

RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR: A Física Envolvida no Diagnóstico por Imagens

Thayná Caroline Lima Nunes

Graduanda em Tecnologia em Radiologia,
Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS

João Borges da Silveira

Doutor em Ciências dos Materiais – UNESP;
Docente das Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS

RESUMO

Um significativo avanço tem sido observado na técnica de ressonância magnética nuclear nos últimos anos, principalmente no que se refere às melhorias tecnológicas aplicadas aos equipamentos espectroscópicos. Esse avanço fez com que a formação de imagens por ressonância magnética (MRI) torna-se a técnica de diagnóstico por imagens mais precisa nas mais distintas áreas da patologia clínica. Isto porque, esta se utiliza das propriedades magnéticas dos núcleos de hidrogênio, presente abundantemente no corpo humano. Sendo assim, este trabalho foi desenvolvido de maneira a explicar de maneira simples e objetiva os princípios físicos envolvidos no diagnóstico por imagens aplicáveis à patologia clínica.

PALAVRAS-CHAVE: Ressonância Magnética Nuclear; Diagnóstico; Formação de Imagens; Princípios Físicos.

INTRODUÇÃO

O histórico da ressonância magnética nuclear (RMN) teve seu início em 1937 através do físico austro-norte-americano Isidor Isaac Rabi (RABI, 1937) que propôs uma nova técnica capaz de determinar a intensidade dos momentos magnéticos nucleares. Em 1946, avançando em relação aos trabalhos realizados por Rabi, uma equipe em Harvard, liderada pelo físico norte americano Edward Mills Purcell (PURCELL et al., 1946) estudando materiais sólidos e outra em Stanford, liderada pelo físico Félix Bloch (BLOCH et al., 1946) estudando materiais líquidos, trabalhando de forma independente, publicaram artigos, ambos na revista *Physical Review*, anunciando que haviam descoberto o efeito da ressonância magnética nuclear em materiais em ambos os estados. Desde então, a RMN tem se mostrado ferramenta muito útil nas distintas áreas, como agricultura, piscicultura, química, médica, farmacêutica, etc. Isto se deve ao fato de que a RMN é uma técnica rápida, não destrutiva (não ionizante) e não invasiva (sem meio de contraste) que pode ser

utilizada em diferentes análises, de diferentes materiais e em estados sólido e líquido (MARTINEZ, 2003).

O grande destaque da ressonância magnética nuclear nas últimas décadas refere-se à sua utilização para a formação de imagens de ressonância magnética, MRI (do inglês *magnetic resonance imaging*) (LUFKIN, 1990), se mostrando como técnica promissora no diagnóstico clínico sendo largamente aplicada em inúmeras patologias. Além das vantagens discutidas anteriormente, a MRI, embora com custo relativamente mais elevado que os demais exames patológicos, destaca-se por proporcionar resultados praticamente instantâneos, fornecendo imagens em 3D (três dimensões), com altíssima resolução e nos diferentes perfis de tecidos humanos. Atualmente, milhares de pessoas no Brasil realizam exames utilizando a MRI, principalmente na oncologia (COSTA, 2010) e na neuropatologia (MASON, 2001).

Para uma efetiva compreensão acerca da formação de imagens através da RMN faz-se necessário o conhecimento de assuntos como eletromagnetismo, física quântica e supercondutividade, envolvidos em tal fenômeno, o que tornaria trabalhoso e de difícil entendimento. O objetivo deste trabalho é fornecer de maneira simples e introdutória, uma abordagem dos princípios físicos inerentes à formação de imagens através da ressonância magnética nuclear com aplicabilidade em patologias clínicas.

2 METODOLOGIA

Adotou-se como metodologia para o desenvolvimento deste trabalho a pesquisa bibliográfica, uma vez que esta permite o aperfeiçoamento do tema escolhido baseando-se em diferentes óticas de diversos autores, objetivando alcançar um denominador comum acerca do tema escolhido. A pesquisa científica, bibliográfica ou não, requer uma leitura atenciosa de livros, artigos de revistas ou outro tipo de material de pesquisa, proporcionando assim, o aprimoramento das ideias e um refinamento conceitual do objeto em estudo, servindo assim, de estrutura para uma demonstração teórica.

Baseando-se nesses argumentos, foi realizada uma pesquisa exploratória através de um levantamento na literatura sobre a ressonância magnética nuclear, enfocando a formação de imagens aplicáveis às patologias clínicas.

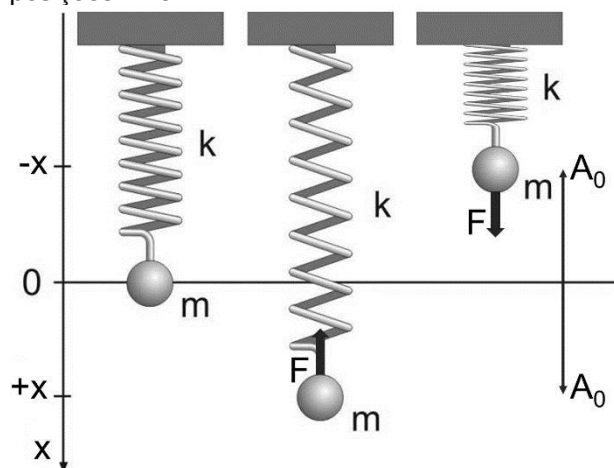
3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Definição de Ressonância

O termo ressonância é definido como a interação entre dois sistemas distintos. Por exemplo, se um sistema elástico vibrar a partir da animação de uma onda sonora, diz-se que o sistema está em ressonância com a onda sonora. Neste caso, para que a onda sonora induza a vibração do sistema faz-se necessária que ela tenha disponha de amplitude e, principalmente, de frequência adequada para tal (GARCIA, 1998).

Diversos sistemas físicos podem apresentar o fenômeno da ressonância. Considerando a hipótese de que um sistema apresente frequências naturais de vibração, este poderá sofrer algum tipo de perturbação (excitação) de um agente externo, o qual, necessariamente, deverá estar em ressonância com as vibrações naturais do sistema (TIPLER, 2000). Para exemplificar, consideremos um sistema bastante utilizado na física, denominado de massa-mola, o qual é composto por uma mola de constante elástica k presa na parte superior a uma superfície rígida e na parte inferior um objeto de massa m , conforme ilustrado na figura 1.

Figura 1 - Sistema massa-mola representando a condição em equilíbrio e o deslocamento entre as posições $+x$ e $-x$.



Fonte: Desenvolvido pelos autores.

Ao submeter este sistema a ação de uma força externa alongando (ou comprimindo) a mola, será gerada na mesma uma deformação x (dada em metros no SI) proporcional à força aplicada, obedecendo à lei de Hooke, descrita pela equação:

$$x = -\frac{F}{k} \quad (01)$$

onde, K é a constante elástica da mola, dada em N/m.

No exato instante em que é cessada a aplicação da força externa sobre a mola, haverá sobre esta, a ação de uma força restauradora, fazendo com que a mola oscile com amplitude entre $-x$ e $+x$, executando assim, um movimento harmônico simples.

Como x é função do tempo, t , alguns manuseios matemáticos envolvendo derivadas e funções trigonométricas permitem obter, a partir da equação (1) e a combinação desta com a lei do Princípio da Dinâmica (segunda lei de Newton), uma relação entre a frequência angular de oscilação, ω , do movimento da mola, descrita por:

$$x(t) = A \cos(\omega t) \quad (02)$$

onde, A é a amplitude máxima de oscilação, ou seja, $x_{\text{máx}}$.

Finalmente, para o sistema massa-mola, a frequência natural de vibração da mola com constante elástica K , à qual está presa uma massa m , é dada por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (03)$$

No entanto, sistemas reais apresentam dissipação energia, que geralmente pode ser por atrito do próprio sistema ou com o ar. Nestes casos, diz-se que o sistema é amortecido, fazendo-se necessário a inserção de energia no sistema para que a amplitude oscilação se mantenha constante. Quando a quantidade de energia inserida é maior que a quantidade de energia dissipada, a energia aumenta com o tempo, implicando diretamente no aumento da amplitude de oscilação (TIPLER, 2000). Todavia, se esta quantidade inserida for exatamente a mesma que a dissipada, a massa oscila com mesma frequência, de maneira que a energia se mantém constante, bem como, a amplitude de oscilação. Nessa condição, a quantidade de energia dissipada a cada ciclo em função do amortecimento é igual à

energia inserida no sistema pela ação de força externa, denominada de força de excitação.

Não havendo, no sistema, forças de excitação e dissipação, o oscilador oscila com frequência natural ω_0 . Porém, se a frequência de excitação for a mesma, ou bem próxima da frequência natural do sistema, ocorrerá uma interação de forma que a amplitude será aumentada. A este fenômeno físico dá-se o nome de ressonância (HALLIDAY; RESNICK, 1991).

3.2 Princípios Básicos da Ressonância Magnética Nuclear

O termo ressonância magnética nuclear (RMN) tem sua origem a partir de características de certos átomos no estado fundamental que, na presença de um campo magnético, tornam-se ressonantes à frequência magnética do campo. Embora o nome seja bastante apropriado para o fenômeno físico, tem-se adotado o desuso do termo “nuclear”, uma vez que ele remete à ideia de ameaça radioativa, em discrepância à sua real condição, não ionizante (MADUREIRA, 2010).

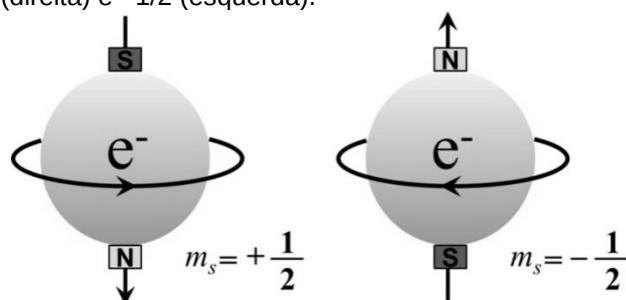
A Ressonância Magnética é uma manifestação da física que permite obter informação estrutural e dinâmica da matéria em estudo, que basicamente consiste na averiguação da propriedade magnética da matéria. Esta técnica espectroscópica, utilizada há décadas pela ciência na obtenção de propriedades físicas e químicas das moléculas, possibilitou um significativo avanço na medicina quando empregado na tomografia para geração de imagens na parte interna do corpo humano (GONSALVES; MELO, 2000).

A ressonância magnética foi estudada primeiramente através da interação com os elétrons. Estes são partículas que possuem massa equivalente a $9,11 \times 10^{-31}$ kg e carga elétrica igual a $1,6 \times 10^{-19}$ C, além disso, do conhecimento da física quântica é sabido que cada elétron possui um *momento de spin* (termo em inglês que significa girar) permitido: $+1/2$ e $-1/2$, como ilustrado na figura 2, e que sob a ação de um campo magnético externo tais elétrons podem ser perturbados (CALLISTER, 2007).

No entanto, alguns núcleos atômicos também possuem *momentos de spin* de $+1/2$ e $-1/2$, concedendo a estes a possibilidade de serem estudados através da ressonância magnética, daí a origem do termo “ressonância magnética nuclear-RMN”. Exemplos desses núcleos são: ^1H , ^{13}C , ^{15}N , ^{19}F e ^{31}P . Embora tenham sido

desenvolvidos ao longo dos anos espectrômetros para estudos dos demais núcleos atômicos, os núcleos de hidrogênio, que são mais simples, pois são compostos por um único próton, foram os primeiros a serem estudados (GONSALVES; MELO, 2000).

Figura 2 – Representação esquemática de dois elétrons com *momento de spin* magnético: $+1/2$ (direita) e $-1/2$ (esquerda).



Fonte: Desenvolvido pelos autores.

3.3 Campo Magnético e o Momento *Spin*

A ressonância magnética nuclear é, basicamente, a exploração dos domínios magnéticos apresentados pelos núcleos atômicos. Esta exploração se dá através da exibição por núcleos de determinados elementos químicos que, quando submetidos a um campo magnético forte e excitados por ondas na frequência RF (rádio frequência) em determinada frequência (frequência de Larmor), emitem rádio sinal, que poderá ser captado por uma antena e com auxílio de um *software* apropriado, ser convertido em imagem (HAGE, 2009).

A intensidade dos campos magnéticos utilizados na produção de imagens por ressonância magnética varia entre 0,02 e 3,0 Tesla. Comparando estes valores ao valor campo magnético produzido pelo momento de *spin* magnético da Terra (da ordem de 3×10^{-5} Tesla), verifica-se que estes podem ser até 100.000 vezes mais intensos que o produzido pela Terra (PAPEPUCCI, 1985).

Sendo assim, para obtenção de campos magnéticos de tamanha intensidade faz-se necessário a utilização no equipamento de MRI de um dispositivo que produza um campo magnético de alta intensidade. Neste caso, podem ser utilizados materiais que apresentem campo magnético permanente, como por exemplo, magnetos de grandes dimensões, ou ainda, optar pela produção do campo. A lei de Ampère, denominada assim em homenagem ao físico francês André-Marie Ampère, corrigida pela teoria eletromagnética de Maxwell, proposta pelo físico e matemático

escocês James Clerk Maxwell, afirma que campos magnéticos podem ser gerados de duas maneiras: através de correntes elétricas (lei de Ampère original) e por campos elétricos que variam no tempo (TIPPLER, 2000). Baseando-se nestas teorias, é possível obter campos magnéticos de alta intensidade a partir da produção de bobinas feitas materiais condutores elétricos que apresentam resistência e, conseqüentemente, perda por efeitos Joule (TIPPLER, 2000), ou ainda, optar pela utilização materiais supercondutores, que transportam correntes elétricas sem perdas por resistência (SILVEIRA, 2012), que neste caso possibilita a obtenção de campos mais intensos.

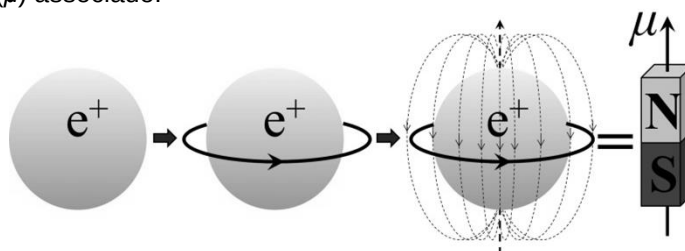
Para facilitar o nosso entendimento quanto à relação entre campo magnético e momento de *spin*, vamos limitar a nossa explanação apenas ao núcleo de hidrogênio, pois este apresenta algumas vantagens, se comparado aos demais elementos que compõem o tecido humano, tais como: (i) Possui apenas um próton no seu núcleo (exceto os seus isótopos deutério e trítio que possuem nêutrons), concedendo a ele, o maior momento magnético entre os elementos químicos, se tornando mais sensível à ressonância magnética; (ii) O corpo humano é composto por cerca de 70% de água (H₂O), implicando que o hidrogênio é o elemento químico mais numeroso do corpo humano, aproximadamente 65%; (iii) Apresenta distintas características de ressonância entre o tecido normal do corpo humano e o tecido patológico e (iv) O sinal obtido é cerca de 1000 vezes superior a qualquer outro elemento químico encontrado nos tecidos animais (HAGE; IWASAKI, 2009).

O único próton que compõe o núcleo do átomo de hidrogênio apresenta comportamento de rotação em torno de si, semelhante ao da Terra, o que concede a este o momento de spin magnético, característica análoga à apresentada pelos elétrons, discutido anteriormente. A figura 3 ilustra, da esquerda para a direita; i) o próton do núcleo de hidrogênio; ii) realizando o movimento de *spin* (giro) em torno de seu próprio eixo; iii) geração de um campo magnético próprio ao seu redor e iv) comportamento de um dipolo magnético (ímã) com um momento magnético (μ) associado.

De maneira geral, os prótons encontram-se arranjados no núcleo de maneira aleatória, implicando que, a direção dos seus momentos magnéticos também se apresente aleatoriamente. Esse arranjo aleatório faz com que o momento magnético associado ao núcleo seja anulado. Em outras palavras, se um núcleo apresenta

momento magnético orientado para cima e outro núcleo apresente momento magnético orientado para baixo, o momento magnético resultante será nulo, ou seja, um anula o outro (PYKETT et al., 1982).

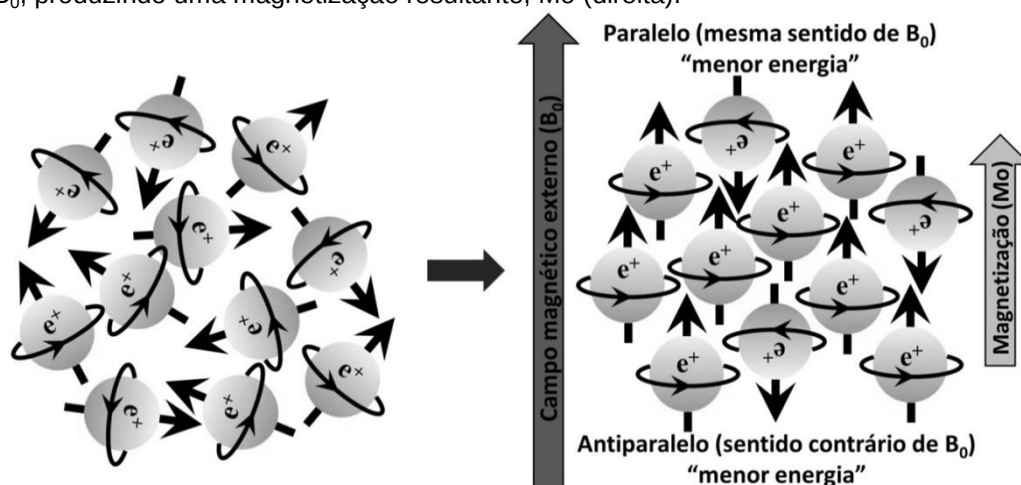
Figura 3 – Próton do átomo de hidrogênio e a geração do campo magnético em torno de si com o momento magnético (μ) associado.



Fonte: Desenvolvido pelos autores.

Um dipolo magnético além de produzir um campo magnético, também é perturbado pela presença de qualquer outro campo magnético externo (HAGE; IWASAKI, 2009). Assim, ao se posicionar um campo magnético externo (B_0) próximo ao núcleo de um átomo que apresente momento magnético, estes serão perturbados pelo campo e serão orientados preferencialmente na direção do campo. Momentos magnéticos de maior energia serão orientados no sentido oposto ao do campo, ao passo que, momentos magnéticos de menor energia serão orientados no mesmo sentido do campo (HAGE; IWASAKI, 2009), conforme ilustrado na figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática dos prótons alinhados aleatoriamente (esquerda) e o alinhamento dos mesmos sob a ação de um campo magnético externo, B_0 , produzindo uma magnetização resultante, M_0 (direita).



Fonte: Desenvolvido pelos autores.

As orientações paralela e antiparalela correspondem, respectivamente, a níveis de menor e de maior energia. Prótons do núcleo de hidrogênio no corpo humano ($\approx 37^{\circ}\text{C}$), quando submetidos a um campo magnético externo de cerca 1,5 Tesla, fornecem uma relação da ordem de cinco de menor energia para um milhão de maior energia. E são exatamente estes cinco prótons que irão produzir um sinal detectável.

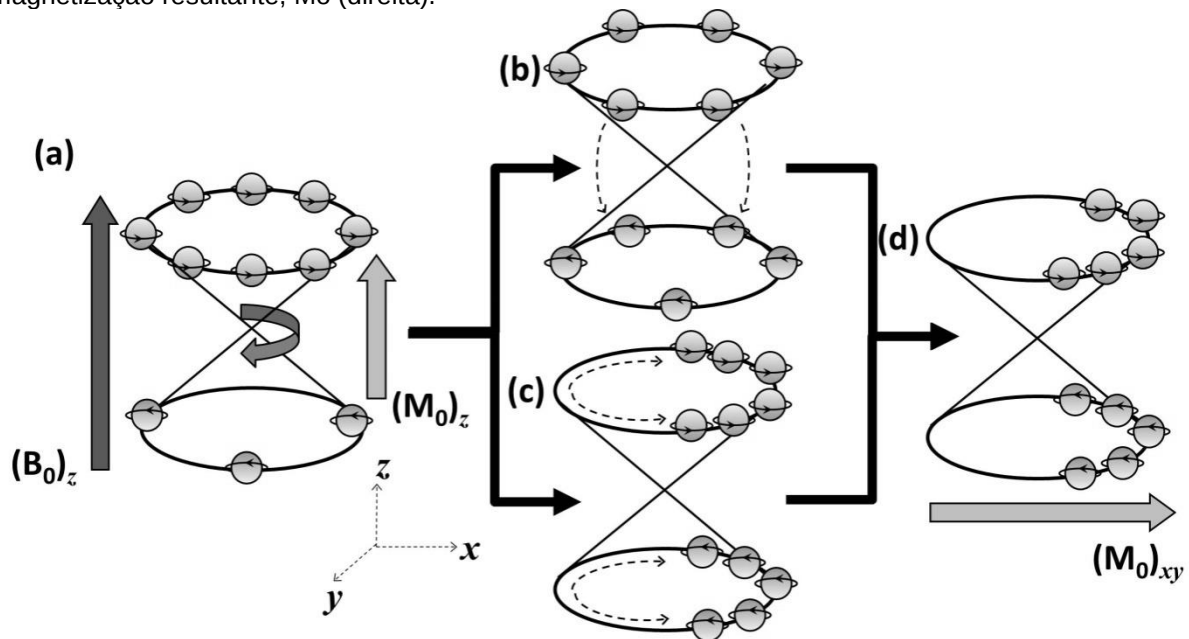
Quando um tecido animal é submetido a um campo magnético por um intervalo de poucos segundos, a magnetização (M_0) atinge um valor de equilíbrio (ou de saturação) cuja intensidade é diretamente proporcional ao campo magnético (B_0) aplicado, além disso, apresenta mesmo sentido e direção que o campo. Considerando o campo magnético como um vetor que aponta na direção do eixo +z, logo, era esperado que os prótons se alinhassem nesta direção, no entanto, o que efetivamente não ocorre é o arranjo destes na forma que se assemelha a um pião girando em volta de seu eixo gravitacional, cujo movimento é denominado de precessão. A Figura 5 (a) ilustra esse comportamento. A frequência da precessão, denominada de frequência de Larmor, é dependente apenas da intensidade do campo magnético obedecendo à equação 4.

$$\omega = \gamma B_0 \quad (04)$$

onde, ω é a frequência de Larmor, γ é uma constante de spin magnético intrínseca de cada material (para o hidrogênio é igual a 42,6 MHz/T) (GARCIA, 1998).

Quando a magnetização (M_0) estiver orientada na mesma direção do campo magnético externo (B_0), ou seja, direção z, embora seu valor seja diferente de zero, a sua determinação ainda é difícil. Sendo assim, faz-se necessário o seu deslocamento para o plano xy, perpendicular ao eixo z. Para tal, são emitidos pulsos de radiofrequência (RF), alinhados perpendicularmente ao eixo z e que estejam na mesma frequência de Larmor dos prótons, cujo fenômeno é descrito como ressonância (GARCIA, 1998). E então, dois processos podem ocorrer: o deslocamento de alguns prótons do estado de menor energia para o estado de maior energia, figura 5 (b) e a precessão em fases destes prótons figura 5(c), o que fará com que o vetor magnetização seja deslocado para o plano xy, figura 5(d).

Figura 5 – Representação esquemática dos prótons alinhados aleatoriamente (esquerda) e o alinhamento dos mesmos sob a ação de um campo magnético externo, B_0 , produzindo uma magnetização resultante, M_0 (direita).



Fonte: Desenvolvido pelos autores.

3.4 Formação da Imagem

O pulso de radiofrequência aplicado no tecido em análise foi capaz de deslocar a orientação da magnetização $(M_0)_z$ para $(M_0)_{xy}$. Ao se desligar o pulso o vetor magnetização retorna gradativamente à posição inicial, ou seja, $(M_0)_z$, fenômeno denominado de relaxação. Durante a relaxação são denotadas duas constantes de tempo: T1 (relaxação *spin-rede*), que está associado ao retorno da magnetização de $(M_0)_z$ para $(M_0)_{xy}$ sendo influenciado pela interação dos *spins* com a rede molecular e T2 (relaxação *spin-spin*), que está associado com a interação dos prótons com os campos magnéticos de outros núcleos. Ressalta-se que essas constantes de tempos dependem entre outros fatores da intensidade e uniformidade do campo magnético aplicado, a intensidade da onda eletromagnética da RF, além, é claro, das características moleculares de cada tecido humano exposto, pois, a partir de suas constantes de tempo, é possível diferenciar os diferentes tipos de tecidos, a saber, gordura, liquor, edema, etc (MAZZOLLA, 2009). A tabela 1 ilustra algumas dessas constantes de tempo a 1,5 Teslas.

Os diferentes tecidos humanos e suas diferentes constantes de tempos de relaxação, T1 e T2 produzem perfis de diferentes contrastes na RMN, que, associado a um software que é responsável pelo armazenamento das informações e

a conversão destas, através de transformadas de Fourier (operações algorítmicas), em imagens digitais.

Tabela 1 – Constantes de tempos de relaxação T1 e T2 para diferentes tecidos humanos a 1,5 Teslas.

Tecido	T1 (ms)	T2 (ms)
Substância branca	790	90
Substância cinzenta	920	100
Líquido cefalorraquidiano (liquor)	4000	2000
Sangue (arterial)	1200	50
Parênquima hepático	490	40
Miocárdio	870	60
Músculo	870	50
Lipídios (gordura)	260	80

Fonte: (MAZZOLLA, 2009)

4 CONCLUSÃO

A qualidade dos diagnósticos clínicos obtidos a partir da formação de imagens por ressonância magnética nuclear (MRI) fez com que esta técnica tenha se tornado referência nas mais distintas áreas da medicina, principalmente, oncologia e neurologia. Este trabalho mostrou de maneira simples e objetiva que os resultados obtidos utilizando esta técnica estão associados a fenômenos físicos envolvendo a interação do campo magnético (B_0) produzido pelo equipamento e o campo magnético intrínseco dos prótons presentes nos núcleos dos átomos de hidrogênio, estes por sua vez, presente em todos os tecidos do corpo humano. Sendo assim, a melhor compreensão destes fenômenos permite uma melhor compreensão dos resultados.

REFERÊNCIAS

BLOCH, F.; HANSEN, W. W.; PACKARD, M. Nuclear induction. Physical Review, v. 69, p.127, 1946.

CALLISTER, Jr. W. D. Materials Science and Engeneering: An Introduction, New York: Wiley, 2007.

COSTA, C., ROCHA, R., GRILO, M., BIANCHI, R., MAYOR, T. S., MONTEIRO, J., GUIMARÃES, H. Tumores no período neonatal. Acta Médica Portuguesa, v. 23, p. 405-412, 2010.

GARCIA, E. A. C. Biofísica: São Paulo, Sarvier, p. 387, 1998.

GONSALVES, A. M. R., MELO, T. M. V. P. Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear. Coimbra: Chymiotecnnon, 2000.

HAGE, M. C. F. N. S., IWASAKIM. Imagem por ressonância magnética: princípios básicos. Ciência Rural, v. 39, n. 4, p. 1287-1295, 2009.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. Física IV. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1991.

LUFKIN, R. B. Manual de Ressonância Magnética. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1990.

LUZYANIN, K., ABRANTES, M. Ressonância Magnética Nuclear – Ferramenta versátil em química farmacêutica e imagiologia médica, Química, v. 117, p. 25-30, 2010.

MADUREIRA, L. C. A., OLIVEIRA, C. S., SEIXAS, C. NARDI, V., ARAÚJO, R. P., ALVES. Importância da imagem por ressonância magnética nos estudos dos processos interativos dos órgãos e sistemas, Revista de Ciências Médicas e Biológicas, v. 9 (Supl. 1), p. 13-19, 2010.

MARTINEZ, I., AURSAND, M., ERIKSON, U., SINGSTAD, T. E., VELIYULIN, E., VAN DER ZWAAG, C. Destructive and non-destructive analytical techniques for authentication and composition analyses of foodstuffs. Food Science and Technology, v. 14, p. 489–498, 2003.

MASON, G. F., BEHAR, K. L., KRYSTAL, J. H., ROTHMAN, D.L. Aplicações da ressonância magnética para medidas espectroscópicas da neurotransmissão. Revista Brasileira de Psiquiatria, v. 23(Supl I), p. 6-10, 2001.

MAZZOLA, A. A. Ressonância magnética: princípios de formação da imagem e aplicações em imagem funcional. Revista Brasileira de Física Médica, v. 3(1), p. 117-29, 2009.

PANEPUCCI, H., DONOSO, J. P., TANNUS, A., BECKMAN, N., BONAGAMBA, T., PURCELL, E. M.; TORREY, H. C.; POUND, R. V. Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid. *Physical Review*, n. 69, p. 37-38, 1946.

PYKETT, I. L. Newhouse, J. H., Buonanno, F. S., Brady, T. J., Goldman M. R. Principles of nuclear magnetic resonance imaging. *Radiology*, v. 143, p. 157-168, 1982.

RABI, I. I. Space quantization in a gyrating magnetic field. *Physical Review*, n. 51, p. 652, 1937.

SILVEIRA, J. B., CARVALHO, C. L., TORSONI, G. B., AQUINO, H. A. ZADOROSNY, R. Thermal treatment of superconductor thin film of the BSCCO system using domestic microwave oven. *Physica C*, v. 478, p. 56–59, 2012.

TIPLER, P. A. Física para cientistas e engenheiros: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica. 4. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

VILLAFANA, T. Fundamental physics of magnetic resonance imaging. *Radiologic Clinics of North America*, v. 26, n. 4, p. 701-715, 1988.