

A relevância do estudo de ressonância magnética nuclear (RMN) e funcional (RMf) para o ensino de física

Francisco José de Araújo Menezes da Silva
Anderson Gomes Vieira*
Universidade Estadual do Piauí,
Piripiri, PI, Brasil.

RESUMO

A sociedade está cada vez mais moderna e, conseqüentemente, mais complexa, o que leva a escola a ter um papel bastante relevante na formação de cidadãos capazes de acompanhá-la. Uma das tecnologias atuais que se enquadra em tal contexto é a técnica de diagnóstico por imagem que explora o fenômeno de ressonância magnética nuclear (RM) e o aprimoramento dessa técnica, denominado ressonância magnética funcional (RMf). Assim, por meio deste trabalho, foi possível apresentar a importância do estudo e da aplicação da RMN e RMf no ensino de física, destacando o rico contexto histórico de evolução desse estudo até sua aplicação na medicina, além de mostrar, por meio de mapa conceitual, os principais conceitos abordados na RMN e na RMf, capazes de enriquecer ainda mais o estudo de física no ensino básico, alinhando com as legislações da educação brasileira.

Palavras-chave: RMf; ensino de física; interdisciplinaridade

1. Introdução

A física pode ser aplicada nas mais diversas áreas do conhecimento, por isso é importante que os estudantes compreendam conceitos de tal ciência, sendo capazes de relacioná-los com situações cotidianas. Na medicina, essa relação existe há muitos anos, ganhando grande destaque a partir do século XX, com a aplicação das radiações ionizantes em sistemas biológicos.

Atualmente, um dos métodos de diagnóstico por imagem mais comum, a imagem por ressonância magnética (IRM), sustenta-se em pilares da física quântica. De acordo com Plewes e Kucharzyk [1], essa tecnologia oferece excelente contraste de alta resolução espacial de tecidos moles, explorando propriedades magnéticas dos núcleos atômicos.

Uma técnica específica e relevante de IRM atual é a ressonância magnética funcional (RMf). Menezes e cols. [2] afirmam que tal técnica “produz imagens detalhadas do cérebro mostrando a localização de um sinal associado à atividade cerebral”. Trata-se de uma das ferramentas mais importantes da neurociência, pois permite estudar respostas hemodinâmicas do cérebro, ou seja, relacionadas à circulação sanguínea nos vasos cerebrais a partir de diferentes atividades neurológicas, como movimentos dos polegares ou mesmo de reações emocionais e julgamentos morais, além de estudos ligados a funções cognitivas, como linguagem e memória [3,4].

Diante disso, o estudo dessas técnicas atuais, modernas e tão relevantes

no meio científico e medicinal pode enriquecer o ensino de física. De acordo com Silva e Carvalho [5], a abordagem de Ciências Naturais no ensino básico se torna necessária para a contribuição na formação de cidadãos responsáveis, promovendo uma educação científica e tecnológica. Dessa maneira, busca-se colaborar no desenvolvimento da capacidade do indivíduo raciocinar e discutir sobre problemas científicos e socio-científicos, tornando-se, assim, atualizado com a sociedade moderna e contemporânea. Para esse estudo, é importante que haja interdisciplinaridade dentro do ambiente escolar, como orientado pela Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB) [6], por meio da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) [7] e dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) [8], com o objetivo de relacionar os conhecimentos de várias áreas – como física, química e biologia – para a compreensão de um problema ou determinado fenômeno.

O estudo dessas técnicas atuais, modernas e tão relevantes no meio científico e medicinal pode enriquecer o ensino de física

Portanto, este estudo permitiu levantar as vantagens proporcionadas pela física aplicada à medicina, com ênfase em imagens de ressonância magnética nuclear, destacando a técnica de ressonância magnética funcional, com o intuito de englobar tal conhecimento na realidade do ensino de física, o que contribui, assim, para a formação de cidadãos atualizados e com conhecimentos mínimos sobre a sociedade moderna que os rodeiam.

Portanto, este estudo permitiu levantar as vantagens proporcionadas pela física aplicada à medicina, com ênfase em imagens de ressonância magnética nuclear, destacando a técnica de ressonância magnética funcional, com o intuito de englobar tal conhecimento na realidade do ensino de física, o que contribui, assim, para a formação de cidadãos atualizados e com conhecimentos mínimos sobre a sociedade moderna que os rodeiam.

2. História da física de RM e RMf

Os estudos dos átomos desenvolvidos na física moderna do século XX

*Autor de correspondência. E-mail: andersongomesv@gmail.com.

serviram de orientação para a observação e compreensão do fenômeno de ressonância magnética nuclear (RM). Pode-se dizer que o trabalho publicado em 1897 por Pieter Zeeman (1865-1943) [9], no qual confirmou que um campo magnético aplicado tem influência sobre as linhas espectrais de um átomo, que, no caso em questão, foi o átomo de sódio (Na), é um dos trabalhos pioneiros para o estudo da RM. Ainda em 1897, Joseph Larmor (1857-1942) publicou um estudo desenvolvido em conexão com o fenômeno de Zeeman, ajudando a esclarecer a natureza das vibrações elétricas na molécula, sendo ele o primeiro a explicar o efeito de divisão do espectro atômico em várias linhas devido a um campo magnético, postulando que os elétrons realizam movimento de precessão quando estão sujeitos a esse campo [10]. A frequência de tal movimento é de grande importância no estudo de ressonância magnética, sendo denominada de frequência de Larmor [11].

No entanto, ainda seriam necessários muitos estudos para uma explicação satisfatória do fenômeno observado por Zeeman, podendo destacar dois trabalhos importantes desenvolvidos na década de 1920: I – Walther Gerlach (1899-1979) e Otto Stern (1888-1969) realizaram um experimento que consistiu de um campo magnético não homogêneo com gradiente linear que foi empregado para testar a quantização espacial. Esse experimento foi importante anos mais tarde para a compreensão do *spin* do elétron, mesmo que inicialmente não tenha tido a finalidade de estudar essa grandeza e tenha resultado em outras interpretações [12]. II – George Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Goudsmit (1902-1978) postularam empiricamente, em 1925, a existência do momento magnético intrínseco do elétron para explicar alguns espectros atômicos. Assim, construía-se cada vez mais a compreensão do fenômeno de ressonância magnética, pois tais estudos demonstraram a natureza quântica do momento magnético e momento angular dos átomos e de seu núcleo [13], explicando diversos outros fenômenos ainda não entendidos na época.

Na década de 1930, buscando meios de determinar e medir o *spin* e o mo-

mento magnético nuclear, Isidor Isaac Rabi (1898-1988) contribuiu enormemente para a física de ressonância magnética, principalmente devido ao experimento apresentado na Fig. 1. Seu objetivo era medir o momento magnético nuclear com alta precisão aplicando, perpendicularmente, um campo magnético oscilante a um campo constante com intensidade muito maior, no qual atravessa um feixe de moléculas. Assim, o campo mais intenso dissocia os *spins* nucleares um do outro e da rotação molecular, enquanto o campo oscilante reorienta estes e o momento magnético quando a frequência de oscilação desse campo estiver próximo da frequência de Larmor, explorando pela primeira vez o fenômeno de ressonância magnética nuclear [14]. Na Fig. 1, as linhas sólidas representam os caminhos de duas moléculas com diferentes velocidades e momentos magnéticos, que não são alterados durante a passagem pelo aparelho. As linhas pontilhadas indicam os caminhos de duas moléculas que têm os momentos magnéticos alterados na região do C devido à presença de um ímã. De maneira resumida, determinando a frequência de Larmor, que foi possível em razão do fenômeno de ressonância magnética, pôde-se medir o momento magnético das diferentes partículas.

Até meados do século XX, muitos estudos e experimentos, como os já mencionados, foram realizados e serviram de conhecimento de base para o surgimento da física de ressonância magnética com as pesquisas independentes de Felix Bloch (1905-1983) em Stanford e Edward Mills Purcell (1912-1997) em

Harvard, em 1946 [16]. Esses estudiosos mostraram, com base em estudos de matéria condensada, como determinados núcleos atômicos sujeitos a um campo magnético absorvem energia na faixa de radiofrequência e reemitem essa energia durante um processo denominado relaxamento de *spin*, analisando o movimento de precessão induzido dos núcleos estudados [17]. Tal fenômeno é o pilar físico utilizado em imagens obtidas por ressonância magnética.

A primeira descrição do uso de ressonância magnética nuclear na medicina aconteceu somente na década de 1970 por Raymond Damadian, no qual conseguiu discriminar tumores malignos e tecido normal, sendo capaz de diagnosticar o câncer por meio da primeira imagem obtida por essa técnica de parte do corpo humano [18].

Em 1990, Seiji Ogawa observou que o nível de oxigênio no sangue é um agente de contraste natural para a ressonância magnética [19]. Tal trabalho é pioneiro no desenvolvimento da técnica de ressonância magnética funcional (RMf), que é hoje amplamente utilizada para o mapeamento da função cerebral, explorando as características magnéticas da hemoglobina [20]. É importante ressaltar que a pesquisa desenvolvida por Linus Pauling (1901-1994) e Charles Coryell (1912-1971) na década de 1930 tem grande contribuição para a RMf, pois eles investigaram as propriedades magnéticas e estruturais da hemoglobina, verificando que a característica magnética dessa célula sanguínea muda de acordo com o seu estado de oxigenação.

Sendo assim, atualmente a RMf é uma técnica fundamental para o estudo e a investigação de atividades cerebrais por meio do acoplamento entre o fluxo sanguíneo cerebral e a atividade neuronal, contribuindo enormemente para a

A primeira descrição do uso de ressonância magnética nuclear na medicina aconteceu somente na década de 1970 por Raymond Damadian

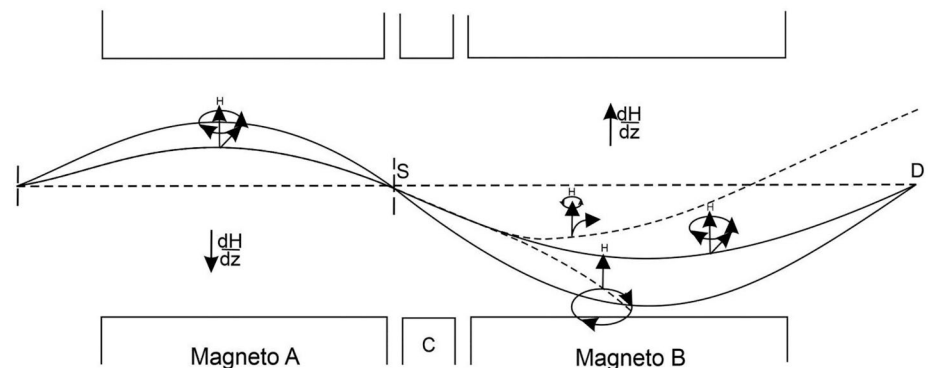


Figura 1 - Experimento de Rabi - Caminhos de moléculas. Fonte: adaptado da Ref. [15].

biologia molecular, neurofisiologia e neuroanatomia, além de ser um desenvolvimento muito importante na ressonância magnética.

3. Spin nuclear

Em termos da mecânica quântica, partículas elementares, como os elétrons, carregam um momento angular intrínseco ou *spin*, sendo este o vetor **S**. Tal momento angular foi observado pela primeira vez no experimento de Stern-Gerlach realizado na década de 1920, justificando a quantização espacial. Porém, na época em que aconteceu o experimento, a interpretação dos resultados foi outra, pois ainda não se tinha conhecimento sobre o *spin* [12]. Este, por sua vez, é quantizado, ou seja, só pode assumir determinados valores. Para o elétron em um átomo, o módulo desse vetor é dado por:

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar, \quad (1)$$

onde *s* é o número quântico de *spin* e \hbar é a constante de Planck normalizada.

É importante destacar que cada partícula elementar tem um valor específico e imutável de *s*, sendo 1/2 para os elétrons. Certamente na mecânica quântica este é o caso mais importante, pois representa o *spin* intrínseco às partículas que compõem a matéria comum, sendo elas os prótons, nêutrons e elétrons, além de todos os quarks e léptons [21]. Vale ressaltar, ainda, que compreender o *spin* 1/2 significa também tornar mais fácil o entendimento da resolução do formalismo de *spin* maior.

No experimento de Stern-Gerlach, foi utilizado o átomo de prata, um elemento com apenas um elétron de valência, ou seja, aquele contido no nível atômico mais externo. Logo, a interação observada do campo magnético com o feixe emitido foi com tal elétron. Assim, pode-se concordar com Sakurai [22] ao afirmar que o átomo de prata como um todo possui momento magnético igual ao momento magnético de *spin* do elétron de valência, portanto existe uma relação de proporcionalidade:

$$\boldsymbol{\mu} = \gamma\mathbf{S}, \quad (2)$$

onde $\boldsymbol{\mu}$ é o momento magnético e γ é a constante de proporcionalidade (espe-

cífica de cada elemento) denominada de razão giromagnética, que, por sua vez, depende da partícula analisada [23]. O momento magnético calculado na equação anterior é intrínseco à partícula, sendo consequência da existência do *spin*. Trata-se do acoplamento de $\boldsymbol{\mu}$ e **S**. Portanto, o momento magnético também é quantizado.

Quando sujeitas a um campo magnético (**B**), partículas como prótons e elétrons tendem a se orientar com o **B** externo, experimentando um torque, devido ao momento magnético, que busca alinhar essas partículas paralelamente com o campo [21]. A hamiltoniana (*H*) associada a esse torque é:

$$H = -\boldsymbol{\mu}\cdot\mathbf{B} = -\gamma\mathbf{S}\cdot\mathbf{B}. \quad (3)$$

Da equação anterior, é possível inferir que a hamiltoniana tem valor máximo quando o momento está antiparalelo ao campo e valor mínimo quando o momento está paralelo ao campo, em razão do fato de ser um produto escalar. Essa característica é de grande importância na IRM, pois os sinais captados para gerar a imagem dessa técnica diagnóstica resultam dos prótons alinhados antiparalelamente ao campo magnético [24].

4. Aspectos da ressonância magnética

Em termos clássicos, o fenômeno de ressonância ocorre com a interação entre dois sistemas distintos que apresentam a mesma frequência de vibração. É importante destacar que todo sistema apresenta frequências de vibrações naturais, podendo entrar em ressonância com outro. Um bom exemplo de sistemas em ressonância é o de uma taça de vidro quebrando por causa de uma onda sonora. Isso ocorre porque a onda em questão tem frequência igual à natural da taça de vidro, fazendo com que, durante a interação, a amplitude de vibração da taça seja máxima.

Em termos atômicos, tem-se a ressonância magnética nuclear, que também está relacionada com a interação entre dois sistemas vibrantes, porém explora-se o momento magnético e o *spin* dos núcleos atômicos quando estes estão sujeitos a um intenso campo mag-

nético, pois é observado um movimento de precessão do núcleo [20].

A ressonância magnética nuclear ocorre, portanto, aplicando-se um breve pulso de radiofrequência (RF) a uma determinada amostra, como um sistema biológico, sujeita a um intenso campo magnético B_0 onde RF e B_0 são perpendiculares. Assim, o núcleo é capaz de absorver energia eletromagnética do pulso de RF transmitido, atingindo o estado excitado por meio da ressonância. Depois, quando o núcleo retorna ao estado fundamental, reemite essa energia, que será captada pela bobina do aparato, sendo possível gerar uma imagem. É importante destacar que apenas núcleos com número ímpar de nêutrons ou de prótons exibem frequência de ressonância magnética nuclear, pois apresentam *spin* diferente de zero [20]. No estudo de RM, o núcleo atômico de interesse é quase sempre o do átomo de hidrogênio, pois contém apenas um próton [24].

A precessão de um dipolo magnético como o núcleo do hidrogênio ocorre, em termos clássicos, devido ao torque exercido pelo campo magnético, que tende a torná-lo alinhado a B_0 [25]. Contudo, como o núcleo apresenta *spin*, ele oscila em torno das linhas de força do campo, realizando o movimento de precessão [24]. Vale destacar que esse movimento ocorre na frequência de precessão (ω_0), que é proporcional ao módulo do vetor B_0 . Tal frequência é denominada também de frequência de Larmor e representa a frequência de ressonância [20], sendo determinado por:

$$\omega_0 = \gamma B_0. \quad (4)$$

Quando *n* dipolos magnéticos estão sujeitos a um campo magnético, observa-se que, em equilíbrio, a diferença entre o número de *spins* paralelos e antiparalelos é de aproximadamente 1% [20]. Assim, surge uma magnetização resultante fraca, representada por **M**, alinhada com B_0 . A Fig. 2A ilustra os *spins* arranjados de forma aleatória instantes antes da aplicação do campo magnético \vec{B}_0 , enquanto a Fig. 2B ilustra didaticamente a magnetização resultante de cinco *spins*, onde quatro estão alinhados paralelamente com B_0 e três não estão. Assim, a soma vetorial dos *spins* resulta em um vetor no eixo z, ou eixo longitudinal, paralelo ao campo.

A magnetização pode ser descrita

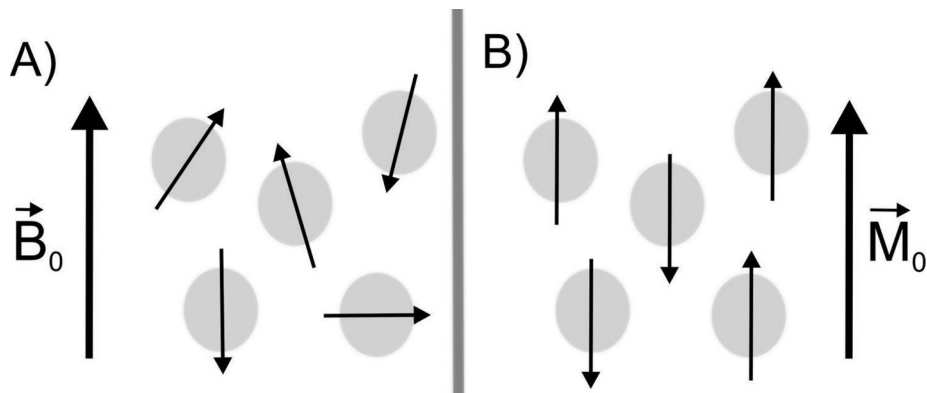


Figura 2 - A) *Spins* com direções aleatórias e B) *spins* alinhados com B_0 gerando a magnetização resultante M_0 . Fonte: adaptado da Ref. [26].

por uma evolução temporal como:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma(\mathbf{M} \times \mathbf{B}_0). \quad (5)$$

Logo, \mathbf{M} precessiona em torno do campo aplicado, pois tal vetor é perpendicular à sua própria derivada, que, por sua vez, é perpendicular a B_0 , significando que \mathbf{M} tem módulo constante.

5. Constantes importantes

Após o núcleo atômico entrar em ressonância com o pulso de RF, naturalmente é reemitido energia, que é captada pelo aparato de ressonância magnética para gerar a imagem do sistema analisado, resultando na passagem do núcleo do estado excitado para o fundamental [21]. Isso significa que \mathbf{M} ficará alinhado novamente com B_0 . O tempo para esse alinhamento é tratado como uma das constantes de relaxação do fenômeno de RM, ou seja, uma das constantes de tempo para o equilíbrio energético do núcleo atômico [20]. Nesse caso, é denominado de tempo de relaxação T_1 , de tempo de relaxamento longitudinal ou, ainda, de tempo de relaxamento *spin-rede*.

Outra constante de tempo importante na RM é analisada com o decaimento de \mathbf{M} no plano xy , denominado de plano transversal [24]. O valor de \mathbf{M}

é muito fraco quando comparado com o módulo de B_0 , por isso são usados os pulsos de RF para tornar essa grandeza mensurável. Esse pulso, quando apresenta a frequência de Larmor, interage com \mathbf{M} fazendo com que a magnetização incline em relação a B_0 , pois absorve energia eletromagnética. A Fig. 3 ilustra a inclinação de \mathbf{M} em diferentes angulações. Com o passar do tempo, a energia liberada pela magnetização decai exponencialmente em uma constante de tempo de relaxação denominada T_2 ao voltar para o estado fundamental.

Essas constantes são de grande importância nesse estudo porque podem ser usadas para gerar contrastes nas imagens obtidas por ressonância magnética, visto que cada tecido do corpo humano tem um valor específico para os tempos de relaxação, por exemplo, para o líquido cefalorraquidiano $T_1 \sim 4000$ ms e $T_2 \sim 2000$ ms [24].

As equações das componentes do vetor magnetização são obtidas por meio das equações de Bloch e dependem dos tempos de relaxamento, como apresentado a seguir:

$$M_z = M_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right), \quad (6)$$

$$M_{xy} = M_0 e^{-\frac{t}{T_2}}, \quad (7)$$

onde M_0 é o estado de equilíbrio. Pode-

-se inferir que, quando o intervalo de tempo entre as aplicações do pulso de RF tender ao infinito, a componente longitudinal tenderá ao equilíbrio, enquanto o componente transversal tenderá à zero, como ilustra os gráficos da Fig. 4, no qual foram utilizados os valores de T_1 e T_2 para o líquido cefalorraquidiano.

6. A obtenção da imagem

A imagem obtida por ressonância magnética é resultado de um mapa que descreve a distribuição espacial dos núcleos atômicos, portanto dos *spins* de uma determinada amostra. De acordo com a Ref. [26], o conceito fundamental no estudo de imagens por RM é o de campo magnético espacialmente variável, ou seja, gradiente de campo magnético, introduzido por Lauterbur em 1972. Devido a essa grandeza, os *spins* em diferentes locais da amostra apresentam precessão com diferentes frequências de forma controlada, consequência da equação de Larmor. Assim, ao dividir o sinal de RM em componentes com frequências distintas, podem-se gerar mapas que fornecem informações sobre as características desses núcleos atômicos. Para obtenção de imagens em três dimensões, são necessários três campos gradientes perpendiculares entre si [27].

No aparato de ressonância magnética, existem duas bobinas, sendo uma responsável por enviar os pulsos de RF e a outra por receber os mesmos quando reemitidos pelos núcleos atômicos, para, então, ser gerada uma imagem. Em outras palavras, a bobina receptora mede a mudança da magnetização líquida \mathbf{M} ao longo do tempo, através do mecanismo de acoplamento eletromagnético, conforme regido pela lei de indução de Faraday. Após a magnetização da amostra ser inclinada para o plano transversal, sua precessão na frequência de Larmor varre a bobina receptora, ou seja, emite sinal eletro-

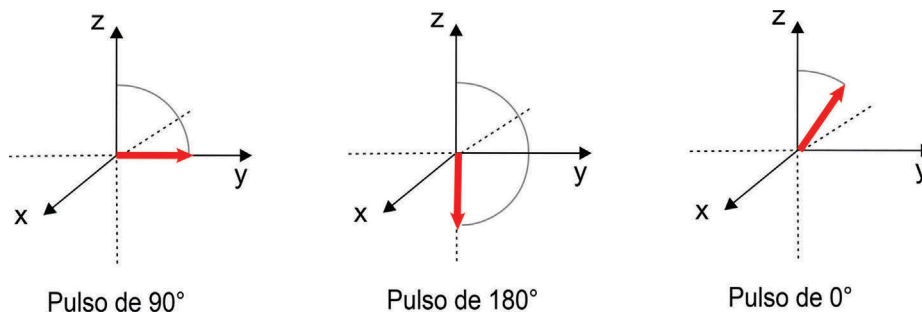


Figura 3 - Inclinação do vetor magnetização provocada por pulsos de RF.

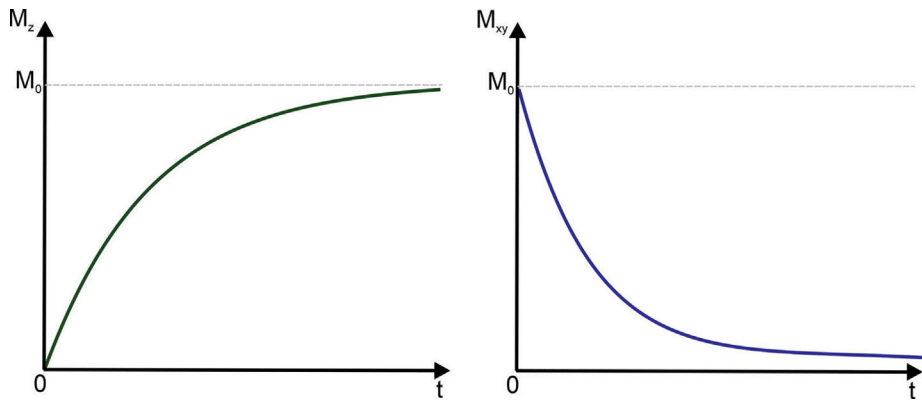


Figura 4 - Retorno da magnetização longitudinal e decaimento da magnetização transversal para o líquido cefalorraquidiano, respectivamente.

magnético, fazendo com que a densidade de fluxo magnético (ϕ) experimentada pela bobina receptora mude com o tempo, induzindo uma fem.

Ademais, no processo de obtenção de imagem, é necessária a codificação espacial através do uso de gradientes de campo magnético para saber exatamente de onde os sinais estão sendo enviados. Um desses gradientes é o de seleção de fatias G_z , que gera “cortes” axiais da amostra, como representado na Fig. 5. Os prótons contidos em cada corte apresentam uma frequência de Larmor característica. Dessa maneira, é possível emitir pulsos de RF com frequência exatamente igual à da região que se deseja obter uma imagem.

Os *spins* dentro da fatia apresentam a mesma fase, por isso se torna necessária a aplicação do gradiente de codificação de fase G_y em um determinado eixo (geralmente no eixo y), responsável por alterar essa característica de forma proporcional à localização do núcleo atômico [24]. Desse modo, os *spins* ficam defasados em cada camada de uma determinada fatia. Por fim, é preciso caracterizar cada ponto dessas camadas, resultando em um mapeamento tridimensional da amostra analisada. Nesse caso, usa-se o gradiente de codificação de frequência G_x no eixo x . Em resumo, o mapeamento é feito, portanto, tornando os *spins* dos prótons de hidrogênio característicos de acordo com suas posições, como ilustra a Fig. 6.

O sinal reemitido pelos *spins* é detectado pela bobina e armazenado em um espaço abstrato do computador denominado espaço K . Este pode ser entendido como uma matriz, onde cada linha é preenchida por um sinal. Portanto, quanto maior a matriz, melhor será a qualidade da imagem gerada, como mostra a Fig. 7. Para decompor a fun-

ção que representa o sinal coletado em suas componentes, sendo elas fase e frequência, aplica-se a Transformada de Fourier. Esta é a mais comum no processamento de sinal e de imagem e é utilizada para transcrever uma função não periódica em outra caracterizada por uma combinação linear de senos e cossenos, empregando a frequência como domínio [28].

7. Ressonância magnética funcional

A RMf é uma técnica de contraste natural nas imagens obtidas por RM que depende do nível de oxigenação sanguínea em uma determinada região cerebral, explorando, assim, o efeito denominado BOLD (*blood oxygen level dependent*). Quando uma determinada atividade é realizada por uma pessoa, podendo ser sensorio-mo-

tor ou cognitiva, partes específicas do cérebro consomem mais quantidade de oxigênio para que estas possam ser efetuadas. Consequentemente, a concentração de deoxihemoglobina¹ em tais regiões aumenta até que um fluxo sanguíneo carregado de oxihemoglobina² chegue, resultando na intensificação do sinal reemitido pelos *spins*, gerando um contraste na imagem resultante.

Devido ao trabalho pioneiro de Ogawa desenvolvido em 1990, pode-se inferir que existe a relação entre o efeito BOLD e o tempo de relaxamento T_2 . A Fig. 8 ilustra a relação entre os tempos de relaxamento T_1 e T_2 com o nível de hemoglobina oxigenada. Observa-se a diminuição de $1/T_2$ com o aumento da oxigenação, isto é, quanto mais hemoglobina desoxigenada estiver presente, menor será o T_2 . Infere-se, ainda, que T_1 não é afetado pelo nível de oxigena-

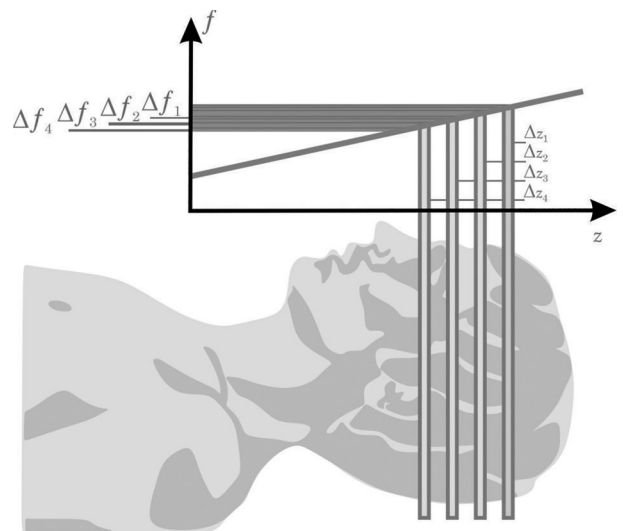


Figura 5 - Aplicação do gradiente de seleção de fatia em uma amostra biológica. A relação entre frequência e posição dos *spins* é linear. Fonte: Ref. [28].

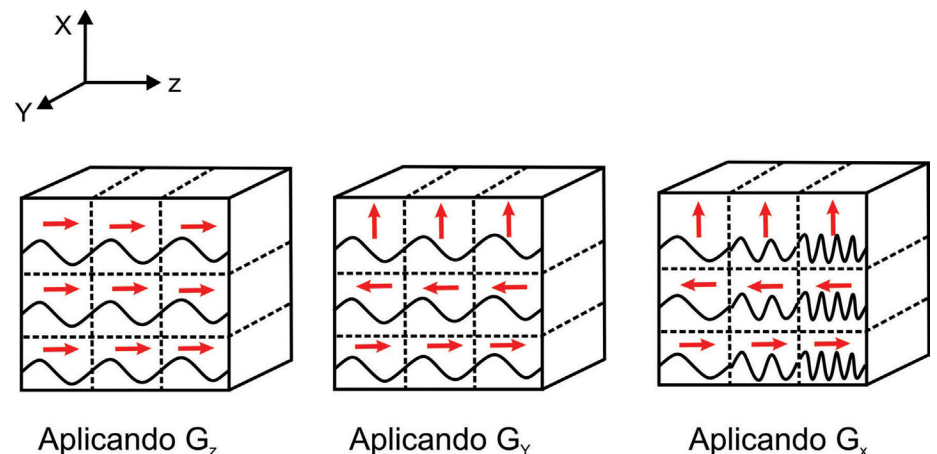


Figura 6 - Aplicação dos gradientes de campo magnético em uma determinada amostra.

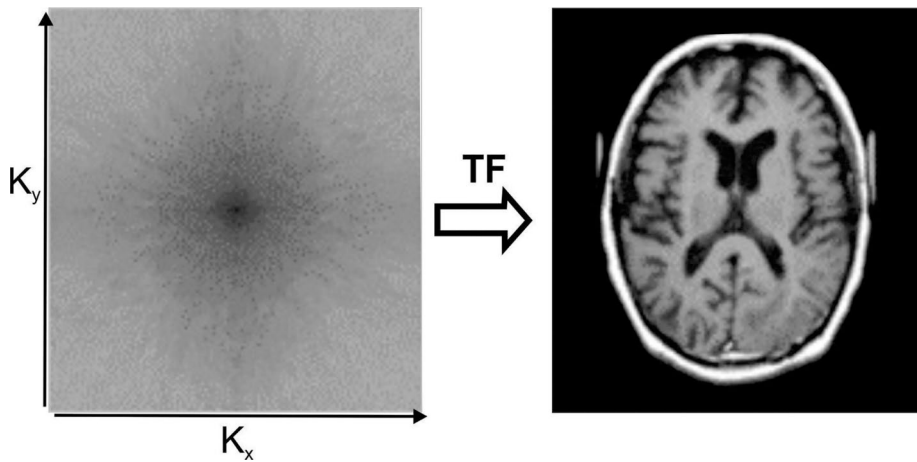


Figura 7 - Na esquerda, tem-se o espaço K e, na direita, a imagem gerada a partir dele com a aplicação da Transformada de Fourier (TF). Fonte: adaptado da Ref. [24].

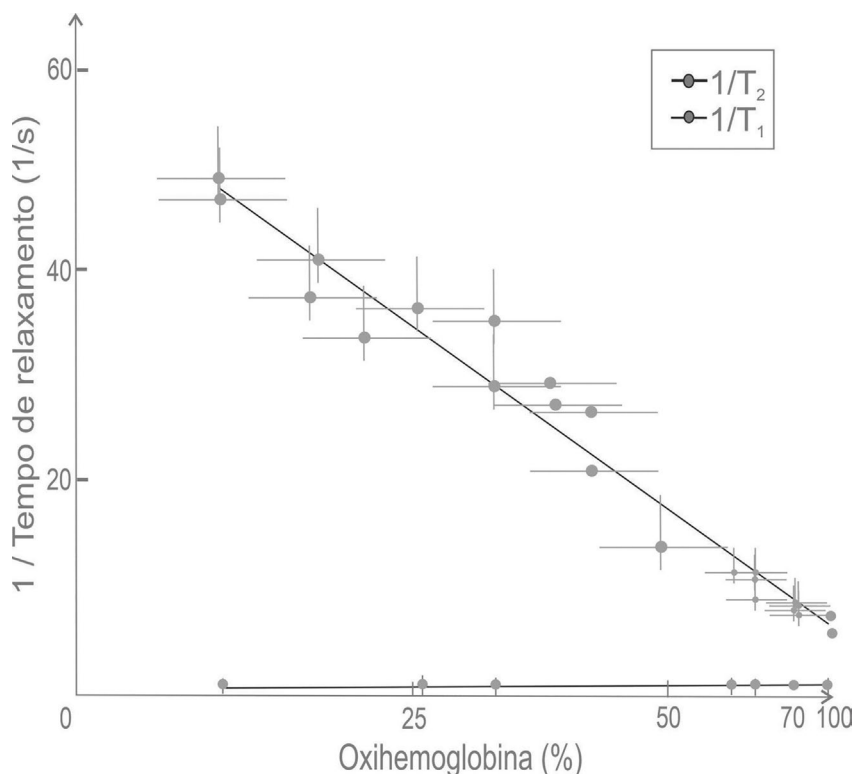


Figura 8 - Efeito da deoxihemoglobina nas constantes de relaxamento da RM. Fonte: adaptado da Ref. [29].

ção do sangue.

O efeito BOLD ocorre por razão biofísica e fisiológica [26]. Em resumo, a primeira razão está relacionada com o fato de a deoxihemoglobina produzir gradientes de campo magnético ao redor e através dos vasos sanguíneos que diminuem o sinal de RM, pois são paramagnéticas, enquanto a segunda razão se dá pela ativação cerebral ser caracterizada por uma queda no oxigênio local e, em seguida, uma queda correspondente na concentração local de deoxi-

hemoglobina. A redução da deoxihemoglobina durante a ativação produz um pequeno aumento no sinal de RM. A Fig. 9 ilustra um vaso sanguíneo em dois momentos: basal, ou seja, em repouso, e ativo. Neste último, a quantidade de oxihemoglobina é acentuada, gerando aumento em T_2 e no sinal local, como descrito anteriormente.

8. Estudo dos temas no Ensino Médio

Diante de tudo o que foi exposto,

torna-se necessário discutir a importância do estudo de temas modernos e contemporâneos no ensino de física. Nesse contexto, a interdisciplinaridade e a contextualização têm grande impacto, pois permitem melhor compreensão de determinados conteúdos devido à aplicação e à relação de diferentes temas, que, isolados, são demasiados complexos e pouco significativos para os discentes, como indução eletromagnética, *spin*, campo elétrico e campo magnético. A proposta desses princípios curriculares foi apresentada na década de 1970 como possibilidade de superar a especialização excessiva por meio da colaboração entre as diversas disciplinas e resulta também da necessidade de encontrar meios de vincular o conhecimento à prática, reorganizando as disciplinas científicas e reformulando as estruturas pedagógicas do ensino [30]. Desse modo, a escola, como ambiente de aprendizagem, precisa acompanhar a sociedade moderna, contribuindo para a construção dos novos conhecimentos e formando, assim, cidadãos atualizados e mais inseridos no meio social contemporâneo.

Uma maneira interessante de enriquecer o ensino nessa perspectiva é tratar o fenômeno de estudo não somente em seus termos científicos e específicos, mas também em sua evolução histórica, mostrando que os saberes ensinados têm produtores, origem e transcendência ao tempo, tomando conhecimento sobre os problemas e questões que os originaram.

Os estudos de RM e RMf têm contexto histórico significativo, podendo ser explorado no ensino de física, tornando aqueles conteúdos que podem ser relacionados a essa temática mais fáceis de serem compreendidos, na medida que passam a ter contextualização histórica de sua evolução. É possível, assim, apresentar a estruturação de um determinado conhecimento científico e até mesmo de sua aplicação, como uma saga dinâmica de teorias e explicações que, aos poucos, vão moldando algo mais definido.

Portanto, em tal embasamento, o discente tem a possibilidade de construir o conhecimento integrado e de organizar seu pensamento de forma a re-ligar e, ao mesmo tempo, diferenciar os saberes [31]. Isso resulta de um ensino que visa desmistificar a ideia de que as ciências são fragmentadas e totalmente independentes, permitindo compreender melhor a relação de um todo com suas partes, e tornando aquilo que está

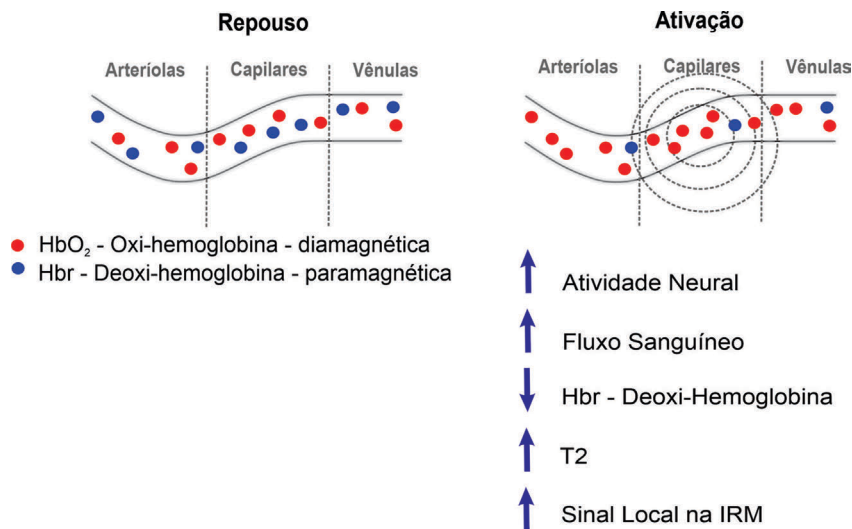


Figura 9 - Efeito BOLD. A atividade neuronal induz aumento local no volume e fluxo sanguíneo e na oxigenação do sangue. As setas azuis indicam quais características aumentam (para cima) e diminuem (para baixo). Fonte: adaptado da Ref. [24].

sendo ensinado de fato com algum significado, além de relacionar os conteúdos escolares a diferentes contextos de sua produção, apropriação e utilização.

A aprendizagem significativa, teoria cognitiva desenvolvida por David Ausubel (1918-2008), está centrada nesse contexto, pois em tal perspectiva a aprendizagem baseia-se, em parte, na transformação de conhecimentos através de situações-problemas e questões daquilo que foi aprendido, construindo uma visão mais abrangente. Pode-se dizer, ainda, que, dessa maneira, os temas trabalhados passam a ser mais úteis pa-

ra os discentes, tornando-se menos abstratos e menos distantes da realidade deles. Como consequência disso, os temas estudados pelo aluno não serão esquecidos totalmente ao longo do tempo, pois, tratando-se da aprendizagem significativa, o conhecimento – podendo este ser conceitual, procedimental ou atitudinal – é estabelecido na estrutura cognitiva do discente [32].

Portanto, o ensino de física de temas modernos e contemporâneos, que são propostos pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN e PCN+), nas Leis de Diretrizes e Bases (LDB), precisa

ter o enfoque de tornar os conteúdos com significados por meio da interdisciplinaridade e da contextualização, tendo como viés, por exemplo, a aplicação destes nas tecnologias atuais e outras áreas do conhecimento. Como interpretado do próprio PCN+, o ensino de física deve proporcionar ao estudante a capacidade de reconhecer e avaliar o impacto do desenvolvimento tecnológico e suas relações com as ciências [33]. Além disso, a física precisa ser vista como cultura [34], por isso deve ser utilizada na escola para desenvolver a compreensão do mundo contemporâneo, dos fenômenos e dos aparelhos utilizados no cotidiano. Ainda, de acordo com [35], é essencial que o estudante do Ensino Médio conheça os fundamentos da tecnologia atual, já que ela atua diretamente em sua vida e pode definir seu futuro profissional.

Para enfrentar o desafio de tornar o estudo de ressonância magnética nuclear e funcional acessível para os estudantes do ensino básico é preciso abordar tais temas por meio de recursos que facilitem esse processo. O ser humano tem a tendência de aprender mais facilmente um corpo de conhecimentos quando ele é apresentado a partir de suas ideias mais gerais e mais inclusivas, desdobrando-se em ideias mais específicas e menos inclusivas [36]. Dessa forma, uma ferramenta didática que pode enriquecer o ensino de física como estruturador do conhecimento é o mapa conceitual, tendo em

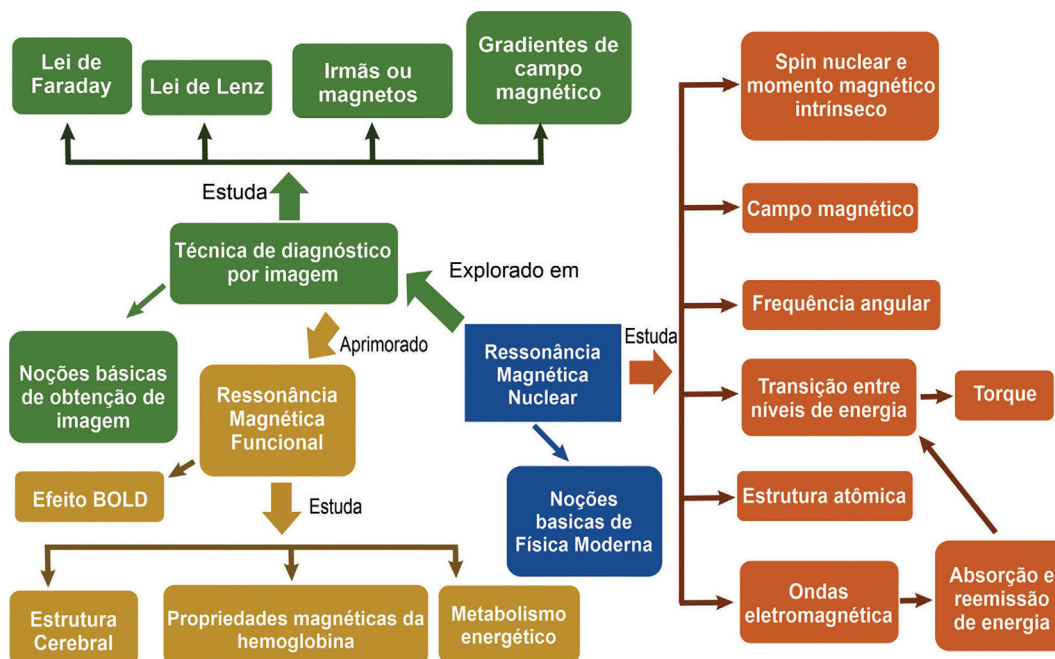


Figura 10 - Mapa conceitual relacionando temáticas ao estudo de RM e de RMf.

vista que, na sua construção, o aprendiz elucidada os conceitos mais relevantes e as suas conexões em um corpo de conhecimento [37].

Nesse contexto, é essencial que o aluno já tenha um breve conhecimento do que será inserido no mapa conceitual. Logo, tal estratégia de ensino pode ser utilizada com os temas RM e RMf de maneira a revisar conteúdos já aprendidos pelos discentes ao longo do Ensino Médio, além de desenvolver a habilidade de reconhecer e avaliar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo e seus impactos na vida social, aprimorando esses saberes.

O mapa conceitual apresentado na Fig. 10 relaciona algumas temáticas com o estudo de ressonância magnética, tornando visível o quanto rico pode ser o ensino de física quando é trabalhado um tema que permite a criação de ramificações a tantos tópicos que são ensinados no ensino regular.

Assim, os estudos de RM e de RMf têm grande relevância no ensino quando são trabalhados em termos básicos, pois, além do que já foi mencionado,

permitem relacionar a física a outras áreas do conhecimento, como química e biologia, abordando técnicas moder-

nas de grande impacto na sociedade atual. Logo, esses estudos são uma ferramenta importante para enriquecer o ensino de física, tendo em vista que tais temáticas, quando abordadas no âmbito escolar, produzem uma educação

contextualizada, interdisciplinar e significativa.

9. Conclusão

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou analisar quanto rica é a física de ressonância magnética e o quanto esse estudo é relevante no contexto social e de ensino, contendo diversos conteúdos que são abordados no nível médio de escolaridade.

Dessa forma, ao estudar o fenômeno de ressonância magnética nuclear aplicado à medicina e a técnica funcional, é possível enriquecer ainda mais o ensino de física, uma vez que a abordagem desses temas tem como consequência um ensino mais contextualiza-

do, tanto em termos históricos como em termos de conteúdos específicos, interdisciplinares e significativos. Isso porque ela permite integrar diferentes ciências para a melhor compreensão de um fenômeno, além de aplicar os assuntos estudados durante os últimos anos do ensino básico na explicação de uma ferramenta tecnológica de grande importância no contexto social contemporâneo. Vale ressaltar, ainda, que tal estudo é capaz de inspirar os discentes a continuarem suas vidas acadêmicas no ramo das Ciências da Natureza, visto que será facilitada a percepção do quanto as ciências andam juntas para o desenvolvimento de uma sociedade moderna e, conseqüentemente, a relevância desses estudos e o quanto são atuais. Também é possível destacar a importância de trabalhar tais temas para uma formação básica de cidadãos atualizados, reduzindo a marginalização de conceitos relacionados às Ciências da Natureza, especificamente à física. Dessa maneira, o ensino de física cumpre ainda mais o seu papel dentro do âmbito educacional.

Recebido em: 13 de Setembro de 2021
Aceito em: 9 de Março de 2022

Notas

¹Hemoglobina, proteína presente nas hemácias, pobre em oxigênio.

²Hemoglobina rica em oxigênio.

Referência

- [1] D.B. Plewes, W. Kucharczyk, J. of Magnetic Resonance Imaging **35**, 1038 (2012).
- [2] M.S. Meneses, S.F.B. Rocha, M.R.Y. Blood, A. Trentin Jr., P.R. Benites Filho e cols., Arquivos de Neuro-Psiquiatria **62**, 61 (2004).
- [3] C.H. Asano, T. Velasco, D. Maziero, C.E.G. Salmon, Rev. Bras. de Fis. Médica **9**, 19 (2016).
- [4] R. Covolan, D.B. de Araújo, A.C. dos Santos, F. Cendes, Ciência e Cultura **56**, 40 (2004).
- [5] L.F. Silva, L.M. Carvalho, Investigações em Ensino de Ciências **14**, 135 (2009).
- [6] Brasil, *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional* (MEC/Semtec, Brasília, 1996).
- [7] Brasil, *Base Nacional Comum Curricular* (MEC/Semtec, Brasília, 2018).
- [8] Brasil, *Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio* (MEC/SEF, Brasília, 1996).
- [9] P. Zeeman, Nature **55**, 347 (1897).
- [10] N. Tubridy, C.S. McKinstry, Neuroradiology **42**, 852 (2000).
- [11] T. Peter, International J. of Scientific Research **7**, 19 (2018).
- [12] G.G. Gomes, M. Pietrocola, Revista Brasileira de Ensino de Física **33**, 2604 (2011).
- [13] T. Geva, J. of Cardiovascular Magnetic Resonance **8**, 793 (2006).
- [14] I.I. Rabi, N.F. Ramsey Jr., J.R. Zacharias, Phys. Rev. **53**, 728 (1938).
- [15] I.I. Rabi, P. Kusch, J.R. Zacharias, Phys. Rev. **55**, 526 (1939).
- [16] R.L. Kleinberg, J.A. Jackson, Concepts in Magnetic Resonance **13**, 340 (2001).
- [17] C. Andrews, A. Simmons, S. Williams, Phys. Education **31**, 833 (1996).
- [18] R. Damadian. Hospital Practice **12**, 63 (1977).
- [19] S. Ogawa, T.M. Lee, D.W. Tank, Proceedings of the National Academy of Sciences **87**, 9868 (1990).
- [20] R.B. Buxton. *Introduction to Functional Magnetic Resonance Imaging: Principles and Techniques* (Cambridge University Press, New York, 2009), p. 470, 2ª ed.
- [21] D.J. Griffiths. *Mecânica Quântica* (Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2013), p. 360, 2a ed.
- [22] J.J. Sakurai. *Modern Quantum Mechanics: Revised Edition* (Addison-Wesley, Boston, 1995), p. 568.

- [23] D. Halliday, R. Resnick, *Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna* (LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2012), p. 448, 9ª ed.
- [24] A.A. Mazolla, Rev. Bras. de Fís. Médica **3**, 177 (2009).
- [25] A.U. Rahman. *Nuclear Magnetic Resonance: Basic Principles* (Springer, New York, 1986).
- [26] S.A. Huettel, A.W. Song, G. McCarthy, *Functional Magnetic Resonance Imaging* (Sinauer Associates, Sunderland, 2004), 2ª ed.
- [27] R.W. Brown, Y.C.N. Cheng, E.M. Haacke, M.R. Thompson, R. Venkatesan, *Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Sequence Design* (John Wiley Sons, New Jersey, 2014), 2ª ed.
- [28] K. Najarian, R. Splinter, *Biomedical Signal and Image Processing* (CRC Press, New York, 2012), 2ª ed.
- [29] K.R. Thulborn, J.C. Waterton, P.M. Mathews, G.K. Radda, *Biochimica et Biophysica Acta*, **714**, 265 (1982).
- [30] R.V. Puentez, O.F. Aquino, A. Longarezi, *Ensino Médio 1: Processos, Sujeitos e Docência* (EDUFU, Uberlândia, 2019).
- [31] E. Morin, *Educação e Complexidade, Os Sete Saberes e Outros Ensaio* (Cortez, São Paulo, 2005).
- [32] M.A. Moreira, *O Que É Afim Aprendizagem significativa?* Currículum, La Laguna, 2012. Disponível em <http://moreira.if.ufrgs.br/oqueeafinal.pdf>, acesso em 4 de janeiro de 2022.
- [33] Brasil, *Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais Física/PCN+* (MEC/Semtec, Brasília, 2007).
- [34] J. Zanetic, *Ciência e Cultura* **57**, 21 (2005).
- [35] F. Ostermann, M.A. Moreira, *Investigação em Ensino de Ciências* **5**, 23 (2000).
- [36] D. Ausubel. *Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva* (Editora Plátano, Lisboa, 2003).
- [37] R. Tavares, *Ciências Cognição* **13**, 94 (2008).