

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA

CÂMPUS FLORIANÓPOLIS

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇOS

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM RADIOLOGIA

MARIANA COSTA

**A UTILIZAÇÃO DO DOSÍMETRO FRICKE-GEL (FXG) E O
IMAGEAMENTO POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA PARA
DETERMINAÇÃO DE DOSE ABSORVIDA: UMA REVISÃO
INTEGRATIVA.**

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2018.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA

CÂMPUS FLORIANÓPOLIS

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇOS

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM RADIOLOGIA

MARIANA COSTA

**A UTILIZAÇÃO DO DOSÍMETRO FRICKE-GEL (FXG) E O
IMAGEAMENTO POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA PARA
DETERMINAÇÃO DE DOSE ABSORVIDA: UMA REVISÃO
INTEGRATIVA.**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnóloga em Radiologia.

Orientador: Alexandre D'Agostini Zottis, Dr.
Co Orientadora: Renata Pietsch Ribeiro, Dr^a.

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2018.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Costa, Mariana

A UTILIZAÇÃO DO DOSÍMETRO FRICKE-GEL (FXG) E O IMAGEAMENTO POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA PARA DETERMINAÇÃO DE DOSE ABSORVIDA: UMA REVISÃO INTEGRATIVA. / Mariana Costa ; orientação de Alexandre D'Agostini Zottis; coorientação de Renata Pietsch Ribeiro. - Florianópolis, SC, 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. CST em Radiologia. Departamento Acadêmico de Saúde e Serviços.

Inclui Referências.

1. Fricke. 2. Dosimetria. 3. Ressonância magnética. I. D'Agostini Zottis, Alexandre. II. Pietsch Ribeiro, Renata. III. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Saúde e Serviços. IV. Título.

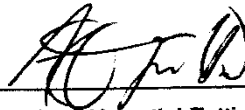
**A UTILIZAÇÃO DO DOSÍMETRO FRICKE-GEL (FXG) E O IMAGEAMENTO POR
RESSONÂNCIA MAGNÉTICA PARA DETERMINAÇÃO DE DOSE ABSORVIDA:
UMA REVISÃO INTEGRATIVA.**

MARIANA COSTA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnóloga em Radiologia e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Tecnologia Radiologia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 4 de julho de 2018.

Banca Examinadora:




Alexandre D'Agostini Zottis, Dr.



Renata Pietsch Ribeiro, Dr^a.



Daniel Souza Felipe, Me.



Flávio Augusto Penna Soares, Dr.

Dedico este trabalho aos meus pais, que me ensinaram que tudo é possível.

Obrigada por todo o amor e apoio!

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Lucio e Sandra, pelo suporte, carinho e amor incondicional que sempre me deram, serei eternamente grata!

Aos meus irmãos Caroline e Gabriel, pelas dádivas da amizade e da alegria.

Aos meus familiares por todo apoio e incentivo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, por possibilitar-me tamanho aprendizado por meio da convivência e das minhas experiências acadêmicas.

Ao professor Alexandre D'Agostini Zottis, por me orientar e auxiliar tanto nas dificuldades acadêmicas quanto pessoais.

Aos demais professores do curso Superior de Tecnologia em Radiologia do IFSC, por todas as contribuições e ensinamentos.

Aos meus amigos, por alegrarem meus dias e por compartilharem comigo inúmeros momentos de felicidade.

Ao meu namorado Dener, por todo suporte, apoio, carinho e amor, que tornou a jornada mais possível e tranquila.

Por fim, a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para minha evolução profissional e pessoal, meus sinceros agradecimentos.

“Não importa o que aconteça, continue a nadar”
Graham Walters.

RESUMO

A dosimetria química, desenvolvida no século XX por Hugo Fricke e aprimorada recentemente com a adição do alaranjado xilenol, denominada Fricke Xilenol gel, consiste na determinação da dose absorvida a partir das medidas de variação das concentrações de íons de Fe^{2+} em cloreto férrico Fe^{3+} . A partir do levantamento desse elemento químico na solução após interação com a radiação, é possível utilizá-lo na área da dosimetria clínica para levantamento de dose absorvida. Dentre as modalidades de leitura disponíveis para avaliação deste dosímetro, a ressonância magnética, a qual baseia-se na propriedade física exibida por núcleos de determinados elementos, mostra-se vantajosa devido sua alta sensibilidade e especificidade, além da possibilidade da utilização de imagens tridimensionais. Visto isso, o presente trabalho objetivou desenvolver uma revisão integrativa referente a dosimetria química, com foco no dosímetro Fricke modificado, Fricke Xilenol Gel (FXG), correlacionando estudos que envolvam este tipo de dosimetria com o uso da técnica de imageamento por ressonância magnética para avaliação de dose absorvida. Para concluir o objetivo geral foi realizado o levantamento de estudos com enfoque na temática de interesse e, após selecionar materiais por meio de critérios de inclusão e exclusão, foram avaliados 3 artigos científicos em base de dados, uma tese e três dissertações. Por fim, os estudos apontaram as aplicações, benefícios e desvantagens do FXG bem como parâmetros utilizados na RM para leitura destes.

Palavras-chave: Fricke. Dosimetria. Ressonância Magnética.

ABSTRACT

The chemical dosimetry, developed in the twentieth century by Hugo Fricke and recently improved with the addition of orange xlenol, called Fricke Xilenol gel, consists in determining the absorbed dose from the measurements of the concentration of Fe^{2+} ions in ferric chloride Fe^{3+} . From the survey of this chemical element in the solution after interaction with the radiation, it is possible to use it in the clinical dosimetry area to collect absorbed dose. Among the reading modalities available for evaluation of this dosimeter, magnetic resonance, which is based on the physical property displayed by nuclei of certain elements, is advantageous due to its high sensitivity and specificity, besides the possibility of using three-dimensional images. In view of this, the present work aimed to develop an integrative review regarding chemical dosimetry, focusing on the modified Fricke dosimeter, Fricke Xilenol Gel (FXG), correlating studies involving this type of dosimetry with the use of the magnetic resonance imaging technique for evaluation absorbed dose. In order to complete the general objective, a study was carried out focusing on the topic of interest and, after selecting materials by means of inclusion and exclusion criteria, three scientific articles were evaluated in a database, one thesis and three dissertations. Finally, the studies pointed out the applications, benefits and disadvantages of FXG as well as parameters used in MRI for reading these.

Key-words: Fricke. Dosimetry. Resonance Imaging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplificação do movimento de precessão de um átomo de hidrogênio.	18
Figura 2 - Exemplificação de formação de Sinal de Declínio de Indução Livre (DIL) por meio de pulso de 90° , gerando sinal para imageamento por RM.	20
Figura 3 – Retorno da magnetização longitudinal	22
Figura 4 - Decaimento da magnetização transversal	23
Figura 5 - Exemplo de sequência de pulso. Pulso de 90° e aplicação no tempo (TE/2) do pulso de RF de 180°	24
Figura 6 Exemplo de dosímetros.....	25
Figura 7 Alteração de cor no dosímetro FXG de 0 a 30 Gy.	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

(H) – Hidrogênio

FXG – Fricke Xilenol Gel;

ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares

IR – Inversion Recovery;

RF – Radiofrequência;

RM – Ressonância Magnética;

RSR – Relação Sinal-Ruído;

S – Sensibilidade;

T – Tesla;

TC – Tomografia Computadorizada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	OBJETIVO GERAL	15
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	BREVE HISTÓRICO DA RESSONÂNCIA MAGNÉTICA	16
2.2	PRINCÍPIOS BÁSICOS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA	17
2.2.1	<i>Precessão</i>	18
2.2.2	<i>Equação de Larmor</i>	19
2.2.3	<i>O Sinal de RM</i>	19
2.2.4	<i>Sinal de Declínio de Indução Livre (DIL)</i>	20
2.2.5	<i>Recuperação T1</i>	21
2.2.6	<i>Decaimento T2</i>	22
2.2.7	<i>Parâmetros de Sincronização de Pulso</i>	24
2.3	DOSIMETRIA	25
2.3.1	<i>Dosimetria Fricke</i>	26
2.3.2	<i>Dosimetria Fricke com Xilenol Gel</i>	27
2.3.3	<i>Funcionamento FXG na RM</i>	28
2.3.4	<i>Aplicações da dosimetria Fricke</i>	29
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	DELINEAMENTO DA PESQUISA	30
3.1.1	<i>Análise de Dados</i>	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1	TRABALHOS ENVOLVENDO DOSIMETRIA FRICKE E IMAGEM POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA	38
4.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
5	CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

O poder das técnicas de imagem em medicina diagnóstica aumenta a cada dia, sublinhando nossa capacidade como humanos de confiar e agir com base no que vemos. Várias áreas da medicina dependem diretamente da nossa capacidade de representar não só a morfologia e função de sistemas e órgãos do corpo humano, como também a estrutura de seus tecidos e, mesmo, a composição bioquímica de seus componentes (FERREIRA; NAFIC, 2011).

Diversas especialidades médicas têm seus campos aperfeiçoados graças às melhorias advindas do avanço tecnológico de equipamentos capazes de realizar exames de imagens, tais como mamografia, radiografia, tomografia computadorizada (TC) e ressonância magnética (RM). A última ocupa um lugar único entre tais modalidades, já que não necessita de radiação ionizante, além de ser útil para a visualização completa de órgãos do corpo humano, não apenas estruturalmente, mas também com detalhamento morfológico e funcional (BUSHONG, 2013).

Considera-se, atualmente, a RM um dos principais métodos de diagnóstico por imagem. Sua importância na investigação de diversos tipos de patologias deve-se justamente à combinação de alta resolução, especificidade e sensibilidade das estruturas analisadas em múltiplos planos de estudo (axial, coronal e sagital), permitindo diferenciar características teciduais. Além de possibilitar estudos voltados para a anatomia humana, esta técnica pode auxiliar em outras áreas de pesquisa, como a dosimetria, já que a RM possibilita uma excelente diferenciação de contraste (HAAGA et al., 2010).

Existem diversas maneiras de estimar dose absorvida das radiações ionizantes com dosimetria física ou química. A dosimetria utilizando solução de Fe^{2+} com Xilenol denominada Fricke-Xilenol Gel ou simplesmente FXG constitui uma dessas formas, conhecidas como dosimetria química e vem se mostrando benéfica para este segmento (MANGUEIRA, 2009). A dosimetria química consiste na determinação da dose absorvida a partir das medidas de variação das concentrações de cloreto férrico (Fe^{3+}) presente na solução, induzidas pela radiação ionizante. Quando a radiação interage com o meio, esta pode ser convertida na produção de íons. Estes íons, por sua vez, podem favorecer reações com outras moléculas,

produzindo radicais livres e/ou íons secundários, os quais podem reagir e formar produtos químicos estáveis (CAPELETI, 2014).

Deste modo, é de extrema importância evidenciar as vantagens da utilização deste tipo de dosimetria, através de levantamento bibliográfico, a qual pode ser relacionada ao imageamento por RM, permitindo assim, a análise do tempo de relaxamento em ponderações T_1 e T_2 e cálculo de valor de absorvância do FXG, permitindo análise de alterações de concentração de íons férricos da solução.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Considerando os avanços tecnológicos na área de medicina diagnóstica, é possível, por meio de levantamento bibliográfico, correlacionar o uso da dosimetria Fricke com o imageamento por ressonância magnética?

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o crescente número e a variedade de informações referentes a área da dosimetria em radiodiagnóstico, é indispensável o desenvolvimento de recursos, no âmbito da pesquisa científica, para que haja referências concisas que proporcionem aos profissionais e interessados, melhor conhecimento do assunto abordado como temática neste trabalho.

A justificativa do presente trabalho se dá pela necessidade em realizar revisão integrativa com o dosímetro FXG como método para contabilizar a quantidade de energia depositada em função de sua quantidade de material no meio na área de dosimetria clínica. Além disso, se faz necessário ampliar a informação a respeito da distribuição espacial da dose absorvida através da avaliação das imagens na RM, já que este tipo de dosímetro também permite análise por métodos óticos, de espectrofotometria, tomografia computadorizada e ressonância magnética.

Por fim, a decisão para efetuar esta pesquisa também se deve ao fato do interesse em particular da pesquisadora pelo assunto abordado em questão.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma revisão integrativa referente a dosimetria química, com foco no dosímetro Fricke modificado, Fricke Xilenol Gel (FXG), correlacionando estudos que envolvam este tipo de dosimetria com o uso da técnica de imageamento por ressonância magnética para avaliação de dose absorvida.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

De modo sistemático, o objetivo geral foi abrangido por meio dos seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar pesquisa bibliográfica acerca da aplicação de técnica de ressonância magnética na área de dosimetria Fricke;
- b) Correlacionar os achados para atualização do tema abordado;
- c) Identificar grupos de estudos existentes envolvendo dosimetria Fricke e seu uso em imagem por ressonância magnética.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BREVE HISTÓRICO DA RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

De acordo com Stark e Bradley Jr. (2005, p. 1), “a ressonância magnética é um fenômeno que envolve campos magnéticos e ondas eletromagnéticas de radiofrequência (RF)”. Os primeiros estudos relacionados a RM nos remontam ao ano de 1946, onde, de um modo independente, Edward Purcell em Harvard e Felix Bloch em Stanford, estudavam os elementos sólidos e líquidos, respectivamente (BLOCH et al., 1946; PURCELL et al., 1946). Em consonância, Silva (2009) discorre que a RM teve início como uma técnica tomográfica, ou seja, que permitia a visualização de uma fatia pequena de um objeto estudado. Stark e Bradley Jr. (2005, p.1) discorrem que por volta de 1967 a ideia de estender a utilização da RM à seres humanos foi colocada em prática e acredita-se que, nesse mesmo ano, os primeiros sinais por meio de RM foram produzidos. Deste modo, “a primeira imagem bidimensional (2D) de RM de prótons de uma amostra de água foi gerada em 1972 por Lauterbur e, em 1974, foi produzida a primeira imagem de um animal vivo” (STARK; BRADLEY JR., 2005).

Com os avanços científicos e tecnológicos relacionados ao tema, “a RM avançou como técnica de tomografia e passou a tratar de dados tridimensionais, ou seja, passou a atuar em volumes do corpo humano” (SILVA, 2009, p. 10). Ainda de acordo com Silva (2009):

Entre 1950 e 1970, a RM foi desenvolvida como um instrumento de análise molecular. Somente em 1971, quando Raymond Damadian mostrou que os tempos de relaxamento magnéticos nucleares de tecidos e tumores eram diferentes, encorajando assim, cientistas a usarem a ressonância magnética como forma de detecção de doenças (SILVA, 2009, p.10).

O advento da RM fez com que seus primeiros estudiosos, Block e Purcell, fossem premiados com o prêmio Nobel em 1952 (SILVA, 2009). Atualmente a RM é peça fundamental na medicina, auxiliando no diagnóstico e tratamento de diversos tipos de patologia nas mais diversas especialidades médicas, contribuindo para o aumento da expectativa de vida de todas as pessoas.

2.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Por definição, a RM é a propriedade física exibida por núcleos de determinados elementos que, quando submetidos a um campo magnético forte e excitados por ondas RF em determinada frequência (Frequência de Larmor), emitem rádio sinal, o qual pode ser captado por uma antena e transformado em imagem (BLOCH et al., 1946; PYKETT et al., 1982; VILLAFANA, 1988; ÁVILLA, 2001). Atualmente, esta técnica permite que tais imagens sejam processadas em planos bi ou tridimensionais, formando as estruturas com base principalmente nos átomos de hidrogênio do corpo humano, não necessitando de radiação ionizante.

As técnicas de RM baseiam-se no princípio de que os núcleos dos átomos, que em estado normal giram com “spins” em orientações randômicas, quando colocados em um campo magnético, se orientam. Se a esses núcleos orientados for aplicado um pulso de radiofrequência, eles absorvem e emitem uma quantidade de energia cuja frequência precisa de ressonância depende das próprias características do núcleo e do campo magnético. Quando o cérebro humano é submetido a um campo magnético ao qual uma frequência de rádio é superimposta, seus tecidos emitem frequências diferentes por terem constituições físico-químicas distintas. Isso também torna possível diferenciar os sinais emitidos pela substância cinzenta ou branca e também pelo líquido cefalorraquidiano (LCR), por exemplo, gerando uma imagem de grande precisão espacial (ARCURI; MCGUIRE, 2001).

Para Mazzola (2009), a RM se resume, basicamente, pela forte interação do campo magnético produzido pelo ressonador (equipamento) com os prótons de (H) presentes no organismo humano, criando então uma possibilidade para envio de um pulso de RF modificada através da bobina/antena receptora. Posteriormente, o sinal é processado e convertido em imagem ou dados.

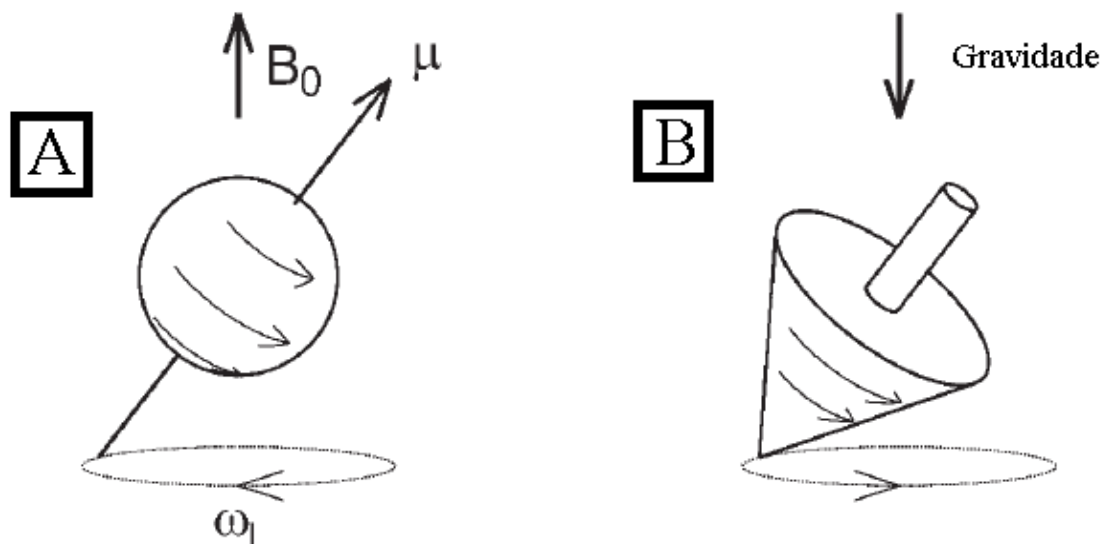
Substancialmente, na prática, o paciente é submetido a um campo magnético intenso, uma onda de radiofrequência incide no paciente, esta onda é desligada e por fim, o paciente emite um sinal que é utilizado na formação da imagem. Isso tudo só se torna possível graças à interação entre o campo magnético com os prótons de hidrogênio, que compõe a água, encontrada em abundância no organismo humano. Cada próton apresenta uma característica de tempo de relaxamento T_1 e T_2 , gerando diferentes contrastes nas imagens adquiridas.

2.2.1 Precessão

Por apresentarem apenas um próton em seu núcleo, os átomos de hidrogênio presentes no corpo humano criam uma condição favorável ao imageamento por RM uma vez que possuem Spin (momento angular) e momento magnético. De acordo com Mazzola (2009, p. 118), os prótons de hidrogênio podem ser vistos como pequenas esferas que giram em torno do seu próprio eixo e, por serem carregados positivamente, criam ao seu redor um campo magnético próprio, comportando-se como pequenos dipolos magnéticos, em outras palavras, pequenos ímãs.

Ao entrarem em contato com um campo magnético forte (B_0), cada átomo sofre uma rotação adicional ou oscilação dos seus momentos magnéticos, e é essa rotação secundária a qual denomina-se precessão – Figura 1 (WESTBROOK; ROTH; TALBOT, 2016, p. 6).

Figura 1 - Exemplificação do movimento de precessão de um átomo de hidrogênio.



Fonte: PRASAD (2006, p. 6).

A Figura 1 acima representa, em sua esquerda (A), um átomo sob ação de um campo magnético forte (B_0), girando em certa frequência precessional (ω_0), apresentando um momento magnético μ . Para melhor compreensão, ao lado direito

(B) temos um pião girando sob seu próprio eixo sob uma força gravitacional, em alusão à um átomo de hidrogênio sob um campo magnético.

2.2.2 Equação de Larmor

De acordo com Westbrook, Roth e Talbot (2016, p. 7), a equação de Larmor (Equação 1) define o valor da frequência precessional dos átomos sob a ação de um campo magnético forte.

$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0 \quad (1)$$

Na qual:

ω_0 = é a frequência precessional;

γ = é a razão giromagnética;

B_0 = é a potência do campo magnético gerada pelo magneto.

Ainda em consonância com Westbrook, Roth e Talbot (2016),

A razão giromagnética do hidrogênio é de 42,57 MHz/T. Outros núcleos ativos em RM têm razões giromagnéticas diferentes, ou seja, tem frequências precessionais diferentes na mesma potência de campo. Além disso, o hidrogênio tem frequência precessional diferente em diferentes potências de campo (WESTBROOK; ROTH; TALBOT, 2016, p. 7).

Em outras palavras, Mazzola (2009, p. 119) afirma que “uma regra importante a ser sempre lembrada é que qualquer alteração no valor do campo magnético irá alterar a frequência de precessão”.

2.2.3 O Sinal de RM

Após os átomos de hidrogênio estarem sob a ação de um campo magnético forte (B_0), ocorre uma magnetização coerente, ou seja, em fase. Isso faz com que os átomos entrem em precessão na frequência de Larmor no plano transversal (WESTBROOK; ROH; TALBOT, 2016, p. 11). Deste modo:

Segundo a lei de indução eletromagnética de Faraday, se for colocada uma bobina receptora ou qualquer fio condutor na área de um campo magnético em movimento, isto é, a magnetização em precessão no plano transversal, será induzida uma voltagem nesta bobina receptora (WESTBROOK; ROTH; TALBOT, 2016, p. 11).

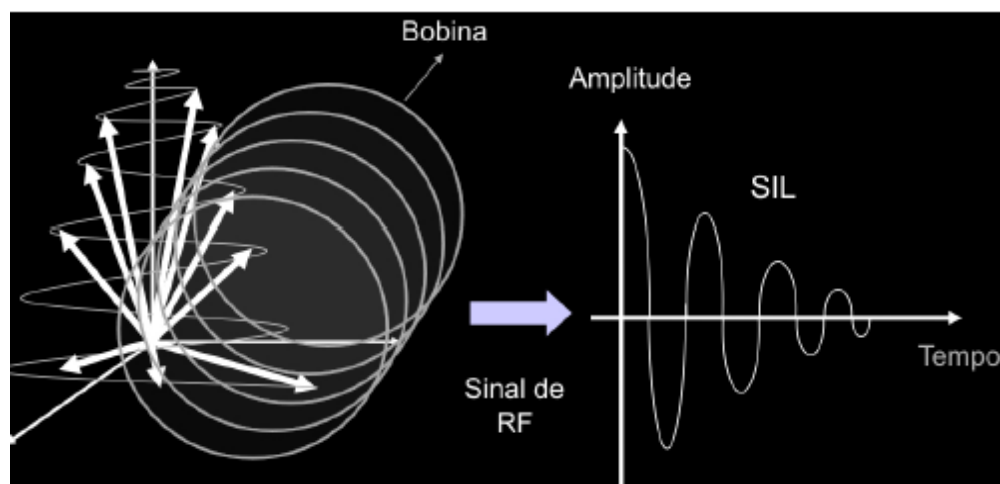
Deste modo, em consonância com as ideias acima, Prasad (2006) discorre que o sinal da RM é criado quando a magnetização em fase atravessa a bobina. “Assim sendo, a magnetização transversal e coerente em movimento produz

flutuações do campo magnético no interior da bobina que induzem uma tensão elétrica na bobina” (WESTBROOK; ROTH; TALBOT, 2016, p. 11-12). Por fim, ainda alinhado com os autores citados, ressalta-se que a frequência do sinal gerado é a mesma que a frequência de Larmor dos átomos dispostos à ação do campo magnético aplicado.

2.2.4 Sinal de Declínio de Indução Livre (DIL)

De acordo com Mazzola (2009, p. 120), “com a aplicação de um pulso de RF de 90°, por exemplo, a magnetização é jogada no plano transversal e passa a induzir uma tensão elétrica na bobina de frequência ω (sinal de RM)” – Figura 2.

Figura 2 - Exemplificação de formação de Sinal de Declínio de Indução Livre (DIL) por meio de pulso de 90°, gerando sinal para imageamento por RM.



Fonte: Mazzola (2009, p. 120).

Prasad (2006) em consonância com Westbrook, Roth e Talbot (2016) afirmam que, após o cessar do pulso de 90° fornecido, o vetor magnetização dos núcleos de hidrogênio passam a sofrer novamente influência do campo B_0 , alinhando-se novamente com o mesmo. No entanto, os núcleos de hidrogênio necessitam perder a energia que lhes foi dada pelo pulso de RF. A este fenômeno é dado o nome de relaxamento.

A magnetização no plano longitudinal aumenta gradualmente – isto é denominado recuperação. Ao mesmo tempo, porém de modo independente, a magnetização no plano transversal diminui gradualmente – isto é denominado decaimento (WESTBROOK; ROTH; TALBOT, 2016, p. 17).

De acordo com Chrysikopoulos (2009, p. 22), durante o processo de relaxamento a recuperação T_1 e decaimento T_2 ocorrem simultaneamente. Portanto, o ponto inicial de decaimento na curva T_2 pode ocorrer em qualquer local na recuperação longitudinal de T_1 .

2.2.5 Recuperação T_1

“A recuperação T_1 é causada pelos núcleos que estão liberando sua energia no ambiente ou quadratura e é chamada de relaxamento rotação-quadratura” (WESTBROOK; ROTH; TALBOT, 2016, p, 13). De acordo com Mazzola (2009, p. 120), há uma equação que representa o retorno da magnetização para o eixo longitudinal – Equação 2:

$$M_z = M_L = M_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (2)$$

Onde:

M_z : magnetização no eixo Z;

M_L : magnetização longitudinal;

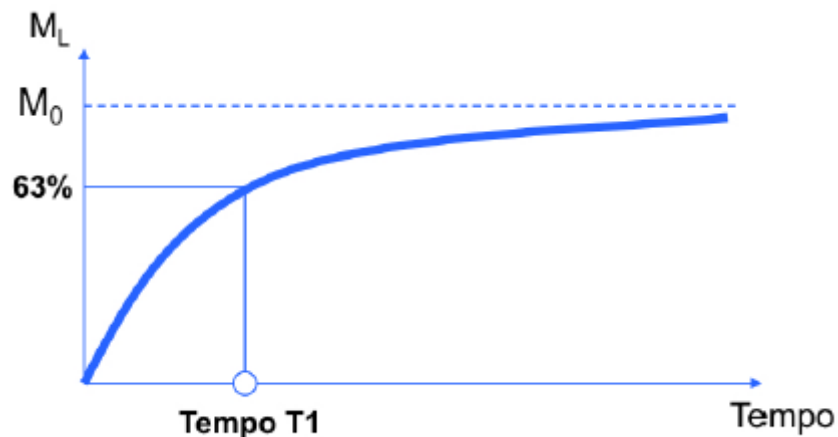
M_0 : magnetização inicial;

t: tempo;

T_1 : constante de relaxação longitudinal.

Ainda de acordo com Westbrook, Roth e Talbot (2016, p. 13), “a taxa de recuperação é um processo exponencial, com tempo de recuperação constante denominado tempo de relaxamento T_1 (necessário à recuperação de 63% da magnetização longitudinal no tecido)” – Figura 3.

Figura 3 – Retorno da magnetização longitudinal



Fonte: Mazzola (2009, p. 121).

2.2.6 Decaimento T₂

Diferentemente da recuperação T₁, o decaimento T₂ ocorre devido à perda de magnetização transversal coerente, ou seja, da defasagem gradual dos núcleos de hidrogênio (PRASAD,2006). “A razão do decaimento também é um processo exponencial, de maneira que o relaxamento T₂ de um tecido é sua constante temporal de decaimento” (WESTBROOK; ROTH; TALBOT, 2016, p. 13). De modo semelhante à recuperação T₁, o decaimento T₂ também pode ser expresso em equação (Equação 3) e em gráfico (Figura 4) (MAZZOLA, 2009, p. 120-121).

$$M_{xy} = M_T = M_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (3)$$

Onde:

M_{xy}: magnetização no plano XY;

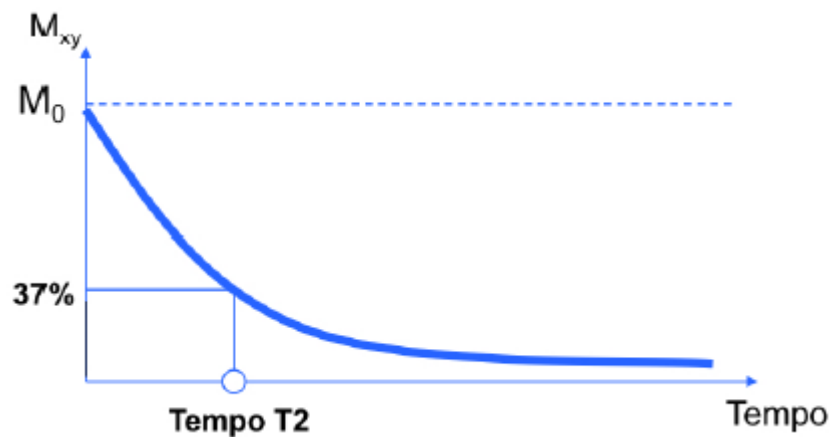
M_T: magnetização transversal;

M₀: magnetização inicial;

t: tempo;

T₂: constante de relaxação transversal.

Figura 4 - Decaimento da magnetização transversal



Fonte: Mazzola (2009, p. 121)

Por fim, Chrysikopoulos (2009) afirma que o tempo de relaxamento T_2 de um tecido também é um processo exponencial, de modo que este é o tempo necessário para a perda de 63% da magnetização transversal. A critério de exemplificação, a Tabela 1 abaixo demonstra os tempos de relaxação T_1 e T_2 aproximados de alguns tecidos do corpo humano à 1,5T (MAZZOLA, 2009, p. 121).

Tabela 1 – Tempos de relaxação T_1 e T_2 aproximados para diversos tipos de tecidos do corpo humano a 1,5 T

Tecido	T_1 (ms)	T_2 (ms)
Substância branca	790	90
Substância cinzenta	920	100
Líquido céfalo-raquidiano (líquor)	4000	2000
Sangue (arterial)	1200	50
Parênquima hepático	490	40
Miocárdio	870	60
Músculo	870	50
Lipídios (gordura)	260	80

Fonte: Mazzola (2009, p. 121).

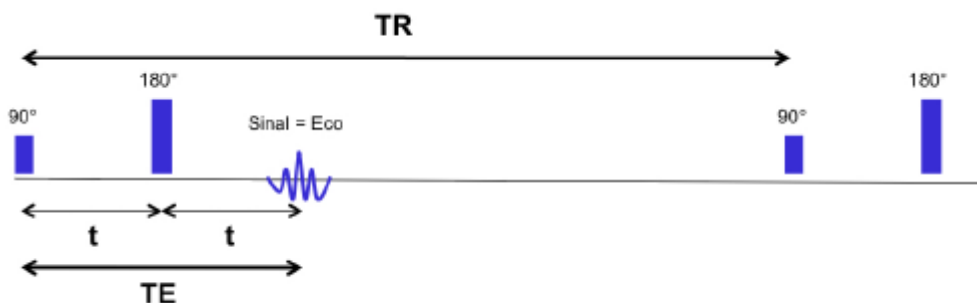
2.2.7 Parâmetros de Sincronização de Pulso

Para que uma imagem seja criada em um sistema de RM, apenas o conhecimento de recuperação T_1 e decaimento T_2 de átomos sob ação de um campo magnético não é o suficiente. Para tal, é necessário que exista um conjunto de ações ordenadas e combinadas. Nesse aspecto, outras duas variáveis essenciais em um sistema de RM são tempo de repetição (TR) e tempo de eco (TE). Deste modo:

O tempo de repetição (TR) é o intervalo de tempo desde a aplicação de um pulso de RF até a aplicação do pulso de RF seguinte e é medido em milissegundos (ms). O TR determina o relaxamento que pode ocorrer entre o término de um pulso de RF e a aplicação do pulso seguinte. O TR determina, portanto, o relaxamento T_1 que ocorreu quando o sinal é lido. Por sua vez, o tempo de eco (TE) é o intervalo de tempo desde a aplicação do pulso de RF até o pico máximo de sinal induzido na bobina e também é medido em ms. O TE determina quanto decaimento da magnetização transversal ocorreu. O TE controla, portanto, o relaxamento T_2 que ocorreu quando o sinal é lido (WESTBROOK; ROTH; TALBOT, 2016, p. 11).

A Figura 5 abaixo tem o objetivo de facilitar o entendimento acerca de TR e TE.

Figura 5 - Exemplo de sequência de pulso. Pulso de 90° e aplicação no tempo (TE/2) do pulso de RF de 180°



Fonte: Mazzola (2009, p. 122).

2.3 DOSIMETRIA

Para Felipe (2003) a dosimetria é a determinação da dose absorvida em um material que resulta das interações da radiação ionizante com a matéria. A determinação é feita através de cálculos e medidas em grandezas radiológicas definidas por comissões como a ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements (Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação, em português).

Dosímetro é um instrumento que detecta ou produz leitura correspondente a dose absorvida depositada em seu material através da exposição de maneira direta ou indireta à radiação ionizante (ATTIX, 1986).

Segundo Oliveira (2018), a dosimetria pode ainda ser dividida em diversas naturezas, como demonstrado na tabela abaixo:

Figura 6 – Exemplo de dosímetros



Fonte: Oliveira (2018).

Com isso, existem diversas maneiras para estimar a dose absorvida no radiodiagnóstico. A luminescência opticamente estimulada (OSL) e a luminescência termicamente estimulada (TL) são muito usadas como formas de avaliar a dose absorvida, por exemplo e ambas têm o mesmo princípio físico, o aprisionamento de elétrons e buracos em defeitos de sólidos isolantes (SILVA, 2012). No entanto, a dosimetria química, contribui melhor para eficácia na relação do resultado de entrega

de dose absorvida. A dosimetria utilizando uma solução química de Fe^{2+} com Xilenol denominada Fricke-Xilenol Gel ou simplesmente FXG constitui uma dessas diferentes formas, e vem se mostrando bastante benéfica para este seguimento (SAUR et al., 2005). A dosimetria química consiste na determinação da dose absorvida a partir das medidas de variação das concentrações de cloreto férrico (Fe^{3+}) presente na solução, induzidas pela radiação ionizante. Quando a radiação interage com o meio, esta pode ser convertida na produção de íons. Estes podem favorecer reações com outras moléculas produzindo radicais livres e íons secundários, que podem reagir e formar produtos químicos estáveis (FERREIRA E OLIVEIRA, 2016).

2.3.1 Dosimetria Fricke

Os primeiros géis sensíveis às radiações foram desenvolvidos na década de 50 por Day e Stein, e estes géis continham fenol em sua composição química. Em 1957, Andrews e colaboradores realizaram medidas de dose depositada por feixe de elétrons e fótons X em géis utilizando ágar (SILVA, 2009). Estudos no ano de 1958 utilizando soluções derivadas do próprio gel Fricke foram realizados. Entretanto, Hoecker e Watkins (1958) descobriram um método alternativo de estudo. Este método era baseado na polimerização por radiação induzida de monômeros em soluções aquosas (MCJURY et al., 1999; SILVA, 2009).

Em 1927, a dosimetria química tipo 'Fricke' teve início com estudos de Hugo Fricke e Stern Morse (FRICKE; MORSE, 1927). Dosímetros químicos tem sua utilização justificada pelo fato de possibilitarem a avaliação da dose em três dimensões, diferente da dosimetria convencionada como câmara de ionização e dosímetros termoluminescentes (TLDs) (CAVINATO, 2009). O dosímetro Fricke tem como base a oxidação do íon de ferro, Fe^{2+} , em íon férrico Fe^{3+} , com oxigênio sob a influência da radiação ionizante (MIZUNO, 2007).

Na dosimetria gel, qualquer propriedade mensurável, que mude em função da dose absorvida de radiação pode ser usada como base para um dosímetro. A ideia de usar a técnica de RM foi primeiramente sugerida por Gore et al. Eles propuseram um novo método de medida e registro da variação da distribuição da dose, utilizando uma solução com absorção equivalente ao tecido, capaz de alta resolução espacial e precisão para doses de radiação moderadas (CAPELETI, 2014).

Atualmente, os dosímetros tipo gel são divididos basicamente em dois tipos: géis com a solução Fricke e géis polímeros (BALDOCK, 2006). O dosímetro tipo

gel deve ser atóxico, descartável em lixo comum, ter resposta independente da dose aplicada e tipo de energia e feixe incidente, além de ser tecido equivalente e preservar resultado em um valor constante ao longo do tempo (MANGUEIRA, 2009).

Com a dosimetria química, utilizando o Fricke gel, torna-se possível realizar o perfil de dose através da distribuição tridimensional da dose de radiação utilizando o equipamento de ressonância magnética.

No dosímetro Fricke ocorre a alteração de cor quando o Fe^{2+} é ionizado transformando-se em Fe^{3+} devido a formação de radicais no meio do mesmo. A radiação provoca oxidações na amostra que correspondem a absorção de fótons (MIZUNO, 2007; FELIPE, 2003). Para avaliação desta interação, é aplicada a técnica de espectrofotometria que consiste em mensurar a quantidade de íons férricos da solução Fricke após o contato da mesma com a radiação (STRECL et. al., 2011).

Na RM a utilização da dosimetria química permite a avaliação das mudanças nas características após exposição à radiação, alterações de parâmetros como contraste e o caminho percorrido pela radiação quando em contato com o gel (GORE et al., 1984). Assim, é possível unir a técnica de imagem de ressonância com a técnica de dosimetria do Fricke gel para avaliação de contraste e dose absorvida.

2.3.2 Dosimetria Fricke com Xilenol Gel

A partir de estudos e pesquisas utilizando géis dosimétricos, se fez necessário a obtenção de um dosímetro mais sensível. A partir de modificações do Fricke Gel padrão, adicionando o alaranjado de Xilenol e gelatina 300 Bloom, foi produzido o Fricke Xilenol Gel (FXG) que é sensível a radiação ionizante e ao ambiente (FERREIRA E OLIVEIRA, 2016).

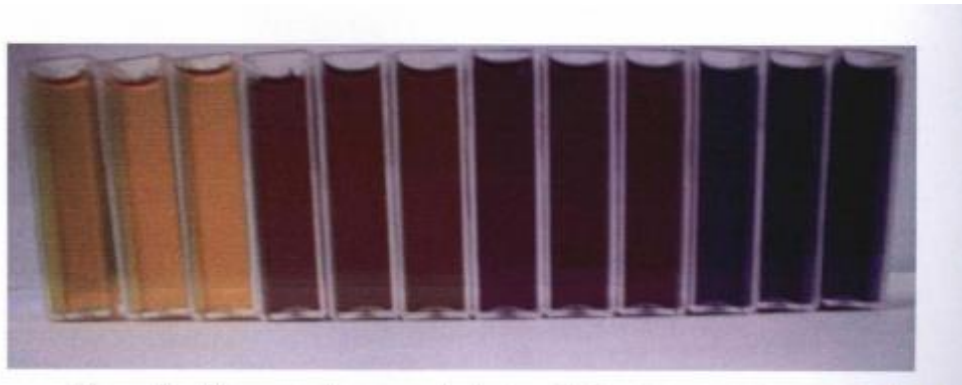
Dosímetros Fricke são dosímetros químicos que funcionam a partir do princípio de oxidação dos íons ferrosos (Fe^{2+}) da solução em íons férricos (Fe^{3+}) induzida por radiação (Fricke, 1927). Com a adição de Alaranjado de Xilenol à solução Fricke padrão pode-se determinar de maneira indireta a quantidade produzida de íons férricos e ferrosos na solução. Os dosímetros Fricke modificados são muito estudados devido às características já muito bem estabelecidas do dosímetro Fricke padrão, empregando a técnica de espectrofotometria. Com a inserção da solução Fricke padrão em uma matriz de gelatina pode-se empregar a técnica de imagem por ressonância magnética (RM) e a confecção de objetos simuladores antropomórficos tecido equivalentes para determinar as curvas de isodose, em três dimensões (3D) (MANGUEIRA, 2009).

O interesse em produzir um dosímetro à base de água está relacionado ao estudo de sistemas biológicos, já que a água corresponde a 80% da constituição molecular do organismo humano (OLIVEIRA, 2011). Com as modificações no dosímetro Fricke padrão (adição de gelatina bloom e alaranjado de Xilenol) o FXG foi desenvolvido então, apresentando maior sensibilidade (doses menores a 30Gy) e maior estabilidade além da facilidade e baixo custo para produção e utilização (SOUZA, 2010).

Em 1984, Gore deu início aos estudos com o dosímetro Fricke, utilizando tomógrafo clínico de ressonância magnética e realizando medidas tridimensionais da dose absorvida. A matriz gelatinosa com sulfato ferroso e xilenol denominado FXG permite análise tanto por métodos óticos quanto por RM (SCHREINER, 2004).

Na figura abaixo, é demonstrada a alteração de cor no dosímetro FXG da esquerda para direita:

Figura 7 Alteração de cor no dosímetro FXG de 0 a 30 Gy.



Fonte: Mangueira (2009).

Para Capeleti (2014) “a solução Fricke apresenta preparo fácil e relativamente rápido, porém é necessária atenção para não haver contaminação e perder a solução”.

2.3.3 Funcionamento FXG na RM

Quando a radiação interage com os íons de Fe^{2+} presentes na solução, estes se oxidam e se transformam em Fe^{3+} . Assim, radicais livres são formados, fazendo com que a concentração de íons férricos se altere e seja detectável pela técnica de RM, já que os prótons de íons ferrosos no meio aquoso na solução têm seu

tempo de relaxação alterado (SCHREINER, 2004). Capeleti (2014) explica que, os íons de Fe^{2+} e Fe^{3+} são espécies paramagnéticas que podem reduzir drasticamente o tempo de relaxação do próton da água, mesmo que em pequenas quantidades.

Os tempos de relaxação T_1 e T_2 do núcleo de hidrogênio em solução aquosa são determinados pela intensidade e espectro de frequência do campo magnético dependente do tempo afetado por cada núcleo. Esses campos locais flutuantes são modulados pelo movimento molecular randômico dentro do fluido. A fonte dominante de interações magnéticas na água pura é o acoplamento dipolo – dipolo entre os núcleos de H na mesma molécula ou entre moléculas vizinhas. O forte efeito dos íons de metais de transição nas taxas de relaxação é devido, principalmente, ao largo campo local produzido pelos spins dos elétrons desemparelhados que dão origem ao seu magnetismo (CAPELETI, 2014).

É possível então, averiguar com mais exatidão, unindo as duas técnicas, a quantidade de energia absorvida no meio e sua distribuição espacial, item imprescindível quando se trata de tratamentos radioterápicos, por exemplo.

2.3.4 Aplicações da dosimetria Fricke

A solução Fricke pode ser utilizada como dosímetro de referência para determinação de taxa de dose em campos gama e pode ser utilizado também como dosímetro de rotina (CAPELETI, 2014). O intuito dos estudos com este tipo de dosimetria, é realizar um mapeamento da dose no campo de radiação utilizado nos tratamentos de tumores maligno, e deste modo assegurar que a dose recebida é aquela prescrita durante o planejamento do tratamento. As técnicas mais empregadas na caracterização do dosímetro são espectrofotometria e imagem por ressonância magnética (RM) (GALANTE; CAMPOS, 2005).

Além da técnica de imageamento por RM, o dosímetro FXG é bastante utilizado na área de pesquisa da física médica, servindo de dosímetro de baixo custo e fácil reprodutibilidade. Conforme demonstrado em pesquisas, os métodos de RM disponíveis nos últimos anos para diagnóstico podem ser úteis para avaliação de distribuição espacial da dose em fantomas (simuladores) (MANGUEIRA, 2009).

3 METODOLOGIA

Chizzotti (1995, p.11) diz que: “a pesquisa investiga o mundo em que o homem vive e o próprio homem”. No entanto, a pesquisa deve seguir uma ordem lógica e o pesquisador deve obedecer a um conjunto de técnicas específicas, possibilitando então a caracterização da pesquisa como científica. Deste modo, a metodologia pode ser definida como um conjunto de etapas que visam, por um método sistemático, a resolução de um objetivo a ser alcançado (MARCONI; LAKATOS, 2010). Não obstante, Gil (2002) e Gressler (2004) discorrem ainda que há diversos tipos de metodologia, as quais devem estar de acordo com o tema do projeto de pesquisa. Neste sentido, o presente projeto de pesquisa caracteriza-se como revisão integrativa.

A revisão integrativa é a sumula de todas as pesquisas que fazem referência à uma questão específica. Difere-se de outras metodologias pois tem como objetivo evitar possíveis vieses em cada uma das etapas, avaliando a relevância e validade dos estudos encontrados (SOUZA; SILVA; CARVALHO, 2010).

Trata-se de um estudo com coleta de dados realizada a partir de fontes secundárias, através de levantamento bibliográfico, baseado na experiência de diversos autores, o que torna a abordagem mais ampla em comparação a outras revisões, pois permite a inclusão de estudos diversificados, sejam eles do tipo experimentais ou não, o que auxilia na compreensão completa do tema analisado.

Este trabalho em questão é uma revisão integrativa envolvendo a dosimetria química e ressonância magnética, com foco na utilização destas duas técnicas combinadas para a avaliação de dose absorvida, com intuito de aferir, através da pesquisa, a aplicabilidade do dosímetro Fricke modificado, o FXG para avaliação de dose absorvida através de imageamento por ressonância magnética.

3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Obedecendo os conceitos de revisão integrativa segundo Mendes, Silveira e Galvão (2008), a referida pesquisa seguiu as seguintes etapas:

- a) Definição do tema e questão de pesquisa;

- b) Critérios de inclusão/exclusão de estudos;
- c) Definição das informações coletadas;
- d) Avaliação dos estudos incluídos;
- e) Interpretação dos resultados;
- f) Apresentação da revisão.

Na etapa inicial, a definição do tema se fez pelo questionamento da pesquisa “é possível correlacionar, através de levantamento bibliográfico, o uso da dosimetria Fricke com imageamento em RM para avaliação de dose absorvida?”

Já para a segunda etapa os critérios de inclusão definidos para a seleção dos artigos foram: publicações em inglês, português e espanhol, artigos na íntegra que retratassem a temática referente à revisão integrativa e artigos publicados e indexados nos seguintes bancos de dado: Science Direct e PubMed, nos últimos 11 anos, com a coleta de dados realizada no período de março a junho de 2018. No Quadro 1, observa-se os critérios de inclusão e exclusão:

Tabela 1 – Critérios de inclusão e exclusão

Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
Temática relacionada com os objetivos da pesquisa	Temática não relacionada com os objetivos da pesquisa
Idiomas inglês, português e espanhol	Outros idiomas
Artigos originais ou de revisão	Notas, cartas ao editor, capítulos de livro, documentos de conferências, citações, patentes
Artigos publicados na íntegra	Artigos publicados em parte ou apenas seus resumos
Publicações entre 2007 e 2018	Publicações anteriores ao ano de 2007

Fonte: Autoral

Ainda citando os critérios de seleção, os artigos inclusos selecionados citavam sobre dosimetria Fricke especificamente com imageamento por ressonância magnética para avaliação de dose absorvida, excluindo outras modalidades de leitura deste dosímetro, como espectrofotometria e tomografia computadorizada.

Com a pesquisa bibliográfica inicial, obteve-se em cada uma das bases de dados, após a aplicação dos filtros de limitação (classificação dos artigos, linguagem e ano de publicação), os resultados listados na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Base de dados combinando descritores e operadores booleanos

Base de dados	Sintaxes de busca	Linguagem	Resultados
Science Direct	“Gel Dosimeter Fricke AND Magnetic Resonance Imaging AND Dose Distribution”	Inglês	64
	“Fricke gel AND RM AND Distribuição de Dose”	Português	0
	“Dosimetría Gel Fricke AND Resonancia Magnética AND Distribución de Dosis”	Espanhol	0
PubMed	“Gel Dosimeter Fricke AND Magnetic Resonance Imaging AND Dose Distribution”	Inglês	2
	“Fricke gel AND RM AND Distribuição de Dose”	Português	0

	“Dosimetría Gel Fricke AND Resonancia Magnética AND Distribución de Dosis”	Espanhol	0
--	---	----------	----------

Fonte: Autoral

Com a escassez de informações nas bases de dados utilizadas, a ferramenta de busca “Google Acadêmico” foi conjuntamente empregada para a realização das buscas de estudos, com os mesmos filtros utilizados (classificação dos artigos, linguagem e ano de publicação) porém com a inclusão adicional de teses e dissertações. Os resultados obtidos são descritos na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Resultados obtidos utilizando Google Acadêmico

Google Acadêmico	“Dosimetria Fricke AND Ressonância Magnética AND Distribuição de dose”	Português	47
	“Dosimetría Fricke AND Resonancia Magnética AND Distribución de Dosis”	Espanhol	12

Fonte: Autoral

A leitura de outras publicações que não artigos, teses e dissertações disponíveis na íntegra, não foram aproveitados para o levantamento de informações desta revisão.

Por fim, fez-se a leitura exploratória dos títulos descritos nas tabelas enumeradas 2 e 3 desta seção e a partir da leitura na íntegra dos títulos disponíveis nas tabelas enumeradas 4 e 5 da seção 3.1.1 deste trabalho, foram coletados os resultados e conclusões.

3.1.1 Análise de Dados

Através dos dados obtidos com as palavras chaves descritas acima, foi realizado a leitura de diversos artigos, além de teses e dissertações disponíveis no Google Acadêmico, que incluíssem realmente o tema desejado. Estudos com outros tipos de dosimetria e/ou técnicas de imageamento foram excluídas.

Na tabela abaixo, Tabela 4, estão descritos os estudos selecionados para inclusão na revisão integrativa:

Tabela 4 – Descrição dos estudos incluídos na revisão integrativa

Número	Título	Autores	Ano e País de Origem	Objetivo	Base de Dados
01	“MRI study of radiation effect on Fricke gel solutions”	A.M.S Galante, H.J Cervantes, C.C Cavinato, L.L Campos, S.R. Rabbani	2007, Brasil.	Utilizar o FXG para avaliação da distribuição de dose na radioterapia após irradiação gama entre 5 e 50 Gy.	Science Direct
02	“Study of optical absorbance and MR relaxation of Fricke xylene orange gel dosimeters”	G. Gambarini, I. Veronese, L. Bettinelli, M. Felisi, M. Gargano, N. Ludwig, C. Lenardi, M. Carraa, G. Collura, A. Longo, M. Marrale, L. Tranchina, F. d’Errico	2016, Itália/EUA	Realizar testes no FXG para ressaltar características que podem afetar a precisão do mesmo.	Science Direct

03	“Correlation between ferrous ammonium sulfate concentration, sensitivity and stability of Fricke gel dosimeters exposed to clinical X-ray beams”	M. Marrale, M. B., Cesare G., S. Gallo, A. Longo, L. Tranchina, B. Abbate, G. Collura, K. Gallias, V. Caputo, A. Lo Castro, M. Midiri, F. D’Errico.	2014, Itália/EUA	Caracterização da relaxometria do FXG por técnica de RM após irradiação gama entre 0 a 20 Gy.	Science Direct
-----------	--	---	------------------	---	----------------

Fonte: Autoral

Os resultados encontrados na base de dados “PubMed” na língua inglesa não foram incluídos na análise de dados citada pois após verificação através da interpretação dos elementos textuais, verificou-se que não se encaixavam no tema de interesse.

Já os resultados encontrados no Google Acadêmico estão representados na Tabela 5 abaixo, demonstrando, com suas consecutivas classificações os tipos de achados envolvendo a temática de interesse:

Tabela 5 – Descrição dos estudos incluídos utilizando Google Acadêmico

	Título	Autores	Ano e País de Origem	Objetivo	Classificação
01	“Desenvolvimento de um sistema de verificação dosimétrica tridimensional utilizando Solução Fricke gel na aplicação para a verificação da Radioterapia em Arco	Roberto Kenji Sakuraba	2015, Brasil.	Avaliar aplicação do FXG para obter resposta para feixe de fótons e sua utilização na avaliação dosimétrica de distribuição da dose em radioterapia.	Tese

	Modulado Volumétrico (VMAT) nos tratamentos com movimentação do alvo pela respiração”				
02	“Avaliação de dose no sistema de irradiação de bolsas de sangue para esterilização”	Paulo Márcio de Oliveira	2014, Brasil.	Avaliar homogeneidade e distribuição de dose aplicada em bolsas de sangue para esterilização utilizando Fricke gel.	Dissertação
03	“Dosimetria em Tomografia Computadorizada e avaliação do perfil de dose empregando dosímetro Fricke gel e a técnica de imageamento por Ressonância Magnética”	Felipe Favaro Capeleti	2014, Brasil.	Verificação de entrega de dose ao paciente utilizando dosimetria Fricke com irradiação através da TC.	Dissertação
04	“Padronização do método de dosimetria Fricke gel e avaliação tridimensional de dose empregando a técnica de imageamento por Ressonância Magnética”	Christianne Cobello Cavinato	2009, Brasil.	Padronização do método de obtenção da solução Fricke desenvolvido no IPEN através do imageamento por RM.	Dissertação

Fonte: Autoral

Os resultados encontrados na base de dados “Google Acadêmico” na língua espanhola não foram incluídos na análise de dados citada pois após verificação

através da interpretação dos elementos textuais, verificou-se que não se encaixavam no tema de interesse.

Após a leitura na íntegra dos elementos encontrados com base na temática de interesse foi elaborada a revisão integrativa em si, apresentada como resultados neste TCC.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra final desta revisão foi constituída por 3 artigos científicos na língua inglesa além de uma tese e 3 dissertações, que foram selecionados pelos critérios de inclusão previamente estabelecidos. Destes, 3 foram encontrados na base de dados Science Direct, mais uma única tese e as três dissertações achadas na base de dados Google Acadêmico.

Nota-se que a maioria das publicações se originam da língua inglesa, com o número total de 66 artigos como resultados, sendo que destes, apenas 3 foram incluídos na revisão integrativa, sendo que nenhum artigo científico das outras línguas pesquisadas, português e espanhol, foram inclusos pois não haviam resultados com as sintaxes de busca, e por esse motivo, uma tese e três dissertações foram inclusas para ampliar as referências desta revisão, e mesmo assim, não houve publicações na linguagem espanhola que pudessem ser inclusas.

4.1 TRABALHOS ENVOLVENDO DOSIMETRIA FRICKE E IMAGEM POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Existem alguns métodos de aplicação da dosimetria Fricke para avaliação da variação do gel após contato com a radiação, como técnicas de radioterapia e tomografia computadorizada, porém a ressonância magnética mostra vantagem pela combinação na técnica de determinação de curvas de isodose com a alta sensibilidade e visualização na imagem em cortes diversos (CHU, 2001; MIZUNO, 2007; OLSSON, 1990).

A RM tem seu princípio de funcionamento baseado na variação no tempo de relaxação do spin do próton dos átomos de hidrogênio, medindo o tempo de retorno destes átomos que ficam em desequilíbrio após a perturbação provocada por um pulso de radiofrequência que é gerado pelo ressonador até o estado de equilíbrio novamente.

Na dosimetria esta técnica é usada para determinação nos tempos de retorno que variam em função da dose de radiação aplicada ao dosímetro (CHU, 2001).

Os materiais na forma de gel, que contém o Fe^{2+} em sua composição e, que após a irradiação são oxidados, aumentando a concentração de Fe^{3+} , são empregados em dosímetros cuja leitura é feita pela técnica de imagem por ressonância magnética (RM) pois a presença de íons férricos, Fe^{3+} , diminui o tempo de relaxação do próton do hidrogênio presente nas moléculas de água. O que torna possível sua diferenciação via variação do tempo de relaxação do spin da água e sua, subsequentemente, aplicabilidade na determinação da dose absorvida (MIZUNO, 2007).

A utilização do dosímetro Fricke e aplicabilidade com a técnica de RM, se mostra, na maioria dos estudos analisados, voltados na sua grande maioria para a avaliação de distribuição espacial de dose, sendo muito utilizada para a área de radioterapia, por exemplo. Segundo Galante et. al (2007) a otimização do controle de qualidade bem como dos processos que utilizam a radiação ionizante para o tratamento de doenças é elemento fundamental para a segurança do paciente, com a mesma concertação, Marrale et al. (2014) acrescenta que a garantia da qualidade desses procedimentos é elemento chave para o sucesso de terapias com dose de radiação letal à tumores, com o mínimo de dano aos tecidos sadios.

Em contrapartida, autores como Gambarini et al. (2017) discorrem com o mesmo enfoque na área de radioterapia, porém com avaliação da aplicabilidade do FXG e suas desvantagens como a difusão de íons férricos que pode afetar a imagem em gradientes de dose muito altos e utilização desse tipo de dosimetria em doses baixas.

De modo geral, todos os estudos demonstram que a quelatação de Fe^{3+} com o alaranjado de xilenol é útil e confiável na precisão de dose absorvida além de fácil preparação em laboratórios, sendo um objeto de pesquisa de baixo custo podendo ser usado na avaliação de irradiação tipo X, fótons e elétrons, além da radiação gama, comprovando sua utilidade como tecido equivalente.

O imageamento por RM requer a aplicação de pulsos de RF e sinais corretos, com a combinação de uma bobina receptora específica para localização das amostras, deste modo, um dado importante obtido através desta pesquisa foram os parâmetros utilizados para a leitura através da técnica de RM, dos quais a maioria utilizou equipamentos de 1,5T (apenas uma pesquisa com equipamento de 7T), exclusivo para pesquisas, a bobina mais utilizada foi de cabeça, usando a sequência IR – Inversion Recovery (Recuperação de Inversão, em português), calculando taxas de T_1 e T_2 demonstrando a concentração de sulfato ferroso das amostras.

De acordo com Cavinato (2009) é importante acondicionamento das soluções dosimétricas sob refrigeração e ao abrigo da luz, evitando a oxidação natural dos íons de Fe^{2+} , assim como descrito nos outros trabalhos avaliados, também levando em conta o tempo de exposição à radiação e leitura na RM, não ultrapassando de 7 horas condicionados de maneira correta.

4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verifica-se que, entre as diversas técnicas para leitura do dosímetro Fricke, tais como espectrofotometria e tomografia computadorizada, a ressonância magnética é a técnica que permite melhor avaliação da real distribuição da dose absorvida na composição dos dosímetros tipo Fricke por meio da leitura de concentração Fe^{2+} que oxidam passando a serem íons de Fe^{3+} , tendo o tempo de relaxação dos prótons de água presentes na solução alterados, o que justifica sua aplicabilidade na avaliação de dose absorvida com linearidade da intensidade do sinal e da dose.

Além disso, fica claro a facilidade de reprodução do dosímetro FXG, o que pode ser útil para pesquisas, sem a necessidade de grandes orçamentos, podendo ser então desenvolvida por diversos centros de pesquisa. No âmbito nacional, a maioria dos estudos foram realizados no estado de São Paulo com recursos do IPEN.

5 CONCLUSÃO

O advento das tecnologias radiológicas trouxe, sem sombra de dúvidas, melhorias significativas para a população como um todo, visto que proporcionam maior facilidade em diagnósticos de patologias diversas, contribuindo para o aumento da expectativa de vida. No entanto, com o uso da radiação ionizante e o conhecimento que esta pode ser prejudicial, tanto para pacientes quanto para médicos ou técnicos/tecnólogos, se fez necessário o estudo acerca de avaliações dosimétricas para garantia de segurança e qualidade de tratamentos como a radioterapia.

Atendendo a necessidade de aprimorar técnicas ou meios que possibilitem a leitura da dose de radiação ionizante entregue por meio de dosímetros, estudos com o FXG utilizando a RM como técnica de leitura para avaliação da distribuição espacial da dose absorvida mostram que através dos cálculos dos tempos de relaxação em T_1 e T_2 do dosímetro após interação com a radiação permitem o cálculo de dose absorvida, além disso, através da obtenção das imagens utilizando a sequência de pulso IR, é possível observar a distribuição dos íons férricos Fe^{3+} na amostra após irradiação do material estudado.

Por fim, se tratando em estudos nacionais, O FXG desenvolvido no IPEN vem sendo amplamente estudado para a dosimetria da radiação gama, com resultados bastantes promissores devido à possibilidade de sua aplicação na dosimetria tridimensional, porém poucos estudos têm avaliado o desempenho desse material em campos de radiação de elétrons aplicados em radioterapia e em campos mistos gama-nêutron.

Com base nos estudos e respondendo ao problema de pesquisa, sim, é possível correlacionar o FXG com a técnica de imageamento por ressonância magnética.

REFERÊNCIAS

ARCURI, Sílvia M; MCGUIRE, Philip K. Ressonância magnética funcional e sua contribuição para o estudo da cognição em esquizofrenia. **Revista Brasileira de Psiquiatria**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.38-41, maio 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-44462001000500012>.

ATTIX, F. H. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. New York, NY: John Wiley & Sons, 1986. Cap. 11, dosimetry fundamentals p. 264 – 291.

BALDOCK, C. **Historical overview of the development of gel dosimetry: a personal perspective**. *Journal of Physics*, v. 56, p. 14-22, 2006.

BERO, M. A., et al. **Tissue-equivalent gel for non-invasive spatial radiation dose measurements**. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 166 – 167, 820 – 825; 2000.

BLOCH, F. et al. The nuclear induction experiment. **Physical Review**, New York, v.70, n.7-8, p.474-485, 1946. Disponível em: http://prola.aps.org/abstract/PR/v70/i7-8/p474_1. Doi:10.1103/PhysRev.70.474.

BUSHONG, Stewart Carlyle. **Radiologic Science for Technologists: Physics, Biology, and Protection**. 10. ed. St. Louis: Elsevier Mosby, 2013. 672 p.

CALDAS, Maria Aparecida Esteves. **Estudos de revisão de literatura: fundamentação e estratégia metodológica**. São Paulo: Hucitec, 1986.

CAPELETI, Felipe Favaro (São Paulo). Dosimetria em Tomografia Computadorizada Empregando Dosímetro Fricke Gel e a Técnica de Imageamento por Ressonância Magnética. **Revista Brasileira de Física Médica**, São Paulo, v. 1, n. 8, p.10-13, out. 2014.

CAVINATO, Christianne Cobello. **Padronização do método de dosimetria Fricke Gel e avaliação tridimensional de dose empregando a técnica de imageamento por ressonância magnética**. – São Paulo.2009. 97f. Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. – Área Tecnologia Nuclear.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia científica**. 4. ed. São Paulo: Makron, 1996.

CHIZZOTTI, A. **Pesquisa em ciências humanas e sociais**. São Paulo: Cortez, 1995.

CHRYSIKOPOULOS, Haris S.. **Clinical MR Imaging and Physics: A Tutorial**. Berlin: Springer, 2009.

CHU, W. C. Radiation Dosimetry Using Frick-Infused Gels and Magnetic Resonance Imaging. **Proc. Nucl. Sci.** v. 25,1, p. 1 - 11, 2001.

FELIPE, Daniel Souza. **Desenvolvimento, teste e aplicação de protótipo para dosimetria da solução Fricke Modificada**. 2003. 51 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade de São Paulo - USP, Ribeirão Preto, 2003.

FERREIRA, E. S; OLIVEIRA, L. N.. VIABILIDADE DE NOVAS FORMULAÇÕES DO DOSÍMETRO QUÍMICO FRICKE GEL. **Holos**, Goiânia, v. 8, n. 32, p.101-112, dez. 2016.

FERREIRA, Fernanda Guimarães Meireles; NACIF, Marcelo Souto. **Manual de Técnicas em Ressonância Magnética**. Rio de Janeiro: Rubio, 2011.

Fricke, H. and Morse, S. (1927). **The Chemical Action of Roentgen Rays on Dilute Ferrous Sulphate Solutions a Measure of Dose**. The American Journal of Roentgenology Radium Therapy and Nuclear Medicine. 18(1), 430-432.

FRICKE, H.; MORSE, S. The chemical action of Roentgen rays on dilute ferrosulphate solutions as a measure of dose. **American Journal of Roentgenology, Radium Therapy, and Nuclear Medicine**, v. 18, p. 430-432, 1927.

GALANTE, A. M. S.; CAMPOS, L. L. Investigations of the Fricke Gel (FXG) Dosimeter Developed at IPEN Irradiated with ^{60}Co Gamma Rays. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE 2007, Sept. 30 - Oct 5,2007, Santos. **Proceedings ... Santos, INAC 2007**, 2007.

GALANTE, Ana Maria Sisti; CAMPOS, Letícia L.. ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DOS COMPOSTOS NO DOSÍMETRO FRICKE GEL. **Radio 151**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p.1-12, maio 2005.

GAMBARINI, G. ; AGOSTEO, S.; MARCHESI, P.; NAVA, E.; PALAZZI, P.; PECCI, A.; ROSI, G.; TINTI, Ret al.. Discrimination of various contributions to the absorbed dose in BNCT: Fricke-gel imaging and intercomparison with other experimental results. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 53, p. 765-772,2000.

GAMBARINI, G. et al. Fricke Gel Dosimetry in Boron Neutron Capture Therapy. **Radiation Protection Dosimetry** v. 101, p. 419-422, 2002.

GAMBARINI, G. et al. Study of optical absorbance and MR relaxation of Fricke xylene orange gel dosimeters. **Radiation Measurements**, [s.l.], v. 106, p.622-627, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2017.03.024>.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª São Paulo: Atlas, 2002.

GORE, J. C.; YANG, Y. S.; SCHULZ, R. I. Measurement of Irradiation Dose distribution by Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Imaging. **Physical Medical and Biology**, v. 29, p. 1189-1197, 1984.

GRESSLER, Lori Alice. **Introdução à pesquisa: Projetos e relatórios**. 2ª ed. São Paulo: Loyola, 2004.

HAAGA, John R. et al. **TC e RM: Uma abordagem do corpo humano completo**. 5. ed. São Paulo: Elsevier, 2010. 2944 p.

HAGE, Maria Cristina Ferrarini Nunes Soares; IWASAKI, Masao. Imagem por ressonância magnética: princípios básicos. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 39, n. 4, p.1275-1283, jul. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782009005000041>.

MANGUEIRA, Thyago Fressatti. **Avaliação Dosimétrica Da Solução Fricke Gel Usando a Técnica De Espectrofotometria Para Aplicação na Dosimetria de Elétrons e Nêutrons**. 2009. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Aplicações, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2009.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E.. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARRALE, Maurizio et al. Correlation between ferrous ammonium sulfate concentration, sensitivity and stability of Fricke gel dosimeters exposed to clinical X-ray beams. **Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, [s.l.], v. 335, p.54-60, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2014.05.012>.

MAZZOLA, Alessandro A.. Ressonância magnética: princípios de formação da imagem e aplicações em imagem funcional. **Revista Brasileira de Física Médica**, Porto Alegre, v. 1, n. 3, p.117-129, jun. 2009.

MCJURY, M., OLDHAM, M., LEACH, M. O., WEBB, S. **Dynamics of polymerization in polyacrylamide gel (PAG) dosimeters: (I) ageing and long-term stability**. *Phys. Med. Biol.*, v. 44, p. 1863-1873, 1999.

MENDES, Karina dal Sasso; SILVEIRA, Renata Cristina de Campos Pereira; GALVÃO, Cristina Maria. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. **Texto & Contexto - Enfermagem**, [s.l.], v. 17, n. 4, p.758-764, dez. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-07072008000400018>.

MIZUNO, Erick Yukio. **Desenvolvimento e caracterização de um gel alanima para aplicação na medida da distribuição da dose de radiação usando a técnica de espectrofotometria**. 2007. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Aplicações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MOREIRA, W. **Revisão de Literatura e Desenvolvimento Científico: conceitos e estratégias para confecção**. Janus, Lorena, ano 1, nº 1, 2º semestre de 2004.

OLIVEIRA, David Marçal Machado de. **Verificação do uso do dosímetro Fricke benzóico xilenol gel em tomografia computadorizada**. 2011. 44 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2011.

OLIVEIRA, Luciano Santa Rita. **Detecção das radiações**. Disponível em: <http://www.tecnologiaradiologica.com/materia_deteccao.htm>. Acesso em: 16 maio 2018.

OLIVEIRA, Paulo Márcio de. **Avaliação de dose nos sistemas de irradiação de bolsas de sangue para esterilização**.- São Paulo, 2014. 83f. Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. – Área Tecnologia Nuclear.

OLSSON, L e et al. MR imaging of absorbed dose distributions for radiotherapy using ferrous sulphate gels. **Iop Science**, Uppsala, v. 35, n. 12, p.1623-1631, jul. 1990.

PRASAD, Pottumarthi V.. **Magnetic Resonance Imaging: Methods and Biologic Applications**. New Jersey: Humana Press, 2006.

PURCELL, E.M. et al. Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid. **Physical Review**, New York, v.69, n.1-2, p.37-38, 1946.

PYKETT, I.L. et al. Principles of nuclear magnetic resonance imaging. **Radiology**, Illinois, v.143, p.157-168, 1982.

SAUR, S et al. Fricke gel as a tool for dose distribution verification: optimization and characterization. **Physics In Medicine And Biology**, [s.l.], v. 50, n. 22, p.5251-5261, 24 out. 2005. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/50/22/003>.

SCHREINER, L .J. Review of Fricke gel dosimeters. *Journal of Physics*, v. 3, p. 9-21, 2004.

SILVA, André Luis Bonfim Bathista e. **Ressonância Magnética Nuclear: Princípios Básicos de Ressonância Magnética Nuclear do Estado Sólido**. São Carlos: Bathista, A. L. B. S., 2005. 50 p.

SILVA, João Henrique Hamann da. **GEL DOSÍMETRO TIPO BANG-1: Aplicação em planejamentos de tratamento por radioterapia e avaliação qualitativa através de imagens obtidas em ressonância magnética**. 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

SILVA, Thiago Rodrigues da. **Dosimetria em Radiologia Diagnóstica Digital: Uso dos Indicadores de Exposição de Sistemas Digitais como Estimadores de Dose Absorvida**. 2012. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SOUZA MT, SILVA MD, CARVALHO R. **Integrative review: what is it? How to do it?** *Einstein* 2010;8:102-6.

SOUZA, V. L. B. et al. Uso do dosímetro Fricke Xilenol Gel para dosimetria de equipamentos radioterápicos. **Scientia Plena**, Recife, v. 12, n. 6, p.24-30, dez. 2010.

STARK, David D.; BRADLEY JUNIOR, William G.. **Ressonância Magnética**. 3. ed. Rio de Janeiro: Revinter, 2005. 1 v.

STRECK, Letícia et al. Validação de método analítico por espectrofotometria UV para sistema emulsionado lipídico contendo benznidazol. **Química Nova**, [s.l.], v. 34, n. 8, p.1459-1463, 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422011000800028>.

TERENCE, Ana Cláudia Fernandes; ESCRIVÃO FILHO, Edmundo. **Abordagem quantitativa, qualitativa e a utilização da pesquisa-ação nos estudos organizacionais**. XXVI ENEGEP. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2006_TR540368_8017.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2017.

TURATO, Egberto Ribeiro. **Métodos qualitativos e quantitativos na área da saúde: definições, diferenças e seus objetos de pesquisa**. **Revista de Saúde Pública**, [s.l.], v. 39, n. 3, p.507-514, jun. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0034-89102005000300025>.

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

WESTBROOK, Catherine; ROTH, Carolyn Kaut; TALBOT, John. **Ressonância Magnética: Aplicações Práticas**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2016.