



RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

CURSO TÉCNICO DE RADIOLOGIA

**Prof. Flávio Augusto Soares, M. Eng.
Prof. Henrique Batista Lopes, M. Eng.**

**EDIÇÃO 2001
REVISADA E AMPLIADA**

ÍNDICE

1. RESSONÂNCIA MAGNÉTICA	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	2
1.2.1. Spin	2
1.2.2. Precessão	2
1.2.3. Campo magnético intenso	3
1.2.4. Emissão de sinal de rádio	4
1.2.5. Conceito de ressonância	5
1.2.6. Recebimento do sinal de ressonância	5
1.2.7. Relaxamento	5
1.2.8. Gradientes de campo magnético	6
2. ESTRUTURA DO RESSONADOR	9
2.1 INTRODUÇÃO	9
2.2 MAGNETOS	9
2.2.1. Magnetos resistivos	10
2.2.2. Magnetos permanentes	10
2.2.3. Magnetos supercondutores	10
2.3 BOBINAS DE GRADIENTE	10
2.4 BOBINAS DE RADIOFREQÜÊNCIA	11
2.5 SUPORTE ELETRÔNICO	11
2.6 COMPUTADOR	12
2.7 CONSOLE DE COMANDO	12
2.8 SEQÜÊNCIA DE PROCEDIMENTO	13
3. FORMAÇÃO DA IMAGEM	15
3.1 INTRODUÇÃO	15
3.2 CONTRASTE DO OBJETO	15
3.3 VETORES MAGNÉTICOS	15
3.4 IMAGEM EM DENSIDADE PROTÔNICA	16
3.5 IMAGENS PONDERADAS	17
3.5.1. Seqüências de Pulso	17
3.5.2. Imagens Ponderadas em T1	18
3.5.3. Imagens Ponderadas em T2	18
3.6 TÉCNICAS DE REDUÇÃO DO MOVIMENTO	19
3.7 TÉCNICAS DE IMAGEM RÁPIDA	19
4. OPERAÇÃO DO RESSONADOR	21
4.1 INTRODUÇÃO	21
4.2 SEQÜÊNCIA DE PROCEDIMENTO	21
4.3 SELEÇÃO E POSICIONAMENTO DA BOBINA	21
4.3.1. Volume Integral Diferencial	22
4.3.2. Bobinas de Superfície	22
4.3.3. Bobinas de Arranjo em Fase	22
4.4 AGENTES DE CONTRASTE	23
5. BIBLIOGRAFIA	24

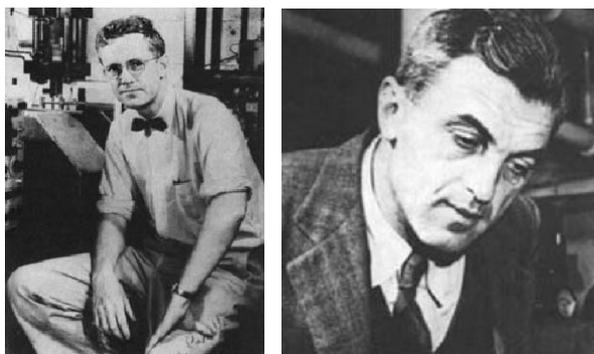


Folha deixada em branco

1. RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

1.1 INTRODUÇÃO

Desde o início da década de 1920 já se realizavam estudos sobre a propriedade magnética dos núcleos atômicos. Porém, a fundamentação teórica e os primeiros dados foram apresentados por Felix Bloch e Edward Purcell em 1946. Ambos trabalhavam separadamente nos Estados Unidos na realização de experimentos para verificar como os átomos, e em especial, os prótons presentes no núcleo, respondiam sob a ação de fortes campos magnéticos. Estas pesquisas deram origem ao espectrógrafo de ressonância magnética nuclear.



(a)

(b)

Figura 1.1. Purcell (a) e Bloch (b) ganharam juntos o prêmio Nobel em 1952.

A descoberta da ressonância magnética como um método de diagnóstico por imagem foi fruto das atividades do matemático e médico americano Raymond Damadian. No final dos anos 60, trabalhando com ressonância magnética nuclear (NMR, sigla em inglês), Damadian verificou o fenômeno físico de núcleos atômicos emitindo ondas de rádio em frequências previsíveis quando sujeitos a forte campo magnético. Fazendo experimentos em ratos com câncer, Damadian ficou intrigado que os sinais emitidos pelas células saudáveis eram



Figura 1.2. Raymond Damadian.

diferentes dos sinais emitidos pelas células doentes. Esta diferença inspirou-o a inventar um equipamento e o método de ressonância magnética nuclear que fosse seguro e preciso para dissecar o corpo humano. Hoje em dia o método é conhecido como imagem por ressonância magnética (MRI, sigla em inglês).



Figura 1.3. Damadian e sua equipe ao lado do primeiro MRI, o "Indomitable". (Fonar - divulgação)

O primeiro ressonador magnético foi patenteado por Damadian em 1972 e usava hélio líquido para refrigerar os magnetos dispostos numa câmara cilíndrica. Um método de localização espacial tridimensional coordenava os sinais recebidos em uma imagem coerente. Embora desacreditado pelos colegas, em 1977 Damadian e sua equipe produziram com sucesso o primeiro equipamento de MRI do corpo humano, a partir de um protótipo chamado de "Indomitable" (persistente) (Fig. 1.3). No dia 3 de Julho de 1977 foi produzida a primeira imagem do corpo humano: o tórax do Dr. Lawrence Minkoff, um dos colaboradores de Damadian. A realização do exame de tórax foi uma preocupação dos pesquisadores que tinham medo que o campo magnético intenso pudesse afetar o cérebro, principalmente a memória do paciente.

No ano seguinte, Damadian fundou uma

companhia de fabricação de ressonadores magnéticos, a FONAR, e foi diagnosticado o primeiro caso de câncer em paciente com a ajuda de seu equipamento de ressonância magnética nuclear.

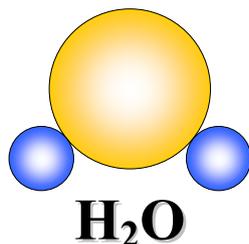


Figura 1.4. Equipamento de ressonância magnética aberta: última geração. (Fonar - divulgação)

1.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A imagem radiológica envolve a interação dos raios X com os elétrons que circundam os núcleos dos átomos, enquanto a imagem por ressonância magnética envolve a interação de ondas de rádio e campos magnéticos estáticos apenas com os núcleos dos átomos. No entanto, nem todos os núcleos de átomos respondem aos campos magnéticos. Apenas os núcleos dos elementos químicos que são constituídos por um número ímpar de prótons ou nêutrons servem para a ressonância magnética. Isto se deve ao fato que tanto os prótons quanto os elétrons possuem carga elétrica. Por estarem sempre girando (movimento conhecido pela palavra inglesa *spin*), essa carga elétrica cria um campo elétrico variável. E a todo campo elétrico variável está associado um campo magnético também variável.

A tabela a seguir, relaciona os elementos químicos mais interessantes para a utilização na ressonância magnética. Embora outros tantos ainda possam ser influenciados por um campo magnético, as imagens de ressonância são produzidas a partir da interação do núcleo de hidrogênio. Este átomo foi escolhido pela sua abundância no corpo humano (na forma de água - H₂O) e por possuir apenas



um próton em seu núcleo.

Tabela 1. Átomos propícios para a detecção na ressonância magnética.

Núcleos adequados para Ressonância Magnética	
¹ ₁ H	Hidrogênio
¹³ ₆ C	Carbono
¹⁴ ₇ N	Nitrogênio
¹⁷ ₈ O	Oxigênio
¹⁹ ₉ F	Flúor
²³ ₁₁ Na	Sódio
³¹ ₁₅ P	Fósforo
³⁹ ₁₉ K	Potássio

1.2.1. Spin

As partículas elétricas, prótons e elétrons, possuem um movimento giratório em torno do próprio eixo. Ou seja, os prótons giram como se fossem planetas. Este movimento acaba por fazer com que os elétrons e prótons transformem-se em pequenos ímãs, conhecidos por dipolos. Como o campo magnético possui um ponto de início ou saída, polo norte, e um ponto de fim ou entrada, polo sul, ele é comumente representado por uma seta, dando a direção e o sentido do ímã.

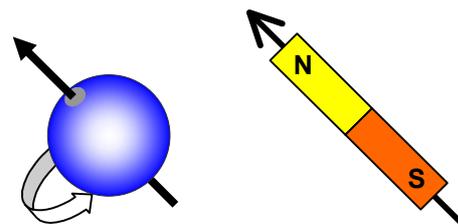


Figura 1.5. Prótons giram como se fossem pequenos planetas e criam seu próprio campo magnético.

1.2.2. Precessão

O segredo da imagem por ressonância magnética está no fato de um corpo magnetizado precessar ao redor de um forte campo magnético estático (sem alteração). Este fenômeno de precessão ocorre sempre que uma força externa age sobre um objeto em rotação. Na Figura 1.6, apresentamos três exemplos de precessão. Um pião em rotação, quando in-

fluenciado pela força da gravidade, precessa ou oscila ao redor da linha definida pela direção da força gravitacional (linha normal). A Terra é outro exemplo de precessão, que ocorre devido à interação com a força gravitacional do Sol e dos outros planetas. Na ressonância magnética, um próton em rotação (no caso específico, o núcleo do hidrogênio) precessa quando colocado sob ação de um campo magnético muito forte. A velocidade desta precessão aumenta com o incremento da força do campo magnético. Assim, um próton sob a ação de um campo de 2 Tesla precessa mais rápido que o próton no campo de 1 Tesla. É difícil imaginar a velocidade de precessão de prótons em sistemas de ressonância magnética, porém sabe-se que em sistemas de campo magnético baixo, os prótons podem atingir velocidades de 5 milhões de ciclos/voltas por segundo (5 MHz).

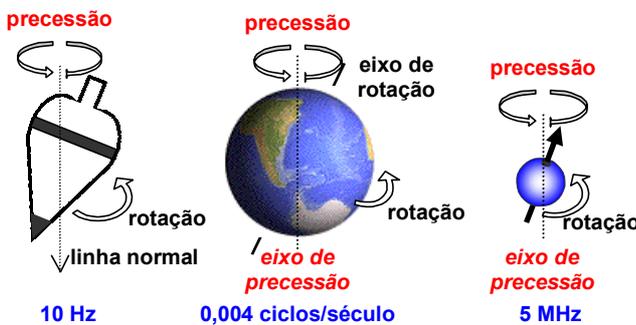


Figura 1.6. Exemplos de movimentos de precessão realizado por 3 corpos: pião, Terra e próton.

1.2.3. Campo magnético intenso

O segredo da ressonância magnética está na aplicação de um campo magnético muito intenso sobre os átomos do corpo humano. Este campo varia de equipamento para equipamento, e situa-se na faixa entre 0,1 Tesla até 2 Teslas (20.000 vezes o campo magnético natural da Terra). Com este campo tão forte, os prótons acabam por realizarem seus movimentos de forma uniforme, conforme a Figura 1.7 abaixo.

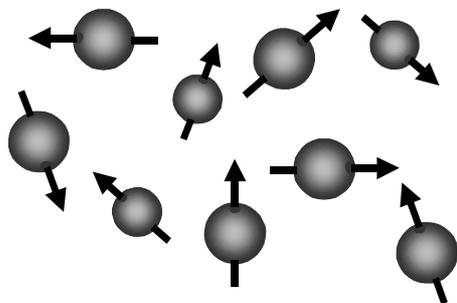


Figura 1.7.(a)

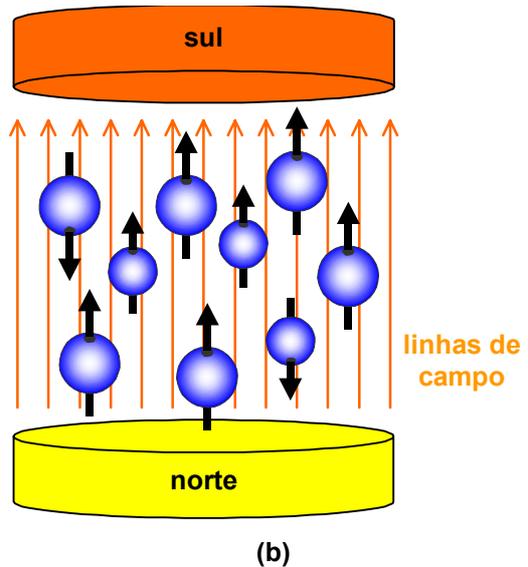


Figura 1.7. Influência de um campo magnético na orientação do spin: (a) os giros são realizados de forma totalmente aleatória; (b) os giros são alinhados segundo o campo magnético.

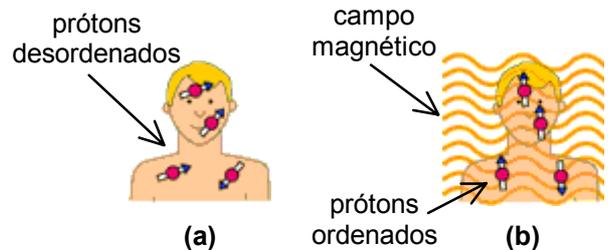


Figura 1.8. Como os prótons do hidrogênio são influenciados pela presença do campo magnético: (a) prótons dentro do corpo sem direção preferencial; (b) prótons alinhados pela força do campo magnético aplicado.

Este campo magnético intenso é necessário para que se possa alinhar todos os prótons e com isso saber qual é a condição inicial deles. Este alinhamento pode ser tanto paralelo (mais numeroso) ou anti-paralelo (menor incidência). Assim, aqueles que saírem do alinhamento poderão ser detectados facilmente. Além do alinhamento, como uma reação à obrigação de ficarem numa direção única, os prótons acabam também por precessar. E esta precessão está relacionada com a intensidade do campo magnético aplicado, segundo a Equação de Larmor:

$$\omega_0 = g \cdot B_0$$

onde ω_0 é a frequência de precessão;
 g é a razão giromagnética; e
 B_0 é a intensidade do campo magnético aplicado, dado em Tesla.

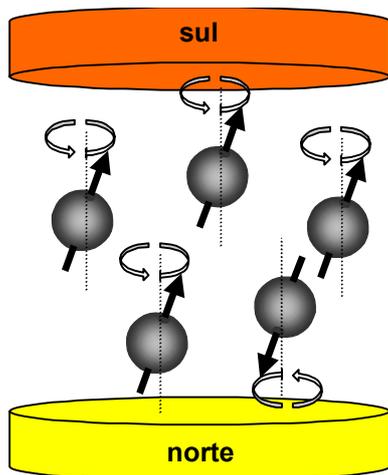


Figura 1.9. Os prótons além do alinhamento, também precessam na presença de um campo magnético intenso.

A razão giromagnética é uma constante que representa uma característica magnética do próton e vale 42,5 MHz/T para o Hidrogênio. Assim, o próton sob a influência de um campo de 1 Tesla irá girar na frequência de 42,5 MHz. Se o campo for diminuído à metade, a frequência do próton cairá para 21,25 MHz.

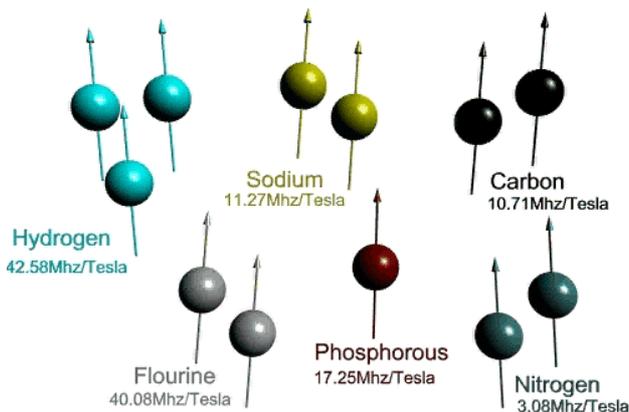


Figura 1.10. Alguns átomos e suas razões giromagnéticas.

1.2.4. Emissão de sinal de rádio

Após a aplicação do campo magnético estático, a precessão dos prótons no paciente pode ser ainda mais alterada por ondas de rádio. Isso se deve ao fato de ondas de rádios serem ondas eletromagnéticas, ou seja, contém um campo elétrico e um campo magnético que variam ambos com o tempo. O efeito que a onda de rádio causa é o aumento do ângulo de precessão do próton. E, quanto mais tempo a onda de rádio for aplicada ao paciente, maior o ângulo de precessão. Na Figura 1.8, a onda de rádio foi aplicada por tempo suficiente para fazer o próton mudar de quase vertical (paralelo ao campo magnético) para horizontal (formando ângulos retos com o campo

magnético estático). Entretanto, mesmo uma duração de ondas de rádio suficiente para modificar a precessão dos prótons para uma posição quase horizontal parece curta em relação aos eventos da vida diária. Dizemos que a onda de rádio é aplicada ao paciente em "pulsos" que podem durar uma fração de segundo durante a *fase de envio* do processo de ressonância magnética. São essas ondas, ou mais especificamente, seus campos magnéticos que estarão em ressonância com os prótons. Por ser esta ressonância causada por interações magnéticas, este tipo de exame é chamado de *RESSONÂNCIA MAGNÉTICA*.

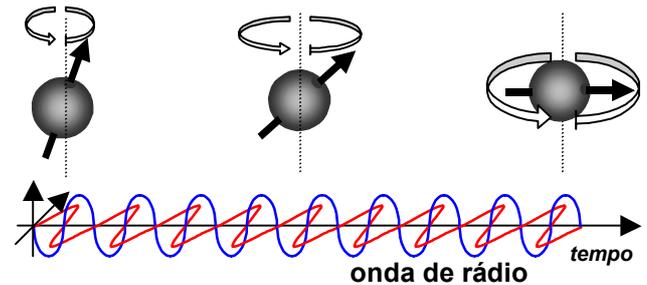


Figura 1.11. À medida que a onda de rádio interage com a partícula (maior tempo), essa aumenta sua velocidade de precessão, o que implica na inclinação do eixo de rotação.

Esta ressonância magnética irá ocorrer não apenas com um único próton, mas com um grande número deles. Assim, cada próton contribui com seu dipolo para gerar um vetor de magnetização resultante, conhecido como \vec{M} , que irá indicar o comportamento médio de todos os prótons de uma determinada região do corpo. Este vetor magnetização será o responsável pela geração da imagem, no momento em que ele receber a energia proveniente da onda eletromagnética gerada pela bobina.

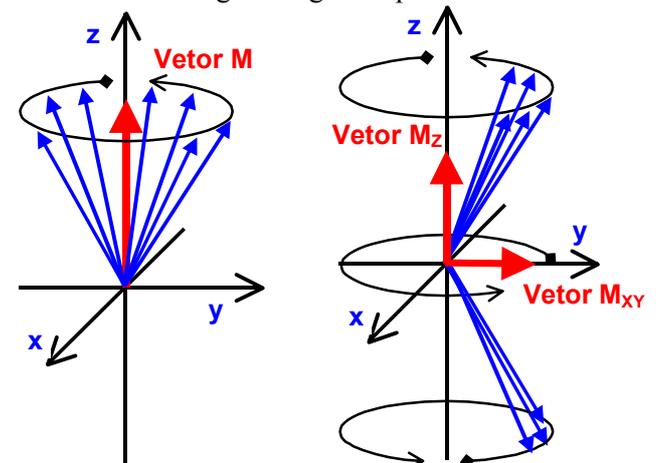


Figura 1.12. Um conjunto de prótons, representados pelos vetores de magnetização, alteram sua precessão ao receberem a energia de uma onda eletromagnética. A componente longitudinal (eixo z) diminui seu valor e aparece uma componente transversal (eixo y).

1.2.5. Conceito de ressonância

A escolha da radiofrequência a ser utilizada para afetar a precessão dos prótons depende da velocidade de precessão em que o próton já esteja girando para que o valor escolhido seja o adequado para entrar em ressonância com os prótons. Isto significa que, enquanto o próton gira, o campo magnético parece estar exatamente no tempo apropriado para ter efeito máximo em forçar o próton para fora do campo magnético estático. Esta simetria ou concordância entre uma força e um sistema que se alteram periodicamente são um exemplo do conceito de ressonância.



Figura 1.13. Quando empurramos o balanço no momento de máxima altura, entramos em ressonância com ele.

Outro exemplo comum de ressonância é quando empurramos alguém no balanço do parque. Quando fazemos isso, naturalmente a empurramos em ressonância. Isto é, aplicamos força ao balanço em uma frequência igual à frequência com que ele retorna para nós. Sabemos que, se aplicarmos nossa energia em qualquer outro momento não haverá efeito útil. Ou seja, se tentarmos empurrar o balanço quando ele estiver vindo ao nosso encontro acabaremos por diminuir sua velocidade, se não o pararmos completamente.

Assim, o princípio de ressonância explica por que utilizamos ondas de radiofrequência aplicadas em pulsos para imagens por ressonância magnética. As ondas de rádio, que se encontram na faixa de 1 a 100 MHz, estão em ressonância com os prótons em precessão.

1.2.6. Recebimento do sinal de ressonância

Da forma como estamos abordando, o próton

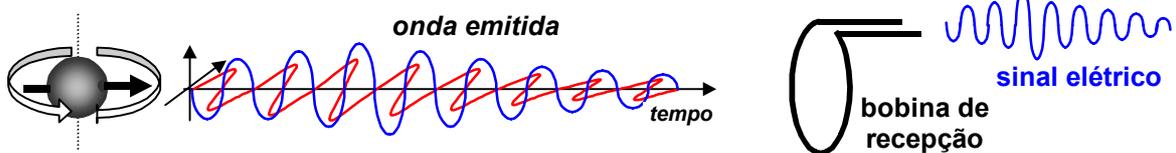


Figura 1.14. Geração do sinal de ressonância magnética.

é um pequeno magneto que ao girar, emite ou cria ondas eletromagnéticas. Estas ondas emitidas de prótons dentro do tecido humano são captadas por uma antena ou bobina receptora durante a *fase de recepção* do processo de ressonância magnética. Este sinal elétrico obtido na bobina receptora é enviado a um computador que utilizará técnicas matemáticas semelhantes a da tomografia computadorizada para reconstruir a imagem do paciente.

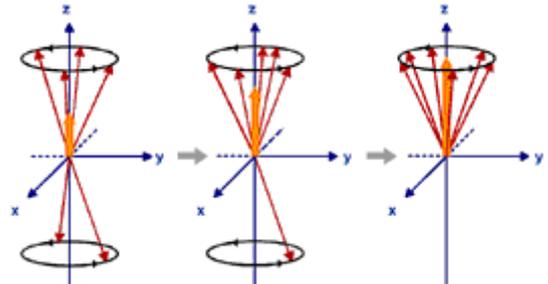


Figura 1.15. Cessado o pulso de RF, os prótons tendem a voltar ao seu estado natural, aumentando a componente longitudinal e eliminando a componente transversal.

1.2.7. Relaxamento

Quando o pulso de ressonância que foi enviado ao próton cessa, todos os prótons estão em precessão juntos e em fase. Assim que o pulso de radiofrequência é desligado, os prótons começam a retornar a uma configuração mais aleatória em um processo chamado de relaxamento. Como o termo indica, os prótons tendem a procurar um estado de menor energia, um estado mais relaxado. À medida que as partículas relaxam, o sinal de ressonância enviado pelos prótons em precessão diminui. A velocidade de relaxamento fornece-nos informação sobre o tecido normal e sobre processos patológicos nos tecidos. Assim, podemos dizer que é o tempo de relaxamento o responsável pela imagem que visualizamos do paciente. O relaxamento é dividido em dois tipos, denominados **relaxamento T1** e **relaxamento T2**. A letra significa tempo, pois é o tempo de duração ou de alteração do vetor M_z e M_{xy} que é calculado em cada um dos relaxamentos.

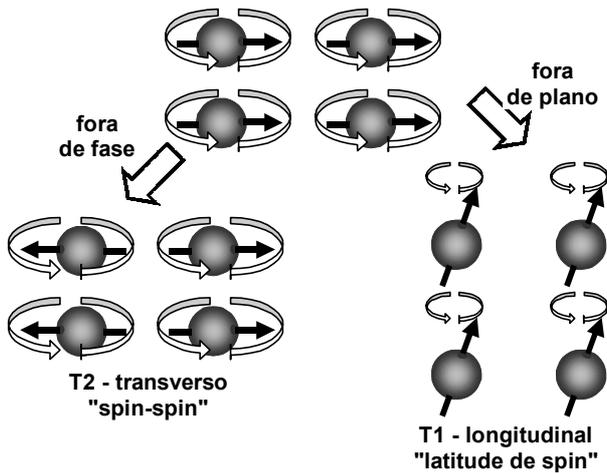


Figura 1.16. As duas categorias de relaxamento.

Relaxamento T1: Esta categoria de relaxamento ocorre quando as rotações começam a precessão em ângulos cada vez menores, isto é, de uma precessão quase horizontal ou transversa a uma mais vertical, conforme Figura 1.15. Este processo, denominado relaxamento tipo latitude de spin ou longitudinal -T1, faz com que o sinal de ressonância magnética diminua de intensidade. Definimos o tempo necessário para este sinal diminuir para 37% de seu valor máximo como T1.

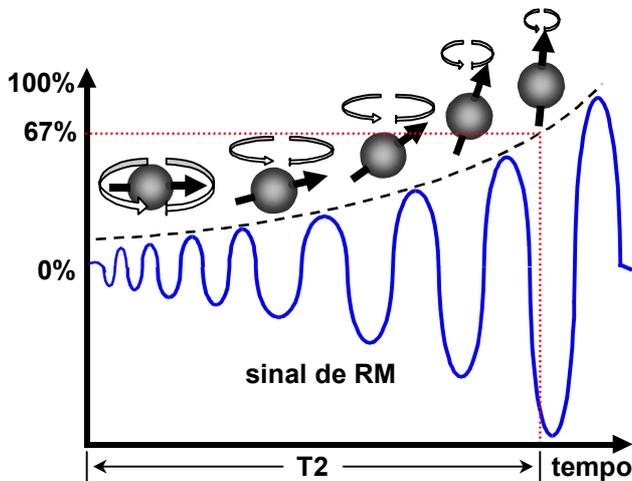


Figura 1.17. Relaxamento T1 (longitudinal ou latitude de spin).

Relaxamento T2: Quando as rotações começam a precessão fora de fase entre si, o resultado é denominado relaxamento tipo transversal ou spin-spin - T2. Se observarmos a Figura 1.16, veremos que os prótons ao longo do gráfico são mostrados "em fase" no início, mas saem de fase conforme passa o tempo. Quando este relaxamento T2 ocorre, o sinal de ressonância magnética diminuirá em intensidade. O tempo necessário para que o sinal diminua para 37% de seu valor máximo é definido como T2.

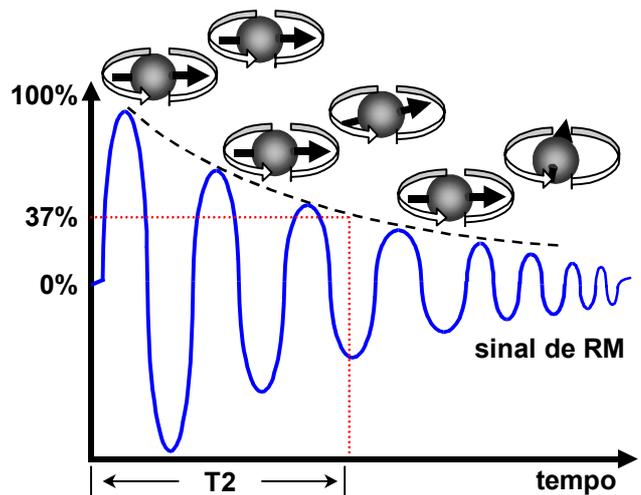


Figura 1.18. Relaxamento T2 (transversal ou spin-spin).

Densidade Spin: Um sinal mais forte será recebido se a quantidade de núcleos de hidrogênio presente em um determinado volume de tecido for maior. Entretanto, esta quantidade, denominada densidade protônica ou densidade spin, é um pequeno colaborador da aparência da imagem por ressonância magnética porque a imagem dos prótons nos tecidos não difere acentuadamente em densidade spin. Uma consideração mais importante discutida anteriormente é que os núcleos que compõem diferentes tecidos no corpo respondem em diferentes velocidades de relaxamento, T1 e T2.

1.2.8. Gradientes de campo magnético

Para entender melhor o método de reconstrução de imagem usado em RM, é necessário compreender o conceito de gradiente, ou uma alteração da intensidade do campo magnético através de uma determinada região ou "corte" de tecido corporal. O gradiente é usado para obter informações de regiões ou cortes específicos do tecido corporal. O conhecimento da localização exata da origem de sinais de RM recebidos do paciente permite que o computador reconstrua a imagem.

Anteriormente, foi demonstrado que a intensidade do campo magnético determina a velocidade de precessão dos núcleos. A velocidade de precessão determina o valor exato da radiofrequência que estará em ressonância com o núcleo. O sistema de RM envia e recebe ondas de rádio dos núcleos apenas quando aqueles núcleos estão em precessão com frequências iguais à das ondas de rádio, isto é, em frequência de ressonância. Assim, um sistema de RM altera o gradiente ou a intensidade do campo magnético através de determinada região ou corte do tecido corporal, de forma que o sistema receberá apenas o

sinal de ressonância magnética dos núcleos em precessão dentro daquela região ou corte. O computador decodifica esta e outras informações, como densidade de spin e relaxamento T1 e T2, podendo portanto, reconstruir a imagem.

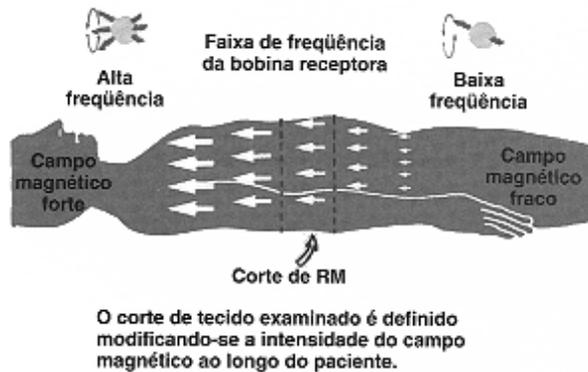


Figura 1.17. Gradiente do campo magnético aplicado ao paciente.

O uso de gradientes em RM é semelhante em vários aspectos ao uso de colimadores de raios X em tomografia computadorizada, em que é usada informação de cortes específicos de tecido irradiado para reconstruir a imagem tomográfica. Os gradientes são produzidos por bobinas de gradiente localizadas dentro do orifício do magneto do sistema principal. Os gradientes são muito mais fracos que o campo magnético estático produzido pelo magneto do sistema de ressonância magnética principal. O gradiente aumenta a intensidade do campo magnético estático sobre algumas regiões do paciente e diminui a intensidade do campo estático sobre outras regiões. Como a intensidade do campo magnético determina a frequência de precessão dos prótons, esta por sua vez, determina a frequência do sinal de RM produzido naquela região. Assim, os gradientes fazem com que diferentes regiões do paciente produzam sinais de RM em frequências ligeiramente diferentes.

Folha deixada em branco