

**Título em Português:**

Processamento de sinais para o estudo de meios porosos por Ressonância Magnética Nuclear em condições de perfilagem de poços de petróleo

**Título em Inglês:**

signal processing for the study of porous media by nuclear magnetic resonance under oil well logging conditions

**Autor:**

João Octavio Kul

**Instituição:**

Universidade de São Paulo

**Unidade:**

Instituto de Física de São Carlos

**Orientador:**

Tito Jose Bonagamba

**Área de Pesquisa / SubÁrea:** Áreas Clássicas de Fenomenologia e suas Aplicações

**Agência Financiadora:**

Outros

# PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA O ESTUDO DE MEIOS POROSOS POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR EM CONDIÇÕES DE PERFILAGEM DE POÇOS DE PETRÓLEO

João Octavio Kül

Arthur Gustavo de Araújo Ferreira

Tito José Bonagamba

Instituto de Física de São Carlos / USP

joaooctaviokul02@usp.br

## Objetivos

O objetivo deste trabalho é a aprendizagem de técnicas de análise e processamento de sinais de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) utilizando simulações numéricas e dados experimentais. A partir desse conhecimento, é feito um estudo de meios porosos com medidas coletadas em laboratório. Esses procedimentos são realizados em um magneto unilateral com amostras que, em geral, não estão estáticas durante o experimento, mas oscilam em torno da região do *sweet spot* do magneto, onde há um gradiente de campo intenso e aproximadamente constante. Também é esperado que com essas informações seja possível correlacionar os efeitos do movimento da amostra e suas consequências no processamento de sinais através da Transformada Inversa de Laplace, condições encontradas durante a utilização da RMN na perfuração de poços de petróleo, com destaque para medidas realizadas durante a perfuração do poço (*logging-while-drilling* - LWD).

## Métodos e Procedimentos

Em RMN, para se medir o tempo de relaxação transversal,  $T_2$ , é feita a medida CPMG [1], que produz um decaimento exponencial da magnetização da amostra, que surge quando a colocamos na presença de um campo magnético externo.

O processo de relaxação transversal descrito pelas equações de Bloch [3] obedece a seguinte relação:

$$M_{xy}(t) = M_0 e^{-t/T_2} \quad (1)$$

Discretizando a equação acima, obtemos um sistema linear na forma matricial:

$$M = kg \quad (2)$$

Nesse caso, temos  $k_{ij} = e^{-t_i/T_{2,j}}$  e  $g$  é um vetor de coeficientes de cada termo exponencial correspondente a  $T_{2,j}$ . Desta forma, temos a

Transformada de Laplace, que corresponde ao sinal de RMN obtido experimentalmente.

A solução que buscamos, portanto, é a Transformada Inversa de Laplace (ILT), ou seja, o vetor de coeficientes  $g$ , que contém a informação da distribuição dos valores de  $T_2$  da amostra:

$$g = k^{-1}M \quad (3)$$

Em geral, basta calcular o vetor  $g$  na forma acima. Contudo, como se trata de um problema mal-posto (mais de uma solução possível), utilizamos a solução que minimiza a expressão

$$|M - kg|^2 \quad (4)$$

Para que a solução seja mais precisa e estável, em geral, usa-se a minimização do funcional de Tikhonov:

$$|M - kg|^2 + \alpha |g|^2, \quad (5)$$

onde  $\alpha$  é o parâmetro de regularização da solução.

## Resultados

Inicialmente, foi feita a seguinte simulação numérica: para a mesma distribuição dos valores de  $T_2$  de um meio poroso hipotético, foram construídos decaimentos multi-exponenciais variando o tempo ao eco (tempo entre duas aquisições de sinal de RMN). Como efeito dessa variação, vemos na figura abaixo que o resultado da ILT passa a divergir da distribuição original a partir de certos valores de tempo ao eco, pois os picos se deslocam para a direita e perdem intensidade. Em um experimento de RMN, deve-se usar um intervalo temporal de aquisição que não produza este efeito no processamento de sinal.

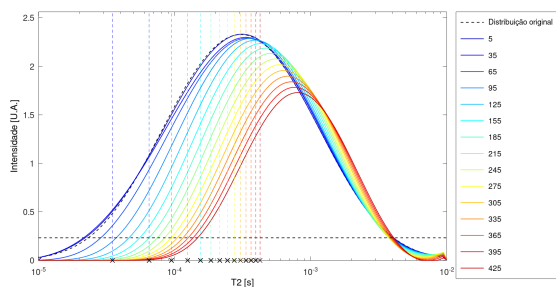


Figura 1: Efeito da variação do tempo ao eco na Transformada Inversa de Laplace.

Na coleta de dados experimentais, foram utilizadas amostras de água, gel e rochas saturadas com água destilada, que oscilam em torno do *sweet spot* do magneto unilateral. Os resultados foram controlados por frequência e amplitude de oscilação, para analisar o impacto de cada um desses parâmetros na medida.

Na figura a seguir, temos os resultados obtidos em uma medida de RMN com oscilação mecânica da amostra na presença de um gradiente de campo magnético intenso. Nesse caso, foi utilizada uma solução aquosa de sulfato de cobre (0,28mM).

Vemos que ao mover a amostra em torno da posição ótima do magneto, passamos a ter uma perda mais rápida de sinal nos primeiros ciclos de oscilação. Também pode-se notar que a distribuição de  $T_2$  da amostra muda em relação à original conforme a amplitude de oscilação aumenta, ou seja, porções cada vez maiores da amostra não são mais excitadas pelos pulsos de radiofrequência seletivos.

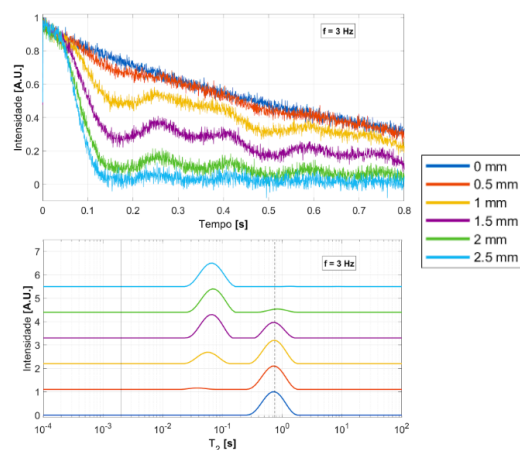


Figura 2: Processamento do sinal para a solução de água e sulfato de cobre penta-hidratado.

## Conclusões

Através das simulações computacionais, vemos o efeito de se usar um tempo ao eco da ordem do valor de  $T_2$  da amostra e como isso afeta na própria inferência de  $T_2$ .

Além disso, o principal efeito de movimentarmos as amostras durante uma medida CPMG em magnetos unilaterais é a perda de sinal devido à seletividade dos pulsos de radiofrequência.

Estes resultados contribuem para uma melhor compreensão dos experimentos de RMN, principalmente em medidas *ex situ* (como em poços de petróleo). Com essas informações, é possível determinar parâmetros físicos do meio poroso, como relaxatividade superficial e porosidade, em condições LWD de perfilagem de rochas reservatório.

## Referências Bibliográficas

- [1] MEIBOOM, S.; GILL, D. *Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times*. Review of Scientific Instruments, v. 29, n. 8, p. 688-691, 1958.
- [2] SOUZA, A. *Estudo de propriedades petrofísicas de rochas sedimentares por Ressonância Magnética Nuclear*. Tese - Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [3] CASANOVA, F.; PERLO, J.; BLÜMICH, B. *Single-Sided NMR: NMR in inhomogeneous fields*. Aachen, Germany: Springer, 2010.

# SIGNAL PROCESSING FOR THE STUDY OF POROUS MEDIA BY NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE UNDER OIL WELL LOGGING CONDITIONS

João Octavio Kül

Arthur Gustavo de Araújo Ferreira

Tito José Bonagamba

Instituto de Física de São Carlos / USP

joaooctaviokul02@usp.br

## Objectives

The objective of this work is the apprenticeship of techniques for analysis and processing of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) signals using numerical simulations and experimental data. From this knowledge, a study of porous media with laboratory measurements is done. These procedures are done on a single-sided magnet with samples which, in general, are not static during the experiment, but they oscillate around the sweet spot of the magnet, where there is a field gradient intense and approximately constant. It is expected that with these information it will be possible to correlate the effects of the sample's movement and its consequences on signal processing with the Inverse Laplace Transform (ILT), conditions found when using NMR in oil well logging, with emphasis on measurements performed during the well drilling (*logging-while-drilling* - LWD).

## Materials and Methods

In NMR, for measuring the transverse relaxation time,  $T_2$ , it is applied the CPMG pulse sequence [1], which produces an exponential decay of the sample's magnetization, that arises when we place it in the presence of an external magnetic field.

The transverse relaxation process described Bloch's equations [3] obeys the following relation:

$$M_{xy}(t) = M_0 e^{-t/T_2} \quad (1)$$

To define the problem numerically, we discretize the equation above in a linear system on the matrix form:

$$M = kg \quad (2)$$

In this case, we have  $k_{ij} = e^{-t_i/T_{2,j}}$  and  $g$  is a coefficients vector of each exponential term corresponding to  $T_{2,j}$ . This way, we build the Laplace Transform, which corresponds to the NMR signal obtained experimentally.

Therefore, the solution we are looking for is the Inverse Laplace Transform, that is, we want to obtain the coefficients vector  $g$ , which contains the sample's  $T_2$  values distribution information:

$$g = k^{-1}M \quad (3)$$

In general, it is enough to calculate the vector  $g$  as above. However, as it is an ill-posed problem (it has more than one possible solution), we use the solution which minimizes the expression

$$|M - kg|^2 \quad (4)$$

In order to make the solution more stable and accurate, we use the minimization of the Tikhonov functional:

$$|M - kg|^2 + \alpha|g|^2, \quad (5)$$

where  $\alpha$  is denominated the regularization parameter of the obtained solution.

## Results

Initially, it was made the following numerical simulation: for the same  $T_2$  values distribution of a hypothetical porous medium, multi-exponential decays were built varying the

echo time (time between two NMR signal acquisitions). As an effect of this variation, we see in the figure below that the ILT result start to diverge from the original distribution from certain values of echo time, because the peaks shift to the right and lose intensity. Thus, in an NMR experiment, an acquisition time interval that does not have this effect on signal processing should be used.

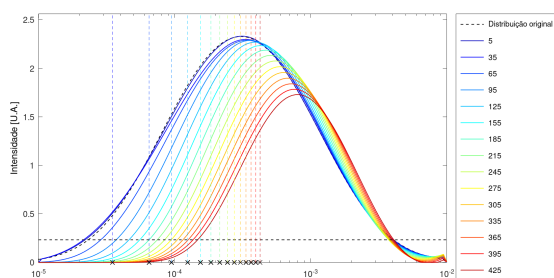


Figure 1: Effect of varying the echo time in the Inverse Laplace Transform.

In the collection of experimental data, samples of water, gel and rocks saturated with distilled water were used, and their signals were measured while their oscillations around the sweet spot of the single-sided magnet. The results were controlled by frequency and amplitude of oscillation, to analyze the impact of each one of these parameters on the measurement.

On the following figure, we have the results obtained on a NMR measurement with a mechanically oscillating sample in the presence of an intense magnetic field gradient. In this case, it was used an aqueous solution of copper sulfate (0.28mM).

We see that moving the sample around the optimal magnet position, we start to have a faster loss of signal in the first cycles of oscillation. It is also possible to note that the sample's  $T_2$  distribution changes in relation to the original as the amplitude of oscillation increases, that is, larger portions of the sample are no longer excited by the selective radiofrequency pulses at each amplitude.

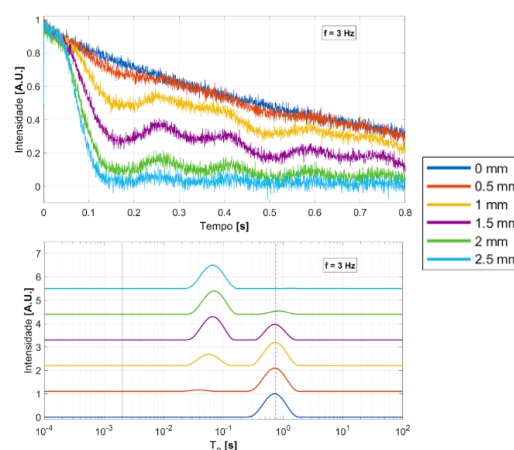


Figure 2: Signal processing for the water and copper sulfate pentahydrate solution.

## Conclusions

With the computer simulations, we see the effect of using an echo time of the same order as the sample's  $T_2$  and how this affects the inference of  $T_2$  itself.

Moreover, the main effect of moving samples during a CPMG measurement on single-sided magnets is the loss of signal due to the selectivity of the radiofrequency pulses.

These results contribute to the understanding of the NMR experiments' data collections, mainly in *ex situ* measurements (as in oil wells). With these informations, it is possible to determine important parameters of the porous medium, like its surface relaxivity and its porosity, under LWD conditions of reservoir rock logging.

## References

- [1] MEIBOOM, S.; GILL, D. *Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times*. Review of Scientific Instruments, v. 29, n. 8, p. 688-691, 1958.
- [2] SOUZA, A. *Estudo de propriedades petrofísicas de rochas sedimentares por Ressonância Magnética Nuclear*. Tese - Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [3] CASANOVA, F.; PERLO, J.; BLÜMICH, B. *Single-Sided NMR: NMR in inhomogeneous fields*. Aachen, Germany: Springer, 2010.