

## Trabalho



<b>Título em Português:</b>	Implementação de Métodos de Relaxometria 2D por Ressonância Magnética no Espectrômetro de Ressonância Magnética Digital (DMRS)
<b>Título em Inglês:</b>	Implementation of 2D Relaxometry Methods by Magnetic Resonance in the Digital Magnetic Resonance Spectrometer (DMRS)
<b>Autor:</b>	Maria Vitória Lima da Silva
<b>Instituição:</b>	Universidade de São Paulo
<b>Unidade:</b>	Instituto de Física de São Carlos
<b>Orientador:</b>	Alberto Tannus
<b>Área de Pesquisa / SubÁrea:</b>	Física Nuclear
<b>Agência Financiadora:</b>	Outros

# Implementação de Métodos de Relaxometria 2D por Ressonância Magnética no Espectrômetro de Ressonância Magnética Digital (DMRS)

Maria Vitória Lima da Silva

Julia Marcolan

Alberto Tannús

Instituto de Física de São Carlos (IFSC), Universidade de São Paulo (USP)

e-mail mariavitoria2022@usp.br

## Objetivos

A Relaxometria por Ressonância Magnética Nuclear (RMN) permite a obtenção das constantes de relaxação  $T_1$  (longitudinal) e  $T_2$  (transversal), fornecendo informações sobre os mecanismos de relaxação em diferentes amostras, o que permite sua caracterização [1].

Existem sequências de pulsos 1D tradicionais, Inversion-Recovery (IR) para  $T_1$  e Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) para  $T_2$ , previamente implementadas no Espectrômetro Digital de Ressonância Magnética (DMRS) [1]. Desenvolvido pelo Centro de Imagens e Espectroscopia por Ressonância Magnética (CIERMag), o DMRS usa Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) e conta com ferramentas próprias, como o Python Magnetic Resonance Framework (PyMR), software para planejamento e execução de experimentos [3], e a linguagem F para facilitar a programação das sequências de pulso de RMN [1].

O objetivo deste trabalho é implementar e avaliar métodos 2D de Relaxometria por RMN para obtenção simultânea de  $T_1$  e  $T_2$  no DMRS.

## Métodos e Procedimentos

No contexto do CIERMag, um método abrange todas as etapas do experimento, desde o pré-processamento até o processamento de dados [1]. Com programação em linguagem F e

scripts auxiliares em Python para organização, validação e análise dos sinais, os métodos implementados (Fig. 1), baseiam-se em preparações distintas da magnetização longitudinal: Inversion-Recovery (IR-CPMG), Partial-Inversion-Recovery (PIR-CPMG) [4] e Saturation-Recovery (SR-CPMG), seguidas por CPMG. Busca-se comparar esses métodos quanto à precisão, tempo de aquisição e reprodutibilidade em relação aos métodos tradicionais unidimensionais (IR e CPMG).

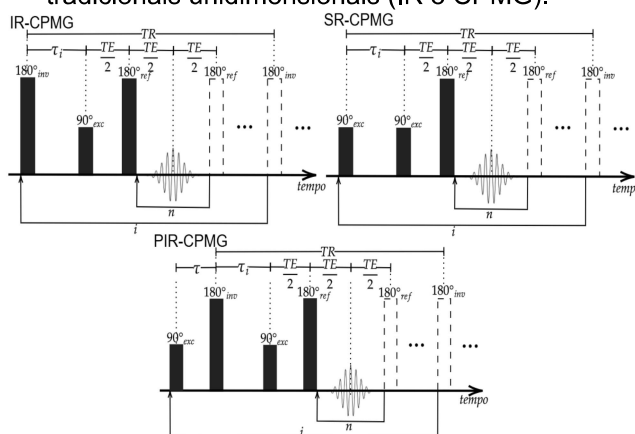


Fig. 1: Diagrama dos métodos 2D. TE é o tempo ao eco, TR é o tempo de repetição,  $n$  varia de 1 ao número de ecos.  $\tau_i$  é o tempo de inversão da repetição  $i$  e  $\tau$  é o tempo de polarização parcial.

Os experimentos foram feitos com um magneto permanente de 0,5463 T, operando a 23,256

MHz para  $H^1$ . Os pulsos de radiofrequência (RF) e a frequência do espectrômetro foram previamente calibrados. A amostra utilizada foi de 1 mL de  $CuSO_4$  0,5g/L. Os experimentos de IR, CPMG e métodos 2D foram repetidos 3 vezes e os valores de  $T_1$  e  $T_2$  foram obtidos a partir da média das medidas.

## Resultados

A Fig. 2 mostra a evolução da magnetização longitudinal e um decaimento transversal em cada método 2D, evidenciando diferenças dinâmicas. Cada ponto da dimensão de  $T_1$  é seguido de um decaimento exponencial da magnetização transversal, usado para obter  $T_2$ .

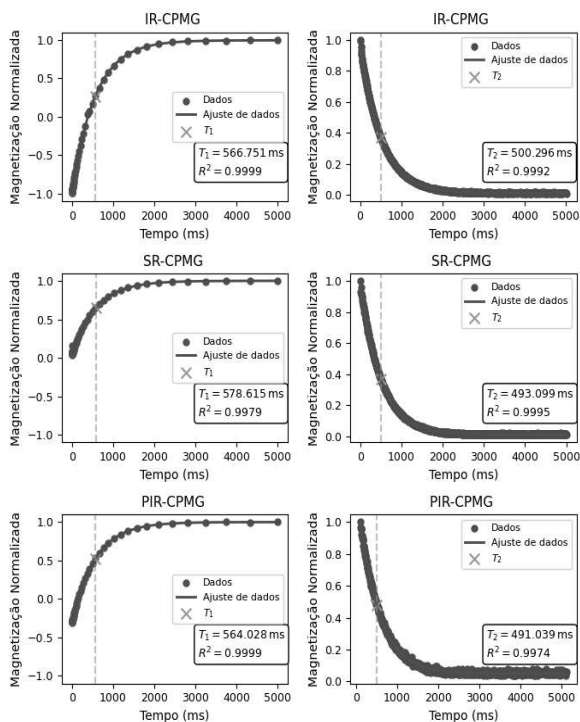


Fig. 2. Evolução da magnetização longitudinal (à esquerda) e decaimento da magnetização transversal (à direita) para cada método.

A Fig. 3 apresenta mapas de intensidade que indicam o ajuste entre dados experimentais e simulados. Os picos identificam as estimativas mais prováveis de  $T_1$  e  $T_2$ , permitindo comparar a precisão dos métodos.

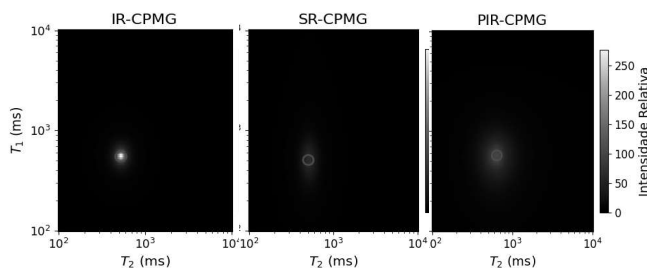


Fig. 3: Mapas de correlação  $T_1$ - $T_2$  para os métodos 2D.

A Tab. 1 mostra os valores de  $T_1$  e  $T_2$  obtidos:

	CPMG	IR	IR-CPMG	SR-CPMG	PIR-CPMG
$T_1$ (ms)	-	556 ± 8	562 ± 6	563±43	562±2
$T_2$ (ms)	506,9 ± 0,2	-	500 ± 1	496±6	487±5
t (min)	10	45	80	45	45

Tab. 1: Comparação dos tempos de relaxação obtidos. t é o tempo total de aquisição.

## Conclusões

Os métodos 2D são consistentes com IR e CPMG. PIR-CPMG equilibrou precisão e tempo; IR-CPMG foi mais preciso, mas mais lento; SR-CPMG menos preciso e mais ruidoso em  $T_1$ . Os mapas mostraram correlação  $T_1$ - $T_2$  e diferenças de ruído. O DMRS mostrou-se eficaz e versátil. Futuros trabalhos poderão aplicar a Transformada Inversa de Laplace (ILT) para espectros quantitativos e diferenciação de compartimentos.

## Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Alberto Tannús, à M<sup>a</sup>. Julia Marcolan pela orientação, ao CIERMag e ao IFSC-USP, pelo apoio e infraestrutura, com financiamento da University of Minnesota/NIH (Processo USP/IFSC nº 2017.1.579.76.7).

## Referências

- [1] TEIXEIRA, J. M. *Digital magnetic resonance spectrometer (DMRS) from CIERMag: calibration and relaxometry measurements methodology*. Dissertação (Mestrado) – IFSC/USP, 2022.
- [2] MARTINS, M. J.; VIDOTO, E. L. G.; TANNÚS, A. *Espectrômetro para uso em sistemas de RM*. Patente BR102015000624-1, USP, 2015.
- [3] PIZETTA, D. C. *PyMR: um framework para programação de sistemas de RM*. Tese (Doutorado) – IFSC/USP, 2018.
- [4] DU, Q. et al. *A novel two-dimensional NMR relaxometry pulse sequence*. J. Magn. Reson., v. 310, p. 106643, 2020.

# Implementation of 2D Relaxometry Methods by Magnetic Resonance in the Digital Magnetic Resonance Spectrometer (DMRS)

Maria Vitória Lima da Silva

Julia Marcolan

Alberto Tannús

Instituto de Física de São Carlos (IFSC), Universidade de São Paulo (USP)

e-mail mariavitoria2022@usp.br

## Objectives

Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Relaxometry allows the determination of the relaxation constants  $T_1$  (longitudinal) and  $T_2$  (transversal), providing information on relaxation mechanisms in different samples, thus enabling their characterization [1].

Traditional 1D pulse sequences exist, Inversion-Recovery (IR) for  $T_1$  and Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) for  $T_2$ , previously implemented in the Digital Magnetic Resonance Spectrometer (DMRS) [1]. Developed by the Centro de Imagens e Espectroscopia por Ressonância Magnética (CIERMag), the DMRS uses Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) and features proprietary tools such as the Python Magnetic Resonance Framework (PyMR), a software for experiment planning and execution [3], and the F language to facilitate NMR pulse sequence programming [1].

The objective of this work is to implement and evaluate 2D NMR relaxometry methods for simultaneous acquisition of  $T_1$  and  $T_2$  in the DMRS.

## Materials and Methods

In the context of CIERMag, a method encompasses all stages of the experiment, from pre-processing to data processing [1]. With

programming in F language and auxiliary Python scripts for organization, validation, and signal analysis, the implemented methods (Fig. 1) are based on distinct preparations of the longitudinal magnetization : Inversion-Recovery (IR-CPMG), Partial-Inversion-Recovery (PIR-CPMG) [4], and Saturation-Recovery (SR-CPMG), followed by CPMG. The objective is to compare these methods in terms of precision, acquisition time, and reproducibility with respect to the traditional one-dimensional methods (IR and CPMG).

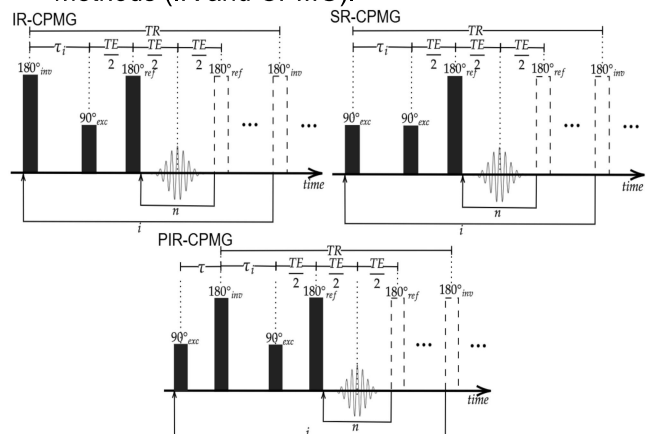


Fig. 1: Diagram of the 2D methods. TE is the echo time, TR is the repetition time,  $n$  ranges from 1 to the number of echoes.  $\tau_i$  is the inversion time of repetition  $i$ , and  $\tau$  is the partial polarization time.

The experiments were performed with a 0,5463T permanent magnet, operating at

23,256MHz for  $^1\text{H}$ . The radiofrequency (RF) pulses and the spectrometer frequency were previously calibrated. The sample used was 1 mL of  $\text{CuSO}_4$  0,5g/L. The IR, CPMG, and 2D methods experiments were repeated three times, and the  $T_1$  and  $T_2$  values were obtained from the average of the measurements.

## Results

Fig. 2 shows the evolution of the longitudinal magnetization and a transverse decay for each 2D method, highlighting dynamic differences. Each point in the  $T_1$  dimension is followed by an exponential decay of the transverse magnetization, used to obtain  $T_2$ .

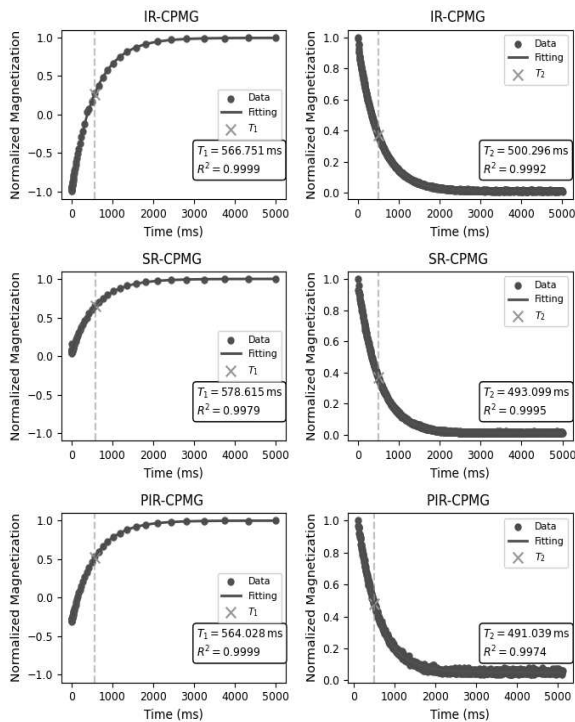


Fig. 2: Evolution of longitudinal magnetization (left) and decay of transverse magnetization (right) for each method.

Fig. 3 presents intensity maps that indicate the fit between experimental and simulated data. The peaks identify the most probable estimates of  $T_1$  and  $T_2$ , allowing comparison of the methods' precision.

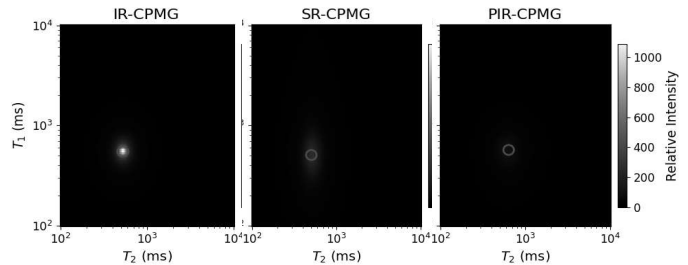


Fig. 3: Correlation maps  $T_1$ – $T_2$  for the 2D methods.

Tab. 1 shows the values of  $T_1$  e  $T_2$  obtained:

	CPMG	IR	IR-CPMG	SR-CPMG	PIR-CPMG
$T_1$ (ms)	-	$556 \pm 8$	$562 \pm 6$	$563 \pm 43$	$562 \pm 2$
$T_2$ (ms)	$506,9 \pm 0,2$	-	$500 \pm 1$	$496 \pm 6$	$487 \pm 5$
t (min)	10	45	80	45	45

Tab. 1: Comparison of the relaxation times obtained. t is the total acquisition time.

## Conclusions

The 2D methods are consistent with IR and CPMG. PIR-CPMG balanced accuracy and acquisition time; IR-CPMG was more accurate but slower; SR-CPMG was less accurate and noisier in  $T_1$ . The maps showed  $T_1$ – $T_2$  correlation and noise differences. The DMRS proved to be effective and versatile. Future work may apply the Inverse Laplace Transform (ILT) for quantitative spectra and compartment differentiation.

## Acknowledgements

I thank Prof. Dr. Alberto Tannús, M.Sc. Julia Marcolan for guidance, CIERMag and IFSC-USP for support and infrastructure, with funding from the University of Minnesota/NIH (Processo USP/IFSC nº 2017.1.579.76.7).

## References

- [1] TEIXEIRA, J. M. *Digital magnetic resonance spectrometer (DMRS) from CIERMag: calibration and relaxometry measurements methodology*. Dissertação (Mestrado) – IFSC/USP, 2022.
- [2] MARTINS, M. J.; VIDOTO, E. L. G.; TANNÚS, A. *Espectrômetro para uso em sistemas de RM*. Patente BR102015000624-1, USP, 2015.
- [3] PIZETTA, D. C. *PyMR: um framework para programação de sistemas de RM*. Tese (Doutorado) – IFSC/USP, 2018.
- [4] DU, Q. et al. *A novel two-dimensional NMR relaxometry pulse sequence*. J. Magn. Reson., v. 310, p. 106643, 2020.