

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática

**OFICINA SOBRE BASES FÍSICAS DA RESSONÂNCIA MAGNÉTICA: UMA
PROPOSTA**

Raimundo Nonato Nogueira Reis

Belo Horizonte
2016

Raimundo Nonato Nogueira Reis

**OFICINA SOBRE BASES FÍSICAS DA RESSONÂNCIA MAGNÉTICA: UMA
PROPOSTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática (Área: Física) da PUC Minas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Profa. Dra. Adriana Dickman
Área de concentração: Ensino de Física

Belo Horizonte

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

R375o Reis, Raimundo Nonato Nogueira
Oficina sobre bases físicas da ressonância magnética: uma proposta /
Raimundo Nonato Nogueira Reis. Belo Horizonte, 2016.
123 f.: il.

Orientadora: Adriana Dickman
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática.

1. Biofísica. 2. Física médica. 3. Ressonância magnética nuclear. 4.
Aprendizagem por atividades. 5. Abordagem interdisciplinar do conhecimento. I.
Dickman, Adriana. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 577.3



PUC Minas

PROGRAMA DE MESTRADO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E MATEMÁTICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

RAIMUNDO NONATO NOGUEIRA REIS

Dissertação defendida e aprovada pela seguinte banca examinadora:

Prof.ª Dr.ª Adriana Gomes Dickman – Orientadora – (PUC Minas)
Doutorado em Física – (UFMG e City University of New York)

Prof. Dr. Marcelo Diniz Monteiro de Barros – (PUC Minas)
Doutorado em Ensino em Biociências e Saúde – (FIOCRUZ)

Prof. Dr. Lev Vertchenko – (PUC Minas)
Doutorado em Física – (UFMG)

Belo Horizonte, 11 de agosto de 2016.

À minha esposa por sempre estar ao meu lado
e aos amigos Carlos Rocha e Walter Cancela
por me incentivarem a voltar a estudar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da Vida.

À minha Amada esposa, Amanda Bayma, pelo apoio e incentivo durante toda a construção dessa dissertação.

À minha sogra Isabel, pelas passagens aéreas de presente e pelo incentivo.

À minha orientadora e professora Adriana Dickman, pela sua dedicação, paciência e sabedoria.

Aos Professores do curso de Mestrado, por compartilharem suas experiências e conhecimentos durante o curso, em particular aos professores Adriana Dickman, Lev Vertchenko e Maria Inês, pelas maravilhosas e inesquecíveis aulas de Física.

Aos meus amados filhos, Bianca, Tiago, Vitória, Clarice e Saúlo, pelo tempo que lhes roubei durante o Mestrado.

À Dona Aparecida e seu Wander, por me acolherem em sua pensão todas as vezes em que estive em BH.

A todos os familiares e amigos, por torcerem sempre pelo meu sucesso.

Muito obrigado!

O que eu ouço, eu esqueço.
O que eu vejo, eu lembro.
O que eu faço, eu entendo.
(Confúcio)

RESUMO

Neste trabalho foi elaborado um produto educacional, na forma de uma oficina sobre as bases físicas da Ressonância Magnética, que busca contribuir para a complementação do estudo deste tópico por alunos dos cursos de Biomedicina. As atividades que compõem a oficina foram elaboradas com base nos três momentos pedagógicos de Delizoicov, estudados no decorrer da construção bibliográfica dessa dissertação, a saber: problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento. Nas atividades iniciais, problematizam-se situações ou fenômenos os quais os alunos estudaram no Ensino Médio e que serão respondidas de acordo com seus conhecimentos prévios. Na organização do conhecimento, trabalha-se com uma apostila com as bases físicas da Ressonância Magnética e com indicações de simulações/animações para que o aluno possa obter os conhecimentos necessários para a compreensão do fenômeno. Na aplicação do conhecimento, utiliza-se uma cruzadinha como uma prática pedagógica, a fim de abordar, de forma sistematizada, o conhecimento adquirido pelo aluno, para analisar e interpretar as situações da problematização inicial e outras que possam ser entendidas pelo mesmo conhecimento. Escolheu-se esta metodologia de ensino, porque nela a aprendizagem não fica centrada apenas no professor, mas também o aluno participa ativamente da construção de seu conhecimento. A oficina foi aplicada em uma faculdade paraense para um total de trinta alunos do curso de biomedicina.

Palavras-Chave: Oficina de Física. Ressonância Magnética Nuclear. Ensino de Física para a saúde.

ABSTRACT

In this work we developed an educational product in the form of a workshop on the physical basis of magnetic resonance imaging, which seeks to contribute to the completion of the study of this topic by students of Medicine and Biomedicine courses. The activities that make up the workshop were drawn up based on the three pedagogical moments of Delizoicov, studied during the construction of this literature dissertation, namely: initial questioning, organization of knowledge and application of knowledge. In the early activities, situations problematize phenomena which students studied in high school and will be answered according to their prior knowledge. In the organization of knowledge, it works with a handout with the physical basis of magnetic resonance imaging and indications simulations / animations so that the student can get the knowledge necessary for understanding the phenomenon. In the application of knowledge, crossword as a pedagogical practice is used in order to address, in a systematic way, the knowledge acquired by the student to analyze and interpret the situations of the initial questioning and others that can be understood by the same knowledge. We were chosen this teaching methodology because it learning is not focused only on the teacher but also the student actively participates in the construction of their knowledge. The workshop was applied in a Pará college for a total of thirty students of biomedicine.

Keywords: Physics Workshop. Nuclear Magnetic Resonance. Physical Education for health.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Animações e simulações e seus respectivos links de acesso	28
Quadro 2 - Questões apresentadas na problematização inicial	29
Quadro 3 - Temas e respectivos links dos vídeos	32
Quadro 4 – Cronograma da oficina	33
Quadro 5 - Respostas dos alunos à primeira questão da problematização inicial....	38
Quadro 6 - Respostas dos alunos à segunda questão da problematização inicial ...	39
Quadro 7 - Respostas dos alunos à terceira questão da problematização inicial.....	40
Quadro 8 - Respostas dos alunos à quarta questão da problematização inicial	41
Quadro 9 - Respostas dos alunos à quinta questão da problematização inicial	42
Quadro 10 - Respostas dos alunos à sexta questão da problematização inicial	42
Quadro 11 - Respostas dos alunos à sétima questão da problematização inicial	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese da análise das respostas da cruzadinha.....44

Tabela 2 - Notas dos alunos para a oficina.....48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Três momentos pedagógicos.....	17
2.1.1 <i>Problematização Inicial</i>	18
2.1.2 <i>Organização do Conhecimento</i>	19
2.1.3 <i>Aplicação do Conhecimento</i>	20
2.2 Proposta de ensino problematizadora	21
3. METODOLOGIA	23
3.1. Escolha do tema	24
3.2. Público alvo	25
3.3. Etapas da elaboração do produto educacional	25
3.3.1. <i>Recursos utilizados</i>	26
<u>3.3.1.1. Produto educacional</u>	<u>26</u>
<u>3.3.1.2 Animações e simulações</u>	<u>27</u>
3.4. Instruções para o professor	28
3.4.1. <i>Problematização inicial</i>	28
3.4.2. <i>Organização do conhecimento</i>	30
3.4.3. <i>Aplicação do conhecimento</i>	30
3.5. Recurso didático	31
3.6. Planejamento da oficina	33
3.7. Aplicação do produto.....	33
3.7.1. <i>Perfil da População</i>	33
3.7.2. <i>Aplicação do Produto Educacional</i>	34
<u>3.7.2.1 Problematização inicial.....</u>	<u>34</u>
<u>3.7.2.2 Organização do conhecimento</u>	<u>34</u>
<u>3.7.2.3 Aplicação do conhecimento.....</u>	<u>36</u>
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4.1 Problematização inicial.....	38
4.2 Aplicação do conhecimento: pós-teste – cruzadinha	44

4.3 Avaliação dos alunos sobre a eficácia da oficina	45
4.4. Discussão dos Resultados	49
 CONSIDERAÇÕES FINAIS	 52
 REFERÊNCIAS.....	 54
 APÊNDICES	 59
Apêndice A - Resumo das respostas dos alunos ao questionário de avaliação	59
Apêndice B - Produto.....	64

1 INTRODUÇÃO

A descoberta dos raios X, em 1895, por Wilhelm Conrad Roentgen trouxe um grande avanço em várias áreas da ciência e tecnologia, haja vista a quantidade de artigos e prêmios Nobel relacionados ao seu estudo e/ou à sua utilização. Em 1955, o físico Narinder Sing Kapany desenvolveu as fibras ópticas, que, ao dominarem o direcionamento da luz, permitiram, além de revolucionar as telecomunicações, a criação de inúmeros aparelhos médicos tais quais os usados em endoscopias, com suas aplicações diagnósticas e terapêuticas (TECHY, 2006). O endoscópio também provocou uma revolução na medicina, permitindo a visualização, com nitidez, das cavidades de determinados órgãos. Para além, a invenção do cateter, que pôde ser introduzido em artérias, possibilitou a obtenção de imagens nítidas da parede do órgão e a possível localização de gordura em artérias. A aplicação destas descobertas na medicina tornou-se fundamental, pois possibilitou o estudo de vários órgãos internos de maneira não invasiva (OLIVEIRA; BORDUQUI, 2012).

Nessa mesma linha, outra descoberta que tem revolucionado as técnicas de diagnóstico não invasivas é a Ressonância Magnética Nuclear (RMN), sendo esse um método que utiliza ondas de rádio para retratar imagens detalhadas e precisas dos órgãos do corpo. A técnica de imagens por Ressonância Magnética Nuclear explora um fenômeno quântico, que ocorre em escala nuclear, e que foi descoberto de forma independente por Felix Bloch e Edward Purcell, posterior à II Guerra Mundial. Essa descoberta lhes valeu o prêmio Nobel de Física de 1952. Porém, os desenvolvimentos que levaram à aplicação desse fenômeno quântico à geração de imagens tomográficas só aconteceram na década de 1970, sendo que, mais tarde, os principais responsáveis por esses desenvolvimentos, Paul Lauterbur e Peter Mansfield, foram também agraciados com o prêmio Nobel, dessa vez em Medicina e Fisiologia (COVOLAN *et al.*, 2004).

A Ressonância Magnética Nuclear é um método estabelecido na prática clínica e está em crescente desenvolvimento, dada sua alta capacidade de diferenciar tecidos e coletar informações bioquímicas. O espectro de aplicações se estende a todas as partes do corpo humano, além de explorar aspectos anatômicos e funcionais (MAZZOLA, 2009). A RMN é, em tempos hordienos, um aliado importante das áreas médica e biomédica, pois trabalha com radiofrequência, uma

radiação não ionizante. Além disso, as imagens fornecidas de qualquer região do corpo humano, em qualquer plano, são extraordinariamente nítidas, bem como o material de contraste, à base de gadolínio, que não provoca tantos efeitos colaterais, como, por exemplo, o iodo usado como contraste no exame de raio X, que pode provocar reações tais como: náuseas, vômitos e sintomas alérgicos. Na Biomedicina, a RMN é utilizada nos tomógrafos que fornecem imagens do interior do corpo humano em pleno funcionamento, de forma não invasiva. Tais imagens auxiliam na identificação de tumores no organismo. Sendo assim, este método tornou-se um dos mais utilizados e representa um dos mais significativos avanços para a medicina do século XXI no que diz respeito à imagem (OLIVEIRA; BORDUQUI, 2012).

Todos os exemplos de exames médicos citados são baseados em princípios da Física. Assim, entende-se que o profissional da saúde que utiliza essas técnicas deve ter uma formação que contemple tais conceitos físicos que são essenciais para uma completa compreensão das potencialidades e também dos riscos resultantes quando essas técnicas são aplicadas em seres vivos. Além disso, a Física é de fundamental importância na interpretação das imagens, sendo preciso, para tanto, que os seus princípios básicos sejam entendidos (HAGE; IWASAKI; 2009).

Portanto, o ensino de Física possibilita aos alunos conhecer e entender melhor os fenômenos da natureza e o mundo tecnológico em que vivem, além de compreender as formas de transformação de energia, estando presente nas mais diversas áreas do conhecimento.

A Física aplicada à Biomedicina pode ser utilizada como facilitadora da aprendizagem significativa, tanto pela variedade de fenômenos que envolve, como pelos seus impressionantes efeitos sobre a tecnologia moderna (PARISOTO; MOREIRA; MORO, 2012). Também chamada de Física Médica, por fazer uso dos conhecimentos e conceitos da Física em ramos como a Biomedicina, esta área tem por base duas vertentes: a aplicação da Física para entender o funcionamento do corpo humano, na saúde e na doença; e as aplicações da disciplina em práticas médicas. Geralmente, sua aplicação mais direta ocorre em imagens médicas e radioterapia, com campo de atuação bastante vasto para profissionais da área.

Esse ramo trabalha com conceitos e técnicas (básicas e específicas) da Física, além da Biologia e da Química e aplica os fundamentos físicos de múltiplas técnicas terapêuticas, fornecendo, assim, as bases para compreensão das

modernas tecnologias médicas e estabelecendo critérios de utilização dos agentes físicos na área da saúde. A importância da Física nos cursos de Biomedicina é bem retratada nas palavras de Corso (2009, p.2),

Um importante motivo de ser da biofísica é dar suporte ao ensino de fisiologia, o qual, por si só, justificaria sua inserção em cursos de medicina. Existem alguns conceitos cruciais para o entendimento do sistema circulatório e respiratório humano que necessitam de conhecimentos de dinâmica de fluidos que não são sequer mencionados no ensino médio. Um médico precisa conhecer a lei de Bernoulli e a transição do regime laminar para o turbulento para entender os sons pulmonares e cardíacos. Também relacionado ao sistema circulatório, a velocidade do sangue na saída do coração pode ir a 30 cm/s e nos capilares não passa de 0,3 mm/s o que se explica pela conservação da vazão em sistemas em série e paralelo. Ademais, para se entender a queda de pressão ao longo do sistema circulatório (e o motivo de possuímos, afinal, um coração) é preciso saber o que são fluidos reais e o que é a viscosidade.

Em sua dissertação de mestrado, Silva (2013) relata uma pesquisa realizada com seus alunos de Ensino Médio sobre o funcionamento de alguns aparelhos baseados em Física Quântica. Nas palavras de Silva (2013, p.1):

O texto informava muito sinteticamente as origens da Física Quântica (FQ) e qual a sua relevância em termos de aplicações tecnológicas. Em especial, o texto dizia que equipamentos como o aparelho de CD, o controle remoto, o aparelho de ressonância magnética, o telefone celular, o laser, o computador, entre outros, só puderam ser projetados devido ao conhecimento da FQ. Diante disso, uma das questões formuladas foi de qual dos equipamentos citados no texto os estudantes prefeririam compreender o funcionamento. Guardadas as devidas proporções por se tratar de uma sondagem com poucos estudantes, esperava mais respostas indicando o telefone celular e o computador como os objetos nos quais eles detinham maior interesse em compreender o funcionamento – afinal, trata-se de objetos corriqueiramente muito utilizados. Entretanto, o aparelho de ressonância magnética foi o mais citado, onze vezes, enquanto o computador e o telefone celular receberam, respectivamente, cinco e quatro citações.

Considerando a importância da discussão de tópicos da Física em cursos direcionados a profissionais da saúde, foi feito um levantamento de algumas referências comumente usadas nos cursos de Biomedicina disponíveis no estado do Pará, possibilitando perceber a quase ausência do tópico Ressonância Magnética Nuclear. Embora os livros analisados apresentem tópicos de Física Moderna, como, por exemplo, modelos atômicos, radioatividade e raio X, esses não apresentavam a Ressonância Magnética como tópico a ser estudado. Este fato se justifica, talvez, por ser um assunto ainda sutil, pois, para seu entendimento, necessita-se usar ideias quânticas, tais como spin de partículas nucleares e interação do spin com campos magnéticos oscilantes (CORSO, 2009).

Neste contexto, e levando em consideração as palavras de Fernandes e Filgueira (2009, p.2),

É comum estudantes do ensino médio se perguntarem – e também ao professor – “por que tenho que estudar física?” Ou “que utilidade tem isso na minha vida?”. O que talvez não seja tão comum são os professores se perguntarem: “por que ensinar física?” Ou “que utilidade tem esse conteúdo na vida do meu aluno?”. É importante que professores e alunos reconheçam a importância do conhecimento em física na formação básica de qualquer indivíduo, porém, isso nem sempre acontece.

Assim, o presente trabalho consiste, também, na elaboração de um material de apoio sobre a RMN para alunos de Biomedicina, uma vez que esse tópico não aparece nos livros de Física de Ensino Médio, e raramente é discutido nos livros de Biofísica, como trabalho de verificação realizado pelo pesquisador e que será discutido adiante, nessa dissertação. Esta proposta se justifica ao considerar a importância da Física nas técnicas de diagnóstico atuais e a quase ausência de discussões a respeito na Educação Básica e Superior.

Essa pesquisa encontra-se assim dividida:

Neste primeiro capítulo, introdutório, destaca-se a importância da Ressonância Magnética Nuclear nos exames diagnósticos por imagem e a sua quase inexistência nos livros de biofísica.

No capítulo 2, são apresentados os três momentos pedagógicos de Delizoicov, que representa um dos principais referenciais teóricos utilizados para a construção da oficina.

O capítulo 3, por sua vez, apresenta a metodologia, com detalhamento de toda ação desenvolvida na construção do produto educacional.

Já no capítulo 4, é mostrada a aplicação do produto para alunos de biomedicina de uma faculdade paraense, bem como a análise dos resultados e avaliação dos alunos. Seguem-se, após, as considerações finais desse trabalho, os apêndices, incluindo, aí, o próprio produto educacional, ao final.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para essa dissertação, foi elaborada uma oficina para discutir as bases físicas da Ressonância Magnética Nuclear com alunos de Biomedicina, consistindo, prioritariamente, de uma introdução aos conceitos físicos – para entendimento da RMN, como suporte, depreendendo que se o aluno realmente entende como o fenômeno se dá, ele, por consequência, obterá maior êxito e maior domínio acerca do tema.

Como referencial teórico, esse trabalho se apoia nos três momentos pedagógicos de Delizoicov e Angotti (1994; 2000). Esta abordagem metodológica consiste em dividir a oficina, produto dessa pesquisa, em três momentos pedagógicos: primeiro momento ou problematização inicial, segundo momento, ou organização do conhecimento e terceiro momento ou aplicação do conhecimento. A seguir são descritos cada um deles.

2.1 Três momentos pedagógicos

Para que se possa compreender de que forma a prática educativa se constrói diante do ensino das ciências, de acordo com Freire (2001), faz-se necessário o entendimento da curiosidade do estudante como motivador nesta construção. Este mesmo pensamento é corroborado pelo trabalho de Delizoicov (2001), que promove uma abordagem problematizadora como fundamental na construção do conhecimento dos alunos diante das ciências. É a problematização que fomenta, no aluno, a curiosidade de entender questões pertinentes ao seu cotidiano, das quais o ensino das ciências se apropria para torná-las acessíveis.

Delizoicov e Angotti (1994) propõem uma dinâmica para o trabalho em sala de aula baseada nas teorias de Paulo Freire, chamada “Três Momentos Pedagógicos”, estruturados, conforme já dito, em **problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento**.

Os três momentos pedagógicos, desse modo, “foram originalmente propostos como desdobramento da educação problematizadora aplicada à construção de um currículo de educação científica” (FERRARI, 2008, p.10), podendo, assim, serem

utilizados dentro de quaisquer programas de ensino, considerando que estes se adequam, facilmente, graças à versatilidade com que as situações problematizadoras instigam a aquisição de novos conhecimentos por parte dos alunos.

2.1.1 Problematização Inicial

Na etapa de problematização inicial, são apresentadas situações reais que os alunos provavelmente conhecem e vivenciam, embora necessitem, para interpretá-las, de conhecimento científico. Organiza-se esse momento de tal modo que os alunos sejam desafiados a expor o que estão pensando sobre as situações. Nesse ínterim, o aluno está com a palavra para que o professor saiba o que estão pensando. É nesse momento, também, que o aluno irá perceber que necessita de novos conhecimentos para explicar as situações apresentadas.

Na etapa inicial dos três momentos pedagógicos, Delizoicov e Angotti (1994, p.29) destacam que:

[...] a problematização poderá ocorrer pelo menos em dois sentidos. Por um lado, o aluno já poderá ter noções sobre as questões colocadas, fruto da sua aprendizagem anterior, na escola ou fora dela. As noções poderão ou estar de acordo com as teorias e as explicações da Física, representando o que se tem chamado de "concepções alternativas" ou "conceitos espontâneos" dos alunos. A discussão problematizada pode permitir que essas concepções emergjam. De outro lado, a problematização poderá permitir que o aluno sinta necessidade de adquirir outros conhecimentos que ainda não detém; ou seja, a situação ou questão se configura para ele um problema para ser resolvido. Daí a importância de se problematizarem questões e situações.

É importante destacar que, ainda que esteja sendo relatado como o primeiro passo do processo de ensino proposto por Delizoicov e Angotti (2000), os autores ratificam que a problematização é uma questão recorrente dentro do ensino das ciências em sala de aula, sendo chamado “eixo estruturante” de tal proposta educacional. De acordo com Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002, p.197):

[...] problematiza-se, de um lado, o conhecimento sobre as situações significativas que vai sendo explicitado pelos alunos. De outro, identificam-se e formulam-se adequadamente os problemas que levam à consciência e necessidade de introduzir, abordar e apropriar conhecimentos científicos. Daí decorre o diálogo entre conhecimentos, com consequente possibilidade de estabelecer uma dialogicidade tradutora no processo de ensino/aprendizagem das Ciências. [...] O caráter dialógico, com a qualidade de *tradutor*, deve ser uma das características fundamentais do

modelo didático-pedagógico, cujo eixo estruturante é a problematização dos conhecimentos.

Diante do tema, neste caso, a Ressonância Magnética Nuclear, e da definição do plano de ensino, dar-se-á início ao contato entre o conteúdo e os participantes, sendo sempre necessária a apresentação problematizadora do assunto que será trabalhado e discutido, e dos materiais didáticos, compondo, assim, uma didática participativa e dialógica. Como ressalta Freire (2007, s.p.), “a codificação, mesmo quando puramente pictórica, é um “discurso” a ser “lido” por quem procura decifrá-la”, isto é, a introdução ao conteúdo é essencial para a fluidez do processo educacional.

2.1.2 Organização do Conhecimento

O que antes era chamado de “Estudo Científico” quando no primeiro momento do estudo de Delizoicov, torna-se o estágio em que se aprofundam os conceitos e questionamentos acerca da problematização. Assim, na organização do conhecimento, os conhecimentos selecionados como necessários para a compreensão dos temas e da problematização inicial são sistematicamente estudados neste momento, sob a orientação do professor. (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNANBUCO, 2011, p.201).

Nesse segundo passo dos três momentos pedagógicos, vale ressaltar, que ainda se mantêm o teor dialógico e instigador do processo educacional, mantendo ativos a curiosidade e o pertencimento dos alunos diante do que é trabalhado nesta metodologia. Para Delizoicov e Angotti (1994, p.150):

[...] inicia-se, portanto, neste segundo momento do roteiro pedagógico, o estudo sistemático do conteúdo programático com o qual a “estrutura profunda” da codificação pode ser apreendida. É o momento de análise dos fatos procurando superar a visão sincrética e eminentemente descritiva, até então exposta. O questionamento que o professor passa a fazer dá-se em observações sistemáticas do meio e/ou em experimentos relacionados diretamente com os fenômenos e é dirigido para a compreensão do processo de transformação envolvido (a “estrutura profunda” da codificação). Durante a problematização em torno das “codificações auxiliares” (as observações de fatos e/ou os experimentos), o professor irá definindo, conceituando, enfim obtendo e fornecendo as informações que delas possam ser abstraídas.

Freire (2005), na intenção de trabalhar com temas sempre próximos da realidade dos participantes, sugere que, dentre os materiais didáticos utilizados, o ministrante utilize recortes de jornais, de revistas, e outros recursos que possam sempre aproximar o conteúdo à análise, para que se possa observar e pesquisar a amplitude dos temas propostos. Nas palavras dele:

Preparado todo este material, a que se juntariam pré-livros sobre toda esta temática, estará a equipe de educadores apta a devolvê-lo ao povo, sistematizada e ampliada. Temática que, sendo dele, volta agora a ele, como problemas a serem decifrados, jamais como conteúdos a serem depositados. (FREIRE, 2005, p.137).

Deste modo, Delizoicov (1991, p.35) afirma que, nesse segundo momento, isto é, na fase de Organização do Conhecimento, estamos “estruturando [...] a aprendizagem dos conhecimentos oriundos e introduzidos pelos paradigmas científicos, como era o objetivo”.

2.1.3 Aplicação do Conhecimento

Como visto, introduziram-se os temas e as abordagens, levantaram-se as questões, apresentaram-se os conteúdos relacionados, correlacionou-os com a realidade dos participantes, assim, é chegado o momento de utilizar as novas concepções para se compreender e resolver as questões propostas na primeira etapa do processo, podendo-se, inclusive, ousar e ir além dos problemas levantados alcançando um conhecimento maior, a partir de questões que até então eram distantes daqueles alunos. Para Delizoicov e Angotti (1994, p.150):

[...] na “Aplicação do Conhecimento” podemos também ampliar o quadro das informações adquiridas ou ainda abranger conteúdo distinto da situação original (abstraida do cotidiano do aluno), mas decorrente da própria aplicação do conhecimento. É particularmente importante considerar esta função da “Aplicação do Conhecimento”; é ela que, ampliando o conteúdo programático, extrapola-o para uma esfera que transcende o cotidiano do aluno. Portanto, com um aprendizado que parte da realidade do aluno, tem-se a perspectiva de superar, em conceito e potencialidade, esta mesma realidade.

Portanto, a proposta deste método de ensino promove uma aproximação entre os alunos e o conteúdo a ser trabalhado, de forma que o plano de ensino parte diretamente daquilo que está presente na vida dos participantes, que está inserido na rotina deles, e, a partir daí, pode-se iniciar o processo de aprendizado. Vale

lembrar que a metodologia se inicia nas questões cotidianas, para que não cause estranheza ou indiferença aos alunos, porém, não se basta nela. É, principalmente neste momento, que se faz necessária a atuação do professor, para que este possa dar as diretrizes à discussão, promovendo uma consistente abrangência do que deverá ser estudado e incorporado pelos participantes. Assim, partindo destes conhecimentos e deste processo de aprendizagem, é que se pretende trabalhar a Ressonância Magnética Nuclear.

2.2 Proposta de ensino problematizadora

Na proposta de ensino, foi utilizada, como Primeiro Momento Pedagógico, a resolução de um questionário com questões que envolviam situações pertinentes que serviam de base para o estudo da RMN, no qual, o papel do professor era instigar os alunos a encontrarem respostas aos seus questionamentos, não lhes fornecendo respostas prontas e acabadas. O aluno deveria sentir necessidade de aquisição de outros conhecimentos que ainda não detinha. Segundo Rosa; Rosseto e Terrazan (2003), corroborando com as palavras de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), o aluno estava com a palavra; ou seja, o professor ouvia o que o aluno tinha a dizer sobre o assunto: tanto sua maneira de entender o conteúdo, como, também, a sua experiência de vida.

A partir desse processo, os estudantes eram desafiados a expor os seus entendimentos sobre determinadas situações significativas que diziam respeito às manifestações de contradições locais e que faziam parte de suas vivências.

No segundo momento pedagógico, foi apresentado ao aluno o produto educacional elaborado nesta dissertação. Especificamente neste momento, o aluno se apropriava do conhecimento científico, que permitia uma melhor compreensão para, a partir daí, melhor interpretar aqueles fenômenos da problematização inicial.

Já o Terceiro momento pedagógico correspondeu à aplicação do produto. Retomavam-se as questões iniciais, em que o aluno mostrava o conhecimento adquirido e incorporado somado ao conhecimento já possuído. Sugere-se ao professor que retome as situações da problematização inicial, agora com o conhecimento mais organizado. Segundo Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2011), esta etapa destina-se, sobretudo, a abordar sistematicamente o conhecimento que vem sendo incorporado pelo aluno, para analisar e interpretar tanto as situações

iniciais, que determinam o seu estudo, como outras que estejam diretamente ligadas ao motivo inicial, mas que são explicadas pelo mesmo conhecimento.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para realização deste trabalho, discutindo os passos seguidos para a construção do produto educacional, assim como as instruções para a utilização deste por professores interessados. Acredita-se que os conhecimentos prévios dos alunos devem servir de pré-requisitos para a construção de novos conhecimentos e seleção de conteúdos importantes para a formação profissional.

A pesquisa realizada foi de cunho qualitativo e utilizou como método de coleta de dados a pesquisa bibliográfica, tomando, como base, obras de Delizoicov (2001; 1991); Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2011; 2002); Delizoicov e Angotti (1994; 2000), entre outros. Esses embasamentos teóricos permitiram o desenvolvimento de uma oficina como produto desse trabalho dissertativo.

O produto educacional elaborado neste trabalho consiste em uma oficina, que é um trabalho estruturado com grupos, independentemente do número de encontros, sobre as bases físicas da Ressonância Magnética destinada a alunos de biomedicina. Apesar de este assunto ser parte da grade curricular de biofísica, no tópico de radiologia, ele não está presente na maioria dos livros de biofísica, pois estes livros abordam apenas o raio X, deixando de fora, na maioria das vezes, a Ressonância Magnética.

Outro método utilizado, ainda para fins de pesquisa, foi a observação direta participante, realizada, prioritariamente, no decorrer da aplicação da oficina, produto educacional dessa dissertação, pelo próprio pesquisador. Segundo Lüdke e André (1986, p.29), esse tipo de observação trata-se daquela a qual “a identidade do pesquisador e os objetivos do estudo são revelados ao grupo pesquisado desde o início. Nessa posição, o pesquisador pode ter acesso a uma gama variada de informações”. Nesse caso, ao que as autoras denominam como “participante total”, o pesquisador assume o compromisso de ação conjunta.

Optou-se por uma oficina como atividade pedagógica, pois essa atividade está dentro de uma proposta na qual o professor ou coordenador não ensina o que sabe, mas cria oportunidades para que os participantes aprendam o que eles necessitam saber, sendo uma abordagem centrada no aprendiz e na aprendizagem e não no professor. Desse modo, a construção de saberes e as ações relacionadas

decorrem, principalmente, do conhecimento prévio, das habilidades, dos interesses, das necessidades, dos valores e julgamentos dos participantes (PAVIANI, FONTANA, 2009, p.79).

3.1. Escolha do tema

O autor deste trabalho é professor de Física e leciona há tempos em cursos preparatórios para o vestibular em Belém do Pará. Ocorre que, depois de certo tempo, alguns ex-alunos, graduandos da área de saúde (Biomedicina), costumam procurá-lo para solucionar algumas dúvidas quando estão cursando o módulo de biofísica e/ou imaginologia. Dentre todos os tópicos da grade curricular de tais disciplinas, os alunos sentem muita dificuldade em radiologia, principalmente em Ressonância Magnética. Assim, percebe-se a dificuldade dos alunos em relação a alguns conceitos físicos vistos no Ensino Médio que os mesmos esqueceram e/ ou nunca dominaram, como, por exemplo: lei de Faraday, espectro eletromagnético, emissão e absorção de energia, etc.

Tendo essa dificuldade dos alunos em mente, realizou-se, inicialmente, um levantamento de algumas referências de livros de Biofísica comumente usados nos cursos da área de saúde e disponíveis no estado do Pará. Percebeu-se a quase ausência do tópico Ressonância Magnética nos livros pesquisados, o que entendeu-se como um indicativo de que há uma grande necessidade de complementar o estudo desse tópico.

Os livros analisados foram: Biofísica Básica (1996), de Ibrahim Felipe Heneine; Física para Ciências Biológicas e Biomédicas (1982), de Emico Okuno, Iberê L. Caldas e Cecil Chow; Biofísica Essencial (2012), de Carlos Alberto Mourão Júnior e Dimitri Abramov; Biofísica – Fundamentos e Aplicações (2003), de José Enrique Rodas Durán; Biofísica (1998), de Eduardo A. C. Garcia. Somente este último apresentava uma introdução ao estudo da RMN, mostrando uma descrição do fenômeno, porém, sem explicar a Física relacionada. A escolha desses livros se deu em virtude de esses serem os mais utilizados para o ensino de Biofísica no estado do Pará.

Concorda-se com Garcia (1998) quando este afirma, no prefácio do seu livro:

Estou convencido de que todo tipo de conhecimento é essencial e que somente com uma formação sistematizada e completa é possível dar ao aluno não apenas as ferramentas práticas de que precisará, mas também e sobretudo a estrutura para que possa, adiante, acompanhar e compreender os avanços da ciência e, assim, inovar permanentemente a sua conduta profissional.

Neste contexto, o foco desse trabalho foi preparar uma oficina sobre a Física da Ressonância Magnética, voltada para alunos de biomedicina, a fim de complementar o conteúdo de biofísica/imaginologia.

Entende-se que a Física representa, para o estudante, na maior parte das vezes, “uma disciplina muito difícil”, em que é preciso decorar fórmulas cuja origem e finalidades são desconhecidas. (SANTOS, ALVES, MORET, 2006, p.57). Por isso, a oficina foi dividida em duas partes, sendo a primeira fazendo uma revisão da Física necessária para o entendimento da Ressonância Magnética e na segunda parte, estudando o fenômeno em si.

3.2. Público alvo

O público alvo foi formado por alunos da área de saúde, principalmente alunos de biomedicina, que utilizarão, depois de formados, o aparelho de Ressonância Magnética, discutirão protocolos e farão a leitura de imagens que ajudam a identificar alterações e patologias em órgãos internos do corpo humano (CORSO, 2009, p.2). Baseado nessa realidade, entende-se que a compreensão dos princípios físicos por detrás do fenômeno é essencial para a formação do profissional. Essa aplicação da Física na área de saúde está de acordo com os PCN (BRASIL, 2002, p.2), quando afirmam que:

As competências para lidar com o mundo físico não têm qualquer significado quando trabalhadas de forma isolada. Competências em Física para a vida se constroem em um presente contextualizado, em articulação com competências de outras áreas, impregnadas de outros conhecimentos.

3.3. Etapas da elaboração do produto educacional

Nesta seção, discute-se cada etapa da elaboração da oficina “Bases físicas da Ressonância Magnética Nuclear”, justificando todas as escolhas feitas durante este processo.

Essa oficina consiste em uma série de atividades envolvendo textos, no formato de apostilas, vídeos, simulações, a fim de proporcionar a máxima interação entre professor, aluno e conhecimento. Espera-se que esse produto possibilite aulas mais dinâmicas, participativas, atraentes e prazerosas, pois: “a melhor aula do mundo é aquela em que os alunos cansam, mas não dormem, acompanham as idas e vindas do pensamento do seu professor, como bem destaca Paulo Freire” (COSTA, 2014, p.90).

3.3.1. Recursos utilizados

A seguir é mostrada a composição do produto educacional que consiste de um questionário pré-teste, uma apostila com o conteúdo da RMN, com indicações de vídeos e animações/simulações, bem como os livros utilizados como referências na sua confecção e a cruzadinha, que é utilizada como pós-teste.

3.3.1.1. Produto educacional

O produto educacional consiste, inicialmente, em um questionário contendo as questões/situações para avaliar os conhecimentos prévios dos alunos, uma cruzadinha aplicada no final da oficina contendo questões referentes à problematização inicial e outras questões que podem ser respondidas pelos novos conhecimentos adquiridos pelos alunos ao longo da organização do conhecimento, e de uma apostila para o aluno dividida em duas partes: (1) Revisão de Física Clássica e Física Moderna, que servem de pré-requisitos para a Física da Ressonância Magnética; (2) Desenvolvimento teórico do fenômeno da Ressonância Magnética mostrando a aplicação da Física. Essa apostila contém todo o desenvolvimento das teorias físicas sobre o assunto para aqueles que têm habilidade matemática, e indicações de sites com animações, vídeos e simuladores para aqueles que não são familiarizados com a Matemática requisitada, uma vez que a Matemática do curso superior é de difícil compreensão para alunos que não possuem em sua grade curricular o cálculo diferencial.

Os livros-textos usados como base para a construção da primeira parte da apostila foram os livros de Física básica de nível superior (HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2009a; 2009b; TIPLER, MOSCA, 2006). Para a construção da segunda

parte foram usados os livros de: Weishaupt, Kochli, Marincek (2006) e Westbrook, Roth, Talbot (2013). Esta apostila está no apêndice B dessa dissertação e se constitui como parte do seu produto educacional, o qual é complementado por um questionário inicial e uma cruzadinha, como já explicitado anteriormente.

3.3.1.2 Animações e simulações

As animações e simulações são consideradas, por muitos, a solução dos vários problemas que os professores de Física enfrentam, ao tentar explicar para seus alunos fenômenos abstratos para serem “visualizados” através de uma descrição em palavras, e demasiado complicados para serem representados através de uma única figura (HECKLER; SARAIVA; OLIVEIRA FILHO, 2007, p.268). Por esse motivo, entende-se que o aluno poderá compreender melhor a parte conceitual do assunto utilizando animações ou simuladores sobre o tópico em questão.

Vídeos, animações, simuladores ou qualquer fonte digital são espécies de softwares educativos conhecidos como Objetos de Aprendizagem (OA) que podem ser utilizados em atividades pedagógicas como recursos complementares no processo ensino-aprendizagem. Essa definição inclui, ainda, imagens, fotos, clips de vídeo, animações e páginas da web (COSTA, 2014). A escolha da animação ou simulação é feita com bastante cuidado para que se consiga ter o resultado esperado, pois se concorda com Munhoz (2013, p.34), quando afirma que:

Toda tecnologia, em si mesma, não tem significado, não provoca impactos, não resolve problemas. Ela é um instrumento que, quando não utilizado, torna-se neutro. Mas, quando você for utilizá-lo, tem de estar preparado, conhecer os fundamentos e compreender os benefícios que pode trazer. A falta de preparo e o desconhecimento dos desafios que a prática impõe pode trazer dificuldades para você atingir seus objetivos.

Portanto, os objetos de aprendizagem servem para potencializar a aula, deixando-a mais dinâmica e interessante. Sabe-se que nenhum recurso tecnológico, por mais avançado que seja, irá substituir um bom professor (COSTA, 2014). Desta maneira, ao selecionar as animações/simulações indicadas na apostila, tomamos o cuidado para que elas exponham fenômenos que variem com o tempo, tornando o processo pedagógico mais direto e mais simples, promovendo o contato direto dos estudantes com as ideias centrais que se deseja mostrar.

As animações/simulações utilizadas na oficina com seus respectivos endereços eletrônicos são mostradas no quadro 1:

Quadro 1 - Animações e simulações e seus respectivos links de acesso

Movimento de um pião	http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/Flash/ClassMechanics/Precession/Precession.html
Processo de carga de um capacitor	http://www.falstad.com/circuit/e-cap.html .
Indução magnética	https://phet.colorado.edu/sims/faradays-law/faradays-law_pt_BR.html
Ressonância Magnética	http://www.iactionline.net/ScannerDemo/MRISimulator.html .

Fonte: Dados da pesquisa.

3.4. Instruções para o professor

A seguir, é mostrado o passo a passo da aplicação do produto em uma carga horária de cinco (5) horas aula, divididos em dois dias. As instruções são resultantes da experiência que o autor principal do produto teve quando aplicou o mesmo em uma faculdade paraense.

3.4.1. Problematização inicial

A oficina de Ressonância Magnética é iniciada com o professor propondo as questões/situações (mostradas no quadro 2), que estabelecem uma relação entre o cotidiano do aluno e o conteúdo de Física que se quer apresentar. Para tanto, o aluno anota, no quadro, suas respostas para, em seguida, adequar a discussão de acordo com os conhecimentos prévios identificados pelo professor.

Quadro 2 - Questões apresentadas na problematização inicial**QUESTÕES/SITUAÇÕES**

1. O professor deve levar um pião ou um giroscópio para a sala de aula que serão postos para girar e, em seguida, pedir os alunos que identifiquem e expliquem o movimento de precessão, além de citar em quais outros sistemas este movimento ocorre.
2. O professor deve levar para sala de aula uma espira ligada a um multímetro. Ao aproximar e afastar um ímã da mesma perguntar ao aluno porque surge na espira uma corrente elétrica? Discutir com os alunos: onde mais isto acontece?
3. Você já fez exames de raio X? É nocivo à saúde? Explique.
4. Você já fez exame de Ressonância Magnética Nuclear ou já ouviu falar? Explique o princípio do exame. Há radiação envolvida?
5. Onde você estaria sujeito à radiação mais perigosa: em um exame de Ressonância Magnética Nuclear ou em um exame de raio X. Por quê?
6. Em suas aulas de química, você provavelmente já ouviu falar sobre spin. Você poderia escrever algo sobre essa grandeza?
7. Ao emitir uma nota musical muito aguda, uma cantora de ópera pode fazer com que uma taça de cristal se despedace. Que fenômeno é esse? Porque ocorre?

Fonte: Elaborado pelo autor

Neste momento, o docente deve provocar os alunos, desafiando-os a exporem seus conhecimentos, que podem ser contraditórios entre si ou não, até que sintam necessidade de buscarem conhecimento científico para explicar as situações apresentadas. As discussões com a turma, sempre com a orientação do professor, devem ser adequadas de acordo com o planejamento da carga horária do mesmo. É sugerido ao professor que a discussão das questões propostas corresponda a, aproximadamente, uma aula de sessenta (60) minutos.

3.4.2. Organização do conhecimento

Esse momento é dividido em duas partes, que correspondem a três aulas de sessenta (60) minutos, divididas em dois dias, sendo uma aula de noventa (90) minutos no primeiro dia e uma aula de noventa (90) minutos no segundo dia.

No primeiro dia, é sugerido um “passeio” por alguns tópicos da Física que são pertinentes à compreensão da RMN, como indução eletromagnética, movimento de precessão, paramagnetismo, espectro eletromagnético, radiações ionizantes, decaimento exponencial, modelo atômico de Bohr, ressonância, momento magnético e spin.

No segundo dia, o professor apresenta o fenômeno da Ressonância Magnética. A proposta consiste em fazer o *link* entre o conhecimento científico adquirido no primeiro dia e o fenômeno da RMN. Neste sentido, entende-se que a primeira parte da apostila resgata conceitos científicos estudados pelos alunos no Ensino Médio e, portanto, visa facilitar a compreensão de grandezas relativas à RMN, tais como: Teorema de Larmor, vetor magnetização longitudinal e transversal, relaxação transversal e longitudinal, que são conhecimentos pertinentes ao entendimento do fenômeno da Ressonância Magnética.

Será utilizado, ainda, um software que simula um exame de Ressonância Magnética, onde o aluno pode escolher o tipo de exame: T1 ou T2, a parte do corpo em que o exame será feito e o tipo de corte utilizado, axial, coronal ou sagital. Este software está disponível gratuitamente na internet¹, bastando, para isso, o aluno preencher um cadastro para gerar *login* e senha. Esse momento, tendo como apoio a utilização de experimento, simulações/animações e vídeos, permite ao professor apresentar os conteúdos básicos dos assuntos selecionados aos alunos, desenvolvendo conceitos, definições, leis e relações, de uma forma interativa e prazerosa (MACÊDO, DICKMAN, ANDRADE, 2012).

3.4.3. Aplicação do conhecimento

Neste terceiro momento, o professor deve verificar o quanto o aluno assimilou do conhecimento científico discutido no segundo momento pedagógico. Então, são

¹ IACI. **MRI Simulator**. Disponível em: <http://www.iacionline.net/ScannerDemo/MRISimulator.html>. Acesso em: 10 ago. 2015.

retomadas as questões e discussões da problematização inicial, porém, agora, espera-se que o aluno seja capaz de responder às questões do primeiro momento pedagógico com o suporte fornecido pela ciência e outras questões que, embora não estejam diretamente ligadas ao motivo inicial, podem ser compreendidas pelo mesmo conhecimento (DELIZOICOV, ANGOTTI, PERNAMBUCO, 2011).

O professor, então, deve pedir aos alunos que preencham a atividade lúdica chamada de **“cruzadinha da Ressonância Magnética”** apresentada junto à apostila, que contém questões referentes tanto à problematização inicial quanto às novas questões/situações que podem ser respondidas com o conhecimento apresentado ao aluno.

A escolha da ludicidade como facilitadora na aprendizagem na sala de aula se justifica, pois, o ensino de Ciências torna-se muito mais eficiente e produtivo, quando se provoca o aluno a construir o seu conhecimento através de observação e da pesquisa. E o lúdico tem esse efeito (BRETONES, 2014, p.23). Concorde-se com Benedetti Filho *et al.* (2009, p.89) quando dizem que: “O uso do lúdico para ensinar conceitos em sala de aula pode ser uma ferramenta que desperte o interesse na maioria dos alunos, motivando-os a buscar soluções e alternativas que resolvam e expliquem as atividades lúdicas propostas”.

É sugerido ao professor que a aplicação desta atividade lúdica aconteça em, aproximadamente, 60 min. A atividade pode ser feita dividindo-se a turma em grupos de quatro ou cinco alunos, dependendo da quantidade total de alunos presentes na sala de aula. Nesse momento, o professor pode sugerir uma disputa entre grupos, uma vez que, de acordo com Soares e Cavalheiro (2006, p.30), “O jogo incentiva a participação do aluno, considerando-se o aluno construtor do próprio conhecimento e valorizando a interação do aprendiz com seus colegas e com o próprio professor”.

3.5. Recurso didático

Além dos experimentos realizados em sala de aula, a primeira e a segunda aulas poderão ser apresentadas em forma de aula expositiva utilizando o projetor de multimídia com material em PowerPoint®, sendo este um resumo do produto educacional elaborado pelo autor.

Os vídeos que o professor pode utilizar na sua apresentação foram construídos pelos autores utilizando um programa de modelagem 3D e encontram-

se disponíveis no canal do Youtube do autor principal dessa dissertação². A lista dos vídeos que podem ser utilizados encontra-se no quadro 3. É sugerido que este resumo apresente apenas a parte conceitual, tanto da primeira quanto da segunda aula, deixando o “corpo” matemático do fenômeno apenas na apostila.

Quadro 3 - Temas e respectivos links dos vídeos

Temas	Link para o vídeo
Pulso de 180°	https://www.youtube.com/watch?v=3z38kNoeG7k .
MRI	https://www.youtube.com/watch?v=2qKH5_BsKc0 .
Água e gordura	https://www.youtube.com/watch?v=rGyM2k5y308 .
Em fase	https://www.youtube.com/watch?v=6VZY04HM-c .
Magnetização transversal	https://www.youtube.com/watch?v=dDq11G3H-Kw .
Vetor magnetização no plano XY	https://www.youtube.com/watch?v=rRMhcDdStXE .
Spin	https://www.youtube.com/watch?v=b83NCES0zZo .
T ₁	https://www.youtube.com/watch?v=y9t3OD1NsbE .
T ₂	https://www.youtube.com/watch?v=UkUK0NG8iNo .
metal+Ressonância Magnética	https://www.youtube.com/channel/UC9N-S6teouQhUG4WEUbeK-A/videos .
Metal + RMN2	https://www.youtube.com/watch?v=5S7elcGITco .

Fonte: Elaborado pelo autor

Embora a aula seja expositiva, ela deverá ser interativa, pois a participação do aluno é primordial nesse momento, uma vez que, de acordo com a visão freiriana (FREIRE, 2001, p.43):

Enquanto, na concepção “bancária”- permita-se-nos a repetição insistente -, o educador vai “enchendo” os educandos de falso saber, que são os conteúdos impostos, na prática problematizada, vão os educandos desenvolvendo o seu poder de captação e de compreensão do mundo que lhes aparece, em suas relações com ele, não mais como uma realidade estática, mas como uma realidade em transformação, em processo.

² O canal encontra-se disponível em: <https://www.youtube.com/channel/UC9N-S6teouQhUG4WEUbeK-A>. Acesso em: 15 abr. 2016.

3.6. Planejamento da oficina

No quadro 4, apresenta-se uma sugestão do cronograma da aplicação do produto para uma carga horária de cinco (5) horas divididos em dois dias. No entanto, esse cronograma poderá ser modificado e adequado de acordo com a carga horária do professor.

Quadro 4 – Cronograma da oficina

PRIMEIRO DIA	<ul style="list-style-type: none"> • PROBLEMATIZAÇÃO INICIAL (60min) • ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO: PRIMEIRA AULA (60min + 30min)
SEGUNDO DIA	<ul style="list-style-type: none"> • ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO: • SEGUNDA AULA (60min + 30min) • APLICAÇÃO DO CONHECIMENTO: (60min)

Fonte: Dados da pesquisa.

3.7. Aplicação do produto

Apresenta-se, nesta seção, o processo de aplicação do produto. A aplicação da oficina em sala de aula possibilitou identificar as concepções prévias desses alunos em relação ao tema desenvolvido, além, também, de verificar a assimilação de conteúdo, após a participação na oficina.

3.7.1. Perfil da População

Participaram da oficina 30 alunos no primeiro dia, 27 no segundo dia e apenas 23 alunos entregaram a avaliação da oficina. Eram alunos do terceiro, quarto e sexto semestres do curso de Biomedicina da Faculdade Metropolitana da Amazônia (FAMAZ), em Belém do Pará. Participaram, ainda, dois alunos graduados em Radiologia, que embora já trabalhassem com diagnóstico por RMN, não conheciam a Física que descreve o fenômeno, e mostraram curiosidade em entendê-la. Os alunos do terceiro e quarto semestres ainda não tinham estudado

RMN na faculdade e, mesmo sendo alunos de turmas diferentes, havia bastante entrosamento entre eles.

3.7.2. Aplicação do Produto Educacional

O produto educacional foi aplicado pelo pesquisador, que foi convidado para a semana acadêmica da faculdade FAMAZ para ministrar esta oficina. Para aplicação do referido produto, foram disponibilizadas um total de cinco horas-aula de 60 minutos, nas quais os momentos pedagógicos foram divididos de acordo com o quadro 4, indicado no item 3.6 “Planejamento da Oficina”, anteriormente descrito.

3.7.2.1 Problemática inicial

A primeira aula começou com a problematização inicial, na qual a turma, separada em grupos de cinco pessoas, discutiu e respondeu aos sete questionamentos a respeito de fenômenos físicos relacionados à Ressonância Magnética. Vale ressaltar que foi possível observar que, na visão dos alunos, os conceitos discutidos nada tinham em consonância com o fenômeno da RMN.

Neste momento, foram levados para sala de aula experimentos, tais como um giroscópio, para que os alunos identificassem a precessão e uma bobina, um ímã e um multímetro, para que fosse repetida a experiência de Faraday sobre indução eletromagnética. Em seguida, foi feito um apanhado dos resultados dos grupos, sistematizando-os para a turma. Este momento pedagógico durou, aproximadamente, 60 minutos.

3.7.2.2 Organização do conhecimento

Em seguida, iniciaram os trabalhos para a Organização do Conhecimento. Para esse momento pedagógico, foram utilizadas três aulas de sessenta minutos, divididas em dois encontros de noventa minutos cada.

Na primeira aula, discutiu-se conceitos de Física, como: Onda Eletromagnética, Espectro Eletromagnético, Movimento de precessão, Indução Eletromagnética, Fótons, Spin, Paramagnetismo, emissão e absorção de energia e o fenômeno da Ressonância.

No segundo dia, trabalhou-se o fenômeno da Ressonância Magnética. Foi quando os alunos perceberam que todos os conceitos vistos no primeiro dia estavam relacionados com a RMN. Neste momento pedagógico, trabalhamos com pequenos vídeos, animações e consultas à apostila, já descritos anteriormente.

No início da organização do conhecimento, discutiu-se sobre Onda Eletromagnética e Espectro Eletromagnético para que os alunos tivessem noção da localização das radiações ionizantes em termos da sua frequência ou comprimento de onda, e saberem, por exemplo, que, quanto maior a frequência, mais ionizante é a radiação. Com isso, eles puderam perceber que a radiofrequência que é utilizada na RMN não é ionizante. Em seguida, foram apresentadas, mais profundamente, as características das radiações ionizantes, para que ficasse clara a vantagem da RMN em relação a outros exames, principalmente com o tipo de radiação utilizada.

Dando sequência à oficina, discutiu-se sobre a hipótese da quantização da energia, estendendo-a para a dualidade onda-partícula, para que os alunos ficassem a par do conceito de fóton, além de entenderem que, quanto maior a frequência, mais energético é o fóton e, portanto, mais ionizante a radiação.

Dialogamos sobre o processo de absorção e emissão de energia por um elétron, fenômeno explicado por Bohr. Nessa discussão, ficou claro que, para que haja transição eletrônica, é necessário que a energia do fóton absorvido seja igual à diferença das energias do estado de alta para o de baixa energia.

Explanou-se, ainda, sobre torque, o significado do produto vetorial, explicação necessária para que os alunos entendessem o movimento de precessão do pião, sua direção e sentido, por exemplo.

Discorreu-se, também, sobre spin, em que se utiliza um modelo híbrido clássico/moderno, ou seja, considerando-se que o elétron/próton gira em torno de seu eixo e toda carga em movimento gera um campo magnético, entende-se que um elétron ou um próton se comporta como pequenos ímãs, gerando um momento de dipolo magnético intrínseco.

Comentou-se sobre paramagnetismo, ou seja, uma substância é paramagnética quando possui elétrons desemparelhados, e foi feita a distribuição eletrônica do sódio, como exemplo, mostrando que ele é paramagnético porque possui um elétron desemparelhado.

Concomitantemente, foram exibidos dois trechos da série “DR. HOUSE” na qual um paciente com tatuagem, cuja tinta contém metal, e uma paciente contendo

uma prótese metálica dentro do corpo encontram-se no interior de um aparelho de Ressonância Magnética. Nestas cenas fica claro o perigo de colocar materiais metálicos dentro de um campo magnético, pois a presença de implantes metálicos representa a possibilidade de lesões mais graves, provocadas por torque e aquecimento (WESTBROOK; ROTH; TALBOT, 2013).

Discutiu-se, ainda, porque ao afastar ou aproximar um ímã de uma espira, surge nela uma corrente elétrica, como foi demonstrado no experimento sobre a indução eletromagnética de Faraday, no primeiro momento.

O “passeio” sobre os pré-requisitos de Física necessários ao entendimento do fenômeno da Ressonância Magnética se encerrou com uma conversa com a turma sobre o que significa ressonância. Concluiu-se este primeiro módulo exibindo um vídeo sobre a ponte de Tacoma (EUA)³, com o objetivo de mostrar que a máxima transferência de energia entre sistemas ocorre na ressonância.

O segundo dia foi iniciado com uma discussão sobre o fenômeno da ressonância magnética, fazendo uma conexão entre o que foi estudado no dia anterior e os “novos” conceitos introduzidos. Dessa maneira, puderam perceber que os “novos” conceitos já lhes eram familiares, uma vez que essa é a função do segundo momento pedagógico: organizar o conhecimento científico necessário para a melhor compreensão do tema e das situações significativas.

3.7.2.3 Aplicação do conhecimento

Nos 60 minutos finais do segundo dia de aula, iniciou-se o momento da aplicação do conhecimento. Para tanto, a turma foi dividida em seis grupos, os mesmos alunos do primeiro momento pedagógico, e distribuída uma cruzadinha (APÊNDICE B) envolvendo questões abordadas na problematização inicial e outras questões envolvendo o fenômeno da RMN, que poderiam ser respondidas pelo mesmo corpo de conhecimento que foi discutido ao longo da oficina.

Vale ressaltar sobre o cuidado de elaborar uma cruzadinha com o máximo possível de questões acerca da RMN, de tal modo a abranger todo o assunto abordado, e que, ao mesmo tempo, não fosse muito longa, para que pudesse se enquadrar dentro do horário previsto. As questões da cruzadinha foram elaboradas,

³ Disponível em: <https://youtu.be/OpV-ue8sFjk>. Acesso em: 30 out. 2015.

ainda, de maneira que permitissem que o aluno visualizasse a integração entre as questões discutidas no primeiro e no segundo momentos pedagógicos.

Por exemplo: em uma das questões da problematização inicial, foi demonstrada a indução eletromagnética em uma espira ligada a um amperímetro. Na organização do conhecimento, foi discutido que o cerne da RMN é deslocar o vetor magnetização para um plano onde existe uma espira perpendicular a ele, ligada a um amperímetro que vai acusar uma corrente elétrica. O objetivo foi, então, mostrar o mesmo fenômeno aplicado em situações diferentes.

A partir disso, propõem-se, agora, a descrição dos resultados encontrados a partir do desenvolvimento dos três momentos pedagógicos já explicitados neste capítulo metodológico.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

São apresentadas, neste capítulo, as respostas referentes às questões que constituem o questionário da problematização inicial e a cruzadinha pós-aula, aplicados aos alunos de biomedicina. Após a análise, é feita uma comparação dos resultados obtidos.

4.1 Problematização inicial

A problematização inicial, constituída de sete questões, foi aplicada antes das discussões a respeito do tema. Neste momento, foi possível identificar os conhecimentos prévios dos alunos sobre os princípios físicos relacionados à Ressonância Magnética. A turma continha, inicialmente, 30 alunos do curso de Biomedicina divididos em seis grupos, os quais foram denominados G1, G2..., G6.

Na primeira questão, sobre o movimento de um giroscópio, foi solicitado que o aluno identificasse o movimento de precessão de um pião e desse exemplos de onde este fenômeno poderia ocorrer. No quadro 5, estão as respostas dos grupos.

Esperava-se que os alunos respondessem que a precessão ocorre porque o torque provocado pela força gravitacional, neste caso, muda a direção do momento angular.

Quadro 5 - Respostas dos alunos à primeira questão da problematização inicial

Grupos	Respostas
G1	Em branco
G2	"Movimento circular gravitacional, isso ocorre devido ao movimento do pião em torno do próprio eixo, e que a gravidade influencia o equilíbrio"
G3	"Através do movimento de precessão"
G4	Em branco
G5	Em branco
G6	"É um movimento vagaroso onde ocorre a mudança do eixo do objeto"

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre as respostas analisadas, percebe-se que os grupos G2 e G6 aparentam ter conhecimento do movimento de precessão. O grupo G6 respondeu

que: “É um movimento vagaroso onde ocorre a mudança do eixo do objeto”. Essa é uma resposta que descreve corretamente, por exemplo, a precessão da Terra, que dura, aproximadamente, 26.000 anos. Entretanto, não explica a origem do movimento. O grupo G3 respondeu à pergunta repetindo seu enunciado, e três grupos não responderam. Nenhum grupo deu exemplo de outras situações em que a precessão ocorre. Assim, percebe-se que apenas uma pequena parcela dos alunos apresentou conceitos relacionados ao movimento de precessão, mas insuficientes para explicá-lo.

A segunda questão refere-se ao fenômeno da indução eletromagnética. Por meio de um experimento simples representando o fenômeno, foi solicitado aos alunos a sua explicação e exemplos de situações em que tal fenômeno ocorre. O quadro 6 mostra as respostas dos grupos, sendo que nenhum deles citou exemplos.

Quadro 6 - Respostas dos alunos à segunda questão da problematização inicial

Grupos	Respostas
G1	Em branco
G2	“Em decorrência do campo magnético?”
G3	“Porque a atração gera corrente elétrica do campo elétrico”.
G4	Em branco
G5	Em branco.
G6	“Ocorre indução de corrente elétrica devido à presença do ímã”

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sabe-se que a variação de um fluxo magnético nas proximidades de uma espira fechada provoca, na mesma, uma força eletromotriz induzida, que gera uma corrente elétrica induzida. Este tópico é bastante explorado no Ensino Médio, uma vez que esse é o modo como ocorre a geração de energia elétrica nas hidrelétricas, por exemplo. Entretanto, apenas o grupo G6 percebeu que o aparecimento de corrente elétrica ocorre devido à presença do ímã, sem maiores detalhes. O grupo G2 dá praticamente a mesma resposta do grupo G6, apenas trocando a palavra ímã por campo magnético; mas também não mostra maiores detalhes. A resposta do grupo G3 está incorreta, uma vez que o aparecimento da corrente elétrica na espira

é consequência da variação do fluxo magnético. De um modo geral, os alunos entendem que aparece uma corrente, embora não saibam explicar o porquê.

A terceira questão possui duas perguntas. Com relação à primeira, todos os alunos afirmaram que já fizeram exames de raio X. No quadro 7, mostra-se as respostas dos grupos sobre a nocividade à saúde deste exame.

Quadro 7 - Respostas dos alunos à terceira questão da problematização inicial

Grupos	Respostas
G1	“Devido aos raios gamas”
G2	“Depende da quantidade de dose e exposição que a pessoa foi submetida”
G3	“É nocivo a saúde apenas se a pessoa ficar exposta a muito tempo”
G4	“Causa desnaturação no DNA das células se houver exposição em concentração elevada e em períodos prolongados”
G5	“Por causa da radiação ionizante, podendo alterar o DNA da célula”
G6	“A radiação utilizada para o exame é a ionizante que causa danos aos celulares ao DNA, entre outros.”

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as respostas acima citam fatos corretos com relação à exposição aos raios X, pois trata-se de uma radiação ionizante, e o grau de ionização depende da dose e do tempo de exposição à radiação. Inclusive, este é um assunto discutido no Ensino Médio, quando se fala sobre o espectro eletromagnético. A única resposta incorreta é aquela que faz referência aos raios gamas, mostrando a confusão do grupo em relação ao tipo de radiação discutida na questão (GRUPO G1).

A quarta questão possuía quatro perguntas: se o aluno já havia feito o exame de Ressonância Magnética Nuclear, se já tinha ouvido falar, se ele poderia explicar o princípio do exame e se havia radiação envolvida. O quadro 8 mostra as respostas dos grupos.

Quadro 8 - Respostas dos alunos à quarta questão da problematização inicial

Grupos	Já fez?	Já ouviram falar?	Princípio do funcionamento	Envolve radiação?
G1	"Não"	"Sim, já ouvimos falar"	Em branco	"Sim, há radiação envolvida"
G2	Em branco	"Sim"	"É um exame que não possui radiação ionizante"	"Não"
G3	"Não"	"Nunca fiz"	Em branco	"Também nunca ouvi falar"
G4	Em branco	Em branco	Em branco	Em branco
G5	"Não"	"Sim"	"Seu princípio é o uso de energia eletromagnética"	Em branco
G6	"Não"	"Sim"	Em branco	"É baseado em campo magnético (ímã)"

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como a RMN não é abordada no Ensino Médio, a resposta correta com relação ao princípio de funcionamento iria depender se o aluno já tivesse ou não feito na faculdade a disciplina que apresentasse o referido tópico. Apenas dois grupos responderam essa parte da questão, mas de forma bastante vaga e imprecisa, embora suas respostas apresentassem elementos que estão presentes no fenômeno da Ressonância Magnética, como, por exemplo, citando a presença de radiação não ionizante (G2) e a utilização de ondas eletromagnéticas (G5), embora nenhum grupo tenha citado que a onda eletromagnética em questão seja onda de rádio.

A RMN consiste em colocar um paciente dentro de um campo magnético para que os spins dos núcleos de hidrogênio se alinhem no sentido paralelo (baixa energia) e antiparalelo (alta energia) a esse campo, produzindo um vetor magnetização na direção do estado de menor energia que será deslocado para um plano transversal por ação de fótons de radiofrequência. Portanto, estar-se-ia satisfeito se o aluno respondesse apenas que o princípio de funcionamento da RMN é baseado nos spins dos núcleos de hidrogênio.

A quinta questão, por sua vez, abordava em que situação o aluno estaria sujeito à radiação mais perigosa: se em um exame de Ressonância Magnética Nuclear ou em um exame de raio X. Cinco grupos responderam corretamente, que o raio X é mais nocivo que a RMN. Um grupo não respondeu. No quadro 9 são apontadas as justificativas dadas pelos grupos.

Quadro 9 - Respostas dos alunos à quinta questão da problematização inicial

Grupos	Respostas
G1	“Raio X, pois a radiação se espalha”
G2	“Raio X é pior devido a ionização”
G3	“Em um exame de raio X, porque a quantidade de radiação é maior”
G4	“No exame de raio X”
G5	Em branco
G6	“Raio X. Porque a radiação ionizante é mais perigosa que a Ressonância Magnética”

Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora cinco grupos mostrassem ter noção de que o raio X é mais nocivo à saúde, a resposta do grupo G2 é aquela que mais se aproxima da resposta esperada. O grupo G6 parece acreditar que a Ressonância Magnética é alguma forma de radiação eletromagnética e o grupo G3 associa a nocividade à quantidade de radiação, o que não explica a diferença, neste caso.

A sexta questão fazia referência à noção do aluno sobre o conceito de spin. O quadro 10 mostra as respostas dos grupos:

Quadro 10 - Respostas dos alunos à sexta questão da problematização inicial

Grupos	Respostas
G1	“Tem a ver com a estabilidade dos átomos”
G2	“É utilizada na terminação iônica para quantificar a camada de valência”
G3	Em branco
G4	Em branco
G5	Em branco
G6	“O spin se define por ser o movimento dos elétrons”

Fonte: Elaborado pelo autor.

O conceito de spin é estudado em Química, no Ensino Médio, como uma propriedade relacionada à rotação do elétron (conceito clássico) e, portanto, o mesmo possui propriedades magnéticas, já que carga em movimento gera um campo magnético. Apenas o grupo G6 acreditava que o spin é uma propriedade que estaria relacionada a alguma forma de movimento do elétron. As outras respostas relacionam a palavra “spin” com a estabilidade dos átomos (GRUPO G1) e o grupo

G2 achava que ela “é utilizada na terminação iônica para quantificar a camada de valência.”

A sétima questão procurava identificar se os alunos já ouviram falar ou saberiam explicar algo sobre o fenômeno de ressonância. Para isso, foi pedido que eles explicassem o que ocorre quando uma taça de cristal é quebrada com o som de uma nota musical. O quadro 11 mostra as respostas dadas à questão.

Quadro 11 - Respostas dos alunos à sétima questão da problematização inicial

Grupos	Fenômeno	Justificativa
G1	Não respondeu	“Comprimento de onda”
G2	Ressonância	“Ocorre quando o comprimento de onda da voz da cantora atinge o mesmo comprimento de onda da taça de cristal igualando a frequência.”
G3	Em branco	Em branco
G4	Em branco	Em branco
G5	Em branco	Em branco
G6	Ressonância	“Ocorre um movimento de onda constante”

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dois grupos responderam corretamente que o fenômeno em questão seria a ressonância. Três grupos justificaram o fenômeno, sendo que apenas o G2 foi o que mais se aproximou da resposta esperada. Sabe-se que a ressonância ocorre quando o fornecimento de energia do agente externo a um sistema ocorre em uma frequência igual à frequência natural de vibração desse sistema. As outras respostas estão bastante incompletas (G1) ou não fazem sentido (G6).

De um modo geral, percebe-se que os grupos G4 e G5 deixaram em branco cinco das sete questões; os grupos G1 e G3 deixaram apenas duas questões em branco, e os grupos G2 e G6 responderam às sete questões. Nenhum grupo acertou todas as questões respondidas.

Na maioria dos casos, as respostas apresentavam fragmentos corretos, mostrando que os alunos já tiveram contato, alguma vez, com as grandezas em questão, embora não tivessem respondido de forma correta, talvez pela dificuldade que a maioria dos alunos teriam em colocar no papel suas ideias ou pela falta de linguagem científica que a maioria não dominaria.

A função desse primeiro momento pedagógico era identificar o que os alunos efetivamente conheciam sobre o assunto abordado. Assim, percebe-se que dois

grupos (G2 e G6) tinham noção de precessão. Esses grupos indicaram entender que, na indução, aparece uma corrente elétrica, embora não soubessem o porquê de o raio X ser nocivo à saúde e que envolvia radiação ionizante e a RMN não. Nenhum grupo explicou o princípio do funcionamento da RMN. Apenas um grupo afirmou que o spin estaria associado a algum tipo de movimento que o elétron possui (G6) e dois grupos (G2 e G6) tinham noção de ressonância. Desse modo, esse resultado reforça a necessidade de se discutir estes conceitos, quer sejam, spin, indução, ressonância, entre outros, mais detalhadamente no segundo momento pedagógico.

4.2 Aplicação do conhecimento: pós-teste – cruzadinha

A turma, que, nesse momento, após os debates conceituais possibilitados pela aplicação da apostila, apresentava vinte e sete (27) alunos, foi dividida também em seis grupos, para que realizassem a cruzadinha da Ressonância Magnética, que abordava questões da problematização inicial e trouxe novas questões referentes ao tema. Nem todos os grupos concluíram a cruzadinha, pois, como era uma semana acadêmica, os alunos tiveram uma palestra antes da oficina, o que acabou reduzindo o tempo estimado para a atividade.

Este fato pode ser comprovado na tabela 1, que mostra o número de questões que foram respondidas por cada grupo. Apenas os grupos G2 e G3 responderam às 19 questões da cruzadinha. Os grupos G1, G4, G5 e G6 reclamaram do curto tempo para resolvê-la e, por esse motivo, não completaram a tarefa.

Tabela 1 - Síntese da análise das respostas da cruzadinha

Grupo	Questões respondidas	Questões corretas	Porcentagem de acertos
G1	11	10	53%
G2	19	19	100%
G3	19	18	95%
G4	16	16	84%
G5	14	11	58%
G6	10	07	37%

Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise das respostas mostra que:

- Na questão 5 - Alguns alunos trocaram a palavra “precessão” por “presseção”, mas, nesse caso, foi apenas um erro gramatical, não conceitual, que não afetou a cruzadinha.

- Na questão 9 - Alguns alunos preferiram escrever a palavra “brilhante” à palavra “hipersinal”. Embora em Ressonância Magnética esses conceitos sejam sinônimos e, por coincidência, possuem o mesmo número de letras, optava-se pela utilização da palavra hipersinal. O aluno apenas iria perceber a diferença se tivesse preenchido uma boa parte da cruzadinha. É óbvio que embora as duas palavras tenham o mesmo significado, a cruzadinha foi uma avaliação que tinha um caráter de jogo e, portanto, possuía regras, pois exigia uma forma de preenchimento para que fosse resolvida corretamente. De qualquer maneira, uma avaliação deste conceito mostra que houve uma compreensão dos alunos, independentemente da palavra usada.

- Já na questão 19 - Alguns alunos trocaram as palavras “onda eletromagnética” por “razão magnética”. O termo razão magnética não existe, sendo, o correto, razão giromagnética, que aparece na cruzadinha em outro momento.

Ao analisar as respostas dos alunos à cruzadinha, percebe-se que houve assimilação do conteúdo estudado, uma vez que apenas o grupo G6 acertou menos que a metade das perguntas feitas na cruzadinha, e dois grupos praticamente acertaram todas as questões, como visto na tabela 1. Se considerar que a falta de tempo foi realmente uma dificuldade, entende-se que a proporção de acertos em relação às questões respondidas é bem significativa (acima de 70%). Assim, entende-se que este resultado indica que as discussões do primeiro e do segundo momentos foram positivas na potencialização do conhecimento.

4.3 Avaliação dos alunos sobre a eficácia da oficina

Entende-se que a avaliação dos alunos em relação à eficácia da oficina é muito importante, pois serve como um “termômetro” para a qualidade educacional do produto em relação ao aprendizado dos alunos.

Dos vinte e sete (27) alunos que compareceram ao segundo dia da oficina, apenas vinte e três (23) participaram da avaliação. Na discussão dos resultados

obtidos, optou-se por utilizar a letra “A” seguida por um número (de 1 a 23) para identificar os alunos, a fim de resguardar a identidade dos sujeitos dessa pesquisa, já que, neste caso, as respostas foram individuais. A coordenadora do curso de biomedicina não informou porque quatro alunos não entregaram a avaliação. O resumo das respostas dos alunos encontra-se no Apêndice A desse trabalho.

Na primeira questão, foi solicitado aos alunos que avaliassem a oficina e o material utilizado pelo professor. As respostas mostraram que a maioria dos alunos gostou bastante da oficina. Dezesete alunos (17) avaliaram a oficina de forma positiva (“excelente”, “muito boa”, “boa”, “esclarecedora”), quatro alunos (4) acharam a utilização do material interessante, um aluno disse que foi “uma das melhores oficinas que já participei” e um aluno criticou a oficina, pois achou que o tempo disponibilizado poderia ser maior e que mais alunos deveriam participar.

Na segunda questão, foi pedido aos alunos que avaliassem a apostila e a sua utilidade para o acompanhamento da oficina. Dezesete alunos (17) disseram que gostaram da apostila (“excelente”, “muito boa”, “boa”, “fácil”, “bem explicativa”), dois (2) alunos acharam que a apostila continha muitas informações e era bem explicativa, embora também criticaram, afirmando que ela possuía muitos termos técnicos, e que a fonte e as figuras estavam pequenas. Um aluno achou-a meio confusa, porém, depois da explicação, afirmou que foi útil para a ampliação dos seus conhecimentos acerca do tema. Um aluno ainda mencionou que a apostila é um resumo da oficina e dois alunos (2) não responderam à questão. Ressalta-se que os problemas apresentados com relação às fontes e figuras foram revistos e solucionados.

A terceira questão versava sobre a avaliação dos vídeos e animações utilizados na oficina. Catorze (14) alunos apenas mencionaram que os vídeos e animações foram “excelentes”, “muito bons” ou “bons”. Sete (7) alunos classificaram os vídeos como “esclarecedores”, “bem didáticos”, “de boa qualidade” ou “autoexplicativos”. Um aluno achou que: “os recursos audiovisuais foram a melhor parte do curso, pois facilitavam a explicação” e um aluno não respondeu. Pela análise dos dados, percebe-se que a utilização de vídeos e animações representou uma parte importante da oficina para a construção do conhecimento do aluno, como pode-se perceber nas seguintes respostas de dois discentes: “Os vídeos e animações estavam ótimos e muito contribuíram para a explicação” (A21); “Excelentes, criativos e bem didáticos (A12).

Já na quarta questão, foi perguntado aos alunos se na discussão dos conceitos eles sentiram que seus conhecimentos prévios foram levados em consideração, e que justificassem com exemplos. Um aluno não respondeu à questão. Vinte e dois alunos responderam que sim, que seus conhecimentos prévios foram levados em consideração, mas não justificaram com exemplos, como pode ser observado nas respostas abaixo:

“Sim, pois, os conhecimentos prévios foram de extrema importância para compreender o objetivo final da oficina”. (A1)

“[...] com certeza os conhecimentos prévios foram levados em consideração, visto que sem esse conhecimento seria um pouco mais trabalhoso entender o assunto”. (A4)

“Sim, meus conhecimentos foram levados em consideração, como, por exemplo, na compreensão spin”. (A8)

“[...] com relação aos conceitos abordados meus conhecimentos prévios a respeito de física foram importantes”. (A21)

Na quinta questão, por sua vez, foi pedido aos alunos que comentassem sobre se o “passeio” feito antes pelas teorias físicas contribuiu para uma melhor compreensão do fenômeno da Ressonância Magnética. Vinte e dois alunos responderam que sim, afirmando que a discussão inicial sobre os conteúdos básicos de Física os ajudaram a entender melhor o fenômeno da RMN. Um aluno não respondeu à questão. Abaixo, algumas respostas dos alunos:

“A breve revisão feita pelo professor ajudou bastante a relembrar, bem como compreender o fenômeno da Ressonância Magnética”. (A4)

“Sim, ajudou bastante, esclareceu muitas dúvidas”. (A15)

“Sim, o curso (de biomedicina) não aprofunda muito nesses conhecimentos e a oficina ajudou a entender alguns termos”. (A16)

“Sim, pois as teorias físicas são a base para o melhor entendimento sobre a Ressonância Magnética”. (A21)

Em relação à aplicação da cruzadinha (sexta questão), percebe-se que as respostas ficaram distribuídas da seguinte maneira: onze (11) alunos acharam-na “excelente”, “ótima” ou “boa”; cinco (5) alunos acharam-na interessante e/ou importante; dois (2) alunos relataram-na como “difícil” e/ou “complexa”; quatro (4)

alunos afirmaram que a cruzadinha estimulou o raciocínio ou foi “muito legal”. Um aluno não respondeu a esta questão.

No que diz respeito aos comentários sobre a cruzadinha, pode-se categorizar as respostas da seguinte forma: **Estímulo/desafio**, com quatro (4) alunos, como na resposta de A2, “A prática estimulou o raciocínio dos alunos, desafiando-os a completar a tarefa”; **Complemento/fixação**, com nove (9) alunos, exemplificado nas palavras de A4: “[...] a cruzadinha, ao final da oficina, serve para complementar o resultado”, e ainda: “[...] abordou o conteúdo completo da oficina” (A18); **Aplicação/teste dos conhecimentos** foi apontado por quatro (4) alunos, como afirmou A6, dizendo que: “A prática pedagógica serviu para aplicar os conhecimentos obtidos com a oficina de Ressonância Magnética”.

Houve também cinco (5) alunos que fizeram críticas à cruzadinha: “Este método pedagógico [...] deveria estar mais bem organizado (estruturado)” (A8); “[...] muito extenso” (A17). Um aluno não respondeu à questão.

Na última questão do questionário de avaliação, foi pedido para que os alunos atribuíssem uma nota de 0 (ruim) a 10 (excelente) para a oficina e o porquê da mesma. A tabela 2 mostra a nota atribuída pelos alunos à oficina. Observa-se que ela foi bem avaliada, com nota mínima igual a oito, sendo que 12 alunos atribuíram nota máxima a ela.

Tabela 2 - Notas dos alunos para a oficina

Número de alunos	Nota
12	10,0
1	9,5
7	9,0
1	8,5
1	8,0
1	Sem nota

Fonte: Elaborada pelo autor.

Já com relação à justificativa da nota atribuída à oficina, cinco (5) alunos acharam que ela deveria ser dada em mais tempo, onze (11) alunos atribuíram suas

notas em decorrência da dinâmica do professor, tais como: interação com a turma, utilização de vídeos, animações, apostila e experimento. A nota atribuída por quatro (4) alunos foi dada em virtude do conteúdo: um aluno disse que assimilou bem; um aluno entendeu que houve interferência do professor na resposta; um aluno afirmou que daria uma nota maior, se tivesse entendido melhor o assunto; e um aluno achou que “[...] era necessário ter criado dinâmicas ao final de cada evento, ou seja, no primeiro e no segundo dias, para verificar o aprendizado adquirido no dia”.

Baseado nesses dados, pode-se agrupar, então, as justificativas em três categorias relacionadas ao mesmo tipo de resposta, sendo estas: **conteúdo, dinâmica do professor e tempo curto**.

4.4. Discussão dos Resultados

De um modo geral, a análise dos dados indica um resultado satisfatório em relação à aplicação do produto, embora o tempo para isso tenha sido curto, em virtude dos atrasos, consequência das atividades da semana acadêmica, como fora anteriormente comentado.

Analizando as respostas do questionário utilizado na problematização inicial, pode-se perceber que alguns alunos já tiveram contato, em algum momento, com conceitos, tais como: precessão, indução magnética, spin, ressonância e raio X. Porém, embora já possuísse esses conceitos em sua bagagem cultural, a maioria não consegue transpor esses conceitos nas respostas às perguntas feitas no questionário. Ressalta-se, entretanto, que a intenção do primeiro momento pedagógico é exatamente esta: partir de um conhecimento mais simples para construir um conceito mais elaborado (DELIZOICOV; ANGOTI; PERNAMBUCO, 2011).

No segundo momento pedagógico, esse conhecimento prévio constituía-se como uma ponte para a construção de um novo conhecimento, neste caso, a Ressonância Magnética. Percebe-se que a estratégia pedagógica, conhecida como os três momentos pedagógicos, é eficaz, pois, na organização do conhecimento, os conceitos prévios são solidificados.

Nesse trabalho, portanto, a organização do conhecimento foi dividida em duas partes: primeiramente, um “passeio” pela Física para sedimentar os conceitos

prévios, e, depois, pela Física da Ressonância Magnética. Para tanto, acredita-se que os três momentos pedagógicos são importantes, pois descentralizam o professor de seu posto de detentor do conhecimento e coloca o aluno como ator principal da construção de seu conhecimento, sendo esse o principal diferencial desse trabalho.

Após analisar os comentários sobre a cruzadinha, na qual foram abordadas questões relativas aos conhecimentos prévios e ao novo conhecimento construído, verificou-se que a maioria dos grupos foi capaz de resolvê-la. Esse dado indica um resultado positivo em relação à aplicação do produto.

Pode-se entender, ainda, pelos resultados obtidos, que, no decorrer da oficina, o aluno percebeu que os conceitos usados para explicar a Ressonância Magnética tratavam-se de aplicações dos conceitos prévios e esse ponto foi essencial para o sucesso da oficina. Isso ficou evidenciado pelas notas atribuídas pelos alunos à oficina e já explicitadas.

Em uma conversa informal do pesquisador com a coordenadora do curso de Biomedicina da instituição, no dia seguinte à aplicação da segunda parte da oficina, foi relatado por ela que os alunos gostaram da metodologia, caracterizando-a como “dinâmica”, “não cansativa” e “visual”, devido às animações, simulações, vídeos e experimentos realizados em sala de aula.

Assim, entende-se que a oficina foi um primeiro passo na direção da compreensão e da assimilação da Física da Ressonância Magnética, uma vez que a assimilação é o processo cognitivo pelo qual uma pessoa integra novos conceitos às estruturas cognitivas prévias. Ou seja, quando o aluno tem novas experiências, ele tende a adaptar esses novos estímulos às estruturas cognitivas que já possui. Por esse motivo, concorda-se com Gaspar (2014, p.191), quando afirma que:

É como se, ao assimilar a resolução do problema (ao “entender”), a mente do aluno iniciasse a instalação de um “programa de resolução” deste tipo de problema. Se o professor aguardar algum tempo durante o qual o aluno possa estudar, refazer esse problema e resolver outros semelhantes, sozinho ou com seus colegas, é bem provável que essa “instalação” se complete com sucesso, e que ele – ou melhor, sua mente – se torne efetivamente capaz de resolver problemas desse tipo.

É importante, portanto, oferecer ao aluno uma aula diferenciada, em que a palavra esteja com ele, de maneira que seja o principal responsável pela construção de seu conhecimento. Mas, para isso, é necessário criar condições para que estes

alunos possam resgatar seus conhecimentos prévios, por meio de discussões, experimentos, vídeos, animações e textos, uma vez que, de acordo com os PCN (BRASIL, 1998, p.72):

Por mais que o professor, os companheiros de classe e os materiais didáticos possam e devam contribuir para que a aprendizagem se realize, nada pode substituir a atuação do próprio aluno na tarefa de construir significados sobre os conteúdos da aprendizagem. É ele quem vai modificar, enriquecer e, portanto, construir novos e mais potentes instrumentos de ação e interpretação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi elaborada uma oficina para discutir os princípios básicos da física da RMN para alunos de Biomedicina. Uma revisão da literatura e conversas informais com alunos da área revelaram a carência desse tópico nos livros de Biofísica. Neste contexto, o objetivo desta proposta concentrou-se na tentativa de tornar o ensino da RMN mais atraente e diferenciado. Para isso, foi elaborado um material didático com uma metodologia capaz de explicar a RMN, de forma que os alunos compreendessem a origem das equações e conceitos físicos por detrás do fenômeno, podendo, também, ser utilizada por professores no planejamento de suas aulas sobre o assunto.

O referencial teórico que orientou a elaboração desse produto educacional apoiou-se na proposta pedagógica de transpor o pensamento de Freire para a sala de aula, por meio dos três momentos pedagógicos de Delizoicov (1991), a saber: a problematização inicial, a organização do conhecimento e a aplicação do conhecimento.

O produto educacional é acompanhado, ainda, por uma apostila, direcionada a professores e alunos de biofísica e imaginologia dos cursos de Biomedicina, que tem por finalidade ajudar o professor na articulação dos conhecimentos envolvidos, possibilitando aulas mais dinâmicas nas quais o aluno também faça parte da construção de seu conhecimento.

A oficina foi aplicada a alunos de Biomedicina de uma faculdade paraense. Desta maneira, no primeiro momento, os alunos foram questionados sobre a física básica relacionada à RMN, depois discutiram-se os princípios e leis da física e sua relação com o funcionamento da RMN, para, finalmente, reaplicá-los. O retorno obtido na aplicação do produto indica que os alunos gostaram de uma aula dinâmica e participativa em que eles sejam críticos, como é o caso da escola construtivista.

De um modo geral, a oficina foi bem aceita pelos alunos, uma vez que a maioria das notas atribuídas pelos mesmos foi acima de oito (em um total de dez) e, pela análise das justificativas, percebeu-se que as animações, os vídeos, a apostila e a metodologia utilizada foram um diferencial da oficina. É claro que houve críticas por parte dos alunos, principalmente em relação ao tempo de realização da oficina,

que alguns acharam curto, em virtude da cruzadinha aplicada no segundo dia ser relativamente extensa.

Também se entendeu, a partir dos dados obtidos, que o questionário aplicado na problematização inicial foi extenso, pois algumas questões possuíam mais de uma pergunta juntamente com a justificativa e o aluno não ficou atento para responder a todas essas solicitações, criando respostas incompletas, o que, no nosso ponto de vista do pesquisador, de alguma forma prejudicou a análise rigorosa.

Conclui-se, porém, que o produto educacional elaborado é uma possibilidade para transformar o ensino tradicional em um ensino inovador, mais centrado no aluno, uma vez que se partiu do pressuposto de que só é possível entender um fenômeno a partir do momento em que este seja significativo e, para isso, o aluno deve fazer parte dessa construção, na qual a curiosidade deve ser sempre despertada nos estudantes.

REFERÊNCIAS

ANGOTTI, J. A. **Solução alternativa para a formação de professores de ciências**: um projeto educacional desenvolvido na Guiné-Bissau. 1982. Dissertação (Mestrado). São Paulo - Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo (FEUSP), São Paulo, 1982.

BENEDETTI FILHO, Edemar; FIORUCCI, Antônio Rogério; BENEDETTI, Luzia Pires dos Santos; CRAVEIRO, Jéssica Alves. Palavras Cruzadas como recurso didático no ensino de teoria atômica. **Química nova na escola**, v. 31, n.2, maio, 2009.

BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. **PCN+ Ensino Médio. Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais**. Brasília: MEC-SEMTEC, 2002.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Fundamental. **Parâmetros Curriculares Nacionais**: terceiro e quarto ciclos do ensino fundamental. Brasília: MEC: SEF, 1998.

BRETONES, P. S. (Org.). **Jogos para o Ensino de Astronomia**. 2.ed. Campinas: Átomo, 2014.

CAMPOS, Nilton. **Ressonância magnética**. 2011. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/workcientifica/ressonancia-magnetica>. Acesso em: 2 jul. de 2015.

CARVALHO. Anna Maria Pessoa de; Gonçalves. Maria Elisa Resende. Formação continuada de professores: o vídeo como tecnologia facilitadora da reflexão. **Cad. Pesquisa**, n.111, São Paulo, Dez., 2000.

CHRYSIKOPOULOS, Haris S. **Clinical MR imaging and physics**. London: Ed. Springer, 2009.

COLORADO. **Faradays laws**. 2014. Disponível: http://phet.colorado.edu/sims/faradays-law/faradays-law_en.html. Acesso em: julho de 2015.

CORSO, Gilberto. Os conteúdos das disciplinas de biofísica e física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol.31, n.2, p.1-4, 2009.

COSTA. I. **Novas Tecnologias e aprendizagem**. 2 ed. Rio de Janeiro: Wak Editora, 2014

COVOLAN, J. *et al.* Ressonância Magnética funcional: as funções do cérebro reveladas por spins nucleares. **Cienc. Cult.** v.56, n.1. São Paulo Jan./Mar, 2004.

DELIZOICOV, D. **Conhecimento, tensões e transições**. 1991. 214 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

DELIZOICOV, D. **Problemas e problematizações**. In: PIETROCOLA, M. (Org.). Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2001. p. 125-150.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M. M. **Ensino de ciências: fundamentos e métodos**. São Paulo: Cortez, 2002.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M. M.. **Ensino de ciências: fundamentos e métodos**. 3.ed. São Paulo: Cortez, 2011.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J.A. **Metodologia do ensino de ciências**. São Paulo: Cortez, 1994.

DELIZOICOV, Demétrio; ANGOTTI, José André. **Metodologia do ensino de ciências**. São Paulo: Cortez, 2000 (Coleção Magistério – 2º grau – Série Formação do Professor).

DURÁN, José Enrique Rodas. **Biofísica: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

FAUSTAD, Paul. **Circuit**. s.d. Disponível em: <http://www.falstad.com/circuit/e-cap.html>. Acesso em: 3 mai. 2015.

FERNANDES, Simone Aparecida, FILGUEIRA, Valmária Gomes. Porque ensinar e por que Estudar Física? O que Pensam os Futuros Professores e os Estudantes do Ensino Médio? 3, Simpósio Nacional de Ensino de Física. **Anais...** São Paulo, SP, 2009.

FERRARI, P. C. **Temas contemporâneos na formação docente à distância: Uma introdução a teoria do caos**. Tese de doutorado em Educação Científica e Tecnológica, UFSC- Florianópolis, 2008.

FREIRE, P. **Pedagogia da Autonomia: saberes necessários à prática educativa**. São Paulo: Paz e Terra, 2001.

FREIRE, Paulo. **Ação cultural para a liberdade e outros escritos**. 14 ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2011.

FREIRE, Paulo. **Educação como prática da liberdade**. 30. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2007.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia do oprimido**. 42 ed. São Paulo: Paz e Terra, 2005.

GARCIA, Eduardo Alfonso Cadavid. **Biofísica**. São Paulo, SP: Sarvier, 1998. 387 p.

GASPAR, Alberto. **Atividades Experimentais no ensino de física: uma nova visão baseada na teoria de Vigotski**. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2014.

GOMES, Gerson G.; PIETROCOLA, Maurício. O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, 2004.

HAGE, Maria Cristina Ferrarini Nunes Soares; IWASAKI, Masao. Imagem por ressonância magnética: princípios básicos. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.39, n.4, p.1287-1295, jul, 2009.

HALLIDAY, David; RESNICK, F.; WALKER, J. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Editora: LTC, 2009a.

HALLIDAY, David; RESNICK, F.; WALKER, J. **Óptica e Física Moderna**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009b.

HARRISON, David M. **Precession of a spinning top**. 2005. Disponível em: <http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/Flash/ClassMechanics/Precession/Precession.html>. Acesso em: 5 abr. 2015.

HECKLER, V.; SARAIVA, M. F. O.; OLIVEIRA FILHO, K. S. Uso de simuladores, imagens e animações como ferramentas auxiliares no ensino/aprendizagem de óptica. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, São Paulo, v. 29, n. 2, 2007.

HENEINE, I. F. **Biofísica básica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 1996.

HEWITT, Paul G. *et al.* **Conceptual Integrated Science**. London: Ed. Pearson, 2014.

HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. Porto Alegre: Editora Bookman, 2011.

HEWITT, S. K.; DONALDSON, I. J.; LOVELL S.C.; DELNERI, D. Sequencing and Characterisation of Rearrangements in Three *S. pastorianus* Strains Reveals the Presence of Chimeric Genes and Gives Evidence of Breakpoint Reuse. **PLoS One**, v. 9, n.3, 2014. Disponível em: <http://www.yeastgenome.org/reference/S000175216/overview>. Acesso em: 13 abr. 2015.

IACI. MRI **Simulator**. s.d. Disponível em: <http://www.iacionline.net/ScannerDemo/MRISimulator.html>. Acesso em: 10 ago. 2015.

LUCENA, Wellington dos Reis. **Ressonância Magnética: Introdução teórica e aplicações**. Universidade Federal do ABC (UFABC), 2011.

LÜDKE, Menga; ANDRÉ, Marli. **Pesquisa em Educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: EPU, 1986.

MACEDO, Josué Antunes de; DICKMAN, Adriana Gomes; ANDRADE, Isabela Silva Faleiro de. Simulações computacionais como ferramentas para o ensino de conceitos básicos de eletricidade+. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 29, n. especial 1: p. 562-613, set. 2012.

MAZZOLA, Alessandro A. Ressonância Magnética: princípios de formação de imagens e aplicações em imagem funcional. **Revista Brasileira de Física Médica**. V. 3, n.1, p.117-129, 2009.

MOURÃO JÚNIOR, Carlos Alberto; ABRAMOV, Dimitri Marques. **Biofísica essencial**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012.

MUNHOZ, Antonio Siemsen. **Objetos de aprendizagem**. Curitiba: InterSaberes, 2013.

OKUNO, Emico; CALDAS, Iberê Luiz; CHOW, Cecil. **Física para ciências biológicas e médicas**. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982.

OLIVEIRA, Genilson A. de; BORDUQUI, Thiago. **Física da Ressonância Magnética**. Universidade Católica de Brasília, 2012.

PARISOTO, Mara Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio; MORO, José Túlio. Subsúncios para a física aplicada à medicina, no contexto do ensino de Física. **Ensino, Saúde e Ambiente**. v.5, n.1, p. 43-62, abr.. 2012.

PAVIANI, Neires Maria Soldatelli; FONTANA, Niura Maria. Oficinas pedagógicas: relato de uma experiência. **Conjectura**, v. 14, n.2, maio/ago, p.77-88, 2009.

REDIT. **Imagem de ressonância magnética com e sem contraste**. Disponível em: <http://3.bp.blogspot.com/-ajh4OqFAGI8/VOJHsuicvII/AAAAAAAAAw0/56UC8OtasU0/s1600/ressonancia.png>. Acesso em: 3 mar. 2015.

ROSA, Daniela Corrêa da; ROSSETTO, Gislaine A. R. da Silva; TERRAZZAN, Eduardo Adolfo, Educação em Ciências na pré-escola: Implicações para a formação de professores. **Revista Educação**, v. 28, n.1, p.85-93, 2003.

SANTOS, G.; ALVES, L.; MORET, M. Modellus: Animações interativas mediando a aprendizagem significativa dos conceitos de Física no Ensino Médio. **Sitientibus**, v. 5, p. 56-67, 2006. (Série Ciências Físicas).

SILVA, André Coelho. **Leitura sobre ressonância magnética nuclear em aulas de física do ensino médio**. Campinas, SP: [s.e], 2013.

SOARES, M. H. F. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. O ludo como um jogo para discutir conceitos em termoquímica. **Química Nova na Escola**, n.23, p.27-31, 2006.

SOARES, Sabrina; DE PAULO, Iramaia Cabral; MOREIRA, Marco Antonio. Física. **Textos de apoio ao professor de Física**. v.19 n.4, 2008.

TECHY, Antonio. A Importância da Fotografia na Medicina. **Revista Brasileira de Reumatologia**, v. 46, n.3, mai/jun, p. 207-209, 2006.

TIPLER, Paul Allan. MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros**. Volume 2: Eletricidade e magnetismo. Trad. Fernando Ribeiro da Silva e Mauro Esperanza Neto. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIVERSITY OF COLORADO. **Lei de Faraday**. 2014. Disponível em: https://phet.colorado.edu/sims/faradays-law/faradays-law_pt_BR.html. Acesso em: 21 abr. 2015.

WEISHAUPT, Dominik , KÖCHLI, Victor D. , MARINCEK, Borut . How **Does MRI Work?** An Introduction to the Physics and Function of Magnetic Resonance Imaging. New York, NY: Springer-Verlag, 2006. Disponível em: <http://pubs.rsna.org/doi/full/10.1148/radiol.2463072568>. Acesso em 15 abr. 2015.

WESTBROOK, Catherine; ROTH, Caroline Kaut; TALBOT, John. **Ressonância Magnética:** aplicações práticas. Trad. Mariângela Vidal Sampaio Fernandes. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2013.

APÊNDICES

Apêndice A - Resumo das respostas dos alunos ao questionário de avaliação

Quadro 1- Respostas dos alunos sobre a oficina. Questão 1

QUANTIDADE DE ALUNOS	RESPOSTAS
11	Excelente/ótima/muito boa
3	Boa
3	Esclarecedora
4	Interessante a utilização dos materiais didáticos
1	Uma das melhores oficinas que já participei
1	Tempo da oficina deveria ser maior e que mais alunos deveriam participar

Fonte: Dados da pesquisa.

Quadro 2 - Respostas dos alunos sobre a apostila. Questão 2

QUANTIDADE DE ALUNOS	RESPOSTAS
9	Excelente/ótima/muito boa
5	Boa
2	Fácil
1	“A apostila continha boa quantidade de informação, entretanto, a fonte e as imagens apresentadas estavam pequenas”
1	“A apostila é bem explicativa. Com várias figuras”
1	“Achei meio confusa, porém depois da explicação foi útil para o conhecimento”
1	“Tinha muitos termos técnicos”
1	“Que a apostila era um resumo da oficina”
2	Em branco

Fonte: Dados da pesquisa.

Quadro 3 - Respostas dos alunos sobre a apostila. Questão 3

ALUNO	RESPOSTA
A1	“os vídeos precisavam ser explicados para que se tornassem mais claros e compreensíveis e compreendiam uma parte importante da oficina pois auxiliaram para a compreensão”
A2	“Pareciam muito específicos inicialmente, mas foram esclarecedores em seguida”.
A3	Em branco
A4	“Os vídeos são bem claros e explicativos, uma ferramenta de suma importância”
A5	“Os vídeos e animações estavam boas, pois não estavam cansativos, estavam ótimos sem texto e com bastante figuras”
A6	“Os vídeos eram de ótima qualidade e bastante didáticos”
A7	“Os vídeos e animações, são ótimos e de bom entendimento. São bem auto explicativos”
A8	“Os vídeos foram bons, pois facilitavam o entendimento”.
A9	“Muito boas, bem acessível para o entendimento”
A10	“Bom”
A11	“Muito bom”
A12	“Excelentes, criativos e bem didáticos”
A13	“Excelente, todos os vídeos eram bem autoexplicativo”
A14	“Os vídeos e animações são de boa qualidade”.
A15	“Os recursos áudio visuais foram a melhor parte do curso”
A16	“Auto explicativo e didáticos”
A17	“Muito bom”
A18	“Bons”
A19	“Vídeos bem didáticos e de fácil entendimento”
A20	“Excelente”
A21	“Os vídeos e animações estavam ótimos e muito contribuíram para a explicação”
A22	“Bem didáticos”
A23	“Excelente, animações incríveis como demonstrações que facilita a visualização”

Fonte: Dados da pesquisa.

Quadro 4 - Respostas dos alunos sobre a oficina. Questão 6

ALUNO	RESPOSTA
A1	“Essa prática foi boa e desafiadora pois estimulou os alunos a dar o máximo de si para completa-la”
A2	“A prática estimulou o raciocínio dos alunos, desafiando-os a completara tarefa”.
A3	Em branco
A4	“A cruzadinha é uma ferramenta importante, pois ao final da oficina serve para complementar o aprendizado”.
A5	“A prática foi boa, é bom aplicar atividades de fixação como a cruzadinha”
A6	“A prática pedagógica serviu para explicar os conhecimentos obtidos com a oficina de Ressonância Magnética”.
A7	“A cruzadinha estava bem complexa”
A8	“Este método pedagógico foi uma ótima ideia. Contudo deveria está mais bem organizada (estruturada)”
A9	“Muito interessante, ajudou a consolidar o aprendizado. ”
A10	“Interessante, pois nos ajudo a conhecer e relembrar a temática”
A11	“Muito difícil”
A12	“Excelente, pois foi uma oportunidade para termos noção do nosso aproveitamento do curso.”
A13	“Excelente, pois colocamos o que aprendemos servindo para além de expor nosso conhecimento, verificar se tínhamos prestado atenção”
A14	“A cruzadinha é uma ótima ideia pois ajudou a fixar o conteúdo que foi passado. ”
A15	“Essa prática é ótima, porém foi muito dificultoso responder.”
A16	“Ótimo, ajuda o discente a melhorar o raciocínio”
A17	“Boa, porém, muito extenso”
A18	“Boa, pois abordou o conteúdo completo da oficina”
A19	“Achei importante para melhor fixação dos conhecimentos e aprendizado.”
A20	“Achei uma ótima forma de aprendizagem, pois a pessoa consegue fixar melhor o que aprendeu em sala”
A21	“Achei bastante interessante, visto que tínhamos acabado de assistir a aula e foi um teste para saber se de fato conseguimos compreender os conceitos explicitados pelo professor”.
A22	“Excelente, pois testou nossos conhecimentos “
A23	“Muito legal, te faz bater cabeça até estimula a lembrar do que foi dito anteriormente no decorrer da oficina.”

Fonte: Dados da pesquisa.

	conhecimento.”
A17	“9,0 pois a mesma foi bem explicada dando uma compreensão clara.”
A18	“9 O conteúdo foi bem explicado bem compreendido exceto por não ter tido tempo suficiente para finalizar o exercício final.”
A19	“10, justamente pela ótima apresentação do palestrante e domínio do conhecimento.”
A20	“10. Adorei a didática e as animações de vídeos do professor, ele tinha paciência para explicar.”
A21	“10, A oficina foi superinteressante. Uma das atuações do biomédico é a imagenologia e a Ressonância Magnética faz parte, sendo importante para a atuação profissional futura. O professor conseguiu passar muito bem o conteúdo e seus métodos foram bastante eficazes. ”
A22	“nota 10, pois o professor possui uma linguagem bem didática.”
A23	“10”

Apêndice B - Produto

**OFICINA SOBRE BASES FÍSICAS
DA
RESSONÂNCIA MAGNÉTICA**



Imagem disponível em: http://www.gmagnolia.com.br/epx/fotos_admin/_conteudo/26.jpg

Prof. RAIMUNDO NONATO NOGUEIRA REIS

Profa. Dra. ADRIANA GOMES DICKMAN

Caro professor,

Esse material é dirigido principalmente a você, professor de biofísica e de imaginologia, que anseia fugir da “educação bancária” descrita por Freire, em que o professor é aquele que detém o conhecimento e “deposita”, de forma passiva, os conteúdos na cabeça do aluno, que supostamente nada sabe.

Na tentativa de transpor o pensamento freiriano para a sala de aula, esta oficina foi elaborada para criar momentos de aprendizagem da Física da Ressonância Magnética, tendo, como base, os três momentos pedagógicos de Delizoicov. (1991) Esta é uma prática pedagógica na qual o aluno é o principal construtor de seu conhecimento e, para tal, utilizamos uma apostila, inserida nessa oficina, na qual sugerimos simulações/animações, vídeos e experimentos.

Neste produto educacional, apresentamos um questionário, como pré-teste, que avaliará os conhecimentos prévios dos alunos, uma apostila, contendo a Física da Ressonância Magnética, que servirá de apoio ao professor e aos alunos, para que possam usar como material didático no decorrer da oficina, e uma cruzadinha que será aplicada como pós-teste.

Nossa sugestão é que a apostila seja utilizada concomitantemente com os vídeos, animações e simulações/animações sugeridas no produto durante a organização do conhecimento, uma vez que essa tática poderá ajudar na construção de novos conhecimentos para o aluno e uma compreensão científica das situações problematizadas.

Esperamos que este material possa contribuir com o planejamento de suas aulas, não apenas nesse tópico em particular, mas em outros tópicos da biofísica e imaginologia. Você também poderá ficar à vontade para adequar a oficina à sua realidade, alterando as questões do pré-teste, o conteúdo da apostila e o formato do pós-teste.

Bom trabalho!

Os autores

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	68
1. OS TRÊS MOMENTOS PEDAGÓGICOS.....	69
Problematização inicial.....	69
Organização do conhecimento	69
Aplicação do conhecimento.....	69
2. CARGA HORÁRIA.....	71
3. PALAVRAS FINAIS.....	72
APÊNDICE 1 - Problematização inicial: questionário	73
APÊNDICE 2 – Apostila	74
1. BASES FÍSICAS DA RESSONÂNCIA MAGNÉTICA	74
1.1. Movimento de precessão: o giroscópio	74
1. 2. Processo de carga de um capacitor	75
1.3. Lei de Faraday: indução eletromagnética.....	78
1.4. Espectro Eletromagnético	81
1.5. Momento magnético orbital e momento angular	84
1.6. Um breve “passeio” pelo desenvolvimento da Física Quântica	85
1.7. Spin.....	87
1.8. Paramagnetismo.....	90
1.9 Momento magnético e energia potencial.....	93
2. RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN).....	96
2.1. O que é Ressonância Magnética?	96
2.2 Precessão dos spins	96
2.3. Equação de Larmor	99
2.4. Vetor magnetização transversal	104

2.4.1 Relaxação	105
2.5. Free induction decay (FID) ou decaimento livre de indução	108
2.6. Sequência spin-eco.....	110
2.7. Contrastes.....	112
2.7.1. Contraste em T1	112
2.7.2. Contraste em T2	113
 APÊNDICE 3 - CRUZADINHA DA RESSONÂNCIA MAGNÉTICA.....	 116
 REFERÊNCIAS	 119
 LEITURAS SUGERIDAS.....	 121

APRESENTAÇÃO

No presente trabalho, apresentamos um produto educacional que envolve o uso de uma oficina sobre a Física da Ressonância Magnética para alunos de Biomedicina. O produto educacional é fundamentado nos três momentos pedagógicos de Delizoicov (1991), que são: *Problematização inicial*, *Organização do conhecimento* e *Aplicação do conhecimento*.

Na *problematização inicial*, é sugerido que a turma seja distribuída em grupos de quatro ou cinco alunos, de acordo com o tamanho da turma, e, como primeira atividade, um questionário, proposto no apêndice 1, ao final dessa apostila, a fim de avaliar os conhecimentos prévios dos alunos sobre o tópico que será abordado. É importante que, nesse momento, não sejam fornecidas as respostas aos alunos; pelo contrário, o professor deverá fomentar os alunos, até que sintam a necessidade de conhecimento científico.

A *organização do conhecimento* é o momento destinado a estudar sistematicamente os conteúdos necessários para a compreensão do tema e da problematização inicial. Esta etapa é o momento de tentar buscar uma linguagem científica para organizar o conhecimento prévio do aluno sobre a Física da Ressonância Magnética e de novos conhecimentos que surgirão.

A *aplicação do conhecimento* é o momento que se destina a empregar o conhecimento científico do qual o estudante vem se apropriando no decorrer de todo o processo para interpretar as questões propostas desde o primeiro momento pedagógico e outras questões que possam ser explicadas e compreendidas pelo mesmo corpo de conhecimento.

1. OS TRÊS MOMENTOS PEDAGÓGICOS

Problematização inicial

Após dividir a turma em pequenos grupos de no máximo cinco alunos, você fornecerá para cada grupo o questionário pré-teste (Apêndice 1), para que possa resolvê-lo de acordo com seus conhecimentos prévios.

Organização do conhecimento

Nesta etapa, você apresentará a apostila elaborada, constituída de duas partes: a primeira parte é um breve passeio sobre alguns tópicos de Física, que servirão para embasar o aluno para compreender a Física da Ressonância Magnética. A segunda compreende o fenômeno da Ressonância Magnética em si. Nesse momento, é muito importante que você faça o link entre as grandezas estudadas na primeira parte da apostila e as grandezas apresentadas na segunda parte. A apostila traz indicações de vídeos, animações e simulações que buscam ajudar os alunos a compreenderem melhor alguns fenômenos.

Aplicação do conhecimento

Neste momento, você pode aplicar uma atividade lúdica chamada *cruzadinha da Ressonância Magnética*, que é uma palavra cruzada envolvendo questões do primeiro momento pedagógico e outras questões que podem ser respondidas pelo conhecimento científico adquirido pelo aluno. Inclusive, neste momento, você pode sugerir uma disputa entre os grupos, uma vez que o jogo é uma atividade rica e de grande efeito que responde às necessidades lúdicas, intelectuais e afetivas, estimulando a sociabilidade e representando, assim, um instrumento potencializador da aprendizagem. A cruzadinha é mostrada no apêndice 3.

Existem vários softwares gratuitos que criam palavras cruzadas. Nós utilizamos, para elaboração dessa atividade, o EclipseCrossWord, que você poderá encontrar no endereço eletrônico www.eclipsecrossword.com.

2. CARGA HORÁRIA

Para aplicação do referido produto, são sugeridas cinco horas-aulas de 60 minutos, nas quais os momentos pedagógicos foram divididos de acordo com o quadro 1.

Quadro 1- Divisão da carga horária dos momentos pedagógicos

Primeiro dia	<ul style="list-style-type: none">• Problematização inicial (60min)• Organização do conhecimento: Primeira aula (60min + 30min)
Segundo dia	<ul style="list-style-type: none">• Organização do conhecimento:• Segunda aula (60min + 30min)• Aplicação do conhecimento: (60min)

Ressalta-se, porém, que essa distribuição poderá ser modificada e adequada à carga horária do professor.

3. PALAVRAS FINAIS

Amigo professor!

Espero que esta oficina lhe proporcione o mesmo prazer que senti ao aplicá-la em uma turma de Biomedicina de uma faculdade paraense.

No decorrer da oficina, você perceberá, nos olhos do aluno, que ele anseia por uma aula diferenciada, na qual ele tenha voz, participe da construção de seus conhecimentos e que seus conhecimentos prévios sejam levados em consideração.

Também apliquei os três momentos pedagógicos nas leis da termodinâmica para alunos do segundo ano do Ensino Médio na escola onde trabalho e obtive resultados excelentes! Também percebi, nesses alunos, o quanto se sentem importantes, engajados e felizes quando você divide com eles a responsabilidade da construção do conhecimento.

Espero que essa oficina seja um passo em direção a outros projetos que fujam da aula tradicional, acrítica e autoritária, que assola as escolas e universidades brasileiras, onde, em geral, os alunos são apenas meros espectadores.

Cordialmente.

APÊNDICE 1 - Problematização inicial: questionário

Questões/situações:

1. Analisando o movimento do giroscópio, identificar e explicar o movimento de precessão. Em quais outros sistemas isto ocorre?
2. Quando um ímã se aproxima de uma espira, surge, nela, uma corrente elétrica. Você poderia descrever o porquê? Onde mais isto acontece?
3. Você já fez exames de raio X? É nocivo à saúde?
4. Você já fez exame de Ressonância Magnética Nuclear? Ou já ouviu falar? Explique o princípio do exame. Há radiação envolvida?
5. Onde você estaria sujeito à radiação mais perigosa: em um exame de Ressonância Magnética Nuclear ou em um exame de raio X. Por quê?
6. Em suas aulas de química, você provavelmente já ouviu falar sobre spin. Você poderia escrever algo sobre essa grandeza?
7. Ao emitir uma nota musical muito aguda, uma cantora de ópera faz com que uma taça de cristal se despedace. Que fenômeno é esse? Porque ocorre?

APÊNDICE 2 – Apostila

1. BASES FÍSICAS DA RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

1.1. Movimento de precessão: o giroscópio

Quando um giroscópio é colocado perpendicularmente ao solo e liberado, ele cai. No entanto, quando o giroscópio sofre uma rotação em torno de seu eixo, ele precessiona em relação à vertical. Isso acontece porque o sistema fica sujeito a um torque perpendicular ao seu eixo que tende a mudar a direção do momento angular de rotação do eixo. O giroscópio gira no sentido do produto vetorial $\vec{L} \times \vec{P}$, que nos dá o valor do torque do peso, como na figura 1. O torque também pode ser definido como a taxa de variação do momento angular, ou seja: $\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt}$.

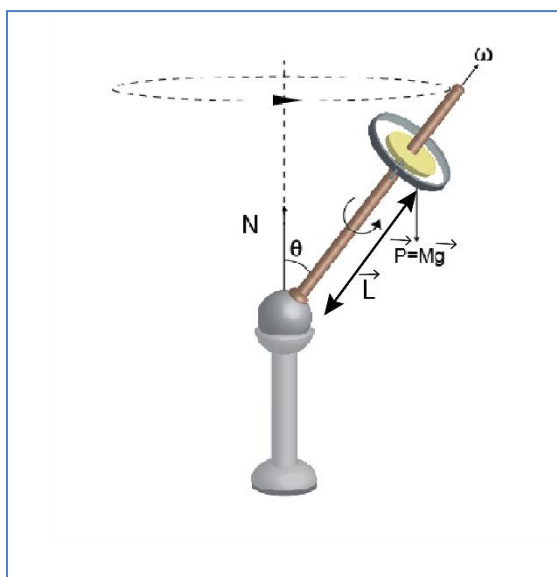


Figura 1 – giroscópio

Fonte: Elaborado pelo autor

Indicamos, no quadro 1, o endereço eletrônico de uma simulação do movimento de um pião que tem o mesmo comportamento do giroscópio. Na figura 2, está mostrada a página da tela inicial da simulação.

Quadro 1- Movimento de um pião

Simulação	Movimento de um pião
Fenômeno	Movimento de precessão
Sítio na Web	http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/Flash/ClassMechanics/Precession/Precession.html
Autor	David. Harrison AT utoronto.ca.
Idioma	Inglês
Configurações básicas Necessárias	Flash player
Livre?	Sim
Interativo?	Sim
Descrição	Animação em <i>flash</i> que simula o movimento de precessão de um pião, mostrando a direção e o sentido do torque, velocidade angular e momento angular

Fonte: Conf. Harrison, 2005.

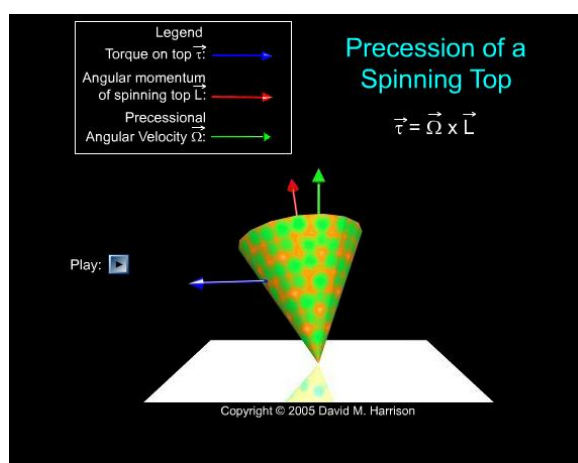


Figura 2 – Precessão do pião

Fonte: HARRISON, 2005, s.p.

1. 2. Processo de carga de um capacitor

Em Ressonância Magnética, a formação da imagem está relacionada com o crescimento do vetor magnetização longitudinal e o decrescimento do vetor magnetização transversal, que são processos cujas descrições envolvem funções exponenciais. As equações que regem esses processos são derivadas das equações de Bloch, que são equações que fogem do escopo deste trabalho.

Podemos comparar esses processos com o processo de carga de um capacitor, que é um fenômeno exponencial e mais palpável para nós.

A figura 3 mostra como um circuito simples pode ser usado para carregar um capacitor. Denomina-se circuito RC um circuito que possui um resistor R em série com um capacitor C . A bateria de força-eletromotriz E , constante, tem resistência interna nula. Como o capacitor do circuito à esquerda na figura 3 está inicialmente descarregado, pois a chave ch está aberta, a diferença de potencial (ddp) em seus terminais é nula.

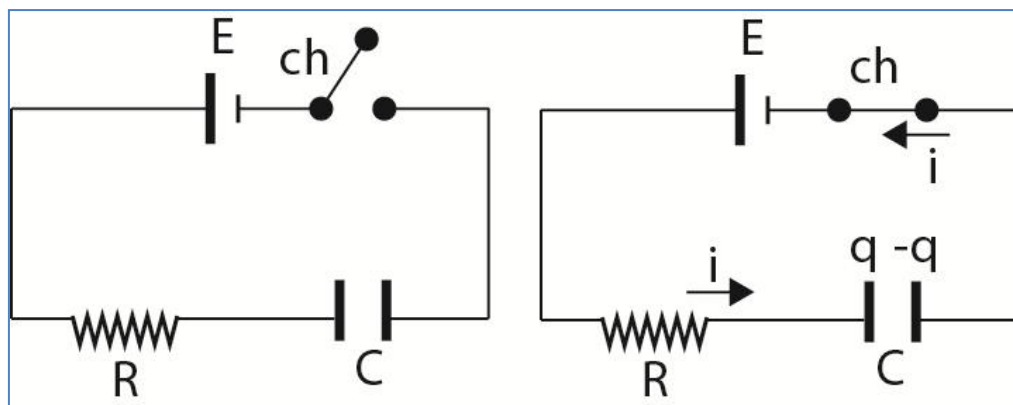


Figura 3 - Capacitor em processo de carga

Fonte: Elaborada pelo autor

Quando fechamos a chave ch do circuito à direita, o capacitor inicia o processo de carga, a ddp em seus terminais aumenta e a ddp nos terminais do resistor diminui. A soma dessas duas ddp é sempre igual a E . Depois de algum tempo, o capacitor fica completamente carregado, a corrente torna-se nula, a ddp através do resistor se anula e a fem que surge nos terminais do capacitor é igual a E . A ddp nos terminais do capacitor em um instante t pode ser calculada pela relação:

$$U_C = E(1 - e^{-t/RC}). \quad (1)$$

Graficamente, a variação da ddp em função do tempo é mostrada na figura 4:

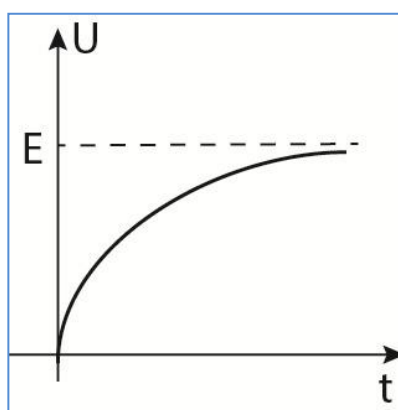


Figura 4 - Gráfico U x t

Fonte: Elaborada pelo autor

Como a corrente elétrica é dada por:

$$i = \frac{dq}{dt}, \text{ então : } i = \frac{E}{R} e^{-t/RC} \quad (2).$$

Graficamente, a variação da corrente em função do tempo é mostrada na figura 5.

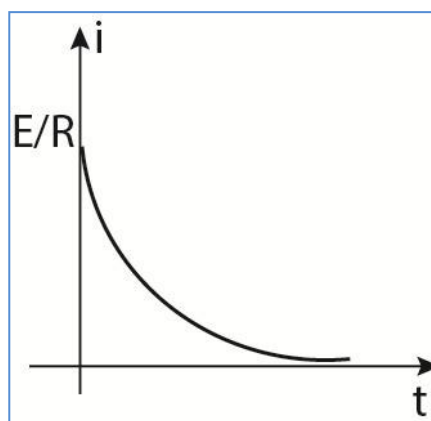


Figura 5 - Gráfico U x t

Fonte: Elaborada pelo ator

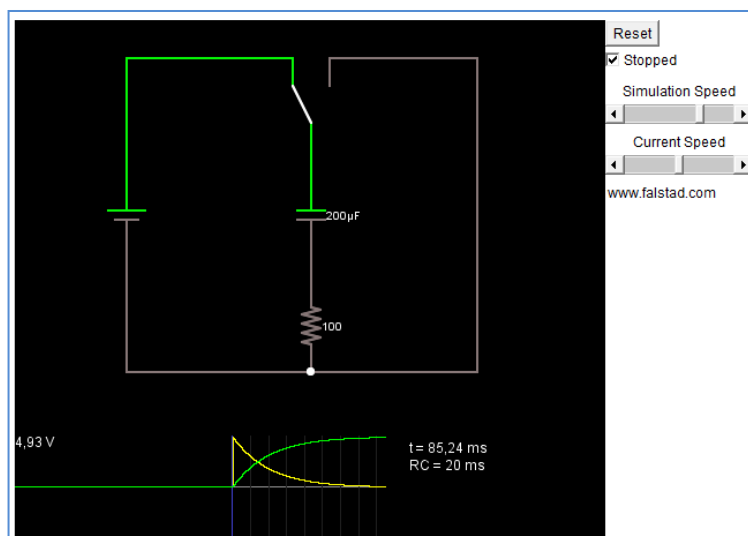
O produto RC denomina-se constante de tempo ou tempo de relaxação do circuito, sendo designado pela letra grega τ , onde $\tau = RC$.

No quadro 2, temos o endereço eletrônico da simulação de um capacitor em processo de carga e descarga, exemplificado, posteriormente, pela figura 6.

Quadro 2 - Processo de carga de um capacitor

Simulação	Capacitores
Fenômeno	Processo de carga de um capacitor
Sítio na Web	http://www.falstad.com/circuit/e-cap.html .
Autor	<u>Paul Falstad</u>
Idioma	Inglês
Configurações básicas Necessárias	Java
Livre?	Sim
Interativo?	Sim
Descrição	Nesta animação você pode movimentar uma chave para carregar e descarregar um capacitor e ver graficamente como variam a ddp e a corrente.

Fonte: Conf. FALSTAD, s.d.

**Figura 6 - Processo de descarga de um capacitor**

Fonte: FAUSTAD, s.d.

1.3. Lei de Faraday: indução eletromagnética

O campo magnético ao redor de um ímã pode ser representado por linhas de indução. As linhas de indução saem do polo norte e entram no polo sul do ímã. O fluxo magnético pode ser definido como uma grandeza que está relacionada ao número de linhas de indução que atravessa uma dada superfície. Quanto mais linhas atravessam a superfície, maior é o fluxo magnético.

Faraday descobriu que sempre que há variação de fluxo magnético nas proximidades de uma espira fechada, surge, nela, uma força eletromotriz induzida, a qual faz surgir uma corrente elétrica induzida, como exemplificado pelas figuras 7 e 8. Na figura 7, podemos perceber que existe fluxo magnético na espira, mas como o ímã está em repouso em relação à espira, o fluxo não varia. Não há voltagem induzida na espira. Portanto, a lâmpada não acende.

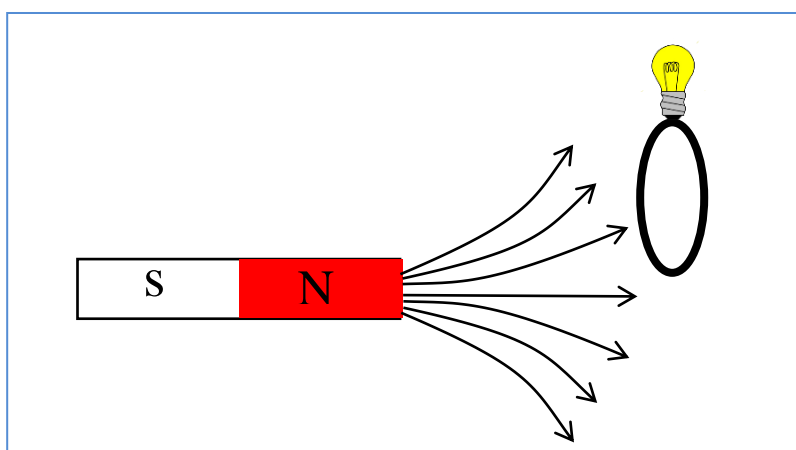


Figura 7 – Sem variação de fluxo magnético

Fonte: Elaborado pelo autor

Já na figura 8, como o ímã está se aproximando da espira, o número de linhas que a atravessa está variando. Portanto, o fluxo magnético está variando, surge uma voltagem induzida na espira, que faz a lâmpada acender.

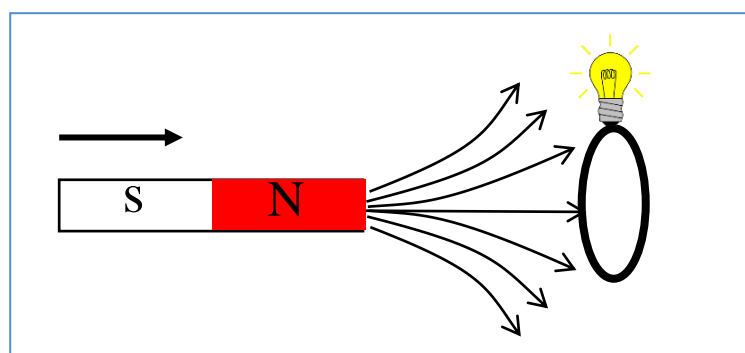


Figura 8 – Com variação de fluxo magnético

Fonte: Elaborada pelo autor

Podemos visualizar a animação da figura 9 sobre indução eletromagnética no site indicado no quadro 3.

Quadro 3 - Simulação da lei de Faraday

Simulação	Lei de Faraday
Fenômeno	Indução magnética
Sítio na Web	https://phet.colorado.edu/sims/faradays-law/faradays-law_pt_BR.html .
Autor	Universidade do colorado
Público alvo	Estudantes de física
Configurações básicas Necessárias	java
Livre?	Sim
Interativo?	Sim
Descrição	Animação em que você pode movimentar um ímã em direção a espira e visualizar o sentido da corrente elétrica induzida.

Fonte: Conf. UNIVERSITY OF COLORADO, 2014.

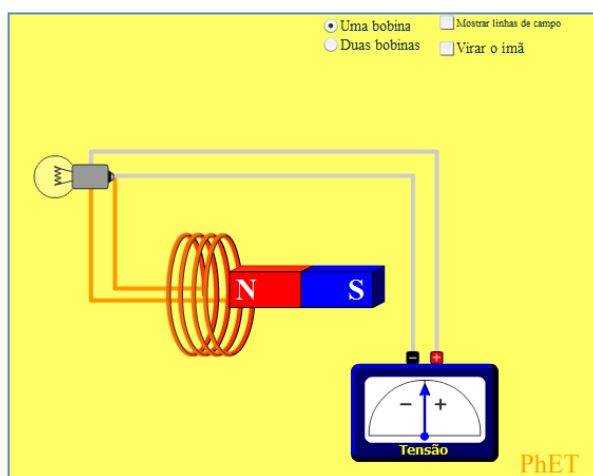


Figura 9 - Simulação da lei de Faraday

Fonte: UNIVERSITY OF COLORADO, 2014, s.p.

Na maioria dos dispositivos elétricos usados na indústria e em nossas residências, a fonte de tensão não é uma bateria, mas uma usina geradora de energia elétrica. Tal usina produz energia elétrica mediante a transformação de uma forma de energia em outra: energia potencial da queda d'água em uma usina hidroelétrica; energia química armazenada no carvão ou no óleo em uma usina termoeletrica; e energia armazenada nos núcleos de átomos em uma usina nuclear. Em uma usina geradora

de energia elétrica, o movimento de um ímã em relação a uma bobina (conjunto de espiras) produz um fluxo magnético que varia através das bobinas e, portanto, surge uma ddp induzida.

1.4. Espectro Eletromagnético

De acordo com a teoria eletromagnética de Maxwell, quando uma carga elétrica é acelerada, seu campo eletromagnético se desprende da carga em forma de ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo com uma velocidade igual a 300.000 km/s. Essa constante é conhecida como velocidade da luz no vácuo. De modo geral, os diversos tipos de ondas eletromagnéticas diferem pelo valor de sua frequência e, também, pela maneira como são produzidas. A Figura 10 representa todas as ondas eletromagnéticas conhecidas. Esse conjunto de ondas eletromagnéticas é denominado espectro eletromagnético.



Figura 10 - Espectro eletromagnético na ordem crescente de sua frequência

Fonte: Elaborada pelo autor

Descrevemos, a seguir, resumidamente, as características de cada onda eletromagnética.

- **Ondas de rádio:** as ondas de rádio ou radiofrequência são produzidas por circuitos ressonantes, têm larga aplicação nas telecomunicações, sendo a região do espectro eletromagnético que nos interessa no estudo da RMN.

- **Micro-ondas:** são produzidas por válvulas eletrônicas, conhecidas como *magnetron*, e utilizadas em radares e fornos de micro-ondas. Esse tipo de radiação é também utilizado em aparelhos celulares.

- **Infravermelho (IF):** são também conhecidas como “ondas de calor”. De acordo com a termodinâmica, é emitida por qualquer corpo que tenha uma temperatura acima do zero absoluto. É utilizada em alguns tratamentos de fisioterapia e por alguns animais, como, por exemplo, a serpente, que consegue captar o IF de suas presas através da *fosseta loreal*, que é um orifício presente entre seus olhos e narinas. É um órgão necessário à sobrevivência deste réptil rastejante.

- **Luz visível:** são ondas eletromagnéticas que vão de, aproximadamente, 4000Å a 8000Å. Conseguem sensibilizar as células fotorreceptoras (cones e bastonetes) da retina e, por isso, nos permitem a visão.

As ondas eletromagnéticas que vão das ondas de rádio até a luz visível são consideradas não ionizantes, uma vez que não provocam riscos à saúde. As radiações a seguir, por sua vez, são consideradas ionizantes.

- **Ultravioleta:** Biologicamente, ela é germicida, podendo ser utilizada para esterilizar instrumental cirúrgico. É fotodissociadora, podendo quebrar algumas ligações químicas. Na superfície da pele pode produzir o melanoma (câncer de pele) e, mais internamente diminuir a produção de elastina e colágeno, substâncias que dão sustentação a pele. Quando incide no ergosterol, produz a vitamina D, também conhecida como calciferol.

- **Raio X:** Atravessa a matéria mole e é parcialmente absorvida por materiais mais densos. Podemos “enxergar” os ossos em um exame de raio X devido a essa propriedade.

- **Raio gama:** É emitido por núcleos radioativos e largamente utilizado no tratamento de câncer.

No espectro eletromagnético, radiações ionizantes são aquelas que possuem alta frequência, como as radiações ultravioleta, raio X e raio gama. O efeito biológico causado pelo raio X, por exemplo, decorre de danos causados nas células pela interação dessa radiação com o meio celular, que pode acontecer de forma direta, como por exemplo, a morte celular, ou indireta, a qual descreveremos a seguir.

Como 75% da constituição do corpo humano é água, é muito provável que o raio X, ao incidir nessa molécula, desfaça a ligação molecular produzindo dois radicais livres, (OH.) e (H.). Um radical livre é um grupo de átomos que tem elétrons desemparelhados e são, conseqüentemente, altamente reativos. Radicais livres podem reagir com muitas moléculas do corpo, incluindo o DNA (HEWITT *et al.*, 2014). Os radicais livres se ligam a estruturas biológicas, produzindo danos irreparáveis, como, por exemplo, a retirada de um hidrogênio do DNA pelo radical (OH.), como mostrado na figura 11.

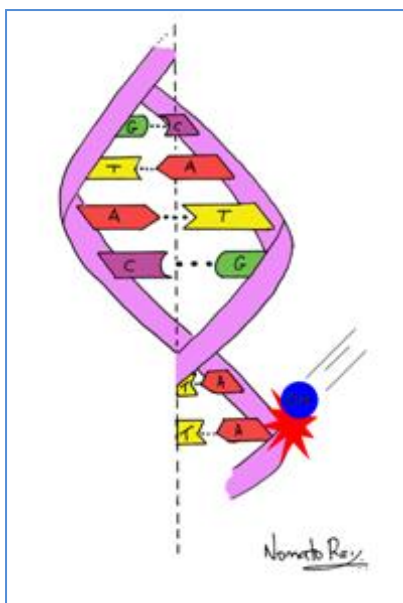


Figura 11 - DNA sendo danificado

Fonte: Elaborada pelo autor

Veremos, mais adiante, que um dos pontos positivos da RMN é o fato de usarmos ondas de rádio, que não são ionizantes e, portanto, não causam danos às estruturas biológicas.

1.5. Momento magnético orbital e momento angular

Consideremos um fio condutor, dobrado na forma de uma circunferência, constituindo o que costumamos denominar uma espira circular, conduzindo uma corrente elétrica. Essa corrente elétrica irá estabelecer um campo magnético no espaço em torno da espira. Entretanto, vamos examinar o campo magnético em seu centro, como na figura 12.

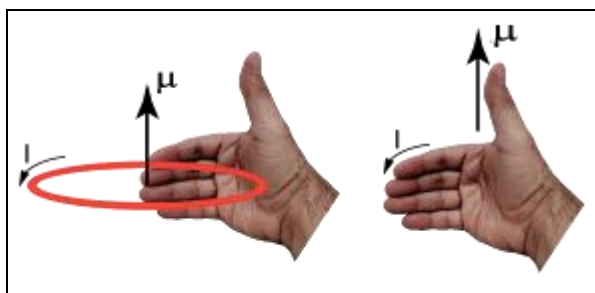


Figura 12 – Campo magnético de uma espira

Fonte: Elaborada pelo autor

Dessa forma, podemos associar a uma espira um momento magnético μ , perpendicular ao plano da mesma. O sentido é dado pela regra da mão direita: com os dedos dessa mão colocados ao longo da espira e no mesmo sentido em que a corrente elétrica convencional a percorre, o polegar indica o sentido do momento magnético (FIGURA 12). O módulo desse vetor é dado por: $\mu = i.A$ em que i representa a corrente e A representa a área plana limitada pela espira.

Por outro lado, de acordo com o modelo de Bohr, o elétron se move ao redor do núcleo numa órbita circular. Assim, podemos pensar no elétron em órbita como uma minúscula espira circular pela qual passa uma corrente. Além disso, como uma espira de corrente gera um campo magnético e, por isso, tem um momento de dipolo magnético, o elétron em órbita também gera um campo magnético e podemos associar a ele um momento magnético orbital, conforme figura 13.

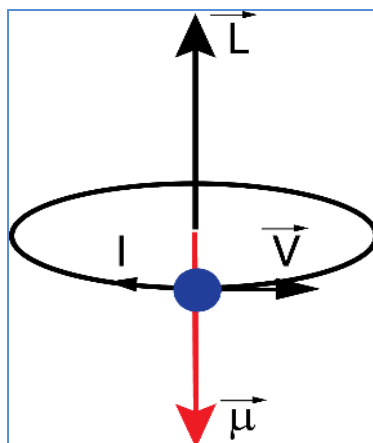


Figura 13 - Relação entre momento magnético e momento angular

Fonte: Elaborada pelo autor

Como foi dito acima, o momento magnético é o produto da corrente i pela área A , que, no caso de uma órbita circular, é dada por $\pi \cdot R^2$, onde R é o raio da órbita. A corrente elétrica é a razão entre a carga do elétron - e e o tempo, que, neste caso, é o período do movimento, T , que é dado pela equação: $T = \frac{2\pi R}{V}$, onde V é a velocidade linear do elétron. Sendo $L = mVR$, o momento angular da partícula, então, combinando essas equações, podemos deduzir que a relação entre o momento magnético e o momento angular é dado pela equação:

$$\vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{L} \quad (3)$$

em que $\gamma = -e/2m$ é conhecida como razão giromagnética. Como esta razão é negativa, então, o momento magnético e o momento angular terão sentidos contrários. No caso do núcleo do hidrogênio, que é positivo, as duas grandezas terão o mesmo sentido.

1.6. Um breve “passeio” pelo desenvolvimento da Física Quântica

Max Planck (1858-1947) explicou a distribuição da radiação de corpo negro de acordo com a hipótese de que a emissão de energia eletromagnética se dá, não de forma contínua, mas de forma discreta ou pacotes de energia. Planck chamou de quantum cada pacote de energia. Começa, então, a ideia de quantização.

No mundo microscópico, muitas grandezas físicas são encontradas apenas em múltiplos inteiros de uma grandeza elementar. Quando uma grandeza apresenta

essa propriedade, dizemos que ela é quantizada. Cada pacote de energia ou fóton tem uma quantidade de energia definida dada por $E = h.f$, onde E é a energia, f é a frequência e h é uma constante de proporcionalidade de valor muito pequeno, conhecida como constante de Planck, cujo valor no S.I. é $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s. A unidade J.s é unidade de uma grandeza muito importante para o nosso curso conhecida como momento angular. Até então, as grandezas físicas eram contínuas, ou seja, podiam assumir quaisquer valores.

Em 1911, Rutherford elaborou um modelo atômico onde, no átomo, os elétrons deslocavam-se em órbitas ao redor do núcleo, da mesma maneira como os planetas descrevem órbitas ao redor do sol. Apesar de o modelo de Rutherford explicar muitos fenômenos, este era inconsistente com o eletromagnetismo de Maxwell, que afirmava que toda carga elétrica acelerada emite radiação eletromagnética. Como no modelo de Rutherford o elétron possui uma aceleração (centrípeta), ele deveria perder continuamente energia até se chocar com o núcleo. Sabemos que isso não acontece.

Baseado na hipótese de Planck, Bohr, um ex-aluno de Rutherford, elaborou alguns postulados para o átomo mais simples de todos: o hidrogênio. Um dos postulados diz que o elétron pode se mover em determinadas órbitas estáveis sem irradiar, denominadas de “estados estacionários”. Outro postulado diz que, quando um elétron numa órbita de energia E_1 absorve um fóton de energia hf , ele salta para outra órbita mais energética E_2 , tal que $hf = E_2 - E_1$, como na figura 14.

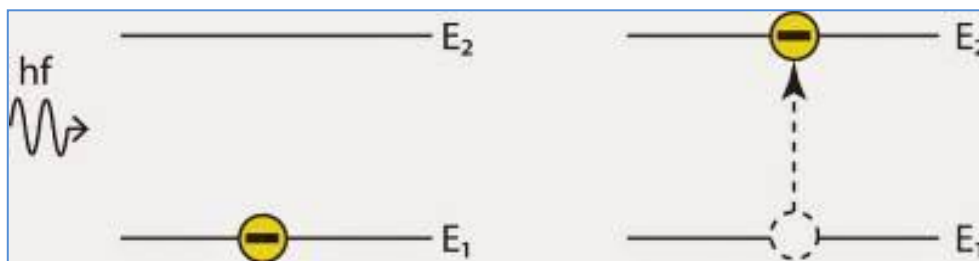


Figura 14 - Excitação do elétron

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao chegar ao nível E_2 , o átomo fica em um estado excitado por certo tempo e, em seguida, o elétron retorna ao nível E_1 , emitindo o mesmo fóton que ele absorvera,

conforme Figura 15. Cada átomo é capaz de absorver ou emitir radiação, cuja frequência é proporcional à diferença entre seus níveis de energia orbital.

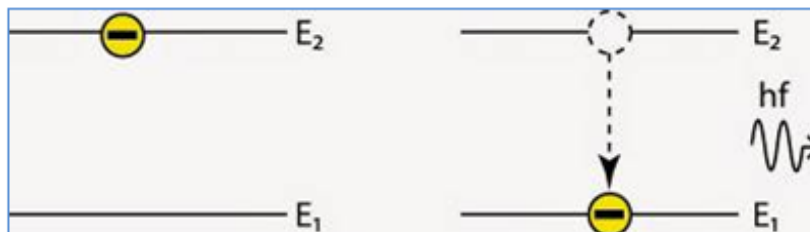


Figura 15 - Relaxação do elétron

Fonte: Elaborada pelo autor

1.7. Spin

Uma interpretação clássica do spin, porém incorreta, seria imaginá-lo como um movimento de rotação do elétron em torno do próprio eixo. Logo, esse movimento cria um campo magnético e este campo magnético está associado a uma grandeza conhecida como momento angular intrínseco, também chamada de spin. O sentido da corrente elétrica que se usa é o *sentido convencional*, ou seja, é aquele que se *opõe ao movimento de cargas negativas*. O sentido do campo magnético gerado pela corrente será dado pela regra da mão direita (FIGURA 16).

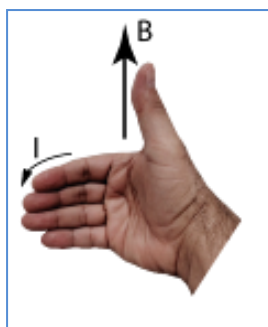


Figura 16 - Regra da mão direita

Fonte: Elaborado pelo autor

Se um elétron está girando no sentido horário, a corrente convencional estará no sentido anti-horário e vice-versa. Se o elétron da figura 17 está girando no sentido horário, ele criará uma corrente no sentido anti-horário e, pela regra da mão direita,

criará um campo magnético, conforme mostra o vetor em azul na mesma figura. Então, o elétron girando se comporta como se fosse um minúsculo ímã.

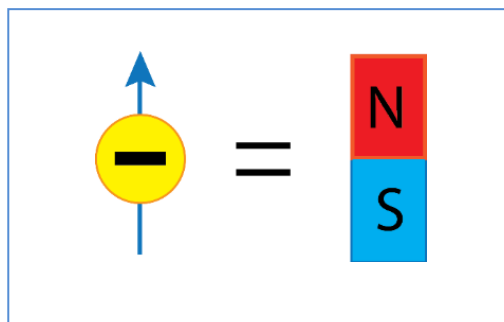


Figura 17 - Spin do elétron

Fonte: Elaborada pelo autor

A existência do spin do elétron foi postulada por dois estudantes de doutorado holandeses, George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit, para explicar alguns espectros atômicos. A existência do spin foi evidenciada pela experiência de Stern & Gerlach (SG).

O experimento de SG consiste em fazer um feixe de átomos (originalmente átomos de prata) passar por um campo magnético não-homogêneo produzido por um ímã, e analisar a deposição desses átomos em uma placa coletora na saída do ímã, como se vê na figura 18. Curiosamente, observa-se que aproximadamente metade dos átomos deposita-se numa extremidade da placa e a outra metade na posição simetricamente oposta, não se registrando praticamente nenhum átomo em qualquer posição intermediária.

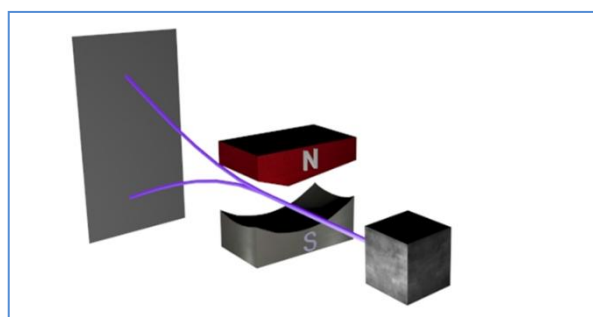


Figura 18 - Aparato utilizado por Stern & Gerlach

Fonte: Elaborada pelo autor

O átomo de prata não tem nada de especial. Ele é neutro (como qualquer outro átomo), porém, possui um elétron desemparelhado. Como um elétron possui um

magnetismo devido ao seu spin, então, ele sofrerá a ação do campo magnético externo. Não esqueça que elétrons emparelhados não sofrem a ação do campo externo porque, pelo princípio de Pauli, dois elétrons em um mesmo orbital possuem spins contrários, logo, seus efeitos magnéticos serão cancelados.

Podemos refazer a experiência de Stern e Gerlach utilizando o sódio ($Z = 11$), mais simples, mas que também possui um elétron desemparelhado. Fazendo sua distribuição eletrônica teremos (FIGURA 19):

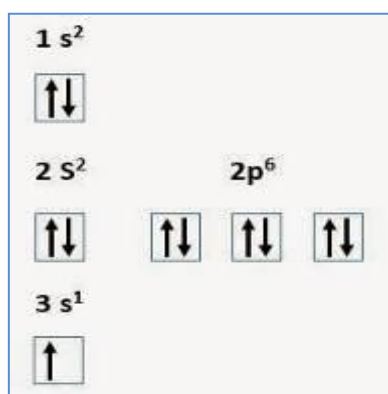


Figura 19 - Distribuição eletrônica do sódio

Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que há cinco orbitais onde os elétrons estão emparelhados e, no último orbital, temos um elétron que está desemparelhado. Como, de acordo com a mecânica quântica, estatisticamente ele pode estar orientado para cima ou para baixo, isso faz o feixe se dividir em dois.

Em Ressonância Magnética Nuclear, o nosso foco é o núcleo de hidrogênio, que é um próton. Mas por que o hidrogênio? O hidrogênio é o escolhido por três motivos básicos (LUFKIN, 1990):

- É o elemento mais abundante no corpo humano, cerca de 75% dos átomos que compõem o corpo são de hidrogênio.
- O próton, que é o núcleo do hidrogênio, possui o maior momento magnético e, portanto, a maior sensibilidade à Ressonância Magnética.

- As características de Ressonância Magnética se diferem bastante entre o hidrogênio presente no tecido normal e no tecido patológico (OLIVEIRA; BORDUQUI, 2012).

Possuir a maior razão giromagnética significa ser mais sensível a um campo magnético externo. Embora, mais adiante deduziremos a equação de Larmor para o movimento orbital de uma carga elétrica, ela também se aplica ao spin, já que ambos os movimentos produzem momentos angulares. Pela análise do quadro 4, percebemos que o hidrogênio possui a maior razão giromagnética dos demais.

Quadro 4 - Razão giromagnética de alguns elementos

NÚCLEO	RAZÃO GIROMAGNÉTICA MHZ/T
¹ H	42.6
¹⁹ F	40.0
²³ Na	11.3
¹³ C	10.7
¹⁷ O	5.8

Fonte: COLORADO (2014, p.13).

1.8. Paramagnetismo

Por simplificação, vamos representar o campo magnético devido ao spin do elétron por uma flecha e iremos chamá-lo de *ímã elementar*. Quando um átomo possui elétrons desemparelhados, ele exibe paramagnetismo. Nessas substâncias, os ímãs elementares tendem a se orientar no mesmo sentido do campo magnético. Na ausência do campo externo, a agitação térmica, que se opõe a qualquer tipo de ordem, mantém os ímãs elementares dispostos aleatoriamente.

A Figura 20 mostra uma substância paramagnética que, na ausência de um campo magnético externo, seus ímãs elementares ficam dispostos ao acaso, produzindo um campo magnético resultante nulo.

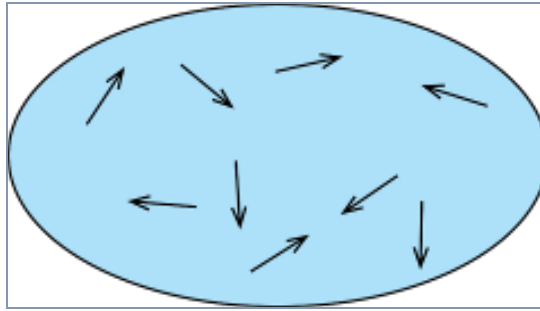


Figura 20 - Substância paramagnética em uma região onde o campo magnético é nulo

Fonte: Elaborada pelo autor

Já a figura 21 mostra o alinhamento parcial dos ímãs elementares produzido por B_0 .

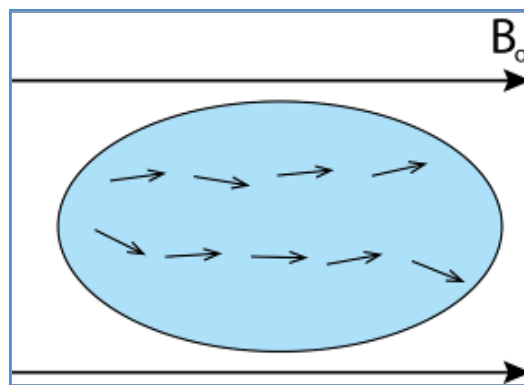


Figura 21 - Substância paramagnética em região onde o campo magnético é diferente de zero

Fonte: Elaborada pelo autor

Vamos analisar o gadolínio ($Z = 64$), que é muito utilizado como contraste em imagem por Ressonância Magnética (FIGURA 22):

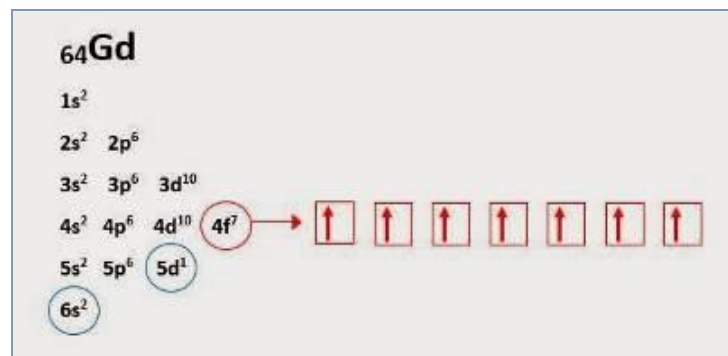


Figura 22 - Distribuição eletrônica do gadolínio

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 22, as camadas que participam das ligações do elemento são as camadas mais externas 5d e 6s (círculos azuis). Dessa forma, a camada 4f (em vermelho), ainda que incompleta, fica blindada pelas mais externas.

Como o gadolínio possui três elétrons nas camadas mais externas, ele pode tornar-se o íon Gd^{+3} . Observe a quantidade de elétrons desemparelhados no gadolínio. Uma das principais aplicações do gadolínio é como agente de contraste para imagens de Ressonância Magnética (IMR), pois o mesmo responde fortemente aos campos magnéticos gerados por esses aparelhos, aumentando o campo magnético local.

O objetivo do uso de meios de contraste em RMN é o de criar uma diferença (contraste) entre um ou mais tecidos que não existiria se uma substância externa ao corpo humano não fosse utilizada. Por exemplo, às vezes, certos tumores são pequenos e não aparecem no exame tradicional. Neste caso, usa-se o contraste para melhorar a visualização dos tecidos e distinguir se o tumor é maligno ou benigno, conforme a figura 23.

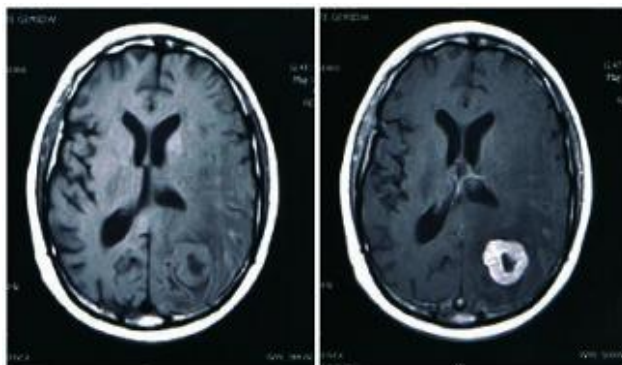


Figura 23 - Lesão tumoral no cérebro antes e depois da aplicação do gadolínio

Fonte: REDIT, s.d.

O gadolínio é uma substância ferromagnética e sozinho é tóxico. Ele deve ser usado junto com uma substância quelante, que o transformará em uma substância paramagnética que dará segurança e permitirá que o mesmo seja eliminado após a administração, basicamente por via renal.

Um campo magnético externo terá suas linhas de indução aproximadas dentro de uma substância paramagnética, provocando o aumento no campo local, conforme

mostra a figura 24. Este aumento local do campo magnético fará com que haja o contraste entre os tecidos.

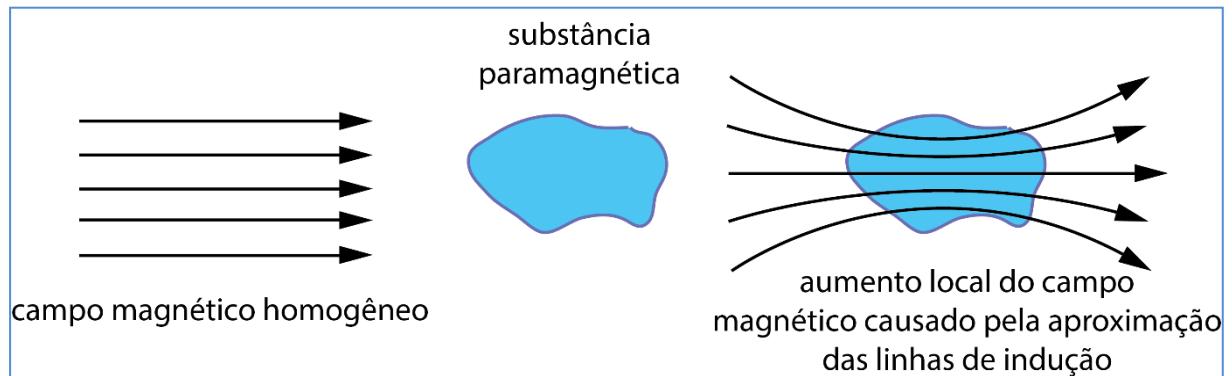


Figura 24 - Aumento do campo magnético local pela presença de substância paramagnética

Fonte: Elaborada pelo pesquisador

1.9 Momento magnético e energia potencial

Quando uma espira de área A , percorrida por uma corrente I , é colocada dentro de um campo magnético de intensidade B , ela fica sujeita a forças magnéticas, que produzem um torque τ , cuja intensidade é dada por

$$\tau = \mu \cdot B \cdot \sin\theta \quad (4),$$

onde θ é o ângulo entre μ e B . Fazendo – se $\theta = 90^\circ$ e $\mu = I \cdot A$, então: $\tau = B \cdot I \cdot A$. Como consequência disso, ela sofre uma rotação, conforme figura 25.

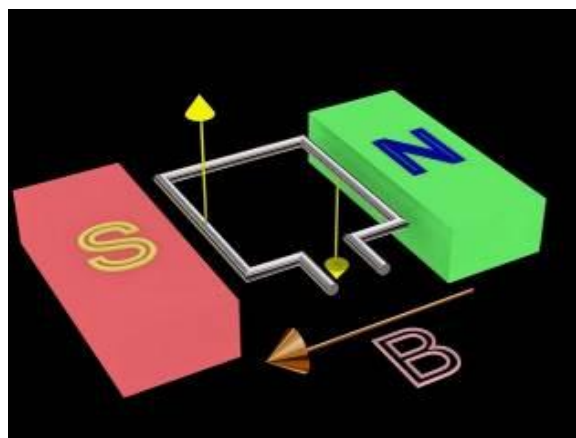


Figura 25 – Torque produzido pelas forças magnéticas

Fonte: Elaborada pelo autor

Quando um ímã é colocado dentro de um campo magnético, como na figura 26, ele fica sujeito a forças (em lilás na figura) que tendem a alinhá-lo na direção do campo magnético, lembrando que polos de mesmo nome se repelem e polos de nomes contrários se atraem.

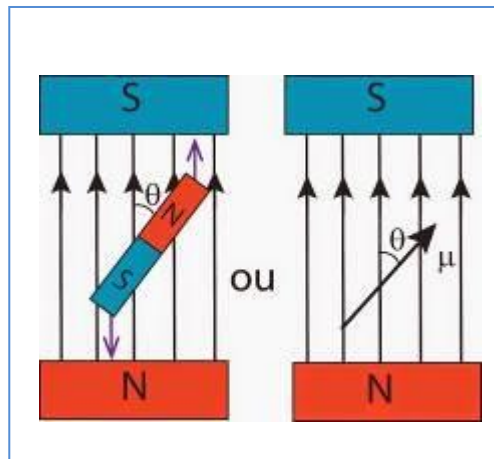


Figura 26 - Momento magnético

Fonte: Elaborada pelo autor

Essas forças produzem um torque dado pela equação (4). A energia potencial deste sistema pode ser calculada pela equação $U = \int \tau \cdot d\theta$ (que é o equivalente angular da equação $W = \int F \cdot dx$). Resolvendo essa integral, chegaremos ao resultado

$$U = -\mu \cdot B \cdot \cos\theta \quad (5).$$

Assim, a orientação do momento magnético pode acontecer no sentido paralelo ou antiparalelo. No sentido paralelo, $\theta = 0^\circ$, temos que $\cos 0^\circ = 1$, implicando que: $U_1 = -\mu \cdot B$. No sentido antiparalelo, $\theta = 180^\circ$, e como $\cos 180^\circ = -1$, temos que: $U_2 = \mu \cdot B$ (FIGURA 27).

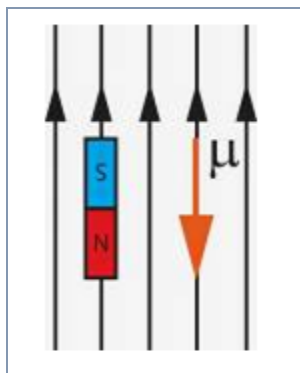


Figura 27 - Alinhamento antiparalelo

Fonte: Elaborada pelo autor

Como $U_1 < U_2$, podemos concluir que a situação de menor energia acontece quando o momento magnético é paralelo ao campo e a situação de máxima energia acontece quando o momento magnético é antiparalelo ao campo magnético.

2. RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN)

2.1. O que é Ressonância Magnética?

MRI é a sigla em inglês para imagens por Ressonância Magnética. O paciente é introduzido no interior de um cilindro onde ímãs potentes fazem com que os átomos de hidrogênio do corpo, que estão presentes na água e em outras moléculas, tendam a se alinhar ao longo da direção do campo, no sentido paralelo ou antiparalelo ao mesmo. Pulsos de radiofrequência (RF) fazem com que alguns dos átomos de hidrogênio absorvam energia e, logo em seguida, reemitam-na. A energia é detectada e mapeada por um computador para produzir a imagem por Ressonância Magnética, que é interpretada por um profissional da área.

O nome original dessa técnica era Ressonância Magnética Nuclear, porém, o termo “nuclear” foi substituído por gerar associação à radioatividade ou energia nuclear, o que não procede neste método de diagnóstico por imagem, pois, neste caso, a palavra “nuclear” significa apenas que os núcleos dos átomos de hidrogênio serão afetados pelos campos magnéticos externos e pulsos de radiofrequência.

A descoberta da RM é atribuída a dois cientistas, agraciados com o prêmio Nobel em 1952: Felix Bloch e Edward Purcell. Eles descobriram o fenômeno da Ressonância Magnética, concomitantemente, em 1946. Entre as décadas de 1950 e 1970, a RM foi desenvolvida e utilizada para análises espectrográficas de moléculas.

Sir Peter Mansfield, da Universidade de Nottingham e o pesquisador Paul Lauterbur, dos EUA, dividiram o prêmio Nobel de Medicina, em 2003, por desenvolverem os exames de Ressonância Magnética, que permitiam enxergar tecidos moles, que vão do cérebro ao abdômen, passando pelos músculos e tendões.

2.2 Precessão dos spins

Cada tecido é composto por um número muito grande de núcleos de hidrogênio com seus momentos magnéticos (μ) distribuídos em todas as orientações possíveis no espaço. Na ausência de campo magnético externo, o vetor magnetização (M) é

nulo, como na figura 28. O vetor magnetização é a resultante de todos os momentos magnéticos.

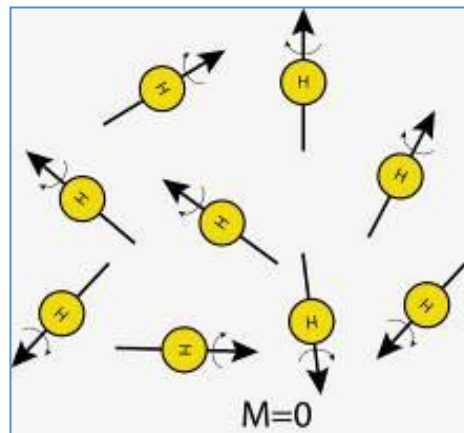


Figura 28 - Hidrogênios ao acaso

Fonte: Elaborada pelo autor

Quando um material, rico em núcleos de hidrogênio, é colocado em um campo magnético estático B_0 , esses núcleos tendem a se alinhar na direção do campo no sentido paralelo ou antiparalelo ao mesmo.

Na presença de um campo magnético estático B_0 , os núcleos de hidrogênio precessam com frequência angular ω_0 , proporcional a intensidade do campo B_0 , como veremos adiante.

Se analisarmos um pequeno volume do corpo humano (75% composto de água, portanto, rico em núcleos de hidrogênio), os núcleos de hidrogênio precessarão, como ilustrado na figura 29. Podemos notar, na figura, que: 7 vetores para cima com 2 vetores para baixo darão como resultante 5 vetores para cima ($7-2=5$).

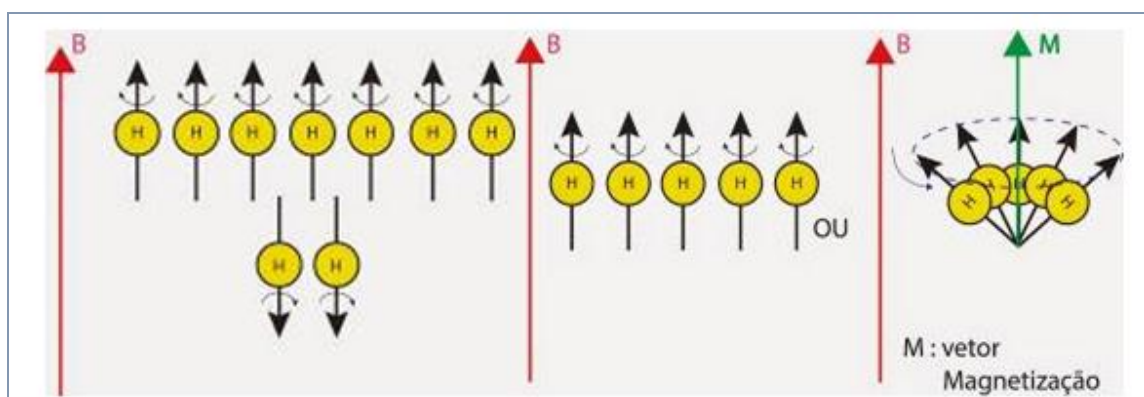


Figura 29 – Vetor magnetização

Fonte: Elaborado pelo autor

A distribuição dos spins entre os níveis de alta e baixa energias é regida pela distribuição de Boltzmann: $N_P / N_{AP} = e^{-\Delta E / kT}$, em que N_P é o número de spins alinhados paralelamente, N_{AP} é o número de spins alinhados antiparalelamente, ΔE é a diferença de energia entre os níveis de alta e baixa energias, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta em kelvin.

Para um campo magnético de 1,5 T e na temperatura média do tecido humano, a diferença entre os spins que ocupam o estado de menor energia e o de maior energia é de, aproximadamente, 5 para 1 milhão (MAZZOLA, 2009). Como na temperatura ambiente o número de spins no sentido paralelo é maior do que no sentido antiparalelo, teremos, então, um vetor magnetização resultante, como indicado na figura 28.

É fácil perceber que no plano XY a resultante do vetor magnetização é nula ($M_{XY}=0$), já que os spins do hidrogênio estão distribuídos de forma aleatória, como se vê na figura 30.

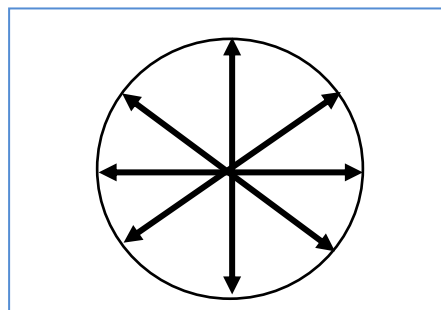


Figura 30 - Plano XY visto de cima: $M_{XY} = 0$

Fonte: Elaborado pelo autor

Por convenção, o campo magnético externo B_0 é aplicado na direção Z do eixo cartesiano. Como o vetor magnetização M_0 está na direção do campo externo, ele não precessa, então, devemos incliná-lo em relação ao campo, como na figura 31. Adiante mostraremos como faremos isso.

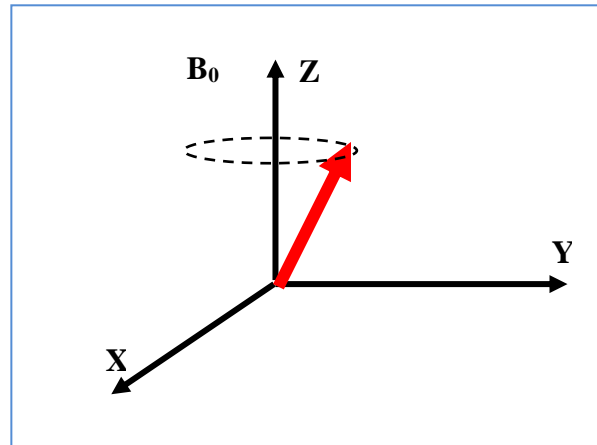


Figura 31 – Momento angular de um núcleo de Hidrogênio precessando em torno de B_0

Fonte: Elaborada pelo autor

2.3. Equação de Larmor

Do eletromagnetismo temos que o módulo do torque é dado pela equação (4). Mas, sabemos, também, que o torque é igual a taxa de variação do momento angular, assim, $\tau = \frac{dL}{dt}$.

Na figura 32, observamos que $dL = L \cdot d\phi$ para um núcleo de hidrogênio precessando no plano XY, então:

$$\tau = \frac{dL}{dt} = \frac{L \cdot d\phi}{dt} = L \cdot \omega \quad (6).$$

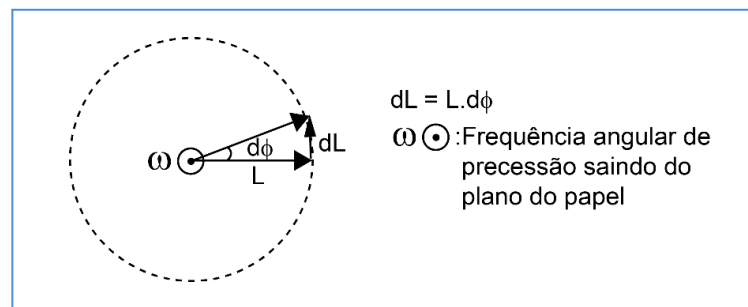


Figura 32 – Plano XY visto de cima

Fonte: Elaborada pelo autor

Igualando-se as equações (4) e (6), temos $\mu \cdot B = L \cdot \omega$, como $\mu = \gamma \cdot L$, então:

$$\omega = \gamma \cdot B \quad (7).$$

Logo, os spins do hidrogênio precessam ao redor do campo com frequência angular $\omega = \gamma \cdot B$, ou frequência linear $f = (\gamma/2\pi) \cdot B$, uma vez que $\omega = 2\pi f$. Na verdade, o quadro 4 se refere ao valores de $(\gamma/2\pi)$. A equação 7 é conhecida como equação de Larmor, que será a equação chave para a compreensão da Ressonância Magnética.

Assim, concluímos que a frequência angular de precessão é proporcional a intensidade do campo magnético, já que, quanto mais intenso é o campo, maior a frequência de precessão. Para o núcleo de hidrogênio, $\gamma = 42,6\text{MHz/T}$, assim, se o campo magnético for igual a 1,5T, então, a frequência de precessão do hidrogênio será, aproximadamente, 64MHz, ou seja, esta frequência está dentro do intervalo correspondente à radiofrequência.

Para inclinar o vetor magnetização em relação ao campo magnético estático B_0 , devemos aplicar, na amostra, um pulso de radiofrequência (RF). Sabemos que uma onda eletromagnética possui um campo elétrico e um campo magnético que oscilam no espaço e no tempo. No entanto, no fenômeno da RMN, apenas a parte magnética da onda, que chamaremos de B_1 , nos interessa. O vetor magnetização, que sofria precessão na direção Z, também irá sofrer precessão na direção X.

Matematicamente, B_1 , que oscila na direção X, pode ser visualizado como sendo a resultante de dois campos magnéticos iguais a B_1 girando em sentidos opostos com frequências angulares ω_1 e $-\omega_1$, no plano XY, conforme indica a figura 33.

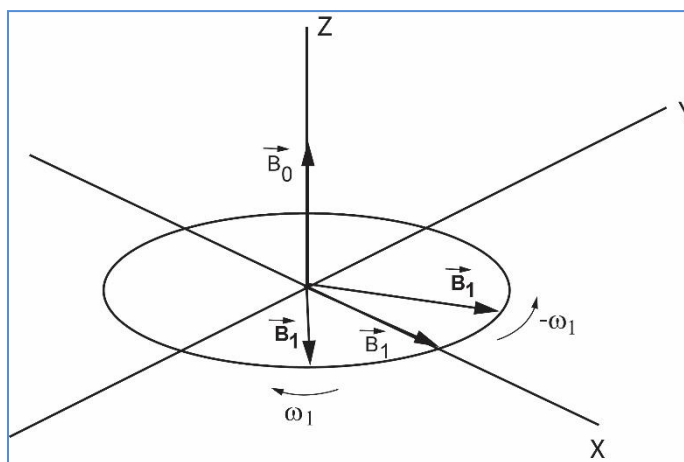


Figura 33 – Campo magnético B_1 da radiofrequência (RF)

Fonte: Elaborado pelo autor

Qual seria a trajetória do vetor magnetização vista por um observador sobre \mathbf{B}_1 , que gira no sentido da precessão dos spins? Dizer que o observador está sentado sobre \mathbf{B}_1 é o mesmo que dizer que ele está em repouso, e o vetor magnetização girando com velocidade angular relativa $(\omega_0 - \omega_1)$. Multiplicando-se a expressão por $1/\gamma$, teremos, pela equação de Larmor $(B_0 - \omega_1/\gamma)$, uma vez que $\omega_0/\gamma = B_0$. O observador girante não verá na vertical um campo magnético B_0 , verá um campo efetivo $(B_0 - \omega_1/\gamma)$. O campo magnético ω_1/γ é fictício, pois é apenas um efeito da rotação do sistema de coordenadas.

O outro vetor \mathbf{B}_1 que gira com frequência angular relativa $-2\omega_1$, não afeta muito a precessão dos spins, pois veremos adiante que o mesmo possui o dobro da frequência de ressonância e, portanto, pode ser desprezado.

O movimento de \mathbf{B}_1 , que gira no sentido de precessão dos spins pode ser representado por suas projeções em X e Y, ou seja, $\mathbf{B}_1 = B_1[\cos(\omega_1 t) \mathbf{i} + \sin(\omega_1 t) \mathbf{j}]$

Um observador no laboratório verá um campo magnético resultante dado por $B_{\text{resultante}} = B_1[\cos(\omega_1 t) \mathbf{i} + \sin(\omega_1 t) \mathbf{j}] + B_0 \mathbf{k}$.

Um observador sobre \mathbf{B}_1 (referencial girante) verá, nesse novo sistema de referência com vetores unitários \mathbf{i}' , \mathbf{j}' e \mathbf{k}' , onde $\mathbf{k} = \mathbf{k}'$, $B_{\text{resultante}} = B_1 \mathbf{i}' + B_{\text{efetivo}} \mathbf{k}'$, uma vez que $\mathbf{i}' = \cos(\omega_1 t) \mathbf{i} + \sin(\omega_1 t) \mathbf{j}$ ⁴. Como $B_{\text{efetivo}} = (B_0 - \omega_1/\gamma)$, então: $B_{\text{resultante}} = B_1 \mathbf{i}' + (B_0 - \omega_1/\gamma) \mathbf{k}'$. Observe que no referencial girante não temos mais $\cos(\omega_1 t)$ e $\sin(\omega_1 t)$, então, para este observador, \mathbf{B}_1 está estático ao longo de \mathbf{X}' .

Na ressonância $\omega_1 = \omega_0$, então⁵, $(B_0 - \omega_0/\gamma) = 0$. Logo, o observador no referencial girante verá apenas B_1 na direção \mathbf{i}' , ou seja, para este referencial girante, o campo magnético em \mathbf{Z}' desaparece.

⁴ Considere \mathbf{i}' como um vetor no plano \mathbf{i} e \mathbf{j} , fazendo um ângulo $\omega_1 t$ com o eixo \mathbf{i} .

⁵ Aqui, podemos fazer a seguinte analogia: se uma pessoa está dentro de um elevador que desce com aceleração constante a , ela sente uma gravidade efetiva dada por $g_{\text{efetiva}} = g - a$, onde g é a aceleração da gravidade local. Se o elevador estiver em queda livre: $a = g$, então, a gravidade efetiva será nula.

A situação agora fica fácil, pois, como para o observador no referencial girante não existe mais campo magnético na vertical, então, ele apenas verá o vetor magnetização precessando em torno de B_1 , com ângulo θ , dado por $\theta = \omega \cdot t$ ou $\theta = B_1 \cdot \gamma \cdot t$, como na figura 34.

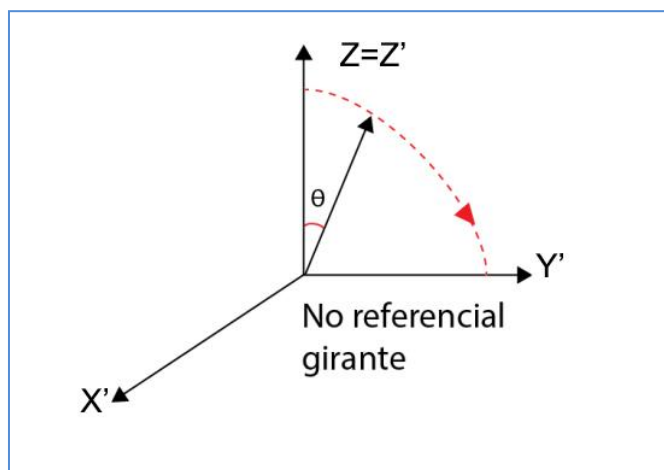


Figura 34 – Variação do ângulo θ (Flip Angle) com o tempo t

Fonte: Elaborado pelo autor

O referencial girante rotaciona com frequência angular $\omega_0 = \omega_1$, em torno de Z' , tendo coordenadas $X'Y'Z'$ centradas no sistema XYZ , com $Z' = Z$, conforme visto na figura 35.

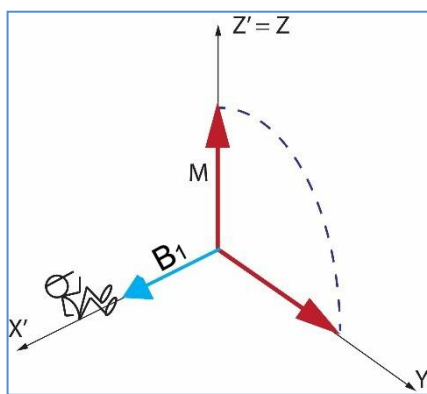


Figura 35 - Trajetória do vetor magnetização visto pelo referencial girante

Fonte: Elaborado pelo autor

Podemos variar o ângulo variando a duração t do pulso. Isso é feito pelo operador do aparelho de Ressonância Magnética. Se quisermos que o vetor magnetização se desloque para o plano transversal XY , basta substituir $\theta = \pi/2$ rad na equação $\theta = \gamma \cdot B_1 \cdot t$, que acharemos a duração do pulso que deverá ser aplicado.

Também podemos explicar este deslocamento do vetor magnetização para o plano transversal baseado nos princípios da mecânica quântica:

- Quando os núcleos estão precessando na presença do campo magnético estático, eles estão fora de fase, ou seja, em posições diferentes, como na figura 36.

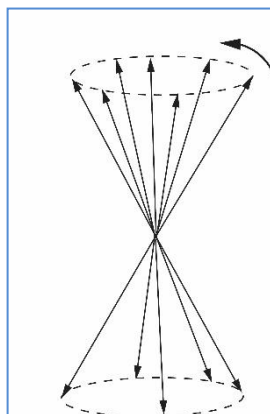


Figura 36 – Núcleos defasados

Fonte: Elaborada pelo autor

- Quando incidimos fótons de RF com energia igual à diferença de energia entre os estados de alta e baixa energias, os núcleos de baixa energia “pulam” para o estado de alta energia até que as duas populações se igualem. Isso faz o vetor magnetização se deslocar para o plano transversal, como visto na figura 37.

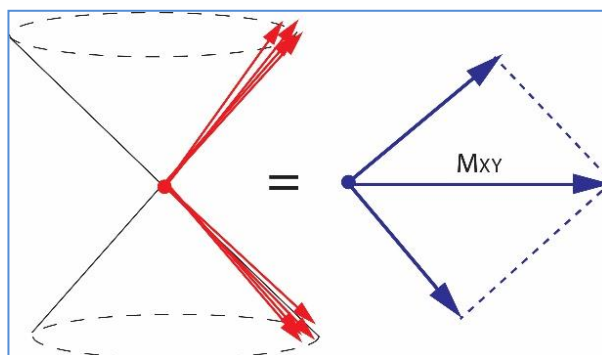


Figura 37 – Núcleos em fase

Fonte: Elaborada pelo autor

Observe que o pulso de radiofrequência tem duas funções: fazer com que os núcleos fiquem em fase (na mesma posição) e igualar as populações de núcleos de

baixa e alta energias. Quando isto acontece, dizemos que o sistema entra em ressonância.

A equação de Larmor também pode ser deduzida da mecânica quântica. Para entrar em ressonância é necessário que a energia do fóton de RF seja igual à diferença entre os estados de alta e baixa energias. Assim, $hf = \mu_B - (-\mu_B) = 2\mu_B$, como $\mu = \gamma L$, então $hf = 2\gamma LB$.

Uma vez que o eixo Z está especificado, o vetor momento angular só pode apontar em certas direções em relação a esse eixo (quantização espacial). O número quântico magnético m_ℓ especifica valores permitidos para L_z , de acordo com a expressão $L_z = m_\ell \hbar$.

Da mesma forma, o momento angular de spin é quantizado no espaço e possui apenas duas orientações possíveis especificadas pelo número quântico de spin m_s , que só pode assumir os valores $\pm \frac{1}{2}$. Por analogia, se $L_z = m_\ell \hbar$, então $S_z = m_s \cdot \hbar = \pm \frac{1}{2} \hbar$.

Como podemos trocar L_z por S_z , uma vez que ambos são momentos angulares, então: $L_z = S_z = \frac{1}{2} \hbar$, onde $\hbar = \frac{h}{2\pi}$. Substituindo na equação para hf , obtemos que $\omega = \gamma B$.

2.4. Vetor magnetização transversal

Porque deslocamos o vetor magnetização para o plano transversal? Na verdade, o sinal da RMN será produzido pelo vetor magnetização que, ao ser deslocado para o plano transversal, induzirá uma voltagem em uma espira disposta perpendicularmente a este plano. É essa voltagem que será convertida em sinal da Ressonância Magnética Nuclear (RMN), como mostrado na figura 38.

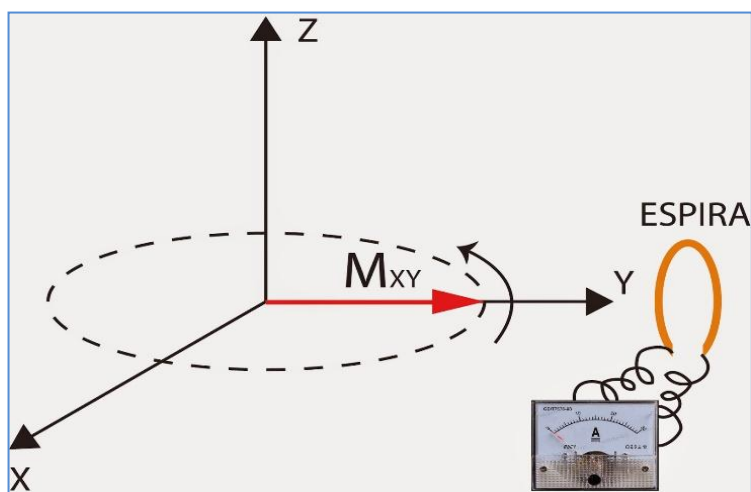


Figura 38 – Sinal induzido na espira

Fonte: Elaborado pelo autor

2.4.1 Relaxação

Uma vez finalizada a emissão de radiofrequência (RF), a magnetização vai voltar à sua posição inicial de equilíbrio mediante um processo de liberação de energia, que é descrito por dois parâmetros: T_1 e T_2 . Quando dizemos que o vetor magnetização volta à sua posição de equilíbrio, queremos dizer que a sua componente transversal diminui enquanto a longitudinal aumenta. Esses dois processos são exponenciais.

O tempo de relaxação longitudinal T_1 ou tempo de relaxação *spin-rede* está associado à interação dos *spins* com a rede (aqui a palavra rede como uma denominação genérica para o meio em torno dos núcleos de hidrogênio). A relaxação longitudinal é um processo exponencial que tem uma forma matemática semelhante à equação (1), e que pode ser calculada pela expressão:

$$M_Z = M_0 (1 - e^{-t/T_1}) \quad (8),$$

onde T_1 é uma constante característica que depende do tecido e M_0 é a magnetização inicial. Por exemplo, a experiência mostra que T_1 da gordura é curto e o T_1 da água é longo, ou seja, o vetor magnetização de um volume de gordura volta ao equilíbrio mais rápido que o vetor magnetização de um volume igual de água. Vejamos por quê.

As moléculas de gordura são moléculas grandes em que os hidrogênios estão ligados a átomos de oxigênio e a átomos de carbono, cuja frequência de rotação é baixa e, portanto, é próxima à frequência de Larmor. A água contém dois átomos de hidrogênio ligados a um átomo de oxigênio, suas moléculas ficam dispersas e possuem frequência de rotação alta, muito diferente da frequência de Larmor.

Quando ligamos o pulso de RF, a gordura entra em ressonância. Como na ressonância a troca de energia com o meio é mais eficaz, então, a gordura absorve e libera energia rapidamente, portanto, recuperando o equilíbrio mais rapidamente. Por isso, o T_1 da gordura é menor que o T_1 da água. A figura 39 mostra o gráfico da relaxação T_1 para a água (azul) e para a gordura (vermelho). Na página 111, veremos como o sinal de M_z é medido.

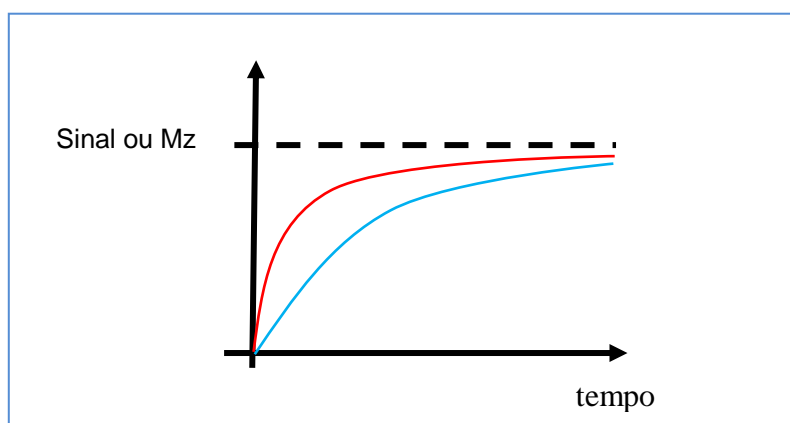


Figura 39 – Relaxação do vetor magnetização longitudinal para a gordura (curva vermelha) e para a água (curva azul)

Fonte: Elaborada pelo autor

Assim, quanto vale M_z quando $t = T_1$? Como $M_z = M_0(1 - e^{-t/T_1})$, então, temos que:

$$M_z = M_0(1 - e^{-T_1/T_1}) = M_0(1 - e^{-1}) = M_0(1 - 0,37) = 0,63 M_0.$$

Ou seja: o tempo necessário para a magnetização longitudinal recuperar 63% do seu valor inicial é chamado de T_1 (OLIVEIRA; BORDUQUI, 2012).

O tempo de relaxação transversal T_2 , ou tempo de relaxação *spin-spin* é associado com a interação entre *spins*. Na relaxação transversal, os momentos magnéticos perdem coerência de fase levando-os a precessar com frequências ligeiramente diferentes. Quando dois spins estão próximos um do outro, o campo magnético de

um afeta o do outro e o campo magnético local sofrerá flutuações, alterando a velocidade de precessão e, portanto, provocando a defasagem entre eles.

A relaxação transversal tem uma forma matemática semelhante à equação (2) e é dada pela expressão:

$$M_{XY} = M_0 e^{-t/T_2} \quad (9),$$

Onde T_2 é uma constante que representa a rapidez da perda da magnetização transversal por causa da defasagem dos spins e M_0 é a magnetização inicial. Essa é uma característica que depende do tecido. A experiência mostra que o T_2 da gordura é curto e o T_2 da água é longo, ou seja, a intensidade do vetor magnetização transversal de um volume de gordura declina mais rápido que o vetor magnetização de um volume igual de água.

A explicação é a seguinte: como na gordura as moléculas estão bastante próximas umas das outras, a interação spin-spin é mais intensa do que nas moléculas de água. Por esse motivo, os spins da gordura defasam mais rapidamente do que os spins da água. A figura 40 mostra o gráfico do decaimento T_2 para a água (azul) e para a gordura (vermelho).

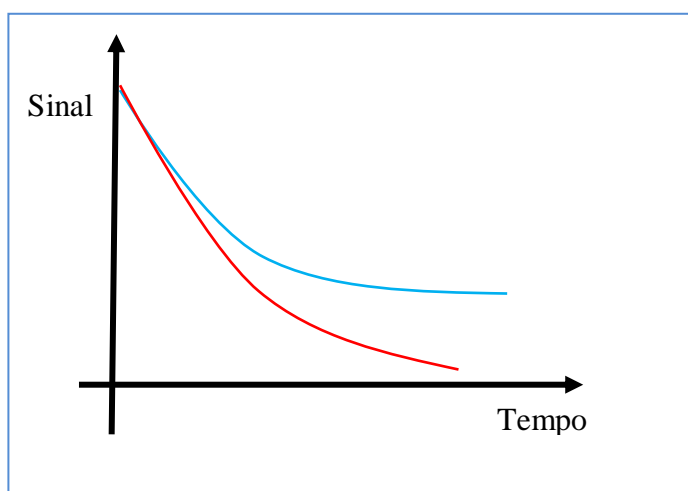


Figura 40 – Decaimento do vetor magnetização transversal para a gordura (vermelho) e para a água (azul)

Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto vale M_{XY} , quando $t = T_2$? Fazendo $t = T_2$ em $M_{XY} = M_0 \cdot e^{-t/T_2}$. Então, temos:

$$M_{XY} = M_0 \cdot e^{-T_2/T_2} = M_0 \cdot e^{-1} = 0,37 \cdot M_0$$

Portanto, T_2 é o tempo necessário para que a magnetização no plano transversal atinja 37% do seu valor inicial (OLIVEIRA; BORDUQUI, 2012).

2.5. Free induction decay (FID) ou decaimento livre de indução

À medida que a intensidade do vetor magnetização transversal decai, em virtude da defasagem dos spins, como na figura 41, a voltagem (sinal) induzida na bobina também diminui.

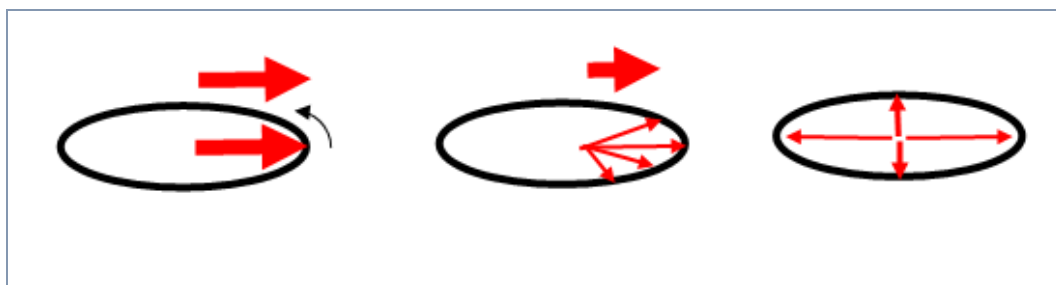


Figura 41 – A defasagem dos núcleos de hidrogênio

Fonte: Elaborada pelo autor

A magnetização transversal, precessando na frequência de Larmor, induz um pequeno sinal chamado *free induction decay (FID)*, algo como decaimento livre da indução, na bobina receptora. O FID é fraco e insuficiente para a formação de imagens. O sinal é induzido na bobina de forma periódica, uma vez que o vetor magnetização transversal está girando nas proximidades da mesma. A sua variação com o tempo é regida pela função $\cos(\omega t)$ (FIGURA 42).

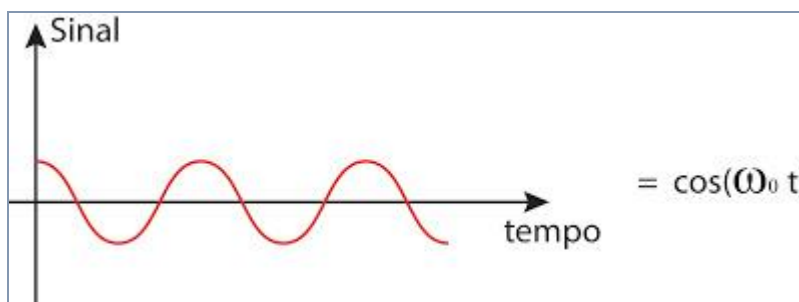


Figura 42 – Oscilação do sinal na bobina

Fonte: Elaborada pelo autor

Porém, esta curva será modulada pelo declínio exponencial do vetor magnetização transversal (e^{-t/T_2^*}), T_2^* é causado pela combinação do relaxamento *spin-spin* e a não homogeneidade do campo externo B_0 (FIGURA 43).

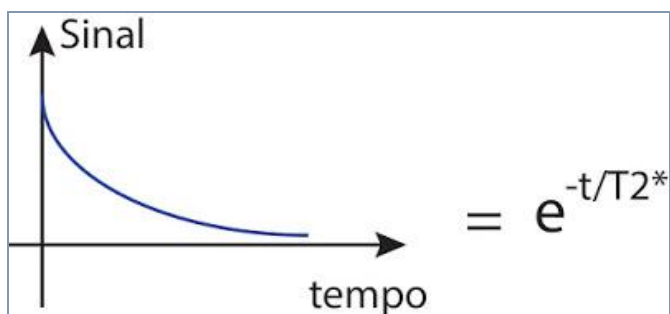


Figura 43 – Decaimento do sinal na espira

Fonte: Elaborada pelo autor

Matematicamente, a combinação dos gráficos 42 e 43 fornecem o gráfico da figura 44, que é um sinal periódico sendo “amortecido” por um declínio exponencial.

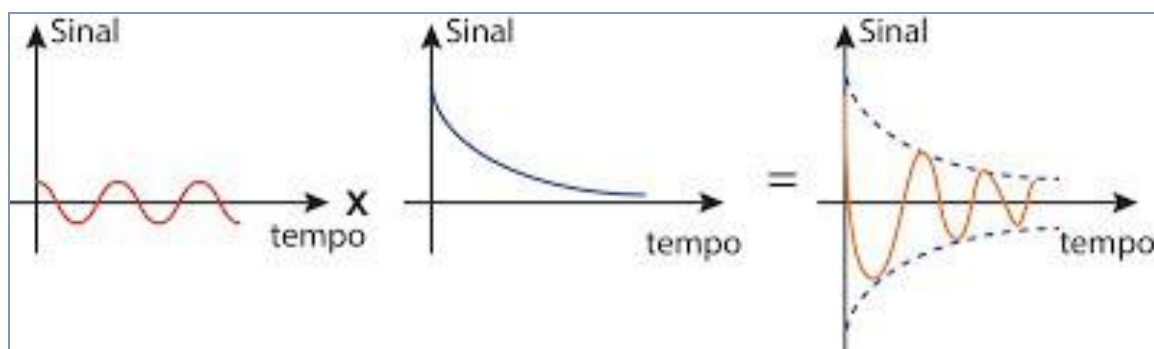


Figura 44 – Resultante da combinação dos gráficos 42 e 43

Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 45, observe que o vetor R (que representa o spin em um dado núcleo de hidrogênio) é mais rápido, e o vetor L (que representa outro spin) é o mais lento. Então, esta diferença de velocidade, causada pelas flutuações no campo local pela presença de spins próximos faz com que os núcleos rapidamente percam coerência e o sinal da RMN vai enfraquecendo. A seta vermelha mais grossa representa a magnetização transversal que vai diminuindo com a defasagem dos spins.

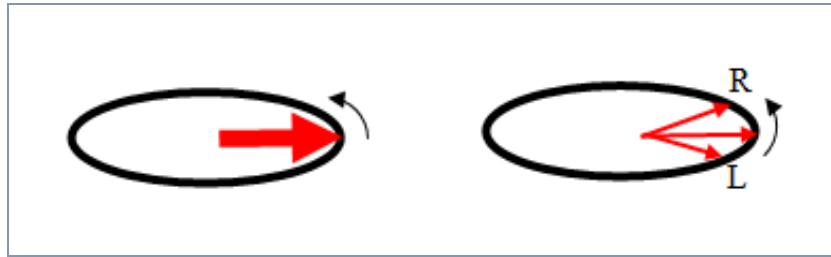


Figura 45 – O vetor R é mais rápido que o vetor L

Fonte: Elaborado pelo autor

Mas existe um truque para intensificar este sinal. Se fizermos os vetores girarem 180° , através de um pulso de 180° ⁶, então, os vetores se sobreporão e teremos novamente um sinal forte, como na figura 45. Para isso, basta substituir $\theta = \pi$ rad na equação $\theta = \gamma \cdot B_1 \cdot t$, que acharemos a duração do pulso que deverá ser aplicado. A seta vermelha vertical representa a magnetização longitudinal que vai aumentando com a defasagem dos spins, uma vez que a magnetização transversal está diminuindo. A seta horizontal mais grossa representa a restituição do vetor magnetização transversal causado pelo pulso de 180° .

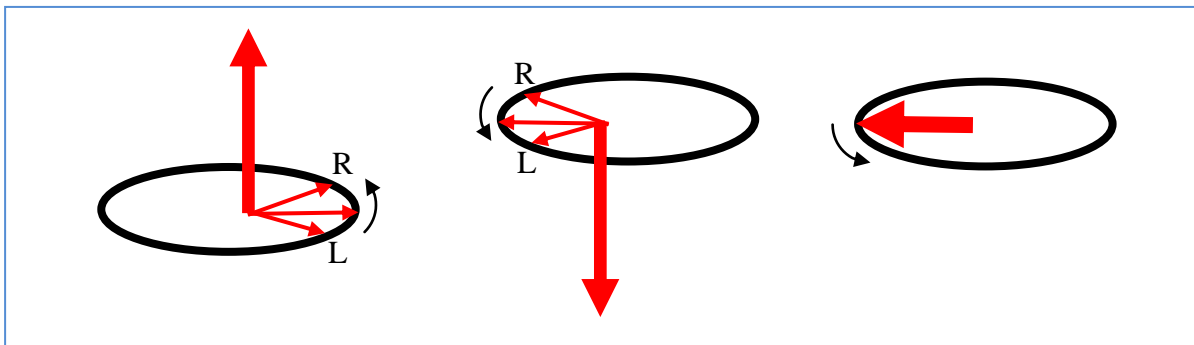


Figura 46 – Tudo se passa como se o “leque” de vetores girasse como uma panqueca

Fonte: Elaborado pelo autor

2.6. Sequência spin-eco

Para obtermos uma imagem nítida da RMN, devemos seguir o esquema da figura 47.

⁶ Esse efeito pode ser visualizado no seguinte endereço eletrônico: <http://www.drcmr.dk/BlochSimulator>.

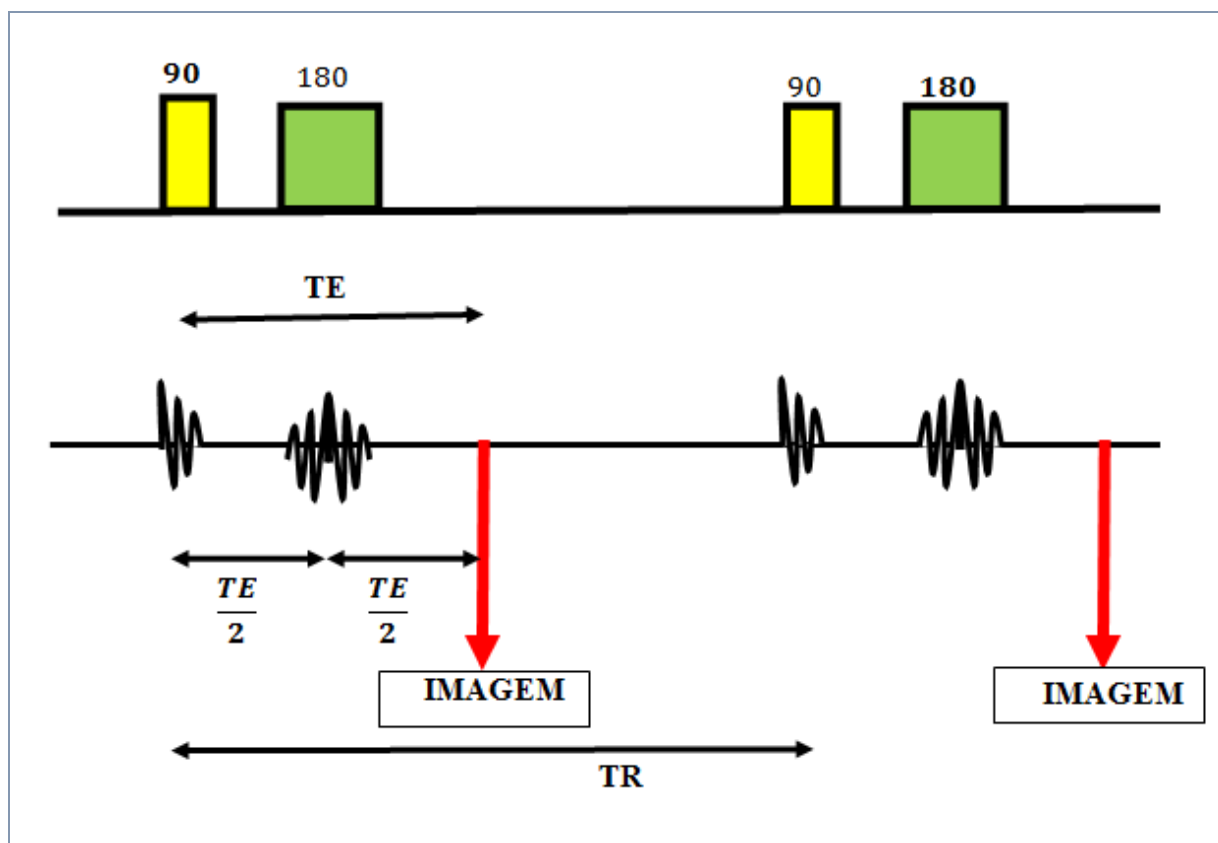


Figura 47 – Sequência spin-eco

Fonte: Elaborada pelo autor

Para termos uma sequência de pulso spin-eco, devemos obedecer às seguintes etapas: primeiro, enviamos um pulso de 90° para transferir o vetor magnetização para o plano de magnetização transversal, onde obtemos um sinal. Devido à defasagem dos spins, o sinal vai enfraquecendo. Esperamos um tempo $\frac{TE}{2}$ e, em seguida, enviamos um pulso de 180° para regenerar o sinal. Depois de mais um tempo $\frac{TE}{2}$, recebemos resposta do paciente, que é um eco de sinal que gera uma voltagem na bobina emissora/receptora.

O tempo entre o pulso de 90° e o eco emitido pelo paciente (pico máximo de sinal induzido na bobina) é denominado tempo de eco, TE. Portanto, o TE determina o quanto de decaimento transversal ocorreu, ou seja, o TE controla o decaimento T_2 .

Outro tempo importante para o parâmetro da imagem é o tempo de repetição, TR, que é o tempo entre dois pulsos de 90° , que são pulsos de excitação. O TR

determina o quanto de relaxação longitudinal pode ocorrer entre a aplicação de dois pulsos de 90° . O TR controla o relaxamento T_1 . TR e TE são propriedades extrínsecas, ou seja, são controladas e ajustadas pelo operador do aparelho de RMN. A escolha de um desses parâmetros coloca mais “peso” em T_1 ou em T_2 .

2.7. Contrastes

2.7.1. Contraste em T_1

Observe a figura 48 que mostra dois tecidos diferentes: gordura (vermelho) e água (azul).

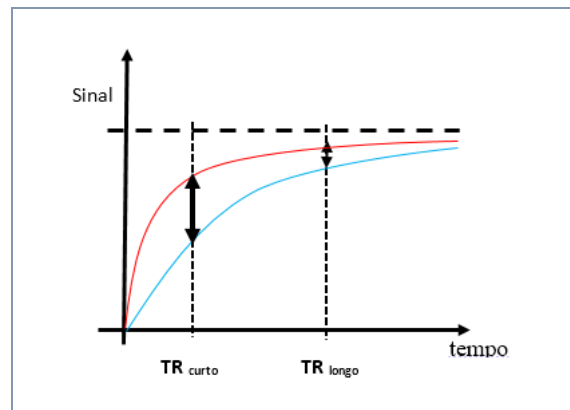


Figura 48 – Contraste T_1 entre água (azul) e gordura (vermelho)

Fonte: Elaborada pelo autor

Sabemos que seus tempos de relaxamento longitudinal (T_1) são diferentes. Analisando o gráfico, percebemos que existe um contraste maior (maior distância entre as curvas) entre a gordura (vermelho) e a água (azul) para um TR curto. Então, a gordura aparece mais clara (hipersinal) e a água aparece mais escura (hiposinal), conforme pode ser visto na figura 49.

Como medir o sinal de M_z ? Como o T_1 da gordura é menor do que o da água, o componente longitudinal da gordura recupera-se mais rápido que o da água. Após um TR menor que os tempos totais de relaxamento dos tecidos, um novo pulso de RF é aplicado, inclinando os componentes longitudinais da água e da gordura para o plano transversal. Como o componente longitudinal da gordura (que agora é transversal) é maior que o componente longitudinal da água (que agora também é transversal), o sinal da gordura é maior (brilhante) que o da água (escuro).

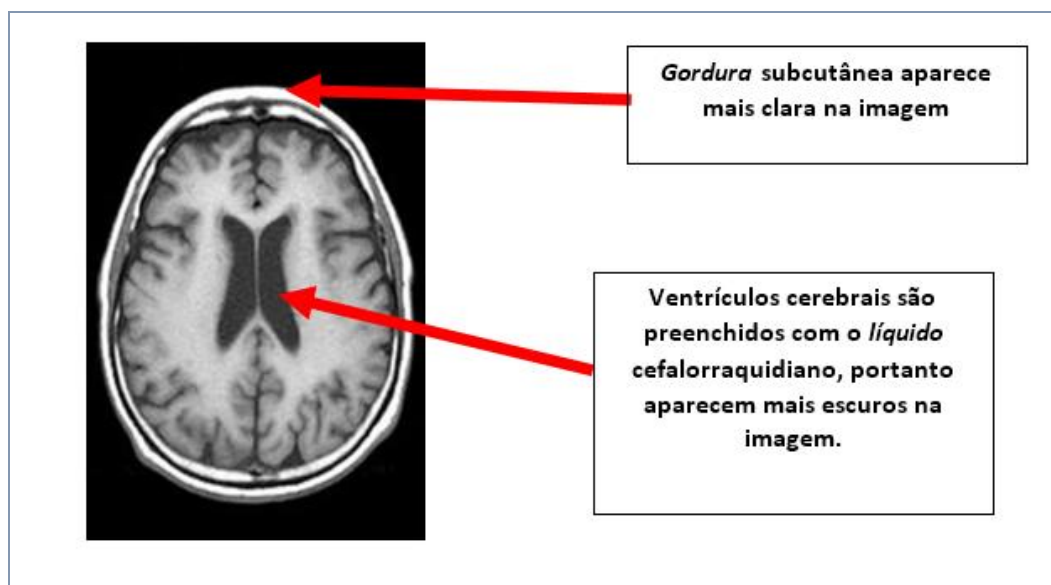


Figura 49 – Imagem ponderada em T_1

Fonte: Elaborada pelo autor

2.7.2. Contraste em T_2

Observe o gráfico da figura 50, que mostra novamente gordura (vermelho) e água (azul). Sabemos que seus tempos de relaxação transversal (T_2) são diferentes.

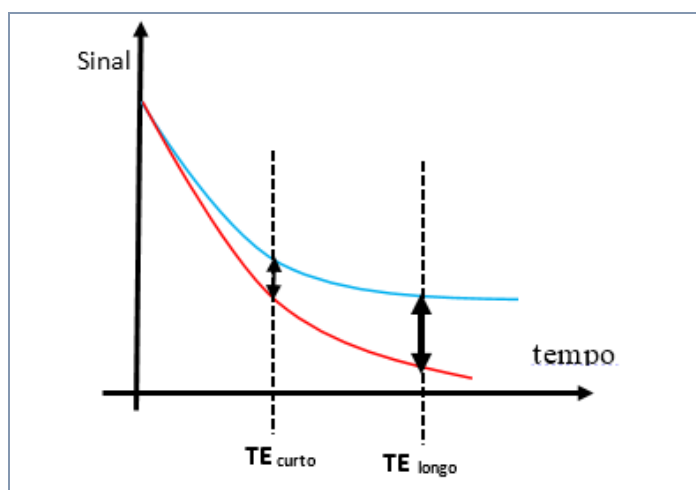


Figura 50 – Contraste T_2 entre água e gordura

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando o gráfico, percebemos que existe um contraste maior entre a gordura (vermelho) e a água (azul) para um TE longo. Então, a gordura aparece clara (mas, menos clara que em T_1) e a água aparece brilhante, conforme pode ser visualizado na figura 51.

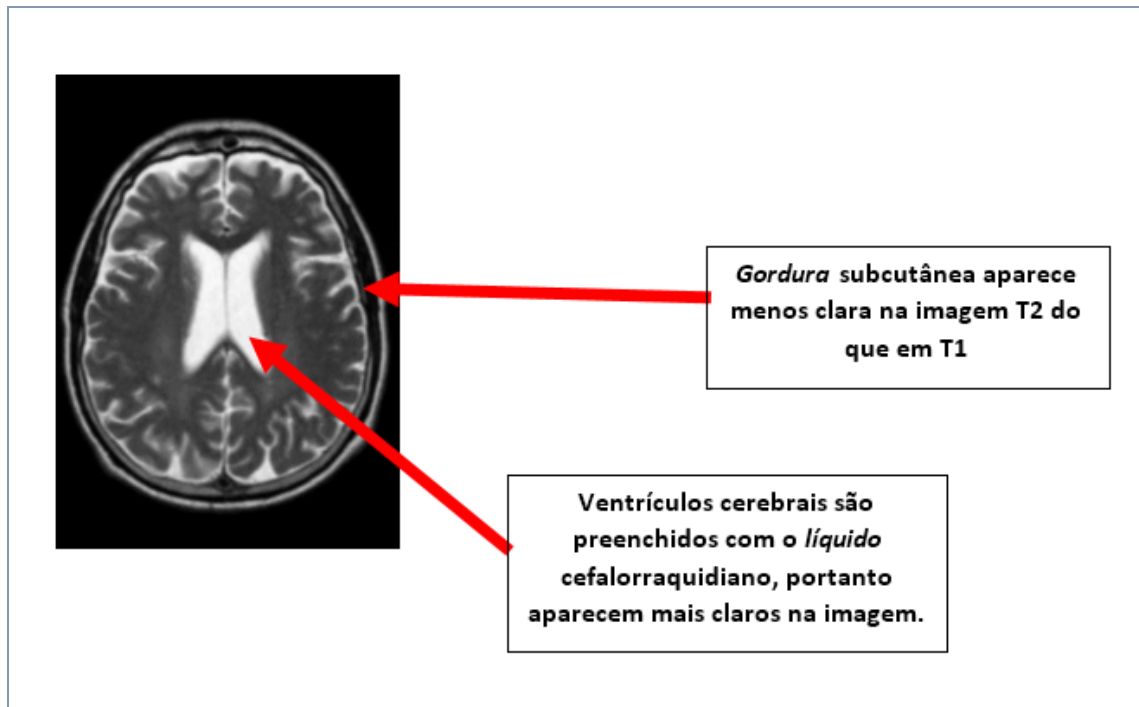


Figura 51 – Imagem ponderada em T2

Fonte: Elaborada pelo autor

Outro fator de contraste é a densidade de prótons (DP). Se considerarmos volumes iguais de duas substâncias diferentes, aquela que tiver a maior densidade de prótons possui o maior vetor magnetização transversal e, portanto, induz um sinal maior e mostram-se claras em uma imagem por contraste por densidade protônica. Logicamente, tecidos com baixa densidade protônica apresentam-se escuros. Para conseguirmos isso, devemos eliminar as ponderações T1 e T2, aumentando TR e diminuindo TE.

No quadro 5 mostramos detalhes de uma simulação de uma máquina de RMN.

Quadro 5 - Simulador de um aparelho de RMN

Simulação	Aparelho de imagem por Ressonância Magnética
Fenômeno	Ressonância Magnética
Sítio na Web	http://www.iacionline.net/ScannerDemo/MRISimulator.html
Autor	The institute for advanced clinical imaging
Idioma	Inglês
Configurações básicas Necessárias	Java
Livre?	Sim
Interativo?	Sim
Descrição	Esta animação simula um aparelho de Ressonância Magnética. Nesta simulação você seleciona a parte do corpo que será analisada e o plano de corte: axial, sagital e coronal. A imagem surge em tempo real no computador da máquina. A máquina ainda simula o ruído característico da máquina.

Fonte: Conf. IACI, s.d.

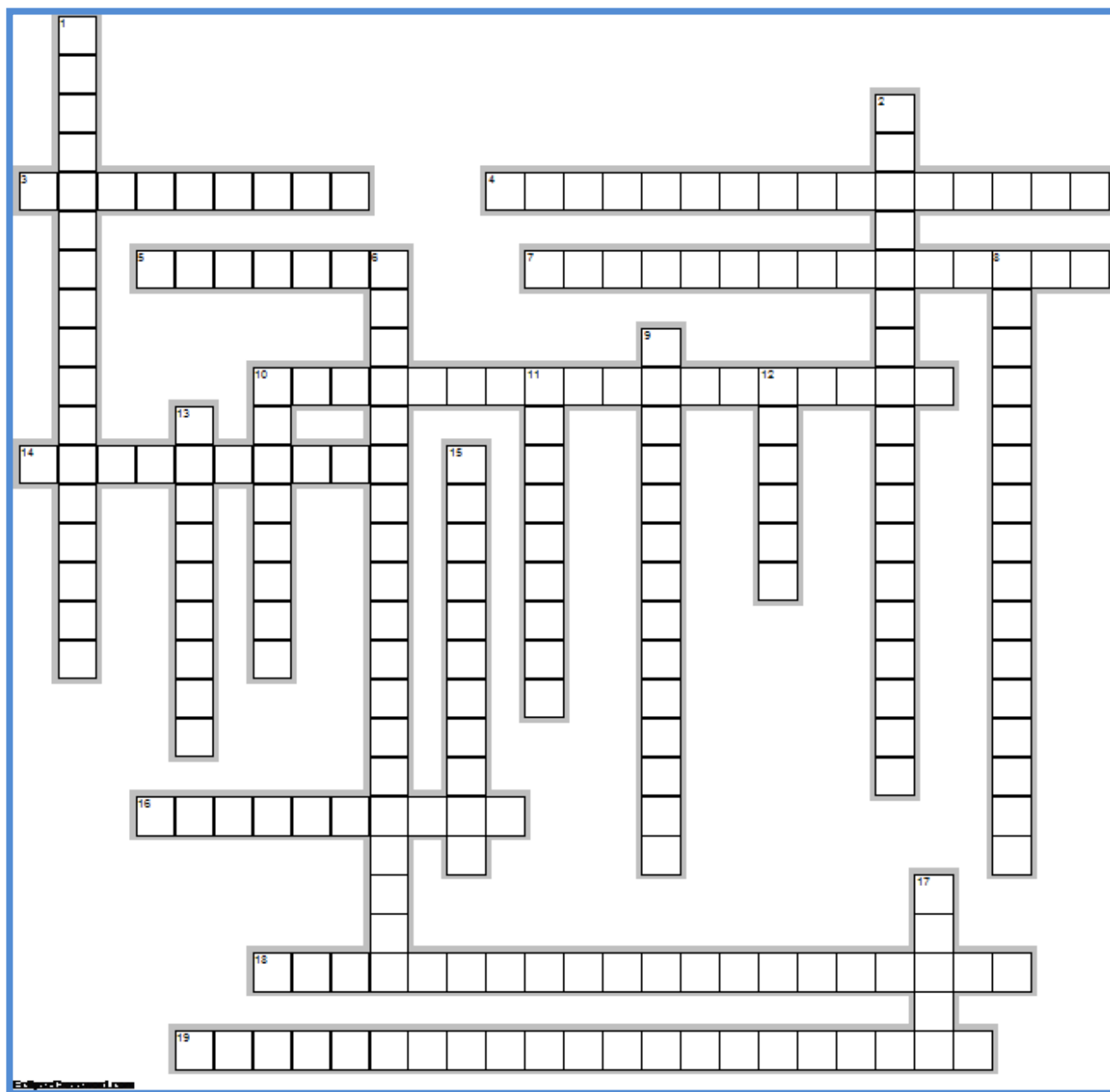
A figura 52 mostra detalhes da tela principal do programa que simula um exame de RMN.



Figura 52 – Simulador de um aparelho de RMN

Fonte: IACI, s.d.

APÊNDICE 3 - CRUZADINHA DA RESSONÂNCIA MAGNÉTICA



HORIZONTAIS

3. Discutir com o grupo a aparência da água e da gordura nos exames T1 e T2. Após a discussão, responda: Qual a aparência da gordura no exame T1?
4. Discutir com o grupo sobre sequências de pulsos, que é parte integral do aprendizado da RM e, em seguida, responder o nome dado ao tempo entre dois pulsos de 90° .
5. Com base na discussão feita no item 3, responda: Quem tem aparência cinza no exame T1?
7. Discutir com o grupo sobre o espectro eletromagnético, sobre as radiações ionizantes, seus efeitos sobre as células do corpo humano. A radiação utilizada no exame de RM é ionizante? Em que parte do espectro eletromagnético ela se situa?
10. Discutir com o grupo sobre a equação de Larmor e qual a sua importância para o estudo da RM. Como se denomina a constante de proporcionalidade desta equação?
14. Ainda com relação à discussão do item 3, como é o sinal dos líquidos no exame T2?
16. Discutir com o grupo qual o elemento mais abundante da natureza e importante para a Ressonância Magnética?
 - Discutir com o grupo o que acontece com os spins logo após desligar a aplicação do pulso e, em seguida, responda os itens 18 e 19:
18. Qual o fenômeno descrito por um parâmetro conhecido como T1?
19. Qual o fenômeno descrito por um parâmetro conhecido como T2?

VERTICAIS

1. Qual grandeza representa o efeito resultante do alinhamento paralelo e antiparalelo dos spins ao campo magnético principal do aparelho de Ressonância Magnética?
2. Com base na discussão feita no item 10 da cruzadinha horizontal, como denomina-se a frequência que os spins do hidrogênio apresentam quando ligamos o campo magnético principal do aparelho de Ressonância Magnética?
6. Discutir com o grupo sobre o que uma carga elétrica em repouso cria em torno de si e o que ela cria quando se desloca em linha reta com velocidade constante. O que ela irá produzir se for acelerada?
8. Com base em seus conhecimentos prévios, que grandeza surge quando um ímã se aproxima de uma espira fechada? Explique-a para o grupo.
9. Ainda com base na discussão feita no item 10 da cruzadinha horizontal, que grandeza é proporcional à frequência na equação de Larmor?
10. Com base na discussão feita no item 7, qual é a mais ionizante das radiações.
11. Com relação à discussão feita nos itens 18 e 19 da cruzadinha horizontal, qual fenômeno se dá logo após o desligamento da incidência de energia, quando os spins, que foram promovidos ao estado de alta energia, voltam ao estado de mais baixa energia?
12. Ainda com respeito à discussão feita no item 3 da cruzadinha horizontal, qual a aparência dos líquidos no exame T1?
13. Com base nos seus conhecimentos prévios, qual o nome do movimento que um giroscópio pode apresentar quando está girando?
15. Com base nos seus conhecimentos prévios, que fenômeno ocorre quando incidimos uma onda em um sistema, de tal modo que a frequência da onda seja igual à sua frequência natural de vibração?
17. Com base nos seus conhecimentos prévios, qual a unidade de campo magnético?

REFERÊNCIAS

DELIZOICOV, D. **Conhecimento, tensões e transições**. 1991. 214 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

FAUSTAD, Paul. **Circuit**. s.d. Disponível em: <http://www.falstad.com/circuit/e-cap.html>. Acesso em: 3 mai. 2015.

HALLIDAY, David; RESNICK, F.; WALKER, J. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Editora: LTC, 2009a.

HALLIDAY, David; RESNICK, F.; WALKER, J. **Óptica e Física Moderna**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009b.

HARRISON, David M. **Precession of a spinning top**. 2005. Disponível em: <http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/Flash/ClassMechanics/Precession/Precession.html>. Acesso em: 5 abr. 2015.

HEWITT, S. K.; DONALDSON, I. J.; LOVELL S.C.; DELNERI, D. Sequencing and Characterisation of Rearrangements in Three *S. pastorianus* Strains Reveals the Presence of Chimeric Genes and Gives Evidence of Breakpoint Reuse. **PLoS One**, v. 9, n.3, 2014. Disponível em: <http://www.yeastgenome.org/reference/S000175216/overview>. Acesso em: 13 abr. 2015.

IACI. **MRI Simulator**. s.d. Disponível em: <http://www.iacionline.net/ScannerDemo/MRISimulator.html>. Acesso em: 10 ago. 2015.

OLIVEIRA, Genilson A. de; BORDUQUI, Thiago. **Física da Ressonância Magnética**. Universidade Católica de Brasília, 2012.

REDIT. **Imagem de ressonância magnética com e sem contraste**. Disponível em: <http://3.bp.blogspot.com/-ajh4OqFAGI8/VOJHsuicvII/AAAAAAAAAAwo/56UC8OtasU0/s1600/ressonancia.png>. Acesso em 3 mar. 2015.

TIPLER, Paul Allan. MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros**. Volume 2: Eletricidade e magnetismo. Trad. Fernando Ribeiro da Silva e Mauro Esperanza Neto. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIVERSITY OF COLORADO. **Lei de Faraday**. 2014. Disponível em: https://phet.colorado.edu/sims/faradays-law/faradays-law_pt_BR.html. Acesso em: 21 abr. 2015.

WEISHAUPT, Dominik , KÖCHLI, Victor D. , MARINCEK, Borut . How **Does MRI Work?** An Introduction to the Physics and Function of Magnetic Resonance Imaging. New York, NY: Springer-Verlag, 2006. Disponível em: <http://pubs.rsna.org/doi/full/10.1148/radiol.2463072568>. Acesso em 15 abr. 2015.

WESTBROOK, Catherine; ROTH, Caroline Kaut; TALBOT, John. **Ressonância Magnética:** aplicações práticas. Trad. Mariângela Vidal Sampaio Fernandes. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2013.

LEITURAS SUGERIDAS

ANGOTTI, J. A. **Solução alternativa para a formação de professores de ciências**: um projeto educacional desenvolvido na Guiné-Bissau. 1982. Dissertação (Mestrado). São Paulo - Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo (FEUSP), São Paulo, 1982.

BENEDETTI FILHO, Edemar; FIORUCCI, Antônio Rogério; BENEDETTI, Luzia Pires dos Santos; CRAVEIRO, Jéssica Alves. Palavras Cruzadas como recurso didático no ensino de teoria atômica. **Química nova na escola**, v. 31, n.2, maio, 2009.

BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. **PCN+ Ensino Médio. Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais**. Brasília: MEC-SEMTEC, 2002.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Fundamental. **Parâmetros Curriculares Nacionais**: terceiro e quarto ciclos do ensino fundamental. Brasília: MEC: SEF, 1998.

BRETONES, P. S. (Org.). **Jogos para o Ensino de Astronomia**. 2.ed. Campinas: Átomo, 2014.

CAMPOS, Nilton. **Ressonância magnética**. 2011. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/workcientifica/ressonancia-magnetica>. Acesso em: 2 jul. de 2015.

CARVALHO. Anna Maria Pessoa de; Gonçalves. Maria Elisa Resende. Formação continuada de professores: o vídeo como tecnologia facilitadora da reflexão. **Cad. Pesquisa**, n.111, São Paulo, Dez., 2000.

CHRYSIKOPOULOS, Haris S. **Clinical MR imaging and physics**. London: Ed. Springer, 2009.

COLORADO. **Faradays laws**. 2014. Disponível: http://phet.colorado.edu/sims/faradays-law/faradays-law_en.html. Acesso em: julho de 2015.

CORSO, Gilberto. Os conteúdos das disciplinas de biofísica e física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol.31, n.2, p.1-4, 2009.

COSTA. I. **Novas Tecnologias e aprendizagem**. 2 ed. Rio de Janeiro: Wak Editora, 2014

COVOLAN, J. et al. Ressonância Magnética funcional: as funções do cérebro reveladas por spins nucleares. **Cienc. Cult.** v.56, n.1. São Paulo Jan./Mar, 2004.

DELIZOICOV, D. **Problemas e problematizações**. In: PIETROCOLA, M. (Org.). Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2001. p. 125-150.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M. M. **Ensino de ciências: fundamentos e métodos**. São Paulo: Cortez, 2002.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M. M.. Ensino de ciências: fundamentos e métodos. 3.ed. São Paulo: Cortez, 2011.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J.A. **Metodologia do ensino de ciências**. São Paulo: Cortez, 1994.

DELIZOICOV, Demétrio; ANGOTTI, José André. **Metodologia do ensino de ciências**. São Paulo: Cortez, 2000 (Coleção Magistério – 2º grau – Série Formação do Professor).

DURÁN, José Enrique Rodas. **Biofísica: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

FERNANDES. Simone Aparecida, FILGUEIRA. Valmária Gomes. Porque ensinar e por que Estudar Física? O que Pensam os Futuros Professores e os Estudantes do Ensino Médio? 3, Simpósio Nacional de Ensino de Física. **Anais...** São Paulo, SP, 2009.

FERRARI, P. C. **Temas contemporâneos na formação docente à distância: Uma introdução a teoria do caos**. Tese de doutorado em Educação Científica e Tecnológica, UFSC- Florianópolis, 2008.

FREIRE, P. **Pedagogia da Autonomia: saberes necessários à prática educativa**. São Paulo: Paz e Terra, 2001.

FREIRE, Paulo. **Ação cultural para a liberdade e outros escritos**. 14 ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2011.

FREIRE, Paulo. **Educação como prática da liberdade**. 30. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2007.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia do oprimido**. 42 ed. São Paulo: Paz e Terra, 2005.

GARCIA, Eduardo Alfonso Cadavid. **Biofísica**. São Paulo, SP: Sarvier, 1998. 387 p.

GASPAR, Alberto. **Atividades Experimentais no ensino de física: uma nova visão baseada na teoria de Vigotski**. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2014.

GOMES, Gerson G.; PIETROCOLA, Maurício. O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, 2004.

HAGE, Maria Cristina Ferrarini Nunes Soares; IWASAKI. Masao. Imagem por ressonância magnética: princípios básicos. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.39, n.4, p.1287-1295, jul, 2009.

HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos de Física**. Vol. 3. 8 ed. Editora LTC, 2009.

HECKLER, V.; SARAIVA, M. F. O.; OLIVEIRA FILHO, K. S. Uso de simuladores, imagens e animações como ferramentas auxiliares no ensino/aprendizagem de óptica. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, São Paulo, v. 29, n. 2, 2007.

HENEINE, I. F. **Biofísica básica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 1996.

HEWITT, Paul G. *et al.* **Conceptual Integrated Science**. London: Ed. Pearson, 2014.

HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. Porto Alegre: Editora Bookman, 2011.

LUCENA, Wellington dos Reis. **Ressonância Magnética**: Introdução teórica e aplicações. Universidade Federal do ABC (UFABC), 2011.

LÜDKE, Menga; ANDRÉ, Marli. **Pesquisa em Educação**: abordagens qualitativas. São Paulo: EPU, 1986.

MACEDO, Josué Antunes de; DICKMAN, Adriana Gomes; ANDRADE, Isabela Silva Faleiro de. Simulações computacionais como ferramentas para o ensino de conceitos básicos de eletricidade+. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 29, n. especial 1: p. 562-613, set. 2012.

MAZZOLA, Alessandro A. Ressonância Magnética: princípios de formação de imagens e aplicações em imagem funcional. **Revista Brasileira de Física Médica**. V. 3, n.1, p.117-129, 2009.

MOURÃO JÚNIOR, Carlos Alberto; ABRAMOV, Dimitri Marques. **Biofísica essencial**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012.

MUNHOZ, Antonio Siemsen. **Objetos de aprendizagem**. Curitiba: InterSaberes, 2013.

OKUNO, Emico; CALDAS, Iberê Luiz; CHOW, Cecil. **Física para ciências biológicas e médicas**. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982.

PARISOTO, Mara Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio; MORO, José Túlio. Subsúncos para a física aplicada à medicina, no contexto do ensino de Física. **Ensino, Saúde e Ambiente**. v.5, n.1, p. 43-62, abr.. 2012.

PAVIANI, Neires Maria Soldatelli; FONTANA, Niura Maria. Oficinas pedagógicas: relato de uma experiência. **Conjectura**, v. 14, n.2, maio/ago, p.77-88, 2009.

ROSA, Daniela Corrêa da; ROSSETTO, Gislaine A. R. da Silva; TERRAZZAN, Eduardo Adolfo, Educação em Ciências na pré-escola: Implicações para a formação de professores. **Revista Educação**, v. 28, n.1, p.85-93, 2003.

SANTOS, G.; ALVES, L.; MORET, M. Modellus: Animações interativas mediando a aprendizagem significativa dos conceitos de Física no Ensino Médio. **Sitientibus**, v. 5, p. 56-67, 2006. (Série Ciências Físicas).

SILVA, André Coelho. **Leitura sobre ressonância magnética nuclear em aulas de física do ensino médio**. Campinas, SP: [s.e], 2013.

SOARES, M. H. F. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. O ludo como um jogo para discutir conceitos em termoquímica. **Química Nova na Escola**, n.23, p.27-31, 2006.

SOARES, Sabrina; DE PAULO, Iramaia Cabral; MOREIRA, Marco Antonio. Física. **Textos de apoio ao professor de Física**. v.19 n.4, 2008.

TECHY, Antonio. A Importância da Fotografia na Medicina. **Revista Brasileira de Reumatologia**, v. 46, n.3, mai/jun, p. 207-209, 2006.