de Construção

4.1 Seleção de materiais e propriedades magnéticas

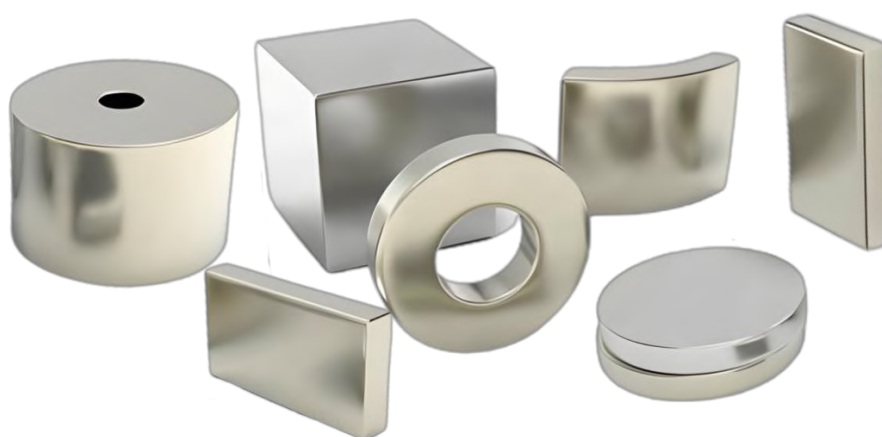
Os arranjos Halbach modernos foi viabilizada pela invenção dos ímãs de terras-raras nas décadas de 1970 e 1980, que apresentam coercitividades e remanências substancialmente superiores às ferritas ou materiais de AlNiCo (Blümli & Soltner, 2023; Tayler & Sakellariou, 2017). Os materiais mais empregados são o Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) e o Samário-Cobalto

(SmCo) (Huang et al., 2025). O NdFeB oferece o maior produto de energia máxima (BH_{\max}), variando entre 35 e 52 MGOe, o que permite a geração de fluxos magnéticos intensos em volumes compactos (Huang et al., 2025; Mandal, 2026a).

Entretanto, o NdFeB é mecanicamente frágil, sensível à corrosão e apresenta uma dependência térmica significativa, com um coeficiente de remanência de aproximadamente $-0,11\%/^{\circ}\text{C}$ a $-0,12\%/^{\circ}\text{C}$ (Mandal, 2026a; Peng et al., 2025). Em contrapartida, o SmCo, embora possua um BH_{\max} menor (cerca de 22 MGOe), é preferido em aplicações de campo, como o perfilamento de poços de petróleo, devido à sua maior estabilidade térmica e temperatura de Curie elevada (até 750°C), suportando ambientes que excederiam os limites operacionais do NdFeB (Huang et al., 2025; Mandal, 2026a).

Devido a essa alta densidade de energia e demanda comercial, é possível encontrar diferentes formatos e tamanhos de ímã de Neodímio, como ilustrado na Figura 2 que exhibe peças em forma de blocos retangulares, cubos, discos, cilindros, anéis perfurados e segmentos de arco.

Figura 2 - Diferentes formatos e tamanhos de ímãs de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), como blocos, cilindros, anéis e segmentos de arco, apresentando revestimento protetor superficial.

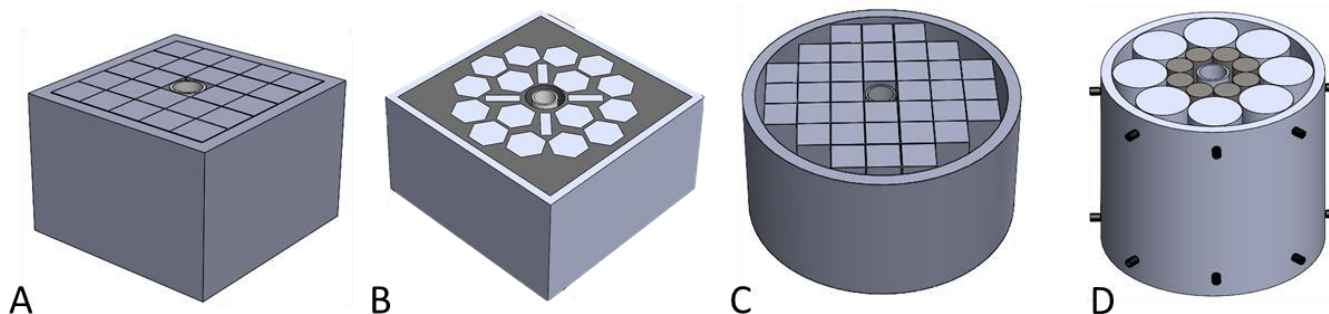


Fonte: Autoria própria (2026).

4.2 Topologia de campo e discretização da magnetização

O arranjo Halbach ideal fundamenta-se em uma magnetização que oscila espacialmente de forma contínua ao longo de uma geometria cilíndrica ou plana. Em cilindros de Halbach para RMN, a magnetização do material (M) gira $2\pi k$ ao longo de uma circunferência, onde $k=1$ define um dipolo que gera um campo B_0 homogêneo e transversal ao eixo do cilindro no seu interior, cancelando o campo externamente (Blümler & Soltner, 2023). Como a magnetização contínua é tecnicamente inviável, a construção real exige a discretização em N segmentos magnéticos.

Figura 3 - Exemplos de discretização de arranjos Halbach com diferentes geometrias de ímãs para otimização da uniformidade e intensidade do campo: A) Configuração em matriz quadrada (tipo Mandhala); B) Arranjo com segmentos hexagonais; C) Geometria circular aproximada por blocos quadrados; D) Arranjo utilizando ímãs cilíndricos.



Fonte: Autoria própria (2026).

De acordo com o teorema de amostragem de Nyquist, o nível de discretização deve ser de pelo menos $N \geq 2k$ para manter a pureza multipolar (Blümmler & Soltner, 2023). Essa segmentação introduz um fator de redução no campo interno (j_0), que se aproxima da unidade à medida que N aumenta; por exemplo, um arranjo de 16 segmentos retém cerca de 97,4% da força de um cilindro ideal (Turek & Liszkowski, 2014). O uso de blocos idênticos, conceito conhecido como Mandhalas (Raich & Blümmler, 2004), simplifica o design e reduz custos, permitindo que as variações estatísticas de magnetização (que podem chegar a 5%) sejam canceladas através do posicionamento otimizado dos blocos baseado em mapas de campo prévios (Blümmler & Soltner, 2023).

4.3 Efeitos de truncagem e stack axial

Diferente do modelo teórico de comprimento infinito, magnetos Halbach realistas sofrem efeitos de truncagem que degradam severamente a homogeneidade nas extremidades do cilindro (Blümmler & Soltner, 2023; Danieli et al., 2010). A queda da densidade de fluxo nas bordas limita o volume sensível útil (DSV - *Diameter Spherical Volume*) (Mandal, 2026a; Yu et al., 2022). Para mitigar essa limitação, a engenharia moderna emprega o empilhamento (*stacking*) de múltiplos anéis de Halbach com espaçamentos axiais calculados de forma análoga às bobinas de Helmholtz (Blümmler & Soltner, 2023; Windt et al., 2011; Yu et al., 2022). Pesquisas indicam que, em magnetos de baixo aspecto (curtos), a heterogeneidade é máxima ao longo do eixo z , exigindo que anéis vizinhos tenham frequentemente diâmetros externos maiores que o anel central para compensar o decaimento do fluxo axial (Yu et al., 2022).

4.4 Técnicas avançadas de homogeneização (*shimming*)

A homogeneidade residual após a montagem mecânica (tipicamente na ordem de 100 a 2000 ppm) é insuficiente para espectroscopia de alta resolução, demandando estratégias de correção (*shimming*) (Wang et al., 2023).

Shimming Mecânico: Envolve o deslocamento radial milimétrico de blocos retangulares ou a rotação de camadas internas aninhadas para ajustar harmônico de campo (Danieli et al., 2010; Telfah et al., 2023b; Wang et al., 2023). Sistemas integrados permitem ajustes micrométricos que corrigem inhomogeneidades de ordem superior (até a 4ª ordem) com precisão inacessível apenas por bobinas elétricas (Danieli et al., 2010; Wang et al., 2023).

Shimming Passivo: Utiliza fragmentos de ferro, placas de aço ou pequenos ímãs de correção posicionados estrategicamente na superfície interna do magneto (Blümmler & Soltner, 2023; Gao et al., 2025; Windt et al., 2011). Algoritmos genéticos (GA) e programação linear (LP) são empregados para determinar a massa e a localização exata desses "shims", permitindo reduzir a inhomogeneidade de 1229 ppm para 320 ppm em sistemas de 48 mT (Gao et al., 2025; Parker et al., 2016).

Shimming Ativo: Implementado via bobinas resistivas alimentadas por correntes estabilizadas (Telfah et al., 2023b; Xu et al., 2022). O principal desafio é a dissipação térmica, resolvida com revestimentos de zircônia e resinas de prata para evitar o superaquecimento dos ímãs permanentes (Gao et al., 2025; Telfah et al., 2023b).

4.5 Estabilidade térmica e gerenciamento de calor

A estabilidade do campo B_0 é criticamente dependente da temperatura, podendo sofrer drifts (deslocamento) de 300 a 1000 ppm para cada 1°C de variação. Duas abordagens principais são utilizadas:

Compensação Passiva: Combinação estratégica de materiais com diferentes coeficientes térmicos (ex.: SmCo e NdFeB) orientados de forma antiparalela, para que suas variações de campo se anulem mutuamente (Blümmler & Soltner, 2023; Mandal, 2026a; Zalesskiy et al., 2014).

Gestão Térmica Ativa (TMS): Uso de invólucros isolantes e sistemas de aquecimento controlado por controle proporcional integral derivativo (PID) (Peng et al., 2025). Designs avançados incorporam camadas de buffer térmico para filtrar oscilações de alta frequência do controlador, alcançando estabilidades de 0,004 °C e reduzindo o drift da frequência de Larmor para menos de 20 ppm em 24 horas (Peng et al., 2025).

4.6 Desafios de segurança e montagem

O manuseio de magnetos de terras-raras exige protocolos rigorosos de engenharia, pois as forças de atração em blocos de 10 cm³ podem exceder 1000 N, e arranjos montados podem gerar forças superiores a 10 kN (Blümmler & Soltner, 2023; Janvrin et al., 2025). A montagem segura frequentemente utiliza guias de alumínio, parafusos de latão não magnéticos e gabaritos que limitam o movimento lateral dos blocos durante a inserção (Huang et al., 2025; Janvrin et al., 2025; Tayler & Sakellariou, 2017). Projetos como o NMR-CUFF utilizam ângulos de abertura específicos (aprox. 35,3°) baseados no polinômio de Legendre de segunda ordem, onde as forças de atração e repulsão se equilibram, permitindo a abertura manual segura do magneto em torno de caules de plantas ou ramos (Blümmler & Soltner, 2023; Windt et al., 2011).

5. Aplicações no Setor Agrícola e de Alimentos

A transição da RMN de magnetos supercondutores para arranjos portáteis baseados em Halbach permitiu o seu uso em campo, estufas e linhas de processamento. Essa mudança metodológica é fundamental para preservar a integridade biológica e as condições ambientais reais das amostras. As seções a seguir detalham os avanços biofísicos e industriais alcançados na última década.

5.1 Fenotipagem e fisiologia vegetal in vivo

O monitoramento de plantas vivas representa um dos maiores avanços da tecnologia de magnetos permanentes baseados em arranjos Halbach. Diferente de métodos tradicionais que exigem a coleta de amostras, a Ressonância Magnética Nuclear (RMN) permite acompanhar, em tempo real e de forma não invasiva, parâmetros fisiológicos críticos como o conteúdo de água (WC), a matéria seca (DMC) e a dinâmica do fluxo de seiva (Colnago et al., 2021; Windt et al., 2011, 2021).

Monitoramento de Crescimento: Estudos recentes demonstraram a viabilidade técnica de medir a densidade de prótons líquidos e sólidos em tecidos vegetais intactos. Esta abordagem permitiu a observação contínua da hidratação em folhas de arroz submetidas a condições de estresse hídrico, bem como o acompanhamento do acúmulo de biomassa durante o processo de enchimento de grãos em espigas de trigo. Para viabilizar essas medidas durante o desenvolvimento da planta, foi essencial o emprego de bobinas de radiofrequência de tamanho ajustável, fundamentadas em designs de Helmholtz, que

acomodam o incremento do diâmetro dos caules sem a necessidade de re-sintonização do circuito eletrônico (Oligschläger et al., 2017; Windt et al., 2021).

Conceito NMR-CUFF: O desenvolvimento de magnetos articulados, denominados NMR-CUFF (Cut-open, Uniform, Force Free), solucionou a limitação física de acesso lateral a ramos e caules fixos, que anteriormente exigia que a amostra fosse inserida pelo topo ou fundo de cilindros fechados (Windt et al., 2011). Com uma massa de aproximadamente 3,1 kg, este dispositivo de 0,57 T utiliza um ângulo de abertura específico ($35,3^\circ$) derivado de soluções analíticas para magnetos Halbach ideais, o que permite que as forças magnéticas se anulem no plano de abertura, viabilizando o manuseio manual com força mínima de cerca de 20 N. Essa tecnologia permite estudos ecofisiológicos complexos, como a investigação de como plântulas de mangue (Rhizophoraceae) utilizam a água armazenada no hipocótilo e nas folhas para mitigar o estresse hídrico causado por flutuações na salinidade do solo (Lechthaler et al., 2016).

Fluxo de Seiva: A investigação do transporte hídrico em estruturas de maior porte foi demonstrada por protótipos como o "Tree Hugger", um sistema de imagem por ressonância magnética (MRI) transportável projetado para envolver troncos de árvores vivas com diâmetros de até 200 mm seca (Blümich, 2019; Zaleskiy et al., 2014). Adicionalmente, o uso de sensores baseados em arranjos Halbach equipados com gradientes magnéticos portáteis permitiu a medição quantitativa do fluxo de seiva no xilema de forma não invasiva (Windt et al., 2011; Zaleskiy et al., 2014). Esses sistemas possibilitam a correlação, em tempo real, da dinâmica hídrica interna com variáveis ambientais críticas, como radiação solar, temperatura e umidade relativa, oferecendo dados fundamentais para o manejo da irrigação e estudos de resistência à seca (Windt et al., 2011).

5.2 Física do solo e monitoramento hídrico

A aplicação da Ressonância Magnética Nuclear (RMN) para a medição direta do teor de água no solo consolidou-se como uma ferramenta fundamental para a agricultura de precisão, uma vez que o sinal detectado é diretamente proporcional ao número de prótons de hidrogênio presentes na fase líquida. Essa detecção quantitativa supera as limitações de métodos indiretos, como sensores capacitivos ou de reflectometria no domínio do tempo (TDR), que podem sofrer interferências de salinidade e composição mineral (Keating et al., 2020).

Sondas "Inside-Out": Diferentemente das geometrias convencionais de laboratório, estas sondas utilizam uma configuração magnética projetada para estender o campo estático B_0 para fora do dispositivo físico (Chen et al., 2025). Designs específicos, como o modelo de magnetos permanentes em formato de haltere, permitem que a excitação de radiofrequência e a detecção do sinal ocorram em um volume cilíndrico de solo ao redor da sonda inserida no terreno (Shen et al., 2019). Essa abordagem viabiliza a caracterização da umidade e da porosidade em perfis verticais com mínima perturbação da estrutura do solo (Keating et al., 2020; Shen et al., 2019).

Dinâmica da Água: Através do processamento dos dados de relaxometria transversal (T_2), geralmente via Transformada Inversa de Laplace, esses sensores permitem a resolução de diferentes populações de água com base na interação com a matriz sólida (Anferova et al., 2007; Rudszuck et al., 2021). As distribuições de T_2 possibilitam distinguir entre a água livre (gravitacional), que relaxa mais lentamente em poros maiores, e a água ligada (capilar ou higroscópica), retida por forças de adsorção em microporos ou superfícies argilosas (Anferova et al., 2007; Keating et al., 2020). Essa diferenciação fornece indicadores precisos sobre a capacidade de retenção hídrica e a disponibilidade de água para as plantas, sendo essencial para a gestão eficiente da irrigação e o diagnóstico da saúde do solo sem a necessidade de escavação ou análises laborais destrutivas (Keating et al., 2020).

5.3 Qualidade de sementes e grãos

A evolução da engenharia de arranjos Halbach permitiu a transição da Ressonância Magnética Nuclear (RMN) de sistemas de bancada restritos para dispositivos portáteis operacionais diretamente em locais de armazenamento e processamento. Esta mudança tecnológica viabiliza a realização de análises volumétricas rápidas e não invasivas, essenciais para a manutenção da qualidade nas cadeias produtivas.

- **Umidade e Óleo:** Um avanço significativo foi a demonstração de um sensor Halbach portátil miniaturizado, com massa de aproximadamente 2,45 kg e operando a 0,16 T, que alcançou uma precisão superior a 1% na determinação do teor de umidade em grãos de soja (Ye et al., 2022). A aplicação da relaxometria transversal (T2) permite a discriminação quantitativa entre os prótons de hidrogênio presentes nos triglicerídeos (óleo) e na água, fundamentada na diferença de mobilidade molecular encontrada em compartimentos celulares como oleossomos e tecidos de armazenamento (Colnago et al., 2021). Essa capacidade possibilita a triagem imediata de cultivares com alto teor lipídico em ambientes de campo ou pós-colheita (Ye et al., 2022).

- **Seleção Genética:** Dispositivos baseados na topologia Halbach têm sido aplicados com sucesso na separação não destrutiva de sementes haploides e diploides em milho, utilizando a variação no conteúdo de óleo como um marcador fenotípico direto. Diferente de métodos ópticos como a espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS), que se limita à análise superficial, a RMN sonda a totalidade da biomassa do grão. Esta técnica acelera significativamente os ciclos de melhoramento genético ao garantir a viabilidade fisiológica da semente para plantio imediato após a análise (Melchinger et al., 2017).

5.4 Ciência da carne e alimentos processados

A aplicação de RMN portátil na indústria de alimentos foca na autenticidade e na qualidade nutricional.

- **Gordura Intramuscular (IMF%):** Sensores unilaterais de Halbach são utilizados para medir a gordura de marmoreio em cortes de carne bovina e ovina diretamente na linha de processamento (McCarney et al., 2025). Diferente da tecnologia de Infravermelho próximo (NIR), que é limitada à superfície, a RMN penetra no tecido e oferece uma resposta linear à densidade de prótons, eliminando a necessidade de recalibrações frequentes causadas por mudanças de temperatura ou umidade no abatedouro (McCarney et al., 2025).

- **Laticínios e Adulteração:** A técnica TD-NMR é eficaz na detecção de contaminantes em leite cru, como formaldeído, uréia, peróxido de hidrogênio e leite sintético (Balthazar et al., 2021; Soyler et al., 2021b). Modelos baseados em Redes Neurais Artificiais (ANN) combinados com espectroscopia de baixo campo permitem classificar amostras de leite por origem geográfica (ex: França vs. Turquia) e tipo de produção (orgânico vs. convencional) com acurácia superior a 80% (Soyler et al., 2021b).

5.5 Nutrientes e bioenergéticos

A gestão de recursos em sistemas de agricultura circular também se beneficia de sensores magnéticos portáteis.

Fertilizantes e Rações: Sistemas de 1,5 T baseados em Halbach quantificam nitrogênio amoniacal e fósforo total em chorumes e esterco líquido com precisão superior ao NIRS (R^2 de 0,97 e 0,95, respectivamente) (Kock et al., 2018; Sørensen et al., 2022). Na análise de rações, a técnica permite determinar o conteúdo de proteína digestível e fósforo de forma rápida (Sørensen et al., 2022).

Biocombustíveis: A RMN de baixo campo é empregada no monitoramento da estabilidade oxidativa de biodiesel e na reação de transesterificação em tempo real (Colnago et al., 2021; Galvan et al., 2023). A análise multidimensional T_1 - T_2 permite estimar componentes celulósicos degradáveis em resíduos para otimização de plantas de biogás (Colnago et al., 2021).

6. Discussão e Síntese

A transição tecnológica dos magnetos supercondutores para os arranjos Halbach representa uma democratização da RMN, permitindo que a técnica saia do ambiente laboratorial controlado para aplicações *in situ* (Blümmler & Soltner, 2023). Embora a intensidade do campo magnético em sistemas Halbach seja significativamente inferior (tipicamente de 0,5 a 2 T) quando comparada aos sistemas de alto campo (acima de 7 T), a eficiência de campo por unidade de massa é maximizada nesta topologia (Blümmler & Soltner, 2023). A literatura indica que, ao reduzir o magneto para dimensões portáteis, a perda de sensibilidade (SNR) é de aproximadamente três ordens de magnitude, o que é considerado um custo aceitável diante da eliminação de infraestruturas criogênicas e de alta manutenção (Danieli et al., 2010). Além disso, a natureza transversal do campo B_0 nos arranjos Halbach facilita o uso de bobinas solenoides, que possuem um fator de preenchimento e sensibilidade intrinsecamente superiores às bobinas de sela utilizadas em magnetos axiais (Blümmler & Soltner, 2023).

Um dos grandes desafios técnicos reside na obtenção de homogeneidade de campo suficiente para aplicações espectroscópicas. A discretização do magneto em segmentos (Mandhalas) e os efeitos de truncagem em cilindros de comprimento finito introduzem inhomogeneidades que podem degradar a resolução espectral (Danieli et al., 2010). Contudo, a evolução de estratégias de *shimming* tem mitigado essas limitações. Designs multicamadas com anéis aninhados e a implementação de mecanismos de correção mecânica, como o deslocamento micrométrico de blocos magnéticos, permitiram alcançar resoluções de sub-ppm (Blümmler & Soltner, 2023; Danieli et al., 2010). Outro avanço crítico é a estabilidade térmica; o uso de técnicas de compensação passiva, combinando materiais como NdFeB e SmCo com diferentes coeficientes de temperatura, mostrou-se eficaz para anular as variações de campo causadas por oscilações ambientais em campo aberto (Blümmler & Soltner, 2023; Huang et al., 2025; Zalesskiy et al., 2014).

Dada a menor dispersão de deslocamento químico em baixos campos, a sobreposição de picos torna-se uma barreira para a quantificação direta (Chen et al., 2025; Telfah et al., 2023b). O sucesso da RMN portátil é intrinsecamente dependente do processamento de dados robusto. O uso de ferramentas quimiométricas como a Regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLS-R) e a Modelagem Hard Indireta (IHM) tem permitido extrair informações quantitativas precisas mesmo de espectros complexos ou de baixa resolução (Castaing-Cordier et al., 2021; Galvan et al., 2023). Recentemente, a aplicação de Redes Neurais Artificiais (ANN) e algoritmos de *Deep Learning* demonstrou superioridade na classificação de amostras heterogêneas, como a diferenciação de tipos de leite por origem geográfica ou a detecção de adulterantes em carnes e óleos vegetais (Soyler et al., 2021b).

A seguir, o Quadro 1 apresenta os principais parâmetros técnicos e resultados de estudos:

Quadro 1 - principais parâmetros técnicos e resultados de estudos representativos na última década:

Autor (Ano)	Aplicação Agrícola/Alimentar	Tecnologia de Magneto	Principais Resultados e Vantagens
Windt et al. (2011)	Fisiologia vegetal (caules e ramos)	NMR-CUFF (Articulado)	0,57 T; 3,1 kg; abertura manual com 20 N para acesso lateral; monitoramento <i>in vivo</i> de fluxo no xilema e crescimento (Windt et al., 2011).
Santos et al. (2016)	Autenticidade e qualidade do leite	Halbach 0,23 T (9 MHz)	Detecção de adulterantes (soro, uréia, H ₂ O ₂ , leite sintético) entre 5–50% v/v; erro de predição (RMSEP) de 2,34% (Santos et al., 2016).
Borba et al. (2021)	Maturação e defeitos em tomates	Halbach 0,23 T (9 MHz)	Acurácia de 97% na maturação (SVM) e 90% na detecção de defeitos internos (PLS-DA) em frutos intactos (Borba et al., 2021).
Soyler et al. (2021)	Hidrólise de lactose e origem do leite	Halbach 1,0 T (43 MHz)	Monitoramento <i>online</i> e contínuo da hidrólise de lactose; classificação de origem geográfica com 92% de acurácia via ANN (Soyler et al., 2021b).
Sørensen et al. (2022)	Nutrientes em rações e chorume	Halbach 1,5 T (62,4 MHz)	Quantificação direta de P (nativa) e N (digestão enzimática); R ² > 0,94; alternativa superior e volumétrica ao NIRS (Sørensen et al., 2022).
Ye et al. (2022)	Umidade em grãos de soja	Mini-Halbach (2,45 kg)	0,16 T; dispositivo 64% mais leve que sistemas anteriores; resolução de 1% na detecção de umidade hídrica <i>in situ</i> (Ye et al., 2022).

Yang et al. (2023)	Qualidade de sementes (óleo/água)	4 anéis Halbach (0,169 T)	Homogeneidade otimizada via <i>shimming</i> passivo (1,8 ppm); adequado para triagem rápida de sementes sem preparo (Yang et al., 2023).
McCarney et al. (2025)	Gordura intramuscular (IMF%) em carnes	Halbach e Unilateral	Medição não invasiva de marmoreio em cortes de carne bovina e ovina na linha de processamento; R^2 de 0,97 para carne bovina (McCarney et al., 2025).

Fonte: Autoria própria (2026).

A integração destas tecnologias permite uma transição do uso da RMN de bancada para seu uso em campo, essencial para a Agricultura. A capacidade de realizar análises volumétricas não destrutivas em solos, sementes intactas e plantas vivas oferece uma vantagem competitiva sobre sensores ópticos superficiais, possibilitando uma gestão hídrica e nutricional muito mais precisa e sustentável. O impacto final é a redução do desperdício através da detecção precoce de anomalias fisiológicas e a garantia da segurança alimentar por meio de métodos rápidos de triagem de autenticidade celular.

7. Desafios Atuais e Perspectivas Futuras

7.1 Desafios técnicos e limitantes de engenharia

Apesar dos avanços significativos, a aplicação de arranjos Halbach em ambientes não controlados enfrenta obstáculos de engenharia complexos. Um dos principais desafios reside na homogeneidade do campo magnético B_0 , que é degradada pelos efeitos de truncagem em magnetos de comprimento finito e pelas imperfeições estatísticas inerentes à fabricação de blocos de terras-raras, que podem apresentar variações de até 5% na magnitude da magnetização (Blümmler & Soltner, 2023; Danieli et al., 2010). O design de sistemas portáteis requer um equilíbrio entre peso, abertura do orifício (bore) e intensidade de campo; reduzir o volume do magneto para aumentar a portabilidade resulta em uma perda de sensibilidade (SNR) de aproximadamente três ordens de magnitude em comparação com sistemas supercondutores (Danieli et al., 2010; Michal, 2020).

A estabilidade térmica constitui outro gargalo crítico, dado que materiais como o NdFeB possuem coeficientes térmicos de remanência negativos (-0,11%/°C), o que resulta no deslocamento (drift) da frequência de Larmor diante de oscilações ambientais comuns no campo (Blümmler & Soltner, 2023; Mandal, 2026a; Zaleskiy et al., 2014). Além disso, a operação em ambientes industriais ou agrícolas expõe o sistema a interferências de radiofrequência (RFI) provenientes de máquinas e redes elétricas, exigindo métodos robustos de blindagem ou cancelamento ativo. Por fim, a presença de materiais condutores ou ferromagnéticos em amostras complexas, como solos ricos em minerais, induz correntes de Foucault e desfasamento rápido do sinal (T_2), limitando a profundidade de investigação e a resolução temporal das medidas (Keating et al., 2020).

7.2 Miniaturização, "Lab-on-a-Chip" e integração IoT

A tendência de hardware para sistemas de RMN aponta para a miniaturização extrema mediante o emprego de sistemas em chip (SoC) e circuitos integrados CMOS. Esses avanços permitem reunir o programador de pulsos, o transceptor de radiofrequência (RF) e o processamento digital de sinais em áreas de apenas alguns milímetros quadrados (Zaleskiy et al., 2014). Tais dispositivos possibilitam o desenvolvimento de sensores RMN portáteis, com dimensões comparáveis às de um smartphone, viabilizando a análise de fluidos biológicos em pontos de atendimento (point-of-care) ou o monitoramento contínuo e não invasivo em biorreatores (Blümich, 2019; Zaleskiy et al., 2014). No contexto da agricultura contemporânea, a integração desses sensores miniaturizados em redes de Internet das Coisas (IoT) permitirá que dados moleculares críticos sejam transmitidos via redes de baixa potência para plataformas de suporte à decisão. Essa infraestrutura tecnológica é fundamental para a automação de processos complexos, como a irrigação de precisão e o manejo nutricional inteligente.

7.3 Inteligência artificial e processamento de dados

A complexidade dos espectros de baixo campo, caracterizados por severa sobreposição de picos e efeitos de acoplamento forte, está sendo mitigada pelo uso de Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina (Telfah et al., 2023b). Algoritmos de Deep Learning e Redes Neurais Convolucionais têm mostrado superioridade na reconstrução de imagens a partir de dados subamostrados (sensoriamento comprimido) e na remoção de ruídos em campos inhomogêneos (Borba et al., 2021; Mandal, 2026b). Além disso, a aplicação de ferramentas quimiométricas avançadas, como a Regressão de Mínimos Quadrados Parciais e a Modelagem Hard Indireta (IHM), permite a extração de informações quantitativas precisas para o controle de processos em tempo real, transformando o sinal bruto de relaxometria em indicadores diretos de qualidade nutricional ou autenticidade alimentar (Blümmler & Soltner, 2023).

7.4 Democratização e ciência de código aberto

A emergência de iniciativas de hardware e software de código aberto (*Open Source*), como os projetos MaRCoS e OCRA, está reduzindo drasticamente as barreiras econômicas para o desenvolvimento de novos sistemas de RMN e MRI (Clarke et al., 2025; Huang et al., 2025). A realização de eventos colaborativos, como hackathons dedicados à construção de scanners do zero, acelera a curva de aprendizado e fomenta a criação de dispositivos customizados para nichos específicos, como o imageamento de extremidades humanas ou o estudo de fluxos granulares (Huang et al., 2025; Mandal, 2026b). Essa democratização tecnológica é essencial para expandir o uso da ressonância magnética para países em desenvolvimento e para pequenas unidades produtivas, onde a técnica pode servir como uma ferramenta de triagem rápida e acessível (Huang et al., 2025; Michal, 2020; Silva Terra et al., 2024).

8. Conclusão

Esta revisão indica que a tecnologia de Ressonância Magnética Nuclear (RMN), fundamentada no desenvolvimento de arranjos de magnetos permanentes Halbach, expandiu sua aplicação do ambiente laboratorial convencional para o monitoramento direto em campo e em processos industriais (Blümich, 2019; Colnago et al., 2021). O advento de sistemas de baixo campo (LF-NMR) e a miniaturização dos dispositivos facilitaram o acesso a ferramentas diagnósticas de RMN, permitindo a execução de análises moleculares rápidas, não invasivas e quantitativas em locais de produção, armazenamento ou processamento (Janvrin et al., 2025; Kock et al., 2018). A viabilidade de investigar a estrutura interna de matrizes biológicas e alimentos sem a necessidade de destruição da amostra estabelece esta tecnologia como um recurso relevante para o controle de qualidade e a modernização técnica das cadeias produtivas globais.

Dentre as inovações em engenharia magnética revisadas, os arranjos de Halbach cilíndricos destacam-se como a solução mais eficiente devido à sua capacidade de maximizar o campo magnético por unidade de massa, oferecendo simultaneamente auto-blindagem e um campo transversal que otimiza a sensibilidade de bobinas solenoides (Blümmler & Soltner, 2023; Giberson et al., 2021). O desenvolvimento do conceito NMR-CUFF resolveu significativamente o problema do acesso lateral a caules e ramos, permitindo o monitoramento fisiológico in vivo com força de abertura mínima (Blümmler & Soltner, 2023). Além disso, os designs multicamadas integrados a sistemas de shimming mecânico e elétrico demonstram ser eficazes na obtenção de homogeneidades de campo estáveis, próximas ao patamar espectroscópico, mesmo em condições de flutuação térmica ambiental (Blümmler & Soltner, 2023). No âmbito analítico, a convergência entre a RMN no domínio do tempo (TD-NMR) e o Aprendizado de Máquina (Machine Learning) mostrou-se uma abordagem promissora para superar a baixa resolução espectral intrínseca, permitindo a classificação precisa de maturação de frutos e a detecção de adulterantes em alimentos complexos com acurácia superior a 90% (Borba et al., 2021; Chen et al., 2025; Galvan et al., 2023; Giberson et al., 2021).

O impacto final da integração de sensores RMN baseados em Halbach reside na viabilização da Agricultura em escala molecular. Ao fornecer medições diretas e precisas do estado hídrico do solo, da qualidade intrínseca de sementes e da dinâmica fisiológica de plantas em tempo real, esta tecnologia oferece suporte crítico para a tomada de decisões agrônômicas mais sustentáveis, reduzindo o desperdício de recursos naturais e fertilizantes (Colnago et al., 2021). Na indústria de alimentos, a implementação desses sensores portáteis garante uma segurança alimentar aprimorada através da triagem rápida de autenticidade em toda a cadeia de suprimentos (Balthazar et al., 2021).

Referências

- Anferova, S., Anferov, V., Arnold, J., Telnishnikh, E., Voda, M. A., Kupferschläger, K., Blümmler, P., Clauser, C., & Blümich, B. (2007). Improved Halbach sensor for NMR scanning of drill cores. *Magnetic Resonance Imaging*, 25(4), 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2006.11.016>
- Balthazar, C. F., Guimarães, J. T., Rocha, R. S., Pimentel, T. C., Neto, R. P. C., Tavares, M. I. B., Graça, J. S., Alves Filho, E. G., Freitas, M. Q., Esmerino, E. A., Granato, D., Rodrigues, S., Raices, R. S. L., Silva, M. C., Sant'Ana, A. S., & Cruz, A. G. (2021). Nuclear magnetic resonance as an analytical tool for monitoring the quality and authenticity of dairy foods. Em *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 108, p. 84–91). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.011>
- Blümich, B. (2019). Low-field and benchtop NMR. *Journal of Magnetic Resonance*, 306, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2019.07.030>
- Blümmler, P., & Soltner, H. (2023). Practical Concepts for Design, Construction and Application of Halbach Magnets in Magnetic Resonance. Em *Applied Magnetic Resonance* (Vol. 54, Números 11–12, p. 1701–1739). Springer. <https://doi.org/10.1007/s00723-023-01602-2>
- Borba, K. R., Oldoni, F. C. A., Monaretto, T., Colnago, L. A., & Ferreira, M. D. (2021). Selection of industrial tomatoes using TD-NMR data and computational classification methods. *Microchemical Journal*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106048>
- Castaing-Cordier, T., Bouillaud, D., Farjon, J., & Giraudeau, P. (2021). Recent advances in benchtop NMR spectroscopy and its applications. Em *Annual Reports on NMR Spectroscopy* (Vol. 103, p. 191–258). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.arnmr.2021.02.003>
- Casarin, S. T., Porto, A. R., Gabatz, R. I. B., Bonow, C. A., Ribeiro, J. P. & Mota, M. S. (2020). Tipos de revisão de literatura. *Journal of Nursing and Health*. J. nurs. health. 10(n.esp.):e20104031.
- Chen, X., Li, C., Wu, L., Yan, S., Qi, L., Chen, J., & Chen, W. (2025). Low-field NMR for polymer science. Em *Giant* (Vol. 24). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2025.100364>
- Clarke, D. A., Hogendoorn, W., Penn, A., & Serial, M. R. (2025). Magnetic resonance imaging in granular flows: An overview of recent advances. *Particuology*, 101, 18–32. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.08.007>
- Colnago, L. A., Wiesman, Z., Pages, G., Musse, M., Monaretto, T., Windt, C. W., & Rondeau-Mouro, C. (2021). Low field, time domain NMR in the agriculture and agrifood sectors: An overview of applications in plants, foods and biofuels. *Journal of Magnetic Resonance*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2020.106899>
- Danieli, E., Perlo, J., Blümich, B., & Casanova, F. (2010). Small magnets for portable NMR spectrometers. *Angewandte Chemie - International Edition*, 49(24), 4133–4135. <https://doi.org/10.1002/anie.201000221>
- Fernandes, J. M. B., Vieira, L. T. & Castelhana, M. V. C. (2023). Revisão narrativa enquanto metodologia científica significativa: reflexões técnico-formativas. *REDES – Revista Educacional da Sucesso*. 3(1), 1-7. ISSN: 2763-6704.
- Galvan, D., de Aguiar, L. M., Bona, E., Marini, F., & Killner, M. H. M. (2023). Successful combination of benchtop nuclear magnetic resonance spectroscopy and chemometric tools: A review. Em *Analytica Chimica Acta* (Vol. 1273). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341495>
- Gao, M., Luo, S., Zhu, L., Xiao, L., Liu, H., Liao, G., Lv, X., Chen, H., & Wang, Y. (2025). Easy-to-implement passive shimming approach of Halbach magnet for low-field NMR measurement. *Journal of Magnetic Resonance*, 376. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2025.107887>
- Giberson, J., Scicluna, J., Legge, N., & Longstaffe, J. (2021). Developments in benchtop NMR spectroscopy 2015–2020. Em *Annual Reports on NMR Spectroscopy* (Vol. 102, p. 153–246). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.arnmr.2020.10.006>
- Gil, A. C. (2017). Como elaborar um projeto de pesquisa. Editora Atlas.
- Grootveld, M., Percival, B., Gibson, M., Osman, Y., Edgar, M., Molinari, M., Mather, M. L., Casanova, F., & Wilson, P. B. (2019). Progress in low-field benchtop NMR spectroscopy in chemical and biochemical analysis. Em *Analytica Chimica Acta* (Vol. 1067, p. 11–30). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.02.026>
- Huang, S., Algarín, J. M., Alonso, J., Anieyrudh, R., Borreguero, J., Bschorr, F., Cassidy, P., Choo, W. M., Corcos, D., Gualart-Naval, T., Han, H. J., Igwe, K. C., Kang, J., Li, J., Littin, S., Liu, J., Rodriguez, G. G., Solomon, E., Tan, L. K., ... Blümich, B. (2025). Experience of how to build an MRI machine from scratch. Em *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* (Vols. 150–151). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2025.101574>
- Janvrin, W., Martin, J., Hancock, D., Varillas, A., Downey, A. R. J., Pellechia, P. J., Satme, J., & Won, S. H. (2025). Open-source compact time-domain hydrogen (1H) NMR System for Field Deployment. *HardwareX*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2025.e00651>

- Keating, K., Walsh, D. O., & Grunewald, E. (2020). The effect of magnetic susceptibility and magnetic field strength on porosity estimates determined from low-field nuclear magnetic resonance. *Journal of Applied Geophysics*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104096>
- Kirtil, E., Cikrikci, S., McCarthy, M. J., & Oztop, M. H. (2017). Recent advances in time domain NMR & MRI sensors and their food applications. *Em Current Opinion in Food Science* (Vol. 17, p. 9–15). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.07.005>
- Kock, F. V. C., Machado, M. P., Athayde, G. P. B., Colnago, L. A., & Barbosa, L. L. (2018). Quantification of paramagnetic ions in solution using time domain NMR. PROS and CONS to optical emission spectrometry method. *Microchemical Journal*, 137, 204–207. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.10.013>
- Lechthaler, S., Robert, E. M. R., Tonné, N., Prusova, A., Gerkema, E., Van As, H., Koedam, N., & Windt, C. W. (2016). Rhizophoraceae mangrove saplings use hypocotyl and leaf water storage capacity to cope with soil water salinity changes. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00895>
- Mandal, S. (2026a). Advanced magnetic resonance imaging. *Em Sensors, Circuits, and Systems for Scientific Instruments* (p. 595–638). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-44-334719-1.00018-2>
- Mandal, S. (2026b). Magnetic resonance imaging. *Em Sensors, Circuits, and Systems for Scientific Instruments* (p. 505–593). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-44-334719-1.00017-0>
- McCarney, E. R., McGilchrist, P., Stewart, S. M., & Dykstra, R. (2025). Fast non-destructive measurement of intramuscular fat in Australian beef and lamb using nuclear magnetic resonance (NMR) technologies. *Meat Science*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109706>
- Melchinger, A. E., Munder, S., Mauch, F. J., Mirdita, V., Böhm, J., & Müller, J. (2017). High-throughput platform for automated sorting and selection of single seeds based on time-domain nuclear magnetic resonance (TD-NMR) measurement of oil content. *Biosystems Engineering*, 164, 213–220. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2017.10.011>
- Miao, R., Wang, Y., Wang, Q., Zheng, Y., He, X., Ren, C., & Jiang, C. (2024). Forward modeling of single-sided magnetic resonance and evaluation of T2 fitting error based on geometric analytical method. *Computers and Geosciences*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105705>
- Michal, C. A. (2020). Low-cost low-field NMR and MRI: Instrumentation and applications. *Journal of Magnetic Resonance*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2020.106800>
- Olgeschläger, D., Rehorn, C., Lehmkuhl, S., Adams, M., Adams, A., & Blümich, B. (2017). A size-adjustable radiofrequency coil for investigating plants in a Halbach magnet. *Journal of Magnetic Resonance*, 278, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2017.03.010>
- Parker, A. J., Zia, W., Rehorn, C. W. G., & Blümich, B. (2016). Shimming Halbach magnets utilizing genetic algorithms to profit from material imperfections. *Journal of Magnetic Resonance*, 265, 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2016.01.014>
- Pereira, A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free ebook]. Santa Maria. Editora da UFSM.
- Peng, B., Yang, J., Wang, Y., Zhao, L., Yang, X., Zheng, J., & Xu, Y. (2025). Design of a thermal management system for halbach magnets in low-field NMR instruments. *Applied Thermal Engineering*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128026>
- Raich, H., & Blümli, P. (2004). Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR mandhalas. *Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering*, 23(1), 16–25. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.20018>
- Rudzuck, T., Nirschl, H., & Guthausen, G. (2021). Perspectives in process analytics using low field NMR. *Journal of Magnetic Resonance*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2020.106897>
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*. 20(2), 5-6.
- Santos, P. M., Pereira-Filho, E. R., & Colnago, L. A. (2016). Detection and quantification of milk adulteration using time domain nuclear magnetic resonance (TD-NMR). *Microchemical Journal*, 124, 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.07.013>
- Shen, S., Guo, P., Wu, J., Ding, Y., Chen, F., Meng, F., & Xu, Z. (2019). Optimized inside-out magnetic resonance probe for soil moisture measuring in situ. *Journal of Magnetic Resonance*, 307, 106565. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmr.2019.07.052>
- Silva Terra, A. I., Taylor, D. A., & Halse, M. E. (2024). Hyperpolarised benchtop NMR spectroscopy for analytical applications. *Em Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* (Vols. 144–145, p. 153–178). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2024.10.001>
- Sørensen, M. K., Beyer, M., Jensen, O. N., & Nielsen, N. C. (2022). Quantification of protein and phosphorus in livestock feed using mobile NMR sensor technology. *Biosystems Engineering*, 216, 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.02.004>
- Soyler, A., Cikrikci, S., Cavdaroglu, C., Bouillaud, D., Farjon, J., Giraudeau, P., & Oztop, M. H. (2021b). Multi-scale benchtop 1H NMR spectroscopy for milk analysis. *LWT*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110557>
- Taylor, M. C. D., & Sakellariou, D. (2017). Low-cost, pseudo-Halbach dipole magnets for NMR. *Journal of Magnetic Resonance*, 277, 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2017.03.001>
- Telfah, A., Bahti, A., Kaufmann, K., Ebel, E., Hergenröder, R., & Suter, D. (2023a). Low-field NMR with multilayer Halbach magnet and NMR selective excitation. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47689-2>
- Telfah, A., Bahti, A., Kaufmann, K., Ebel, E., Hergenröder, R., & Suter, D. (2023b). Low-field NMR with multilayer Halbach magnet and NMR selective excitation. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47689-2>
- Turek, K., & Liszkowski, P. (2014). Magnetic field homogeneity perturbations in finite Halbach dipole magnets. *Journal of Magnetic Resonance*, 238, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2013.10.026>

- Wang, Y., Liu, T., Peng, B., Yu, P., Yang, X., & Xu, Y. (2023). Research of integrated shimming Halbach magnet for High strength, compact Benchtop NMR device. *Journal of Magnetic Resonance*, 355. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2023.107559>
- Windt, C. W., Nabel, M., Kochs, J., Jahnke, S., & Schurr, U. (2021). A Mobile NMR Sensor and Relaxometric Method to Non-destructively Monitor Water and Dry Matter Content in Plants. *FRONTIERS IN PLANT SCIENCE*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.617768>
- Windt, C. W., Soltner, H., Dusschoten, D. Van, & Blümmler, P. (2011). A portable Halbach magnet that can be opened and closed without force: The NMR-CUFF. *Journal of Magnetic Resonance*, 208(1), 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2010.09.020>
- Xu, Y., Wang, F., Wang, Y., Yu, P., Zhang, J., & Yang, X. (2022). Active shim coils design for Halbach magnet based on inverse boundary element method. *Magnetic Resonance Letters*, 2(3), 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.mrl.2022.06.001>
- Yang, L., Chen, F., Chen, L., Zhang, Z., Chen, J., Wang, J., Cheng, X., Feng, J., Bao, Q., & Liu, C. (2023). An easy-built Halbach magnet for LF-NMR with high homogeneity using optimized target-field passive shimming method. *Journal of Magnetic Resonance*, 357. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2023.107582>
- Ye, Y., Shen, S., Guo, P., Xu, X., Wan, C., & Xu, Z. (2022). A Portable Halbach NMR Sensor for Detecting the Moisture Content of Soybeans. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1–11. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3181266>
- Yu, P., Wang, Y., Xu, Y., Wu, Z., Zhao, Y., Peng, B., Wang, F., Tang, Y., & Yang, X. (2022). Theoretical foundation for designing multilayer Halbach array magnets for benchtop NMR and MRI. *Journal of Magnetic Resonance*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2022.107322>
- Zalesskiy, S. S., Danieli, E., Blümich, B., & Ananikov, V. P. (2014). Miniaturization of NMR systems: Desktop spectrometers, microcoil spectroscopy, and “nMR on a Chip” for chemistry, biochemistry, and industry. *Em Chemical Reviews* (Vol. 114, Número 11, p. 5641–5694). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/cr400063g>