



Notas Técnicas

CBPF-NT-003/23

junho 2023

Desenvolvimento e fabricação de sonda de RMN com microrresonador planar
via prototipação mecânica.

Josie P. da Silva, Eldues O. Martins, Roberto S. Sarthour e Ivan S. Oliveira

Desenvolvimento e fabricação de sonda de RMN com microrresonador planar via prototipação mecânica.

Development and fabrication of an NMR planar microresonator probe using mechanical prototyping.

Josie P. da Silva,* Roberto S. Sarthour,† Ivan S. Oliveira,‡ e Alexandre M. Souza§
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas,
Rua Dr. Xavier Sigaud 150 Ed. Cesar Lattes,
Urca, Rio de Janeiro, RJ. CEP 22290-180, Brazil

Eldues O. Martins¶
Petróleo Brasileiro S.A., PETROBRAS,
Centro de Pesquisas Leopoldo Miguez de Mello, CENPES,
Av. Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária,
Rio de Janeiro, RJ CEP: 21.941-915, Brazil

Resumo: Sondas de ressonância magnética nuclear (RMN) para amostras líquidas são amplamente utilizadas em diversos campos de pesquisa nas mais variadas aplicações, principalmente em física, química, biologia e seus respectivos desdobramentos. A técnica já consagrada por sua aplicabilidade, possui limitações relacionadas à sensibilidade. Todavia, existem meios para ampliarmos seu alcance, tais como aumento do campo externo B_0 , a utilização de técnicas de hiperpolarização ou no caso de amostras com volume reduzido, a construção de microressonadores, aumentando, dessa forma, o acoplamento entre o sensor e a amostra. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a fabricação de uma sonda de RMN utilizando microressonadores planares para investigarmos amostras com volumes da ordem de nanolitros. Esta sonda foi projetada para operar em alto campo com magneto de 11.7 T, sintonizada em 500Mhz com processamento de sinal realizado pelo console da Bruker.

Palavras chave: RMN; Microslot; Microressonador planar; Nanoamostras; Nanofabricação.

Abstract: Nuclear magnetic resonance (NMR) probes for liquid samples are widely used in several research fields in the most varied applications, mainly in physics, chemistry, biology and their respective developments. However, the technique already established for its applicability has limitations related to its sensitivity. Nonetheless, there are ways to broaden its scope, such as increasing the external field B_0 , using hyperpolarization techniques, or, in the case of samples with reduced volume, the construction of microresonators, thus increasing the coupling between the sensor and the sample. This work presents the development and fabrication of an NMR probe using planar microresonators to investigate samples with limited volumes. This probe was designed to operate at high field with a 11.7 T magnet, tuned at 500Mhz with signal processing performed by Bruker's console.

Keywords: NMR; Microslot; Planar Microresonator; Nanosample; Nanofabrication.

1. INTRODUÇÃO A RMN

O experimento de RMN é baseado na interação entre um campo magnético e os núcleos atômicos que compõem a amostra a ser analisada[1–4]. Quando a amostra é colo-

cada sob a ação de forte campo magnético externo B_0 , os núcleos atômicos se alinham a esse campo. Em seguida, um pulso de radiofrequência é aplicado à amostra, fazendo com que os núcleos atômicos absorvam energia e mudem seu alinhamento.

A precessão dos spins em torno do campo aplicado B_0 , resulta na variação de intensidade do fluxo magnético, que cria, por indução de Faraday, uma corrente elétrica em uma bobina receptora colocada próximo a amostra. [5, 6]

Porém, apenas uma pequena fração de todos os momentos magnéticos contribuem para o sinal de RMN, pois a energia térmica na temperatura ambiente é muito maior que a energia de interação entre os momentos magnéticos e o campo externo. Tipicamente, 1 a cada 100 milhões de núcleos contribuem efetivamente para o sinal de RMN [7].

Devido a baixa polarização dos spins, a técnica possui

*Electronic address: josie@cbpf.br

†Electronic address: sarthour@cbpf.br

‡Electronic address: ivan@cbpf.br

§Electronic address: amsouza@cbpf.br

¶Electronic address: eldues@petrobras.com.br

baixa sensibilidade. A situação é ainda mais crítica quando o volume ou massa da amostra são limitados. [8–11].

Um circuito típico de uma sonda de RMN é mostrado na figura 1. Este circuito possui capacitores ligados em série e em paralelo com o indutor. Os capacitores usados, em geral, são variáveis e podem ser utilizados para ajustar a ressonância do circuito, ou seja, para ajustar a impedância em 50 Ohms na frequência de interesse.

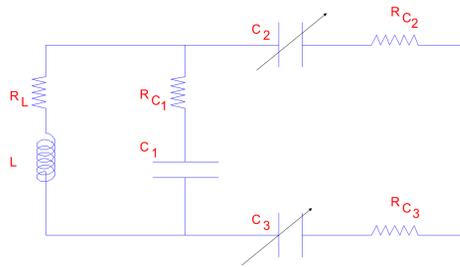


FIG. 1: Circuito ressonante típico de uma sonda de RMN. Na imagem acima, temos os capacitores variáveis C2 e C3, o capacitor fixo C1, as resistências associadas a cada um dos componentes discretos aqui representadas por RL, RC1, RC2, RC3 e, por fim, o indutor L. No microressonador planar, o microslot fabricado no centro da microstrip possui comportamento equivalente a um indutor. É nesta região do microslot que o campo B1, perpendicular à estrutura, é produzido. Nesta mesma posição, posicionamos a amostra que será submetida à técnica. Imagens produzidas no CBPF.

O indutor é o elemento utilizado para acoplar diretamente a amostra. Quando uma corrente oscilante passa pelo indutor, este induz um campo magnético oscilante que é responsável por tirar a amostra do equilíbrio. O indutor usado para excitar a amostra é também usado para captar o sinal de RMN, induzido pela precessão dos spins [12].

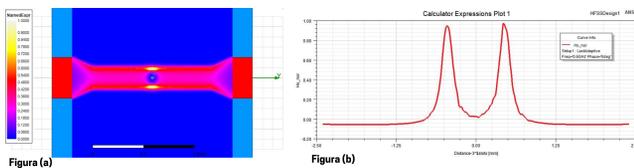


FIG. 2: Figura (a) Perfil do campo B1 e sua respectiva intensidade, resultado das simulações realizadas no HFSS para o circuito fabricado. A região amarela evidencia que o campo é mais intenso próximo ao microslot. O campo B1 é perpendicular ao campo externo B0. Figura(b) Relação entre o campo B1 (normalizado) e a distância no eixo x. A concavidade central mostra a relação do campo B1 com a geometria do microslot, ou seja, no centro do microslot (centro da curva) é praticamente nulo e maior sobre o cobre nas laterais nas laterais. Imagens produzidas no software HFSS.

O indutor utilizado pode ser um solenoide, por exemplo, porém existem muitos outros formatos utilizados, cada um projetado para diferentes aplicações e amostras [13–15].

Para projetar um indutor adequado ao experimento de RMN, temos que antes de tudo ter em mente que o campo oscilante gerado por ele deve estar perpendicular ao campo externo aplicado. Outra propriedade importante é o fator de preenchimento.

O *microslot* é um ressonador proposto para medir

amostras com volume da ordem de alguns nanolitros. A sonda *microslot* é composta por uma pequena fenda ou *slot* feito em um *stripline*. Essa fenda funciona como um indutor e, portanto, pode ser utilizada como ressonador de RMN (vide figura: 3) [16–19].

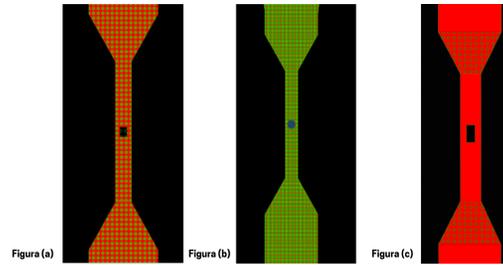


FIG. 3: Nas figuras acima temos a representação gráfica 3 *microslots* fabricados em uma *microstrip* de cobre com 35μ de espessura; (a) é um *Slot* quadrado 400 x 400 μ; (b) é um *microslot* redondo com 500 μ de diâmetro; (c) o *microslot* fabricado com 400 x 800μ. As amostras são posicionadas exatamente acima do microslot para que no momento da realização da medida, estejam dentro do campo magnético produzido nesta região. Imagens produzidas no *software Altium*

As sondas *microslot* são amplamente utilizadas em muitas áreas de pesquisa, incluindo química, biologia e física de materiais [20]. Elas são particularmente úteis para estudos de pequenas moléculas, materiais complexos e biológicos, bem como para aplicações em que é importante a coleta de dados em áreas muito específicas da amostra [21, 22]. A técnica também pode ser aplicada em geofísica, química de solo e petrofísica, como por exemplo, no estudo de propriedades de rochas sedimentares, molhabilidade da rocha na recuperação de petróleo de reservatórios carbonáticos, possibilidade de medidas de difusão em meios porosos, medidas magnéticas de rochas e medidas de propriedades de fluidos em dispositivos de microfluídica [23–27].

Tendo em vista a baixa sensibilidade da técnica de RMN, o objetivo deste trabalho é construir sondas para experimentos de RMN, com amostras de volume reduzidos, tipicamente da ordem de dezenas a centenas de nanolitros. O circuito ressonante utilizado, foi um microressonador planar [10, 16, 17, 19, 28–31]. Este tipo de sonda é adequado para amostras de tamanhos reduzidos, pois além de permitir o aumento de sensibilidade em várias ordens de magnitude, possibilita a construção de equipamentos de RMN portáteis, os chamados "*lab on chip*" [22, 32, 33].

2. FABRICAÇÃO DA SONDA MICROSLOT

Utilizou-se nesse projeto ferramentas específicas de usinagem de circuitos RF, para que as estruturas fossem usinadas com maior precisão, utilizando ângulos de corte retos e com o menor impacto mecânico, com o objetivo de chegar a um resultado com o mínimo de rebarbas possível. Assim, executou-se a sequência de fabricação listada a seguir:

1. Criação do *layout* - o *design* da PCB é criado em um *software CAD (Altium)* e exportado para a prototipadora (arquivos gerber), figuras 4 e 5;

2. A placa de circuito impresso é preparada para a usinagem, a placa utilizada já possui camada de cobre de 35 microns em duas faces (frente e verso).
3. As especificações da placa à ser usinada são inseridas no *software Circuit Pro*, desenvolvido pelo fabricante do equipamento. Os parâmetros iniciais são: a espessura total da placa a ser usinada, espessura da camada de cobre que reveste a placa, o número de faces, que podem ser dupla ou simples, a largura e o comprimento. Essa informações são essenciais para que o equipamento possa automaticamente associar aos eixos x, y e z. As ferramentas são utilizadas de acordo com cada operação realizada e com o nível de precisão que for determinado pelo projeto.
4. Ao final da parametrização dá-se início a etapa de usinagem da placa, a prototipadora LPKF S104 utiliza um cabeçote de usinagem de alta velocidade para perfurar, fresar e cortar a placa de acordo com o *layout*, figuras 6.

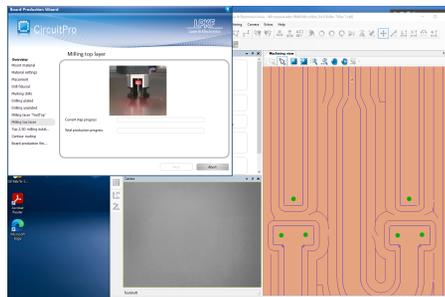


FIG. 6: Tela do processo de usinagem em execução. Na janela à direita é possível visualizar a lista de etapas à serem executadas e à esquerda parte do processo que esta sendo executado: caminho à ser percorrido pela ferramenta de desbaste em azul e furos à serem executados em verde. Imagens produzidas no *Circuit Pro*.

Testes diversos foram realizados, explorando ao máximo, os limites de precisão na execução, afim de que os resultados atuais fossem alcançados. Ao final da fabricação, realizou-se uma inspeção com um microscópio ótico, modelo *Olympus Z61*, faixa de ampliação 6,7x e oculares de 10x.

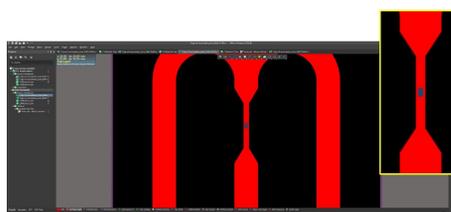


FIG. 4: Designer do microressonador planar a ser fabricado, em destaque uma *microstrip* com o *microslot* no centro da mesma. Imagem produzida no *Altium Designer*.

são alguns dos contribuintes para o aumento da inhomogeneidade do campo B1 gerado pelo microressonador planar na região onde se encontra o *microslot* [28, 29, 34]. Objetivando minimizar essas contribuições que prejudicam a qualidade da medida, foram utilizadas algumas técnicas de preparação de amostras metalográficas [35].

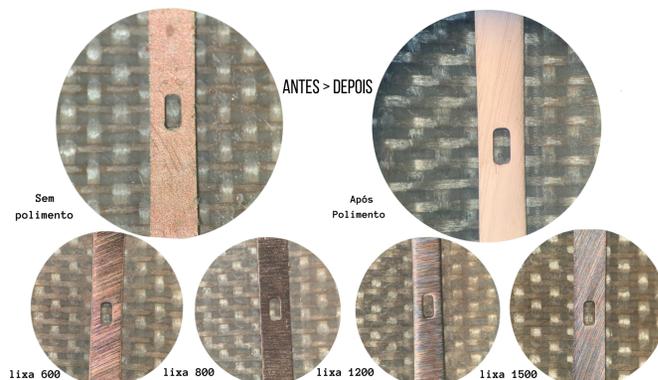


FIG. 7: Aplicação das técnicas de preparação de amostras para metalografia, etapas de lixamento evolução da esquerda para a direita. Acima em destaque antes do processo e ao final da etapa de polimento. Imagens produzidas no CBPF, microscópio ótico.

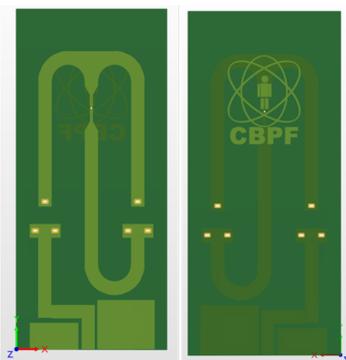


FIG. 5: *Designer* da PCI - placa de circuito impresso. Vista frontal e vista traseira. Imagem produzida no *Altium designer*.

Rugosidade, rebarbas e demais deformações decorrentes da usinagem bem como as características dos materiais utilizados na fabricação da estrutura do microressonador

A superfície da amostra foi lixada para remover quaisquer irregularidades ou deformações na superfície. Isso é importante para garantir um resultado plano e uniforme. Realizou-se uma sequencia de lixamento à base de água com granulometria 600, 800, 1.200 e 1.500. A orientação do lixamento deve ser alterada entre cada etapa, ou seja, ao trocar a lixa ou o tecido com diamante em suspensão a amostra deve ser rotacionada. Na figura 7 apresentamos os resultados de cada etapa.

A superfície da amostra foi polida para remover riscos e marcas deixadas pelo lixamento. Isso ajuda a obter uma superfície brilhante e lisa como é possível visualizarmos nas figuras 7, 8 e 9. Foram realizadas três sequências de polimento com cinco minutos cada, utilizou-se diamante em suspensão de 9 microns, 6 microns e 1 micron. Depois desta última etapa a amostra é lavada com álcool isopropílico e detergente neutro para remover resíduos químicos e evitar con-



FIG. 8: Ressonador antes do polimento à esquerda. Ao centro e à direita, vemos o ressonador polido. Imagem produzida no CBPF.

taminação. Seguiu-se com a secagem completa da amostra utilizando ar comprimido. Isso é importante para evitar a formação de manchas.



FIG. 9: Microressoador planar fabricado para operar em alto campo, sintonizado em 500MHz

Para proteger o cobre do circuito de corrosão, aplicou-se uma camada de verniz incolor próprio para circuitos impressos marca Isotec, composição resina monocomponente e propelente (butano/propano). Antes da aplicação do verniz, os pontos de contato foram protegidos com fita adesiva de carbono, para não comprometer a solda dos componentes discretos.

3. CARACTERIZAÇÃO, TESTES E DISCUSSÃO

Ao final da fabricação, testes de conformidade e desempenho com analisadores de rede e medidores RLC foram realizados. Dessa forma, fez-se possível caracterizar as propriedades dos componentes da sonda, tais como capacitância, resistividade e fator Q do circuito finalizado.

Para o teste de conformidade dos capacitores, antes de serem inseridos no circuito, um medidor LRC modelo 880 fabricado pela *BK Precision* foi utilizado para medir as propriedades elétricas.

A medida foi realizada utilizando pontas Kelvin para

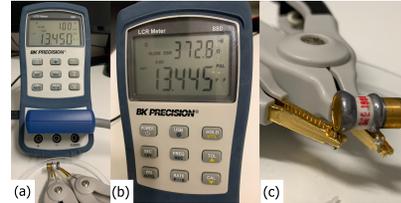


FIG. 10: No conjunto de imagens é possível ver o medidor RLC modelo 880 fabricado pela BK Precision e um capacitor variável conectado ao medidor via pontas Kelvin sendo ajustado para operar em 13,5 PF (conforme simulações realizadas). (a) medidor conectado ao capacitor variável; (b) display do medidor onde podemos visualizar os parâmetros usados na medida ESR; (c) pontas de Kelvin conectadas aos pinos do capacitor váriavel. Imagens produzidas no CBPF.

medição à 4 fios, com 5 terminais, sendo um deles o terminal de guarda que elimina ruído, aumentando a precisão das medidas (figura 10). Utilizamos o modo paralelo e frequência máxima 100kHz por serem capacitâncias baixas. A precisão indicada pelo fabricante é de 0,1 percento para capacitância. O capacitor fixo e o valor da resistência em série (ESR) dos capacitores também foram medidos.

Durante a medida os capacitores variáveis foram ajustados para a capacitância indicada nas simulações, cujos valores de operação simulados são, respectivamente: 13.5pF e 12.3pF. Os componentes foram adicionados ao circuito já ajustados.

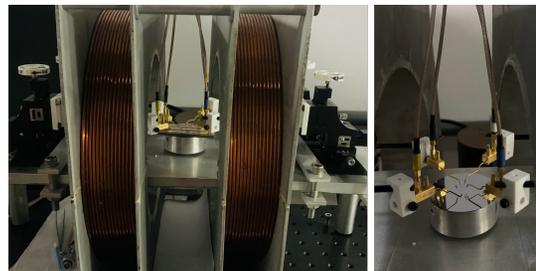


FIG. 11: Aparato experimental pra realização de medida de resistência à quatro fios realizada com analisador de parâmetros B1505A da Keysight. Imagens produzidas no CBPF.

Para a medida de resistividade utilizamos o aparato experimental conectado ao analisador da potência modelo B1505A fabricado pela Keysight (vide fig. 11), adequado para caracterizar dispositivos de alta potência, desempenha função dupla de traçador de curvas e analisador de parâmetros de semicondutores.

Nas medidas realizadas encontramos os parâmetros listados na tabela I

TABLE I: Medida de resistividade

Medida	Tensão (V)	Corrente (I)	Resistência (R)
1	1.03100mV	50.0063mI	20.6174mohm
2	1.46400mV	50.0064mI	29.2763mohm

Para medir a transmissão e reflexão do sinal utilizamos

o analisador de rede N9923A da *Keysight*. Ele é capaz de medir a magnitude e a fase de sinais de RF em um intervalo de frequência de até 4 GHz.

Para caracterizar a sonda, conectou-se a ela o analisador de rede através de um cabo coaxial. Em seguida, o analisador foi configurado para realizar as medições de reflexão da sinal. Conforme pode ser visualizado na figura 12. Realizamos também essa mesma medida nas sondas comerciais fabricadas pela *Varian* e pela *Bruker* respectivamente (vide fig. 13).

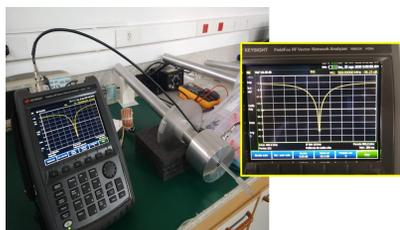


FIG. 12: Medições de transmissão/reflexão realizadas com analisador de RF. Imagens produzidas no CBPF.

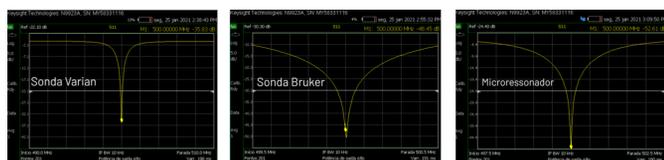


FIG. 13: Da esquerda para direita temos as medidas de reflexão do sinal, realizadas nas sondas: *Varian*, *Bruker* e *Microressonador* com analisador de rede N9923A da *Keysight*. Imagens produzidas no CBPF.

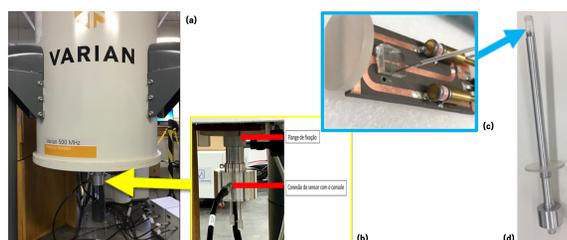


FIG. 14: (a) o magneto de 11.7 teslas instalado no laboratório de RMN do CBPF, ele é o responsável pelo campo externo; (b) sonda conectada ao magneto (fixada pelo flange); (c) circuito; (d) corpo da sonda totalmente montado e aberto onde podemos ver o sensor exposto.

Para testar o funcionamento do microslot, utilizamos um espectrômetro *Bruker Avance Neo 500*, vide figuras 14 e 15. As medidas aqui apresentadas foram realizadas utilizando capilares. Os resultados obtidos para as medidas de amostras padrão, serão mostrados nas figuras 16 e 17. Foram realizados testes de desempenho em alto campo com amostras de 20 % H_2O e 80% de D_2O com um volume menor que 50 nanolitros (vide figura 16). Em seguida realizamos medidas de sacarose diluída em H_2O com volume menor que



FIG. 15: Destaque para o flange de fixação e para a interligação do sensor ao console do espectrômetro.

50 nanolitros e aproximadamente 2.6 nanomol de moléculas no volume ativo (ver fig.: 17).

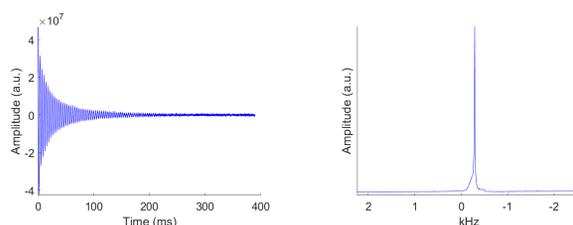


FIG. 16: Medida realizada com a sonda fabricada. Amostra: 20% H_2O diluído em 80% D_2O , medida em alto campo (11.7 T) e sintonizada em 500 MHz. Do lado esquerdo temos o FID e do lado direito temos a FFT (espectro). Imagem produzida no CBPF.

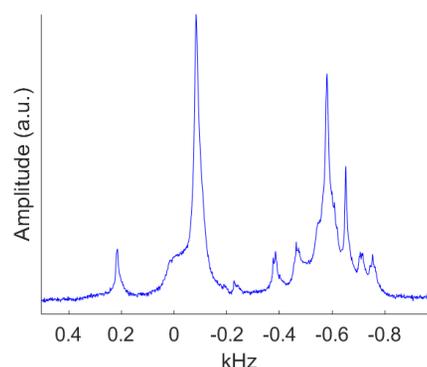


FIG. 17: Medida de sacarose diluída em H_2O realizada no laboratório de RMN do CBPF. Imagem produzida no CBPF.

4. CONCLUSÕES GERAIS

O principal objetivo deste trabalho é a construção de uma sonda para análise de amostras com volumes nanométricos, para isto, foi desenvolvido, fabricado e validado um microressonador planar via prototipação mecânica semi automatizada, método que se mostrou extremamente eficaz para redução de tempo de fabricação e linearidade no resultado final obtido. Podemos afirmar que este método de fabricação

pode ser usado para este tipo de microressonadores dentro do limite operacional do equipamento.

Como perspectiva de melhoria pontual de aspectos relacionados à operação da sonda, faz-se necessário a implementação de sensores complementares que visam fornecer mais informações à respeito das condições em que as medidas estão sendo realizadas, ou seja, detalhes das características do ambiente que as amostras estiveram expostas no processo de medição, como por exemplo monitorar a temperatura.

Espera-se produzir novos microressonadores com estes sensores adicionais integrados a sonda, até o presente momento foram realizados apenas testes preliminares de prototipagem porém os resultados foram satisfatórios o que cria expectativas positivas em relação as novas fabricações planejadas.

Além disto, automatizar o processo de troca de amostras tornando a sonda apta à realizar medidas on-line será também um desafio futuro tal como o uso desta sonda em aplicações de Petrofísica.

5. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer aos colaboradores de todos os laboratórios envolvidos no CBPF pela importante contribuição, em especial a equipe do Litmec, Labnano, Laboratório de Química e ao Magdyn. Agradecer a PETROBRAS pela parceria estabelecida e pelo financiamento do projeto de pesquisa. A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração entre a Petrobras e o CBPF.

-
- [1] David G Gadian. *Nuclear magnetic resonance and its applications to living systems*. Clarendon Press, 1982.
- [2] C.P. Slichter. *Principles of Magnetic Resonance*, chapter 00. Springer Berlin Heidelberg, 1996.
- [3] Ivan S Oliveira. *Física Moderna para Iniciados, Interessados e Aficionados*. v. 1 e v. 2. São Paulo: Livraria da Física, 2006.
- [4] Eiichi Fukushima. *Experimental pulse NMR: a nuts and bolts approach*. CRC Press, 2018.
- [5] SE Barnes and S Maekawa. Generalization of faraday's law to include nonconservative spin forces. *Physical review letters*, 98(24):246601, 2007.
- [6] Vladimír Mlynárik. Introduction to nuclear magnetic resonance. *Analytical Biochemistry*, 529:4–9, 2017. Introduction to in vivo Magnetic Resonance Spectroscopy (MRS): A method to non-invasively study metabolism.
- [7] Nian Wu, Timothy L Peck, Andrew G Webb, Richard L Magin, and Jonathan V Sweedler. 1h-nmr spectroscopy on the nanoliter scale for static and online measurements. *Analytical Chemistry*, 66(22):3849–3857, 1994.
- [8] Michael E Lacey, Raju Subramanian, Dean L Olson, Andrew G Webb, and Jonathan V Sweedler. High-resolution nmr spectroscopy of sample volumes from 1 nl to 10 μ l. *Chemical reviews*, 99(10):3133–3152, 1999.
- [9] Raluca M Fratila and Aldrik H Velders. Small-volume nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Annual review of analytical chemistry*, 4:227–249, 2011.
- [10] Ying Chen, Hardeep S Mehta, Mark C Butler, Eric D Walter, Patrick N Reardon, Ryan S Renslow, Karl T Mueller, and Nancy M Washon. High-resolution microstrip nmr detectors for subnanoliter samples. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(41):28163–28174, 2017.
- [11] Jan G. Korvink, Neil MacKinnon, Vlad Badilita, and Mazin Jouda. "small is beautiful" in nmr. *Journal of Magnetic Resonance*, 306:112–117, 2019.
- [12] Douglas A Skoog, F James Holler, and Stanley R Crouch. *Principles of instrumental analysis*. Cengage learning, 2017.
- [13] Timothy L Peck, Richard L Magin, and Paul C Lauterbur. Design and analysis of microcoils for nmr microscopy. *Journal of Magnetic Resonance, Series B*, 108(2):114–124, 1995.
- [14] Marc J Madou. *Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization*. CRC press, 2002.
- [15] F. David Doty. *Probe Design and Construction*, chapter 00. John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [16] PJM Van Bentum, JWG Janssen, APM Kentgens, J Bart, and Johannes GE Gardeniers. Stripline probes for nuclear magnetic resonance. *Journal of Magnetic Resonance*, 189(1):104–113, 2007.
- [17] Hans Georg Krojanski, Jorg Lambert, Yilmaz Gerikalan, Dieter Suter, and Roland Hergenroder. Microslot nmr probe for metabolomics studies. *Analytical chemistry*, 80(22):8668–8672, 2008.
- [18] AG Webb. Microcoil nuclear magnetic resonance spectroscopy. *NMR Spectroscopy in Pharmaceutical Analysis*, pages 83–130, 2008.
- [19] J Bart, AJ Oosthoek-de Vries, K Tijssen, JWG Janssen, PJM Van Bentum, JGE Gardeniers, and APM Kentgens. In-line nmr analysis using stripline based detectors. In *Proc. 14th Int. Conf. on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences*, pages 2086–8, 2010.
- [20] Jan Korvink, Vlad Badilita, Dario Mager, Oliver Gruschke, Nils Spengler, Shyam Sundar Adhikari Parenky, Ulrike Wallrabe, and Markus Meissner. *Innovative Coil Fabrication Techniques for Miniaturized Magnetic Resonance Detectors*, chapter 5, pages 109–141. John Wiley Sons, Ltd, 2018.
- [21] Myrna J Simpson and Andre J Simpson. *NMR spectroscopy: a versatile tool for environmental research*. John Wiley & Sons, 2014.
- [22] Hakho Lee, Eric Sun, Donhee Ham, and Ralph Weissleder. Chip-nmr biosensor for detection and molecular analysis of cells. *Nature medicine*, 14(8):869–874, 2008.
- [23] André Alves de Souza. *Estudo de propriedades petrofísicas de rochas sedimentares por Ressonância Magnética Nuclear*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2012.
- [24] Michael A Wilson. *NMR techniques & applications in geochemistry & soil chemistry*. Elsevier, 2013.
- [25] Frederico Bastos Schuab. *Integração do Perfil De Ressonância Magnética Nuclear (RMN) com resultados de ensaios de laboratório em reservatórios carbonáticos*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- [26] Bruno Chencarek, Moacyr do Nascimento, Alexandre M Souza, Ivan S Oliveira, and Maury D Correia. Process for production and characterization of synthetic rocks with controlled porosity for applications in petrophysics by high and low field nmr. *Notas Técnicas (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Online)*, 8(1):1–16, 2018.
- [27] José Leão de Luna, Fábio André Perosi, Mariléa Gomes dos Santos Ribeiro, Leonardo Borghi, and Andre Souza. Particionamento da porosidade por rmn aplicada na avaliação da permeabilidade, saturação irreduzível de água e resistividade elétrica de coquinas da formação morro do chaves. *Anuário*

- do Instituto de Geociências*, 41(2):614–622, 2019.
- [28] Yael G Maguire. *Microslots: scalable electromagnetic instrumentation*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [29] Yael Maguire, Isaac L. Chuang, Shuguang Zhang, and Neil Gershenfeld. Ultra-small-sample molecular structure detection using microslot waveguide nuclear spin resonance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(22):9198–9203, 2007.
- [30] Yael Maguire, Isaac L Chuang, Shuguang Zhang, and Neil Gershenfeld. Ultra-small-sample molecular structure detection using microslot waveguide nuclear spin resonance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(22):9198–9203, 2007.
- [31] Guilherme Uhlig. *Construção de uma sonda Microslot para Experimentos com Ressonância Magnética Nuclear*. PhD thesis, dissertação de mestrado, CBPF, 2017.
- [32] Ángel Ríos, Mohammed Zougagh, and Mónica Avila. Miniaturization through lab-on-a-chip: Utopia or reality for routine laboratories? a review. *Analytica chimica acta*, 740:1–11, 2012.
- [33] James Eills, Dmitry Budker, Silvia Cavagnero, Eduard Y Chekmenev, Stuart J Elliott, Sami Jannin, Anne Lesage, Jorg Matysik, Thomas Meersmann, Thomas Prisner, et al. Spin hyperpolarization in modern magnetic resonance. *Chemical Reviews*, 123(4):1417–1551, 2023.
- [34] Ayten Kalfe, Ahmad Telfah, Jorg Lambert, and Roland Hergenroder. Looking into living cell systems: planar waveguide microfluidic nmr detector for in vitro metabolomics of tumor spheroids. *Analytical chemistry*, 87(14):7402–7410, 2015.
- [35] Regis Almir Rohde. *Metalografia preparação de amostras. Laboratório de ensaios mecânicos. Universidade Regional Integrada do alto Uruguai e Missões, 3ª Edição, Rio Grande do Sul*, 2010.

Notas Técnicas é uma publicação de trabalhos técnicos relevantes, das diferentes áreas da física e afins, e áreas interdisciplinares tais como: Química, Computação, Matemática Aplicada, Biblioteconomia, Eletrônica e Mecânica entre outras.

Cópias desta publicação podem ser obtidas diretamente na página web <http://revistas.cbpf.br/index.php/nt> ou por correspondência ao:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brasil
E-mail: alinecd@cbpf.br/valeria@cbpf.br
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>

Notas Técnicas is a publication of relevant technical papers, from different areas of physics and related fields, and interdisciplinary areas such as Chemistry, Computer Science, Applied Mathematics, Library Science, Electronics and Mechanical Engineering among others.

Copies of these reports can be downloaded directly from the website <http://notastecnicas.cbpf.br> or requested by regular mail to:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brazil
E-mail: alinecd@cbpf.br/valeria@cbpf.br
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>