

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

Hendrik Dumith Louzada

Desenvolvimento de um *framework* para criação e estudo da evolução de
pulsos de RF em experimentos de Ressonância Magnética

São Carlos

2024

Hendrik Dumith Louzada

Desenvolvimento de um *framework* para criação e estudo da evolução de
pulsos de RF em experimentos de Ressonância Magnética

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto de Física de São Carlos da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de Bacharel em
Física Computacional.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Tannús - IFSC.

São Carlos

2024

RESUMO

O CIERMag está atualmente avançando com uma proposta de criação de um Espectrômetro Digital de Ressonância Magnética. Esse projeto envolve tanto a construção de um hardware que executa Sequências de Pulsos, parte integrante de Métodos de Ressonância Magnética (RM), quanto o desenvolvimento de software de controle e utilização desse hardware. Dentro deste cenário, este trabalho se alinha com o projeto de maior amplitude, a partir da criação de um sistema que simule e gere pulsos de rádio frequência (RF) em experimentos de RM, com base na evolução das equações

de Bloch, denominado BLOCHLAB. Sua finalidade, além de ser uma peça do Espectrômetro Digital, se destina como uma ferramenta de estudo acadêmico sobre os pulsos de RF. No escopo do BLOCHLAB, desenvolveu-se experimentos de pulsos de RF com variadas modulações e funções, como Amplitude (AM), Fase (PM) e Frequência (FM), além de simular a trajetória do perfil de magnetização quando exposto a esses pulsos de RF e realizar simulações em diferentes parâmetros como intensidade do campo de radiofrequência, tempo, frequência de oscilação, *field of view*, tempos de relaxação T_1 e T_2 , e tempo de excitação. Como conclusão, este trabalho entregou uma plataforma robusta e intuitiva, possibilitando que indivíduos com limitado conhecimento em programação possam projetar e analisar distintos pulsos para espectroscopia e imagens por RM.

Palavras-chave: Espectrômetro Digital de Ressonância Magnética; Pulsos de Radiofrequência; Equações de Bloch; Simulação da evolução do perfil de magnetização. Experimentos de Espectroscopia e Imagens por RM.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A Ressonância Magnética (RM) é uma técnica amplamente utilizada em diversas áreas da ciência, sendo comumente dividida em três grandes áreas complementares: a Relaxometria por Ressonância Magnética, a Espectroscopia por Ressonância Magnética (ERM), e o Imageamento por Ressonância Magnética (IRM). Enquanto a ERM está mais ligada à medição analítica de propriedades químicas dos tecidos, com aplicações em química, biologia e ciência dos materiais, a IRM desenvolveu-se predominantemente no campo médico, produzindo imagens detalhadas principalmente de tecidos biológicos moles e contribuindo significativamente para a Neurociência, especialmente na determinação de metabólitos nos tecidos.⁵

Uma das principais vantagens da RM é ser uma técnica não invasiva e não destrutiva, devido à baixa energia da radiofrequência utilizada. Diferentemente de métodos como raios-X, que empregam radiação ionizante de alta energia, e podem causar danos aos tecidos orgânicos, a RM utiliza pulsos de radiofrequência que não provocam ionização, preservando a integridade das amostras estudadas.⁵

No contexto do desenvolvimento de um Espectrômetro Digital de Ressonância Magnética que possa atuar como Relaxômetro, Espectrômetro Analítico, ou Scanner de Imagens por RM, torna-se essencial a criação de ferramentas que facilitem o estudo e a simulação de pulsos de RF. Compreender a evolução do perfil de magnetização quando exposto a diferentes pulsos é fundamental para aprimorar técnicas existentes e desenvolver novas aplicações na área. Nesse cenário, o presente trabalho alinha-se ao projeto de maior amplitude, ao propor o desenvolvimento de um *framework* que permita sanar o déficit de uma plataforma que integre tanto a geração de pulsos de RF e gradientes, quanto a análise dos mesmos, quando aplicados em um experimento de RM.

1.2 Ressonância Magnética Nuclear

A ressonância magnética nuclear (RMN) é um fenômeno físico que permite a análise detalhada das propriedades magnéticas de núcleos atômicos. A descoberta da natureza do spin do próton, baseada nos experimentos de Stern e Gerlach no início da década de 1920¹, levou Rabi e seus colaboradores, na década de 1930, a investigar a interação do spin do próton com um campo magnético externo². Com essa base, em 1946, Bloch e Purcell estenderam esses conceitos quânticos iniciais para a medição do efeito da precessão dos spins em torno de um campo magnético^{3,4}. Eles conseguiram medir com sucesso um sinal precessional de amostras de água e parafina, explicando muitos dos detalhes experimentais e teóricos, que ainda hoje são fundamentais.

1.2.1 Precessão do Spin e Relação de Larmor

A RM baseia-se na interação de *spins*, nucleares ou eletrônicos, com campos magnéticos externos. Por definição, precessão é o movimento circular do eixo de rotação de um corpo giratório em torno de outro eixo fixo, causado pela aplicação de um torque na direção da precessão. O *spin nuclear* é um momentum angular intrinsecamente relacionado a um momento magnético de uma partícula quântica. Na presença de um campo magnético o momento magnético $\vec{\mu}$ experimenta um

torque pela teoria do eletromagnetismo, assim o momentum angular a ele associado responde a esse torque evoluindo na forma de uma precessão em torno do campo magnético $\vec{B}$.

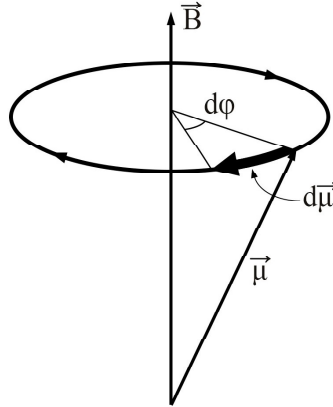


Figura 1 - Precessão do *spin* em torno de $\vec{B}$ pelo torque $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ no sentido anti-horário.

A frequência angular de precessão do *spin* em torno de um campo magnético $\vec{B}$ é dada pela relação de Larmor⁵:

$$\omega = \gamma B, \quad (1.1)$$

onde γ é a constante chamada de razão giromagnética, e ω conhecido como frequência de Larmor. Para o próton da água, seu γ tem um valor aproximado de $2,68 \cdot 10^8 \frac{rad}{sT}$. Isso significa que, em um campo de 2 T, os *spins* precessionam a uma frequência de 85,2 MHz, dentro da faixa VHF de radiofrequência.

1.2.2 Modelo Fenomenológico de Bloch

Para descrever a dinâmica da magnetização em RMN, Felix Bloch⁶ propôs um conjunto de equações macroscópicas a partir de argumentos fenomenológicos usados para calcular a magnetização nuclear $\vec{M} = M_x \hat{i} + M_y \hat{j} + M_z \hat{k}$ em função do tempo, quando os tempos de relaxação T_1 e T_2 estão presentes. Em notação vetorial, pode ser descrita como:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} - \frac{M_x \hat{i} + M_y \hat{j}}{T_2} - \frac{(M_z - M_0) \hat{k}}{T_1} \quad (1,2)$$

As equações de Bloch consideram que a magnetização $\vec{M}$ precessiona ao redor do campo magnético externo, ao mesmo tempo em que sofre processos de relaxação, retornando a magnetização ao seu estado de equilíbrio. O tempo de relaxação longitudinal T_1 é o tempo característico para a componente da magnetização do eixo z (M_z) retornar ao seu valor de equilíbrio M_0 , após uma perturbação do estado estacionário. Esse processo ocorre devido às interações de *spin-rede*, ou seja, pela transferência de energia dos spins para o ambiente. Enquanto que o tempo de relaxação T_2 , é o tempo característico para a magnetização no plano transversal (M_{xy}) decair devido à perda de coerência de fase entre os spins. Processo este, que ocorre pela interação mútua entre os *spins*, ou seja, interferência *spin-spin*.

1.2.3 Pulsos de Radiofrequência

Em um experimento típico de RMN, utilizando um núcleo de H^1 , os prótons alinham-se em maioria, na direção do campo magnético estático B_0 , estabelecendo um estado de equilíbrio para a Magnetização (M_0). A aplicação de um pulso de RF no plano transversal, geralmente ao longo do eixo x ou y , gera um campo magnético oscilante B_1 que, na frequência de Larmor, é capaz de excitar os spins e girar a magnetização para o plano xy . Essa rotação é determinada pelo ângulo de *flip*, que depende da intensidade e da duração do pulso sendo aplicado.^{5,6}

Além dos pulsos de RF, os gradientes de campo magnético são elementos essenciais para técnicas de IRM, sendo estes, campos magnéticos adicionais que variam linearmente no espaço, superpostos ao campo estático B_0 .⁵ Assim, a aplicação de gradientes em diferentes direções e em momentos específicos durante a sequência de pulsos, afetam a frequência de precessão dos spins de maneira dependente da posição.⁵ Dessa forma, ao combinar gradientes com pulsos de RF, é possível selecionar fatias da amostra, realizar codificação espacial de fase ou frequência, tornando possível o controle do contraste e resolução espacial da reconstrução de imagens.⁵

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Linguagem de Programação

A implementação do BLOCHLAB foi realizada em Python⁷, uma linguagem amplamente utilizada na comunidade científica devido à simplicidade de sua sintaxe, permitindo escrever códigos de rápida compreensão e de fácil manutenção, além de dispor de uma alta gama de bibliotecas, APIs e ferramentas. Dentre as bibliotecas disponíveis, podemos citar a NumPy⁹, SciPy⁸, SigPy¹¹, CuPy¹², utilizadas para implementação de cálculos numéricos, PyQt5¹³ para desenvolvimento da interface gráfica, e JSON¹⁴, para manipulação de arquivos de Pulsos.

2.2 Ambiente de Programação

Para a instalação do Python e das bibliotecas necessárias, foi utilizado o Anaconda¹⁵, um gerenciador de pacotes e ambientes virtuais de código aberto amplamente adotado na comunidade científica. O Anaconda permite a criação e configuração de ambientes virtuais a partir de um arquivo contendo as especificações necessárias, como versões de pacotes e dependências, garantindo assim a compatibilidade e facilitando a replicação do ambiente em diferentes máquinas ou sistemas operacionais.

O desenvolvimento de todo o código foi realizado visando à compatibilidade entre diferentes sistemas operacionais, principalmente, nos sistemas operacionais Windows, Linux e MacOS. Entretanto, como a aplicação é executada em cima de um ambiente virtual configurado pelo Anaconda, é necessário que exista uma distribuição do mesmo para o sistema operacional em questão.

2.3 Simulação e Geração de Pulsos

Para a resolução numérica das equações de Bloch, foi utilizado o método de Runge-Kutta de oitava ordem, conforme apresentado por Hairer, Nørsett e Wanner¹⁰. Este método proporciona a precisão necessária para resolver o sistema, além de oferecer eficiência computacional adequada

para simulações com um grande número de pontos. Especificamente, utilizou-se o algoritmo DOP853¹⁰ disponível na biblioteca SciPy, uma biblioteca de código aberto para computação científica em Python, reconhecida por suas implementações eficientes de métodos numéricos avançados.

Além disso, para a geração de pulsos de RF e gradientes, utilizou-se o ferramental disponível no SigPy, que contém uma gama de funções e classes necessárias para manipulações de sinais, visando desenvolver pulsos voltados à IRM. Assim, para pulsos adiabáticos¹⁷, Shinnar–Le Roux (SLR)¹⁹, BIR-4²⁰ e GOIA^{17, 21}, foram empregadas as funções implementadas diretamente no SigPy. Por outro lado, para pulsos do tipo BISS-8¹⁸, desenvolveu-se o algoritmo a partir da descrição em [De Graff et al. \(1996\)](#), e as demais modulações específicas, conforme [Tannus et al. \(1997\)](#).

2.4 Análise da simulação computacional

A validação do comportamento do *framework* foi realizada comparando os resultados simulados da magnetização com as previsões teóricas a partir das equações de Bloch. Para isso, utilizou-se um caso particular no qual a solução analítica é facilmente demonstrada: tempos de relaxação T_1 e T_2 tendendo ao infinito, aplicação de um pulso quadrado (Hard Pulse) com B_1 constante no eixo x , e magnetização inicial M_0 alinhada ao eixo z , no referencial girante de coordenadas, em ressonância. Nessas condições, verificamos se o comportamento de M_x , M_y e M_z em função de B_1 está de acordo com o resultado esperado.

Para esta demonstração, partimos das equações de Bloch ([eq. 1.2](#)) sem os termos de relaxação (equações de rotor), onde γ é a razão giromagnética e $\vec{B}_{eff}$ é o campo magnético efetivo.

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B}_{eff} \quad (2.1)$$

Como o campo de RF está sendo considerado constante e sendo aplicado ao longo do eixo x , podemos escrever o campo magnético efetivo a partir do campo B_0 no referencial girante de

coordenadas em termos da frequência a partir da relação de Larmor ([eq. 1.1](#)). Definindo $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{RG}$, temos:

$$\vec{B}_{eff} = B_1 \hat{i} + \frac{\Delta\omega}{\gamma} \hat{k} \quad (2.2)$$

Assim, a frequência angular associada a partir do módulo do campo efetivo pode ser dado por:

$$B_{eff} = \sqrt{B_1^2 + \left(\frac{\Delta\omega}{\gamma}\right)^2} \quad (2.3)$$

$$\Omega = \gamma B_{eff} = \sqrt{(\gamma B_1)^2 + \Delta\omega^2} \quad (2.4)$$

Desse modo, como a magnetização inicial $\vec{M}_0 = M_0 \hat{k}$ as componentes da magnetização pela solução da [equação 2.1](#) após a aplicação de um pulso retangular de duração τ podem ser expressas como:

$$M_x = M_0 \left(\frac{\gamma B_1 \Delta\omega}{\Omega^2} \right) [1 - \cos(\Omega\tau)] \quad (2.5)$$

$$M_y = -M_0 \left(\frac{(\gamma B_1)^2}{\Omega^2} \right) \sin(\Omega\tau) \quad (2.6)$$

$$M_z = M_0 \left[\left(\frac{\Delta\omega}{\Omega} \right)^2 + \left(\frac{\gamma B_1}{\Omega} \right)^2 \cos(\Omega\tau) \right] \quad (2.7)$$

Como estamos considerando o referencial girante de coordenadas em ressonância temos $\Delta\omega = 0$, dessa forma esperamos que ao simular a magnetização em função da variação do campo, encontremos:

$$M_x = 0 \quad (2.8)$$

$$M_y = -M_0 \sin(\gamma B_1 \tau) \quad (2.9)$$

$$M_z = M_0 \cos(\gamma B_1 \tau) \quad (2.10)$$

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

O BLOCHLAB, objeto deste trabalho, foi desenvolvido para fornecer duas funcionalidades principais: a simulação de um experimento de RM, e a geração de pulsos de RF. Essas que, por sua vez, foram divididas para fins práticos de programação em duas partes, o núcleo (core) e a interface gráfica (GUI), fornecendo as funcionalidades principais e a interação visual com o usuário. Dentro deste cenário, seu desenvolvimento permitiu o estudo dos pulsos de RF com variadas modulações e funções, em um experimento de RM, a partir da visualização da trajetória do perfil de magnetização. Isso é essencial para entender o papel de qualquer tipo de pulsos de RF nas sequências de seus Métodos de ressonância¹⁶, como por exemplo, nas sequências utilizadas no Espectrômetro Digital de RM, em desenvolvimento pelo grupo CIERMag.

3.1 Simulação de um experimento de RM no BLOCHLAB

Desenvolveu-se de uma classe, compondo o núcleo do *framework* (através do Python e as bibliotecas destacadas), que contenha todos os parâmetros necessários para executar a simulação, os pulsos selecionados a serem aplicados, e o vetor da magnetização projetada em três dimensões como seus atributos. Além dos métodos necessários para a conexão com a GUI, essa classe possui o método principal responsável pela execução da simulação, que utiliza o algoritmo DOP853 do SciPy para resolver a integral numericamente do sistema de EDOs das equações de Bloch a partir do estado inicial do vetor magnetização e das variáveis do sistema.

Este *framework*, também possibilita o controle sobre quais parâmetros do sistema variam durante a simulação, para isto, foram adicionados seis "modos de simulação": "B1", "Time", "Freq", "FOV", "T1" e "T2". Dessa forma, é possível controlar o início, o fim e a amostragem da frequência do campo B_1 , do tempo decorrido, da frequência e dos tempos de relaxação T_1 e T_2 . Ademais, os

parâmetros de offset de frequência e a fase de excitação são determinados e mantidos constantes em quaisquer modos de simulação.

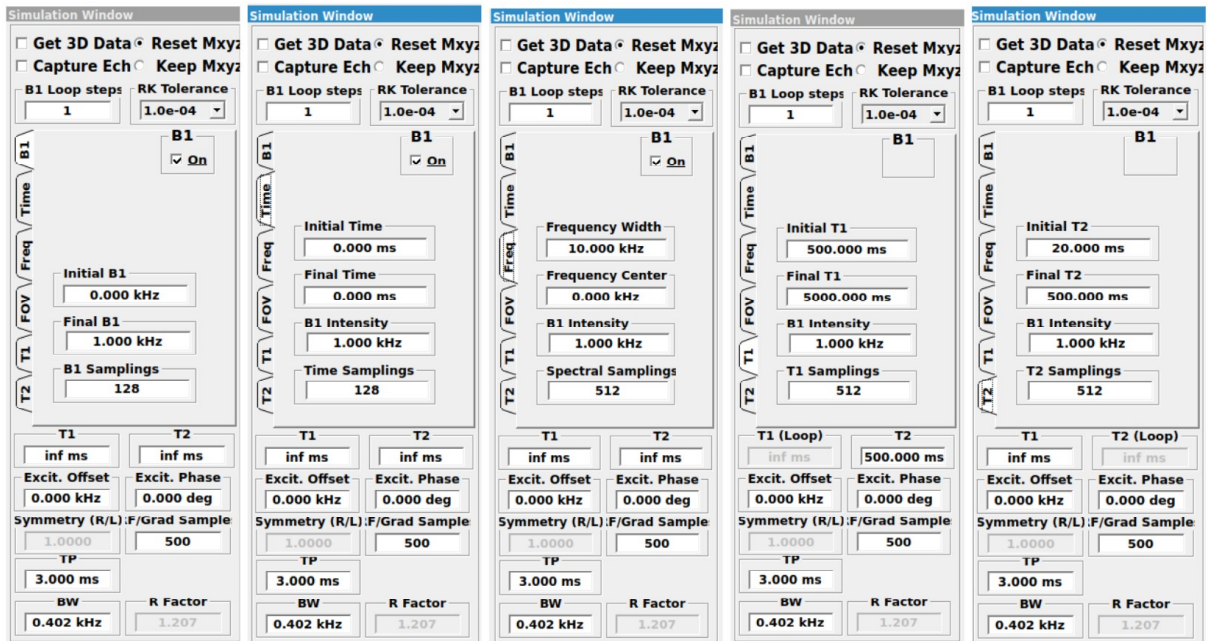


Figura 2 - Painel lateral de controle dos parâmetros (Simulation Window) para cada modo de simulação. Realizado em PyQt5.

Durante a simulação, os gráficos da magnetização em função da frequência ou do tempo, são gerados dependendo do modo selecionado. Especificamente, são graficados separadamente os componentes M_x , M_y , M_{xy} e M_z e a fase da magnetização “Mp”, permitindo uma análise de cada componente da magnetização do experimento simulado. Além disso, o *framework* inclui a Transformada Rápida de Fourier (FFT) da magnetização, de forma que é possível ter uma visão no domínio da frequência que é essencial para o estudo dos resultados.



Figura 3 - GUI do BLOCHLAB com o gráfico M_x em destaque. Após a simulação de um pulso retangular no modo de simulação “B1”.

3.2 Desenvolvimento de Pulsos no BLOCHLAB

Também foi construída a interface GOIA, em referência ao conceito de Gradient-modulated Offset Independent Adiabaticity¹⁷, que proporciona uma plataforma intuitiva para a geração e controle de pulsos RF, dividindo o processo de modulação em três blocos principais, Modulação de Amplitude (AM), Modulação de Frequência (FM) e Modulação de Fase (PM), além das configurações adicionais para gestão detalhada dos formatos e comportamentos dos pulsos.

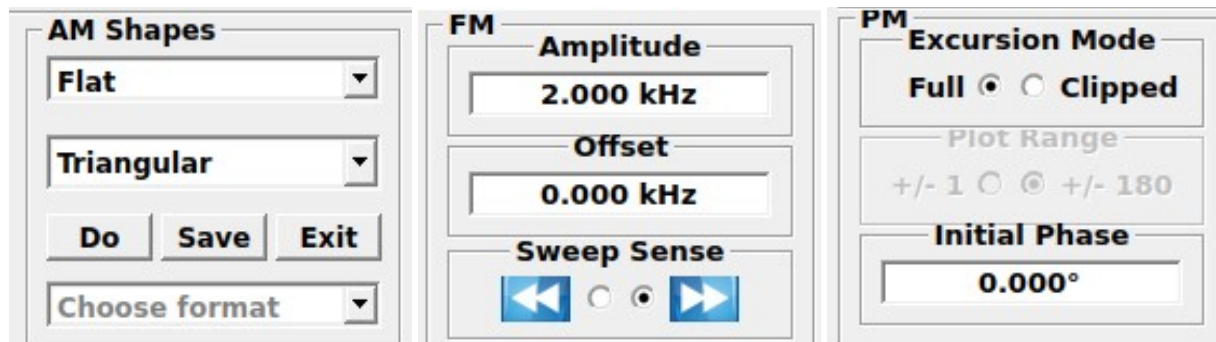


Figura 4 - GUI do GOIA dos blocos do painel de configuração das modulações.

Com a elaboração deste controle, no bloco AM, o usuário pode selecionar a forma da onda de modulação a partir de um menu *drop-down*, podendo escolher entre quaisquer sinais disponibilizados pelo SciPy ou outros adicionados posteriormente. Opções como "Do", "Save", "Exit" e "Choose format" permitem executar a modulação, salvar configurações, sair da interface ou escolher o formato do arquivo de saída, respectivamente. No bloco FM, os controles permitem ajustar a amplitude da modulação de frequência, definir o offset de frequência e escolher o sentido da varredura ("Sweep Sense"), determinando a amplitude e a direção da variação da frequência em torno de uma frequência central, aspectos para aplicações onde a direção da varredura afeta a interpretação dos dados. Já na modulação de fase, os usuários podem definir a extensão da variação da fase (como "full" ou "clipped") e ajustar a fase inicial do pulso, permitindo a personalização da trajetória de fase do pulso.

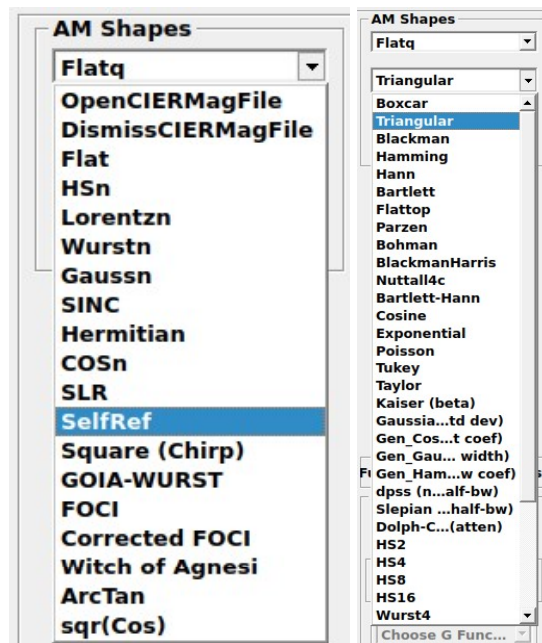
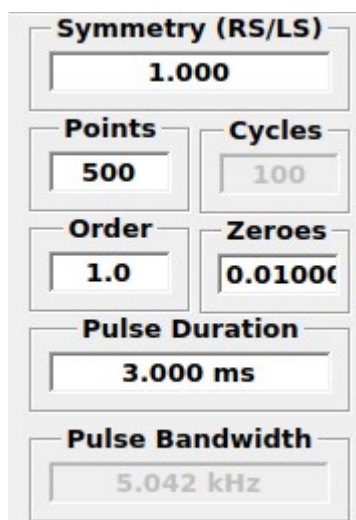


Figura 5 - Menu *dropown* para seleção da forma de onda e da função multiplicadora do bloco AM.

Essa interface também oferece outros campos de controle de personalização dos pulsos de RF, como “*Pulse Duration*”, que permite o controle da duração total do pulso, aspecto crucial para

controlar a energia total entregue ao sistema, "*Symmetry (RS/LS)*", adicionando o controle de simetria temporal para determinadas formas de onda, e "*Points/Cycles*", para definir o número de pontos ou ciclos que compõem os dados do pulso. Após configuração do pulso, algumas propriedades, tal como "*Pulse Bandwidth*" e "*R Factor*", podem ser atualizadas automaticamente dependendo do "*Shape*" selecionado.



The image shows a control panel for the GOIA system. It contains several input fields for configuring pulse parameters. The parameters and their values are as follows:

Parameter	Value
Symmetry (RS/LS)	1.000
Points	500
Cycles	100
Order	1.0
Zeroes	0.01000
Pulse Duration	3.000 ms
Pulse Bandwidth	5.042 kHz

Figura 6 - Campos de controle adicionais do GOIA.

Além dos parâmetros de controle da geração de pulsos já citados, foram adicionados campos de controle mais específicos para suportar a geração de pulsos avançados em ressonância magnética, tais como "*BIR-4 Parameters*", "*BISS-8 Parameters*", "*DANTE Parameters*" e "*SLR Parameters*".

The image shows three side-by-side panels for configuring pulse sequences in the GOIA software. Each panel has a title and a set of controls.

- BIR-4 Parameters:**
 - ☒ **Make it BIR-4**
 - Ph1:** 0.00°
 - Ph2:** 0.00°
 - BISS-8 Parameters:**
 - ☐ **Make it BISS-8**
 - ☐ **True Gradient**
 - Desired Flip Angle:** 0.0°
 - Ph1:** 0.00°
 - Ph2:** 0.00°
 - Ph3:** 0.00°
 - Ph4:** 0.00°
 - >Copy Values<**
- DANTE Parameters:**
 - ☒ **Make it DANTE**
 - Segments:** 15
 - Fringe BW:** 0.333 kHz
 - Overall BW:** 0.667 kHz
 - Frank Pulse:** ☐ **Make it Frank**
 - Hermitian Flip:** 90° ☒ 180°
- SLR Parameters:**
 - ☒ **SLR Algorithm**
 - ☐ **UseSLF-ran**
 - Pulse Type:** Inversion
 - Filter Type:** Least Squares
 - Pass Band Stop Band:** 0.01000 0.01000
 - R Factor:** 4.000

Figura 7 - Painéis de ajuste para pulsos de tipos específicos do GOIA.

Desse modo, a inclusão desses parâmetros permite a criação e ajuste de pulsos especializados que são essenciais para desenvolvimento de sequências mais avançadas de RM. Por exemplo, pulsos do tipo BIR-4 e BISS-8 possibilitam configurar pulsos adiabáticos, utilizados para contornar os efeitos da inhomogeneidades da intensidade do campo RF no ângulo de flip da magnetização¹⁷. Enquanto que os pulsos DANTE¹⁷ permitem a configuração de sequências de pulsos para saturação seletiva de spins, útil em experimentos que requerem seletividade espectral. Por fim, os *SLR Parameters* possibilitam a síntese de pulsos utilizando o método de Shinnar-Le Roux, permitindo a criação de formas de pulso com perfis de amplitude e fase otimizados. Assim, esses recursos ampliam a capacidade do *framework* em atender demandas mais complexas, proporcionando uma ferramenta robusta para o desenvolvimento de pulsos de RF em aplicações de ressonância magnética.

Na interface do GOIA, além dos painéis de controle, são apresentados três gráficos das modulações do pulso em questão. A interface é projetada para que os gráficos e os painéis de controle funcionem de forma integrada; assim, à medida que o usuário ajusta os parâmetros, as mudanças são refletidas instantaneamente nos gráficos correspondentes.

Por exemplo, ao alterar a forma da modulação em amplitude no painel AM Shapes, o gráfico AM(t) é atualizado para mostrar o novo perfil de amplitude. Da mesma forma, ajustes na amplitude ou no offset da modulação em frequência nos controles FM são refletidos no gráfico

FM(t), isso possibilita observar como a frequência do pulso será varrida ao longo do tempo, bem como nos ajustes mais avançados. Essa visualização em tempo real permite compreender como cada parâmetro influencia o pulso resultante, tornando o processo de desenho de pulsos de RF mais intuitivo e eficiente.

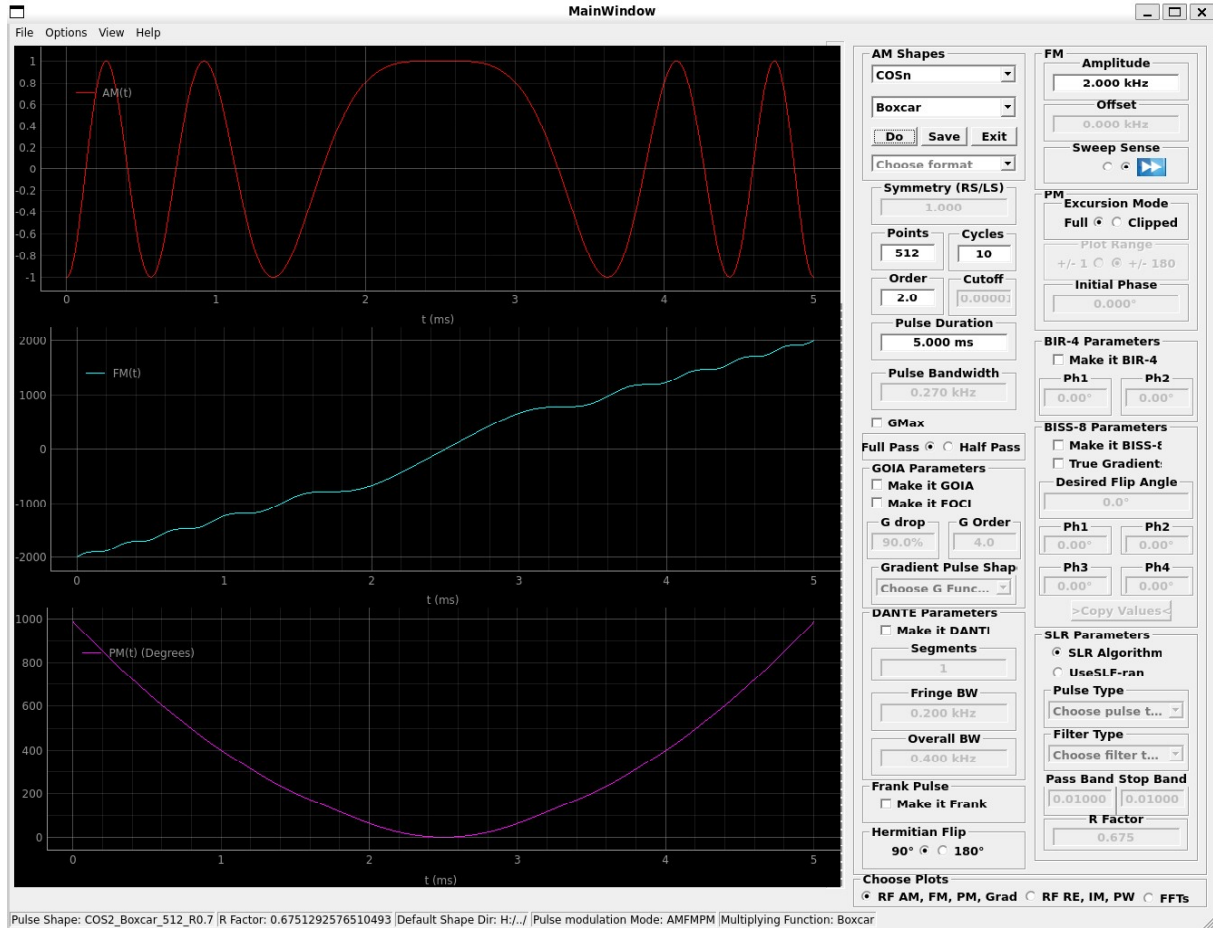


Figura 8 - GUI do GOIA, para um pulso de 5ms com forma de onda de função COS de 2º ordem, função multiplicadora do tipo “Boxcar”, 10 ciclos e com 2kHz de amplitude de modulação da frequência.

3.3 Execução da Simulação no BLOCHLAB

Para validação do comportamento do *framework*, realizou-se uma simulação no modo “B1”, definindo os tempos de relação T_1 e T_2 como infinitos, de magnetização inicial no eixo z , ao

aplicar um *Hard Pulse* somente com modulação AM, de forma "Flat" e função multiplicadora "Boxcar", de amplitude unitária e duração de 5 ms.

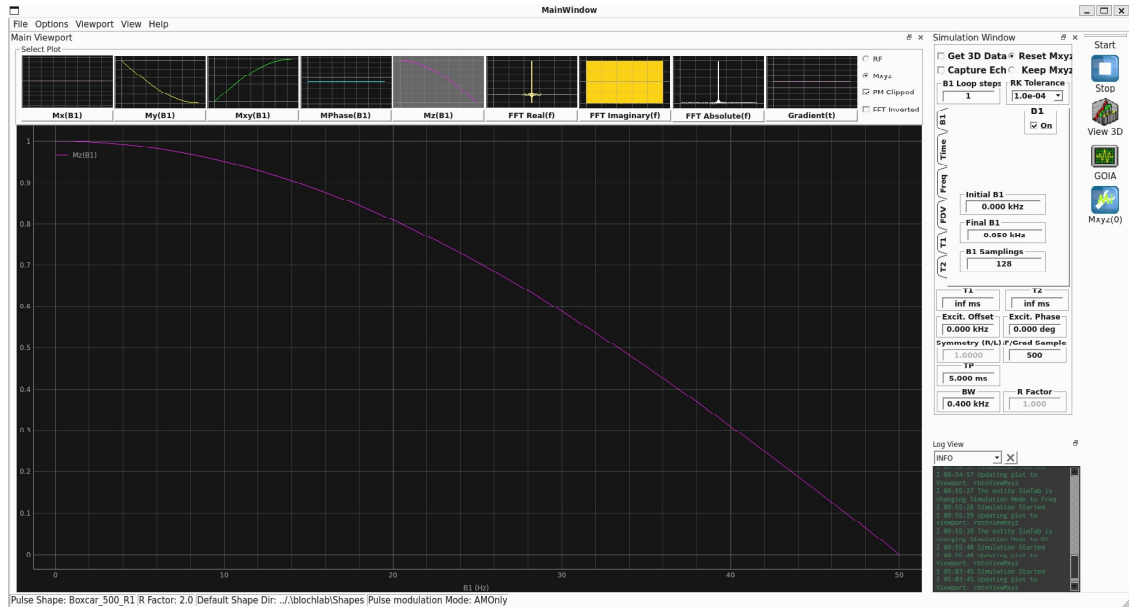


Figura 9 - Variação da magnetização em função de B1 ao aplicar um *Hard Pulse*.

Conforme esperado, foi possível observar a componente M_y da magnetização variando senoidalmente de 0 a -1, enquanto M_z , cossenoidalmente de 1 a 0 e M_x permanecendo nulo. Assim, o resultado da simulação corrobora com a solução analítica das equações de Bloch para este caso específico (eq. [2.8](#), [2.9](#), [2.10](#)). Ademais, os módulos de M_z e M_y irem para 0 e 1 (em offset 0), respectivamente, caracterizam um ângulo de flip de 90°, isso ocorre pois o valor do parâmetro "Final B1" é o inverso da duração do pulso (TP), como é evidenciado pelas equações [2.9](#) e [2.10](#).

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo como base o estado-da-arte das tecnologias de computação e da ressonância magnética, torna-se essencial a criação de ferramentas que facilitem o estudo e a simulação de pulsos de RF. Neste trabalho, foi desenvolvido o BLOCHLAB, um *framework* que simula a evolução da magnetização na aplicação de pulsos de radiofrequência em experimentos de

ressonância magnética, fundamentado nas equações de Bloch, validado através da comparação com soluções analíticas conhecidas. Este *framework* também compõe em sua plataforma, uma ferramenta de desenvolvimento de pulsos que possibilita ajustes dinâmicos de seus parâmetros com a visualização em tempo real dos resultados. Assim, permitindo que alunos estudem e entendam como pulsos são modulados e afetam a magnetização em experimentos de RM, assim como desenvolvedores de sequências de RM podem testar e visualizar o funcionamento de novos pulsos. Como perspectivas futuras, novos tipos de pulsos podem ser acrescentados no GOIA para permitir uma gama maior de opções. Além disso, sugere-se a expansão do *framework*, para incluir simulações de campo constante heterogêneo e a adição de múltiplos gradientes. A adição de gradientes espaciais de B1, além dos tradicionais de B0 permitirá a evolução da pesquisa nos conceitos de Imagens com codificação espacial de B1, com inúmeras vantagens, entre elas a redução do custo dos equipamentos pela eliminação dos conjuntos de bobinas de gradientes de B0. Desse modo, tornando este *framework* ainda mais robusto e valioso, tanto para pesquisadores, quanto para estudantes desta área.

REFERÊNCIAS

1. GERLACH, W.; STERN, O. Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld. **Springer eBooks**, p. 26–29, 1 jan. 1989.
2. RABI, I. I. et al. A New Method of Measuring Nuclear Magnetic Moment. **Physical Review**, v. 53, n. 4, p. 318–318, 15 fev. 1938.
3. BLOCH, F.; HANSEN, W. W.; PACKARD, M. Nuclear Induction. **Physical Review**, v. 69, n. 3-4, p. 127–127, 1 fev. 1946.
4. B. BLEANEY. Edward Mills Purcell. 30 August 1912 — 7 March 1997. 1 jan. 1999.
5. HAACKE, E. et al. **Magnetic resonance imaging: physical principles and sequence design**. New York: Wiley-Liss, 1999. 937 p.
6. BLOCH, F. Nuclear Induction. **Physical Review**, v. 70, n. 7-8, p. 460–474, 1 out. 1946.
7. HANS PETTER LANGTANGEN. **A Primer on Scientific Programming with Python**. [s.l.] Berlin, Heidelberg Springer, 2016.
8. VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, n. 3, p. 261–272, 3 fev. 2020.

9. HARRIS, C. R. et al. Array Programming with NumPy. **Nature**, v. 585, n. 7825, p. 357–362, 16 set. 2020.
10. ERNST HAIRER; NØRSETT, S. P.; GERHARD WANNER. **Solving ordinary differential equations I Nonstiff problems**. [s.l.] Berlin [U.A.] Springer, 2010.
11. ZWART, N. R. (ISMIRM 2019) **SigPy: A Python Package for High Performance Iterative Reconstruction**. Disponível em: <<https://archive.ismrm.org/2019/4819.html>>.
12. OKUTA, R. et al. **CuPy: A NumPy-Compatible Library for NVIDIA GPU Calculations**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://learningsys.org/nips17/assets/papers/paper_16.pdf>.
13. **PyQt5 Reference Guide — PyQt v5.14.0 Reference Guide**. Disponível em: <<https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/>>.
14. JSON.ORG. **JSON**. Disponível em: <<https://www.json.org/json-en.html>>.
15. ANACONDA. **Anaconda**. Disponível em: <<https://www.anaconda.com/>>.
16. PIZETTA, D. C. **Biblioteca, API e IDE para o desenvolvimento de projetos de metodologias de Ressonância Magnética**. 2014. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
17. TANNUS, A.; GARWOOD, M. Adiabatic pulses. **NMR in Biomedicine**, v. 10, n. 8, p. 423–434, 1 dez. 1997.
18. DE GRAAF, R. A.; NICOLAY, K.; GARWOOD, M. Single-shot, B1-insensitive slice selection with a gradient-modulated adiabatic pulse, BISS-8. **Magnetic Resonance in Medicine**, v. 35, n. 5, p. 652–657, maio 1996.
19. PAULY, J. et al. Parameter relations for the Shinnar-Le Roux selective excitation pulse design algorithm (NMR imaging). **IEEE Transactions on Medical Imaging**, v. 10, n. 1, p. 53–65, mar. 1991.
20. R. SCOTT STAEWEN et al. 3-D FLASH Imaging Using a Single Surface Coil and a New Adiabatic Pulse, BIR-4. **Investigative Radiology**, v. 25, n. 5, p. 559–567, 1 maio 1990.
21. ANDRONESI, O. C. et al. Spectroscopic imaging with improved gradient modulated constant adiabaticity pulses on high-field clinical scanners. **Journal of Magnetic Resonance**, v. 203, n. 2, p. 283–293, 1 abr. 2010.