

Universidade de Brasília – UnB  
Campus Gama – FGA  
Engenharia Eletrônica

**Simulador de sistemas de aquisição de  
sinais de ressonância magnética para imageamento médico**

JÉSSICA VIVIAN MOREIRA DA SILVA  
Orientador: Dr. CRISTIANO JACQUES MIOSSO



JÉSSICA VIVIAN MOREIRA DA SILVA

**Simulador de sistemas de aquisição de sinais  
de ressonância magnética para imageamento médico**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Dr. Cristiano Jacques Miosso

Brasília, DF  
2015

Brasília/DF, Novembro de 2015

#### FICHA CATALOGRÁFICA

JÉSSICA VIVIAN MOREIRA DA SILVA

Simulador de sistemas de aquisição de sinais de ressonância magnética para imageamento médico

23p., 210 × 297 mm (FGA/UnB Gama, Engenharia Eletrônica, 2014)

Trabalho de graduação em engenharia eletrônica

Universidade de Brasília, Campus Gama – FGA/UnB

- |                          |                         |
|--------------------------|-------------------------|
| 1. Ressonância Magnética | 2. Imageamento Médico   |
| 3. Equações de Bloch     | 4. Engenharia Biomédica |
| I. FGA UnB/UnB.          | II. Title (series)      |

#### REFERÊNCIA

SILVA, JÉSSICA VIVIAN MOREIRA DA (2014). Simulador de sistemas de aquisição de sinais de ressonância magnética para imageamento médico. Dissertação de graduação em engenharia eletrônica, Universidade de Brasília, Campus Gama, DF, 23p.

**FGA/UnB – Universidade de Brasília, Campus Gama**

**Simulador de sistemas de aquisição de sinais de ressonância  
magnética para imageamento médico**

***Jéssica Vivian Moreira da Silva***

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

APROVADA POR:

---

Prof. Cristiano Jacques Miosso, PhD  
(Orientador)

---

Prof. Marcus Vinícius Chaffim Costa, Doutor  
(Examinador interno)

---

Prof. José Felício da Silva, PhD  
(Examinador interno)

## Resumo

As técnicas de reconstrução de imagens de ressonância magnética (RM) são uma ferramenta fundamental para obtenção de imagens médicas por meio de dados adquiridos de um sistema subamostrado. Dessa forma, validar o desempenho desses algoritmos é um dos fatores determinantes para aquisição de imagens com boas estimativas com relação ao modelo real. Esses dados ou medidas no espaço- $k$  podem ser obtidos diretamente de um escâner de ressonância magnética, porém o acesso a tais dados não é normalmente fornecido por fabricantes. De modo que em muitas simulações nas pesquisas correntes, os dados no espaço- $k$  são obtidos de forma aproximada a partir de entradas calculadas por transformação das imagens já reconstruídas, o que não leva em conta aspectos relevantes do processo físico da ressonância. Em muitos casos, isso leva a simplificação do modelo de medidas, o que pode resultar na sobrestimação dos algoritmos de reconstrução. Essa técnica, embora largamente utilizada, não oferece medidas reais e não possibilita simulação de ruídos em fases distintas do processo. Uma outra abordagem que tem sido recentemente empregada, é a utilização de fantasmas que levam em sua construção aspectos relacionados as medidas mais realistas no espaço- $k$ . O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma outra abordagem, baseada na simulação do processo de aquisição de medidas em um escâner de ressonância magnética, combinando a utilidade da geração de medidas de teste com o aspecto didático de ilustrar conceitos físicos e matemáticos do processo de funcionamento do escâner. É possível, ainda, ilustrar o efeito de diferentes pulsos e sequências de gradientes na disposição final de trajetórias no espaço- $k$ , pois o sistema simula a obtenção de dados no espaço- $k$  levando em conta os aspectos físicos abordados na equação fenomenológica de Bloch e dos sinais obtidos nas bobinas para pulsos específicos. O sinais serão obtidos a partir de modelos de tecidos biológicos, que serão construídos levando em conta a distribuição geométrica dos tecidos e valores tabelados de tempos de relaxação estimados para cada região. São consideradas duas etapas no estudo: (i) a simulação com base das equações de Bloch, dos momentos magnéticos gerados em um único ponto de um tecido vivo, em resposta aos campos magnéticos estáticos e pulsos RF em uma máquina de ressonância; (ii) a integração numérica de momentos magnéticos calculados para sequências específicas de pulsos magnéticos. Ao final, os valores obtidos na primeira fase do projeto serão comparados com o previsto pela teoria. Na próxima etapa a imagem correspondente será reconstruída usando técnicas clássicas de reconstrução e uma análise comparativa entre o modelo e a reconstruída será realizado para quantificar a qualidade e identificar possíveis ajustes do sistema.

**Palavras-chave:** Ressonância magnética, formação de imagens médicas, simulador, equações de Bloch, codificação espacial, espaço- $k$ .

## Abstract

A versão final do documento incluirá também o resumo em inglês.

**Keywords:** Magnetic resonance, medical imaging, simulator, Bloch's equations, spatial coding,  $k$ -space.

# Sumário

|          |                                      |           |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                    | <b>14</b> |
|          | <b>Introdução</b>                    | <b>14</b> |
| 1.1      | Contextualização . . . . .           | 14        |
| 1.2      | Problematização e Proposta . . . . . | 16        |
| 1.3      | Objetivos . . . . .                  | 18        |
| 1.3.1    | Objetivo Geral . . . . .             | 18        |
| 1.3.2    | Objetivos Específicos . . . . .      | 19        |
| 1.4      | Justificativa . . . . .              | 19        |

# Lista de Tabelas



# Lista de Figuras

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

O imageamento por ressonância magnética (IRM) se tornou a modalidade de diagnóstico por imagem mais flexível permitindo a caracterização de muitos aspectos do paciente desde o metabolismo e fisiologia até a microestrutura do tecido vivo [cite: <http://www.harvardprostatekbrn-magnetic-resonance-imaging-mri-may-aid-detection-of-prostate-cancer>]. A técnica se baseia na detecção de propriedades magnéticas dos núcleos de determinados elementos. Ela é empregada como ferramenta de auxílio para o diagnóstico de uma série de doenças, pois produz imagens dos órgãos internos e de estruturas do corpo com um nível de detalhamento que favorece a identificação de anomalias [15, 20]. Essas imagens são obtidas por meio da aplicação de campos magnéticos que induzem o efeito de ressonância nos átomos de hidrogênio. A resposta do núcleo do átomo, mais especificamente dos seus *spins* às perturbações magnéticas são registradas e processadas por um sistema dedicado à reconstrução de imagens médicas utilizando-se desses dados registrados. Inicialmente, a técnica foi chamada de imageamento por ressonância magnética nuclear (IRMN), do inglês, *Nuclear Magnetic Resonance imaging* (NMRI), porém devido à conotação negativa associada à palavra nuclear, o nome mais disseminado é apenas ressonância magnética [10].

Embora seu uso em aplicações clínicas tenha se iniciado somente em meados de 1980, os estudos que deram origem à teoria do IRM são datados do início do século XX com a postulação do *spin* nuclear e o momento nuclear do dipolo. Lorentz previu em seu estudo sobre partículas carregadas o que chamamos hoje de Efeito Zeeman, confirmado mais tarde por Pieter Zeeman, seu aluno, que experimentalmente observou o deslocamento das linhas espectrais de um sistema em várias componentes pela ação de um campo magnético [10]. Nos anos subsequentes houveram várias pesquisas e estudos com o propósito de detectar propriedades magnéticas do núcleo atômico, como por exemplo, a descoberta da frequência de Larmor ou precessão, que está intimamente relacionada ao campo magnético aplicado e à razão giromagnética. Em 1946, Felix Bloch e Edward Purcell descobriram independentemente o fenômeno da ressonância magnética e ganharam o prêmio Nobel em 1952 pelo desenvolvimento de novos métodos para medições precisas de ressonância magnética. Durante o período de 1950 a 1970, a RM foi usada e desenvolvida apenas para fins de análise molecular química e física.

Em 1969, o médico e matemático, Raymond Damadian, inventou o primeiro escâner de ressonância magnética [10]. Damadian descobriu que tumores têm diferentes tempos de relaxação ( $T_1$  e  $T_2$ ) quando comparados com tecido biológico saudável. Essa descoberta motivou o uso da ressonância magnética para diagnóstico de doenças. No mesmo período,

a ressonância magnética foi demonstrada pela primeira vez por Lauterbur, utilizando amostras de pequenos tubos de ensaio, onde a técnica de reconstrução utilizada foi a retroprojeção, similar à técnica usada em tomografia computadorizada (CT) [14]. Após as primeiras demonstrações de ressonância magnética, os anos subsequentes foram marcados por várias descobertas e avanços de técnicas empregadas na área. Em 1975, Richard Ernst propôs IRM usando fase, codificação de frequência e transformada de Fourier [13].

Três anos mais tarde, a primeira ressonância magnética de corpo inteiro foi realizada e durou 4 horas e 45 minutos onde foi necessário escanear 106 diferentes posições com 20 a 30 medições do sinal por posição. O resultado foi uma imagem em corte transversal do peito, revelando o coração, os pulmões, vértebras e musculatura [11]. No mesmo ano, Peter Mansfield desenvolveu a técnica *Echo-planar imaging* [18]. Em 1987, a técnica *Echo-planar imaging* foi utilizada para produzir um vídeo em tempo real de um ciclo de batimento cardíaco [4]. Nos anos seguintes houve o desenvolvimento de técnicas rápidas de IRM, espectroscopia por ressonância magnética para aplicações clínicas e imageamento funcional. Com isso, vemos que o imageamento por ressonância magnética é uma ciência jovem e ainda em constante desenvolvimento.

## 1.2 Problematização e Proposta

Os sistemas de saúde em geral tem adotado um novo foco organizacional que se baseia em alguns princípios como, prognóstico, prevenção, evidencia, diagnóstico e tratamento antecipado[Cite: Nesse cenário, a ressonância magnética tem se mostrado uma ferramenta efetiva, principalmente, na área da oncologia, ajudando a detectar tumores no fígado, pâncreas e rins.

O exame é usado não só para diagnóstico, mas também para acompanhamento de tratamentos, como no caso de tratamento quimioterápico. Onde o exame fornece ferramentas que permite avaliar o comportamento biológico do tumor levando em conta a irrigação sanguínea da área, que quanto menor for, indica que melhor é o efeito do medicamento utilizado[cite: [www.saoluiz.com.br](http://www.saoluiz.com.br)]. Já no caso de exames mamográficos, o exame de RM auxilia na identificação de focos da doença antes mesmo da mamografia. Na área ortopédica, a RM se destaca pela superioridade com relação aos exames de radiografia, tomografia e raio-x, sendo capaz de diagnosticar qualquer doença que provoque alterações anatômicas no sistema musculoesquelético. A neurologia é outra área que se beneficia dos exames de RM que auxiliam tanto no diagnóstico de problemas no tecido nervoso como serve de ferramenta de suporte para decisões pré-operatórias sendo capaz de prever se o paciente terá comprometimento de alguma função cerebral após a cirurgia.[cite:]Essas são apenas algumas das áreas da medicina que se beneficiam dos avanços constantes do imageamento médico por RM, avanços estes que permitem maior confiabilidade e precisão no diagnóstico e detecção de doenças e tumores cada vez mais

precoce.

Por possibilitar o diagnóstico e prognóstico de quadros clínicos sem que haja necessidade de um processo cirúrgico para investigação, a RM tem se tornado uma ferramenta preferível. Dessa forma, a tendência é que a busca pelo exame seja ainda maior, o que mostra a necessidade e relevância do desenvolvimento de técnicas que agilizem ou otimizem o processo de aquisição de medidas e reconstrução de imagens de ressonância magnética.

Essas técnicas de reconstrução passam por longos períodos de desenvolvimento, análise e validação. Há técnicas clássicas, como, Retroprojeção filtrada (*filtered backprojection*), que consiste basicamente em filtrar as projeções no espaço de frequências usando um filtro de rampa e, após realizada a transformada inversa, retroprojetar esses valores para construir a imagem [5]. Ou ainda, técnicas mais inovadoras e que não estão disponíveis em equipamentos clínicos como *Compressive Sensing*. Desenvolvida desde de 2005, essa técnica propõe a aquisição de sinais com taxas de amostragem abaixo da frequência de *Nyquist*. Para que isso seja possível dois princípios devem ser seguidos, esparsidade e incoerência [3].

É importante entender que a análise e validação dessas técnicas encara problemas como pouca disponibilidade de medidas reais no espaço- $k$ , pois os fabricantes de equipamentos de RM normalmente não disponibilizam essas medidas que variam de um dado equipamento para outro devido as técnicas de mapeamento, sequência de pulso e gradiente de campo empregados. Também não há muitos dados reais para condições controladas como modelos de tecidos conhecidos, ou medidas correspondentes à situações desafiadoras para análise dos métodos de reconstrução.

Uma solução comum a esses problemas é usar imagens prontas de ressonância magnética e estimar medidas, por meio de simulações rasterizadas, sem levar em consideração aspectos relevantes do processo físico da ressonância -Crime inverso, do inglês, *Inverse crime*. Embora essa seja uma solução largamente utilizada, não se pode afirmar que essas medidas são realistas e que levam em conta restrições temporais nos equipamentos. Em geral, utilizam a transformada de Fourier ideal e não levam em conta ruído real das máquinas. Embora se possa adicionar ruídos, eles são adicionados apenas aos dados finais, o que não é fiel à realidade [8].

Diante desse contexto, propõe-se o desenvolvimento de um pacote computacional para simular sistemas de aquisição de dados de ressonância magnética, que permita simular etapas do processo de aquisição de sinais para reconstrução de imagens médicas de RM. Em uma primeira abordagem partindo da solução da equação fenomenológica de Bloch, para testes com um único ponto do tecido biológico. E uma segunda abordagem, realizando integração numérica para estimar a contribuição de cada ponto do tecido, levando em conta o sinal recebido na bobina do equipamento para uma sequência específica de pulsos.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa desenvolver e analisar um sistema que simule etapas do processo de aquisição de dados por ressonância magnética.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de desenvolver o sistema, o projeto tem os seguintes objetivos específicos:

- I. Realizar simulações a partir de modelos de tecidos humanos e da descrição de campos magnéticos e estáticos, extraindo medidas no espaço- $k$ .
- II. Simular o efeito de diferentes pulsos RF e diferentes intensidades de campos magnéticos, com parâmetros de entrada realistas. Dessa forma, espera-se simular ao menos gradientes correspondentes a trajetórias radiais.
- III. Construir fantasmas com diferentes níveis de complexidade e detalhamento.
- IV. Reconstruir imagens a partir dos dados gerados pela simulação utilizando técnicas clássicas de reconstrução de imagem.
- V. Realizar uma análise comparativa entre a imagem construída e o modelo baseando-se em critérios de qualidade que serão definidos posteriormente na metodologia.

## 1.4 Justificativa

A disponibilidade de um programa que simule as etapas de escaneamento de um equipamento de ressonância magnética pode futuramente diminuir os custos relacionados às pesquisas e desenvolvimento de técnicas de reconstrução de imagem, bem como diminuir significativamente o tempo de validação da técnica desenvolvida. Além de que torna possível a criação de um banco de dados de medidas no espaço- $k$  para diferentes tipos de tecidos com diferentes níveis de complexidade em diversos cenários de simulação.

Com a disponibilidade desses dados é possível intensificar o estudo de técnicas de reconstrução de imagens e certamente agilizar a disponibilidade dessas técnicas para aplicações clínicas. Fato que influencia positivamente no estudo e diagnóstico de doenças e anomalias detectáveis por ressonância magnética, favorecendo assim, todo cenário clínico médico que depende ou se beneficia do avanço de tecnologias de imageamento médico.

Em um cenário mais próximo, tendo o sistema em mãos, ele funciona também como ferramenta didática no estudo de ressonância magnética uma vez que podem ser observados os efeitos de diferentes perturbações para diferentes modelos artificiais.

# Referências Bibliográficas

- [1] Felix Bloch. Nuclear induction. *Physical review*, 70(7-8):460, 1946.
- [2] R. Nick Bryan. *Introduction to the science of Medical Imaging*. Cambridge University Press, 2010.
- [3] Emmanuel J Candès e Michael B Wakin. An introduction to compressive sampling. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 25(2):21–30, 2008.
- [4] B Chapman, Robert Turner, Roger J Ordidge, M Doyle, M Cawley, R Coxon, Paul Glover, e Peter Mansfield. Real-time movie imaging from a single cardiac cycle by nmr. *Magnetic resonance in medicine*, 5(3):246–254, 1987.
- [5] A. M. M. da Silva. Reconstrução quantitativa de SPECT: Avaliação de correções. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, USP, 1998.
- [6] Donald et al McRobbie. *MRI: From Picture to Proton*, volume 85. 2003.
- [7] Margaret A Foster. *Magnetic resonance in medicine and biology*. 1984.
- [8] Matthieu Guerquin-Kern, L Lejeune, Klaas P Pruessmann, e Michael Unser. Realistic analytical phantoms for parallel magnetic resonance imaging. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 31(3):626–636, 2012.
- [9] Matthieu Guerquin-Kern, L Lejeune, Klaas P Pruessmann, e Michael Unser. Realistic analytical phantoms for parallel magnetic resonance imaging. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 31(3):626–636, 2012.
- [10] Joseph P. Hornak. *The basics of MRI*. Interactive Learning Software, Henrietta, NY, Bellingham, Wash. New York, 1996-2010.
- [11] George Kauffman. Nobel prize for MRI imaging denied to Raymond V. Damadian a decade ago. *Journal of Computing*, 2014.
- [12] Orhan Konez. *Magnetic Resonance Imaging: Basic Principle*. 1995.
- [13] A. Kumar, D. Welti, e R. R. Ernst. NMR fourier zeugmatography. 1975. *J Magn Reson*, 213(2):495–509, 2011.
- [14] Paul C Lauterbur et al. Image formation by induced local interactions: examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature*, 242(5394):190–191, 1973.

- [15] Christiana M Leonard, Kytja KS Voeller, Linda J Lombardino, Mary K Morris, George W Hynd, Ann W Alexander, Helen G Andersen, Mary Garofalakis, Janice C Honeyman, Jintong Mao, et al. Anomalous cerebral structure in dyslexia revealed with magnetic resonance imaging. *Archives of neurology*, 50(5):461–469, 1993.
- [16] Z. Liang e P. C. Lauterbur. *Principles of magnetic resonance imaging: a signal processing perspective*. IEEE Press Series in Biomedical Engineering. SPIE Optical Engineering Press; IEEE Press, Bellingham, Wash, New York, 2000.
- [17] David R. Lide. *CRC Handbook of chemistry and physics*. CRC Press, 84th edição, 2003.
- [18] Peter Mansfield. Multi-planar image formation using nmr spin echoes. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 10(3):L55, 1977.
- [19] Pierre-Marie Robitaille e Lawrence Berliner. *Ultra high field magnetic resonance imaging*, volume 26. Springer Science & Business Media, 2007.
- [20] Victor W Swayze, Virginia P Johnson, James W Hanson, Joseph Piven, Yutaka Sato, Jay N Giedd, Diane Mosnik, e Nancy C Andreasen. Magnetic resonance imaging of brain anomalies in fetal alcohol syndrome. *Pediatrics*, 99(2):232–240, 1997.
- [21] Dominik Weishaupt, Victor D Köchli, e Borut Marincek. *How does MRI work?: an introduction to the physics and function of magnetic resonance imaging*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [22] Catherine Westbrook. *MRI at a glance*. Blackwell Science, 2002.