



# PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DO USO DA RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR APLICADA ÀS ROCHAS CARBONÁTICAS

Michelle Ramos Cavalcante Fortunato <sup>1</sup>

## INTRODUÇÃO

A importância das rochas carbonáticas no contexto da indústria do petróleo já é amplamente reconhecida no mundo e o interesse comercial por essas rochas tem aumentado nos últimos anos devido as crescentes descobertas mundiais de reservas de óleo e gás, visto que grande parte das reservas provadas mundiais está associada a essas rochas. Segundo SINGH (et al., 2020), mais de 60% do petróleo mundial estão localizados em rochas carbonáticas, 62% das reservas provadas estão nos países do Golfo e 70% dessas reservas dizem respeito aos carbonatos. Essas rochas, porém, apresentam arranjo poroso complexo, com ampla variedade geométrica e de tamanho de poros.

Os reservatórios petrolíferos apresentam duas principais litologias, os arenitos e carbonatos. Ambos são constituídos de rochas sedimentares que apresentam meio poroso específico sendo caracterizado por suas propriedades petrofísicas, tais como porosidade, permeabilidade, molhabilidade e pressão capilar. Essas propriedades são influenciadas pelos eventos geológicos de deposição, diagênese ou fraturamento que deram origem as rochas (ASSAAD, 2009). Muito embora a rede porosa de algumas rochas sejam previsíveis, fato é que nas rochas carbonáticas muito ainda é preciso conhecer. As rochas carbonáticas apresentam rede de poros não previsíveis, com relevante dependência anisotrópica, sendo constituído por sistemas de poros complexos e heterogêneos que variam de microporos, vugs e poros interparticulares (MÜLLER-HUBER; SCHÖN; BÖRNER, 2016; ZHANG; ZOU; PENG, 2018). Assim, a corrida por melhores técnicas de análise tem fomentado inovações nessa área desde o final da década de 90, de forma que a caracterização do meio poroso dos carbonatos ainda é desafiadora e sua heterogeneidade tem fomentado o uso de técnicas mais versáteis e sofisticadas.

---

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia de Biocombustíveis e Petroquímica e Especialista em Engenharia de Sistemas Offshore pela UFRJ, [michelleramosufrj@gmail.com](mailto:michelleramosufrj@gmail.com);



Embora existam métodos convencionais de perfilagem de poços para melhor caracterizar os reservatórios carbonáticos, esses não são suficientes para análise completa dessas rochas, uma vez que elas são dependentes de testemunhos e dados petrográficos, que dificilmente estão acessíveis. Para superar esse problema, a perfilagem de ressonância magnética nuclear (NMR) surge como uma das tecnologias avançadas para avaliação de reservatórios *in situ* (BELILA et al., 2020).

É importante evidenciar que as propriedades petrofísicas do espaço poroso são relevantes na área de exploração e produção de petróleo, principalmente, na avaliação da produtividade dos reservatórios. Trata-se, portanto, do cerne da maioria das atividades dessa área, possibilitando a previsão do potencial de armazenamento de fluidos e da permeabilidade desses (DANDEKAR, 2013; SCHÖN, 2011).

Nesse sentido, a ressonância magnética nuclear (RMN), uma técnica espectroscópica que alcança o nível atômico dos núcleos magnéticos, é uma técnica valiosa para avaliação de rochas e, portanto, dos reservatórios de petróleo. A tecnologia perfilagem de RMN, o referencial teórico adotado neste trabalho, tem se mostrado relevante na avaliação das formações rochosas e fomentou novos interesses sobre o espaço poroso e o comportamento dos fluidos nos últimos anos. A RMN para estudo de rochas envolve o uso do baixo campo magnético, de forma que há a análise do núcleo de hidrogênio dos fluidos e seu ambiente físico do espaço poroso. Esse núcleo de isótopo  $^1\text{H}$  com abundância natural superior a 99%, produz um forte sinal frente ao campo magnético aplicado. Portanto, o estudo das propriedades petrofísicas nesse contexto se baseia na resposta desses núcleos ao campo magnético aplicado e as propriedades podem ser estimadas de forma direta ou indireta. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma prospecção tecnológica do uso da perfilagem RMN aplicada aos carbonatos, fornecendo um panorama das principais empresas detentoras dessa tecnologia e como as patentes têm explorado essa tecnologia em função das diferentes propriedades petrofísicas encontradas no espaço poroso das rochas.

Como mostrado no Gráfico 1, na década de 60 surgiu as primeiras patentes com uso da RMN na investigação de propriedades das formações de arenitos (Gráfico 2) e o progresso dessa tecnologia forneceu à indústria do petróleo novas metodologias em geofísica de poços para caracterização de reservatórios. Quando comparada com outras técnicas, as potencialidades da perfilagem de poço com uso de RMN ficam evidentes para atender ampla



gama de demandas (DA SILVA et al., 2015), sendo as inovações direcionadas para as mais importantes propriedades petrofísicas (Gráfico 3).

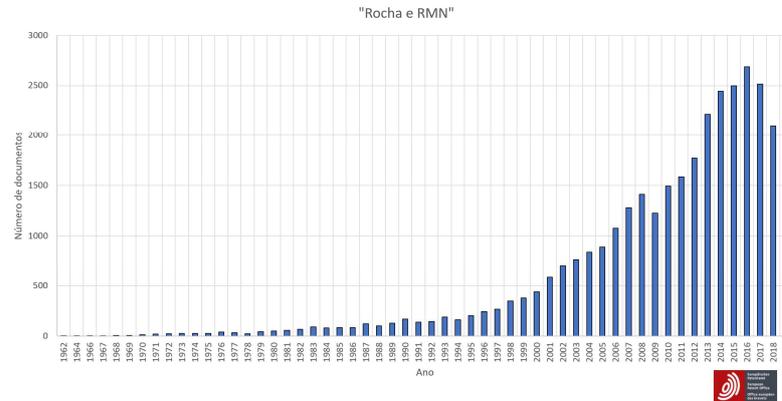


Gráfico 1 - Frequência de publicação de patentes desde o início da tecnologia RMN. Fonte: Elaboração própria com dados obtidos da base Espacenet.

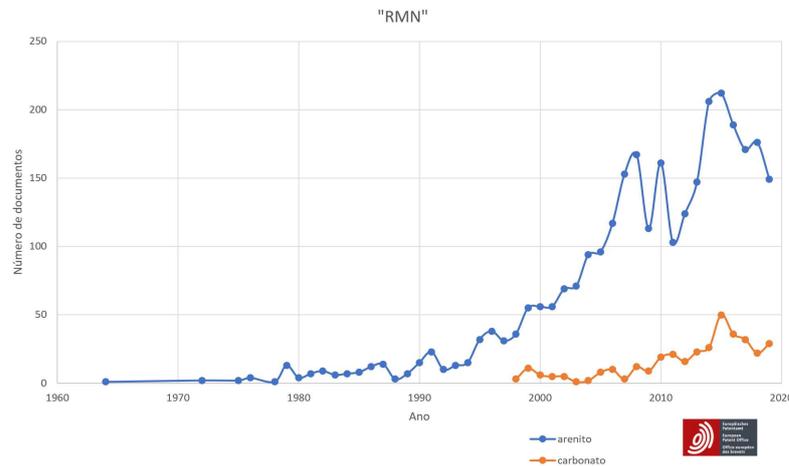


Gráfico 2 - Frequência de publicação de patentes desde o início da tecnologia RMN para rochas areníticas e carbonáticas. Fonte: Elaboração própria com dados obtidos da base Espacenet.

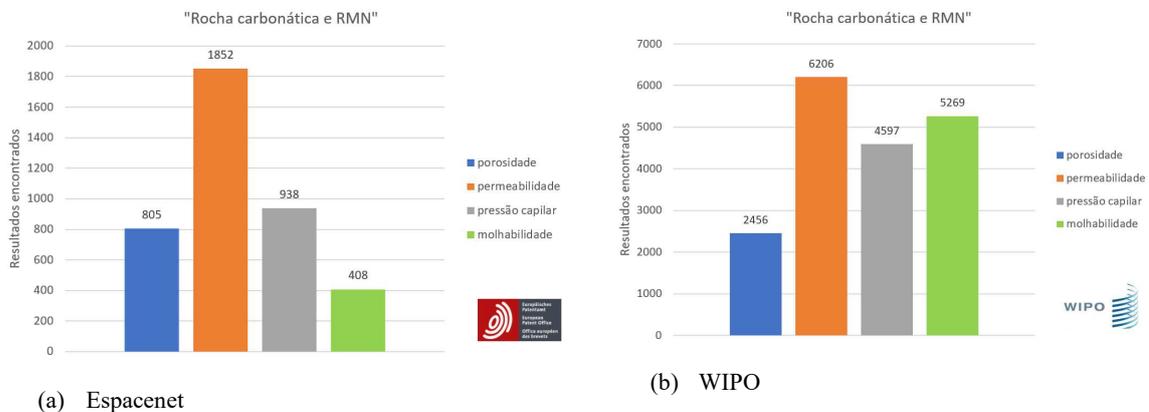


Gráfico 3 - Número de patentes usando tecnologia RMN aplicada às rochas carbonáticas de acordo com as propriedades petrofísicas. Fonte: Elaboração própria com dados obtidos das bases Espacenet e WIPO.



## **METODOLOGIA (OU MATERIAIS E MÉTODOS)**

Nesse trabalho são apresentados os resultados de prospecção tecnológica, realizada em janeiro de 2021, relativa à tecnologia RMN aplicada às rochas. Foram utilizadas algumas combinações de palavras de busca nas bases da Espacenet (*European Patent Office*) e da WIPO (*World Intellectual Property Organization*) para melhor compreensão da ocorrência de patentes reivindicadas para tecnologia RMN aplicada aos estudos de propriedades de rochas. Foi constatado que grande parte das patentes encontradas é de inovação em métodos de medição por RMN.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

De acordo com o gráfico 1, realizada com filtro de busca, nos últimos 20 anos houve um aumento expressivo de depósito de documentos de patentes sobre tecnologia RMN aplicada a rochas, atingindo um máximo de publicações em 2016 com 2687 documentos. Ressalta-se que na lista dos dez maiores titulares em patentes nessa área, segundo a base Espacenet, a empresa alemã BASF e a norte-americana Schlumberger lideram as inovações, sendo a Schlumberger a líder de inovações em tecnologia RMN aplicada à rochas carbonáticas.

De acordo com o gráfico 2, realizada com filtro de busca, a década de 60 surge as patentes de tecnologia RMN aplicada aos arenitos, chegando ao máximo em 2015 com 212 documentos registrados na base Espacenet. No entanto, as inovações em rochas carbonáticas iniciaram apenas no final da década de 90, chegando ao máximo em 2015 com 50 documentos registrados.

O maior quantitativo da busca na base Espacenet, realizada sem filtro, realizada em janeiro de 2021, ao usar as palavras-chave “rock” and “NMR” forneceu 11559 patentes e a adição do termo “carbonate”, recuperou 6531 publicações. Ao incluir os termos relativos às propriedades petrofísicas tais como “porosity”, “permeability”, “capillary pressure” e “wettability”, pode-se constatar pelo gráfico 3a, que a maioria das reivindicações tinha como objetivo usar a RMN para melhores soluções da permeabilidade. Além disso, o maior quantitativo da busca na base WIPO, realizada sem filtro, ao usar as palavras-chave “rock” and “NMR” forneceu 29137 patentes e a adição do termo “carbonate”, recuperou 22746



publicações. Ao incluir os termos relativos às propriedades petrofísicas tais como “porosity”, “permeability”, “capillary pressure” e “wettability”, pode-se constatar pelo gráfico 3b, que a maioria das reivindicações também tinha como objetivo usar a RMN para melhores soluções da permeabilidade. Ressalta-se que desse levantamento, a patente mais atualizada apresenta como reinvidicação um novo método medição de RMN com correção de temperatura em distribuição de raio de garganta de poro (SHAO; SONGHUA, 2020).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sem dúvida, a RMN é uma técnica poderosa para caracterização de reservatórios de petróleo, seja pela análise de amostras do núcleo ou pela perfilagem de poço. Em comparação a outras técnicas, a RMN tem a grande vantagem de ser uma técnica não invasiva. Por meio dela é possível estudar o sistema estrutural dos poros e obter as principais propriedades petrofísicas para avaliação consistente da qualidade e produtividade dos reservatórios. É possível estudar a porosidade por medições diretas e demais propriedades de forma indireta, com modelos matemáticos cada vez mais aperfeiçoados. Muito embora ainda haja dificuldades de previsão completa do meio poroso, ainda sim, pode-se afirmar que os avanços tecnológicos associados à RMN permitiu grande conhecimento técnico sobre as rochas e melhor compreensão sobre o comportamento dos fluidos confinados. Além disso, em ambas as bases de buscas utilizadas, grande parte das inovações tinham soluções de estimativas da permeabilidade pelo uso da RMN.

É notório que a heterogeneidade das rochas carbonáticas confere a elas maiores desafios na caracterização de reservatórios petrolíferos e pelo quantitativo de inovações publicadas nas principais bases de patentes internacionais é possível constatar que grandes esforços tem sido empregados na criação de novos métodos de tecnologia RMN na tentativa de desvendar os extraordinários arranjos estruturais dessa rocha.

O depósito de patentes que faz uso da RMN visando soluções para análise de rochas carbonáticas é ainda recente e se deve em grande parte as recentes descobertas de petróleo e gás nesse tipo de rocha. Além disso, como os reservatórios carbonáticos são dominados por uma alta variedade de estruturas porosas, como nanoporos, microporos, macroporos e fraturas, outras propriedades tem sido exploradas com o uso da RMN. Isso justifica o aumento de



deposição de patentes envolvendo outras propriedades petrofísicas, tais como molhabilidade e pressão capilar.

**Palavras-chave:** RMN, petrofísica, rocha, carbonato, prospecção.

## REFERÊNCIAS

- ASSAAD, F. A. **Field Methods for Petroleum Geologists. A Guide to Computerized Lithostratigraphic Correlation Charts Case Study: Northern Africa.** Springer, v. 53, 2009.
- BELILA, A. M. P. et al. Pore typing using nuclear magnetic resonance, an example with samples from cretaceous pre-salt lacustrine carbonates in the Santos Basin, Brazil. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 190, n. July 2018, 2020.
- DANDEKAR, A. Y. **Petroleum reservoir rock and fluid properties, second edition.** CRC Press, 2013.
- DA SILVA, P. N. et al. Automatic classification of carbonate rocks permeability from <sup>1</sup>H NMR relaxation data. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 9, p. 4299–4309, 2015.
- MÜLLER-HUBER, E.; SCHÖN, J.; BÖRNER, F. Pore space characterization in carbonate rocks - Approach to combine nuclear magnetic resonance and elastic wave velocity measurements. **Journal of Applied Geophysics**, v. 127, p. 68–81, 2016.
- SCHÖN, J. H. **Physical Properties of Rocks: A Workbook.** Elsevier, 2011.
- SHAO, W.; SONGHUA, C. **Temperature Correction of NMR Relaxation Time Distributions** US, 2020.
- SINGH, K. H. et al. **Petro-physics and rock physics of carbonate reservoirs.** Springer, 2020.
- ZHANG, S.; ZOU, C.; PENG, C. Numerical simulation study of anisotropic velocities in fractured-vuggy carbonate reservoirs. **Journal of Geophysics and Engineering**, v. 15, n. 5, p. 1851–1863, 2018.