



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
FACULDADE DE FÍSICA

CARLOS AUGUSTO DOS SANTOS OLIVEIRA

APLICAÇÃO DO DECAIMENTO RADIOATIVO NA GLÂNDULA DA TIROIDE

Belém-Pará

2022

CARLOS AUGUSTO DOS SANTOS OLIVEIRA

APLICAÇÃO DO DECAIMENTO RADIOATIVO NA GLÂNDULA DA TIREOIDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Licenciado em Física, pela Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Isaac Torres Sales

Belém-Pará

2022

ERRATA

Modificação do título de **APLICAÇÕES DO DECAIMENTO RADIOATIVO NA MEDICINA NUCLEAR** para **APLICAÇÃO DO DECAIMENTO RADIOATIVO NA GLÂNDULA DA TIREOIDE**

Modificações na estrutura do resumo: introdução, metodologia, resultados e conclusão.

Modificação na Introdução do primeiro parágrafo descrevendo algumas aplicações e no último algumas alterações.

Correções de pontuações no decorrer do texto.

Modificação do capítulo 3 e 4 atendendo a sugestão da banca.

Foi retirado do texto tipos de radiação alfa, beta e gama da pg. 36, devido algumas divergência da literatura do TORTORA com as referências do texto.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
FACULDADE DE FÍSICA

ATA DA APRESENTAÇÃO E DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO –
TCC

Ata da sessão de apresentação e defesa de Trabalho de Conclusão de Curso para concessão de grau de Licenciado em Física, realizado às 14:00 h do dia 28 de janeiro de 2022, de forma virtual por meio da Plataforma Google Meet (<https://meet.google.com/zco-hkdc-hpy>), cuja orientação teve início em 03 de Novembro de 2021 sendo intitulada: “**APLICAÇÕES DO DECAIMENTO RADIOATIVO NA GÂNDULA DA TIREOIDE**”, contendo 42 páginas, que foi apresentado durante XX minutos pela discente **CARLOS AUGUSTO DOS SANTOS OLIVEIRA**, matrícula Nº **201708140010** diante da banca examinadora aprovada pela Faculdade de Física do Instituto de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal do Pará, assim constituída: **Prof. Dr. Isaac Torres Sales (Orientador - UFPA)**, **Prof. Dr. Erick Frade Silva (Examinador 1 - UFOPA)**, **Prof.ª Msc. Ingrid Ferreira Da Costa (Examinadora 2 – UFES)**, **Prof.ª Dr.ª Cleidilane Sena Costa (Examinadora 3 – UFPA)**. Em seguida o mesmo foi submetido à arguição, tendo demonstrado conhecimentos no tema objeto da proposta de TCC, favorecendo à banca examinadora apresentar contribuições para melhoras no desenvolvimento e decidir pelo conceito **BOM** do mesmo, bem como conceder o prazo máximo de 15 dias para serem efetuadas as modificações sugeridas pela banca, se for o caso, e em seguida a mesma será assinada por todos os membros. Para constar foram lavrados os termos da presente ata que lida e aprovada recebe a assinatura dos integrantes da banca examinadora e do DISCENTE.

ORIENTADOR: Isaac Torres Sales

EXAMINADOR 1: Erick Frade Silva

EXAMINADOR 2: Ingrid Ferreira da Costa

EXAMINADOR 3: Cleidilane Sena Costa

DISCENTE: Carlos Augusto dos Santos Oliveira

CARLOS AUGUSTO DOS SANTOS OLIVEIRA

“APLICAÇÕES DO DECAIMENTO RADIOATIVO NA GIANDULA DA TIREOIDE.”

Monografia apresentada como requisito para obtenção do título de Licenciado em Física pela Faculdade de Física do Instituto de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal do Pará, submetida à apreciação da banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Orientador:

Isaac Torres Sales
Prof. Dr. Isaac Torres Sales
(UFPA)

Examinador 1:

Erick Frade Silva
Prof. Dr. Erick Frade Silva
(UFOPA)

Examinador 2:

Ingrid Ferreira da Costa
Prof.^a Msc. Ingrid Ferreira Da Costa
(UFES)

Examinador 3:

Cleidilane Sena Costa
Prof.^a Dr.^a. Cleidilane Sena Costa
(UFPA)

Belém, 28 de janeiro de 2022.

A minha esposa Maria Graciete e aos meus filhos Jefferson Augusto, Carlos Eduardo, Marcos Vinícius e Maria Clara.

Vocês fazem parte desse trabalho e obrigado pela paciência.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, SENHOR JEOVÁ, pelo fôlego de vida e pela condução que tem feito na minha vida, aos meus irmãos que tem orado pela minha vida, pelos meus projetos, sonhos, etc.

Ao meu irmão Edcarlos que me apoiou bastante nesse projeto acadêmico, fez algumas doações de livros LTC de Física, obrigado mano pela força no curso. A minha esposa Graciete pela paciência e dedicação em me apoiar nos momentos difíceis da minha trajetória e aos meus filhos pela compreensão.

Gostaria de agradecer as pessoas que contribuíram para esse trabalho acontecer, ao Prof. Rubens com suas filosofias de vida estimuladoras, aos professores que passaram pela minha vida acadêmica são tantos! E deixaram seus ensinamentos, como prof. Marcelo com seus pontos de vista críticos e conselhos, ao prof. Danilo por estimular estudar o “Landau”, ao prof. Miguel pelos diálogos proveitosos durante suas aulas, prof. Maria Lucia com suas aulas enriquecedoras. Ao meu orientador prof. Orientador Isaac Torres Sales pela paciência e dedicação que tem tido comigo na preparação desse trabalho acadêmico, tem ajudado bastante no direcionamento do TCC.

Ao meu colega de classe prof. Domingos que foi parceiro nos momentos difíceis do Curso de Física, não deixando eu chutar o “balde”, obrigado colega! Ao meu colega Francisco que mora no mesmo bairro que eu, e não pode concluir por motivos alheios, foi parceiro também no Curso de Física.

A todos que contribuíram de forma direta e indireta fica meus agradecimentos.

RESUMO

O trabalho é uma revisão pesquisa bibliográfica e mostrou a importância que estudo do núcleo atômico desempenha na Física especialmente na Física Nuclear de onde podemos obter aplicações importantes no ramo da medicina nuclear. O objetivo do trabalho é estudar uma das aplicações do decaimento radioativo da Física Nuclear na Medicina Nuclear, especialmente na glândula da Tireoide. Metodologicamente o trabalho abordou como se deu a descoberta do núcleo do átomo e suas implicações dentro do contexto da Física nuclear, suas propriedades nucleares e o decaimento radioativo envolvendo alfa, beta e gama. Abordando resultados importantes como os benefícios e as aplicações na medicina nuclear e dos isótopos radioativos, de que forma podem ser usados como traçadores nos diagnósticos de nódulos e o uso da radioterapia como tratamento da Tireoide. Concluímos mostrando a importância do decaimento radioativo no estudo da medicina nuclear, uma área da Ciência Biológica e da Física que tem evoluído bastante nos últimos anos, tratando e salvando muitas vidas.

Palavras-chave: Decaimento Radioativo; Medicina Nuclear; Alfa; Beta; Gama.

ABSTRACT

The work addresses how the discovery of the nucleus of the atom took place and its implications within the context of nuclear physics, its nuclear properties and radioactive decay involving alpha, beta and gamma. Addressing important aspects such as the benefits and applications in nuclear medicine and radioactive isotopes, how they can be used as tracers in the diagnosis of nodules and the use of radiotherapy as a thyroid treatment. The work deals with the importance that the study of the atomic nucleus plays in science, especially in Nuclear Physics, from where we can obtain important applications in the field of nuclear medicine. The objective of this work is to study one of the applications of radioactive decay of Nuclear Physics in Nuclear Medicine, especially in the Thyroid gland. We conclude by showing the importance of radioactive decay in the study of nuclear medicine, an area of Biological Science and Physics that has evolved a lot in recent years, treating and saving many lives.

Keywords: Radioactive Decay; Nuclear Medicine; Alpha; Beta; Gamma.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Experimento para detecção de partícula alfa	13
Figura 2: mostra em detalhe o comportamento das partículas incidente	14
Figura 3: Representa as Propriedades de alguns Nuclídeos	15
Figura 4: o gráfico representa nuclídeos conhecidos	17
Figura 5: Energia de decaimento alfa dos núcleos	23
Figura 6: representa os processos de decaimento que ocorre na série 4n	25
Figura 7: Ilustrando porque o decaimento beta na série 4n e em outras séries.....	26
Figura 8: mostra um aparelho usado na cintilografia	30
Figura 9: estrutura interna de um gerador de tecnécio	31
Figura 10: mostra a parte frontal da tireoide	33
Figura 11: vista anterior da glândula da tireoide	35
Figura 12: mostra detalhe da glândula da tireoide	36

LISTA DE SIGLAS

CNEN	Centro Nacional de Energia Nuclear
CDTN / MG	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
IEN/RJ	Instituto de Engenharia Nuclear
IPEN/SP	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
UFPA	Universidade Federal do Pará
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
LTC	Livros Técnicos Científicos
RIT	Radioiodoterapia
NIS	Cotransportador sódio-iodeto
PET	Tomografia por emissões de pósitrons
RBE	Efetividade biológica relativa

LISTA DE SÍMBOLOS

Z	Número Atômico
N	Número de Nêutrons
A	Número de Massa
Tc	Tecnécio
Mo	Molibdênio
T3	tri-iodotironina
T4	tetraiodotironina
C	velocidade da luz
λ	constante de desintegração
R	taxa de decaimento
Ci	curie
Bq	becquerel
α	alfa
β	beta
γ	gama
E	energia
I	elemento químico iodo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.1	Descoberta do Núcleo	12
2.2	Propriedades dos Núcleos	14
2.2.1	Terminologia	15
2.2.2	Classificação de Nuclídeos	16
2.3	Decaimento Radioativo	17
2.3.1	Decaimento Alfa, Beta e Gama	21
3	APLICAÇÕES DA FÍSICA NA MEDICINA NUCLEAR	27
3.1	Os Benefícios das radiações no tratamento da tireoide	28
3.2	Traçadores Radioativos	28
3.3	Medicina Nuclear	28
3.4	Os Radioisótopos na Medicina	30
3.5	A Radioterapia	31
3.5.1	Histologia, os hormônios e as funções das glândulas da Tireoide	32
3.5.2	Classificação ultrassonográfica dos nódulos da tireoide	35
3.5.3	Consequências da radiação ionizante	37
4	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Sabemos da importância que o estudo do átomo desempenha na ciência, especialmente na Física, onde o átomo se divide em eletrosfera e núcleo e a Química estuda os elétrons que ficam na eletrosfera do átomo, movimentando-se ao redor do núcleo em orbitas circulares chamadas de camadas eletrônicas, junto com a Física da Matéria Condensada que estuda os cristais e as propriedades dos elétrons no interior desses cristais e a Mecânica Quântica que fornece descrições tais como a radiação do corpo negro e as órbitas dos elétrons.

Física Nuclear que é uma área de pesquisa com grande relevância para compreensão das leis da natureza e estuda a estrutura dos núcleos atômicos bem como os mecanismos de reações nucleares, assim como aplicações para Medicina Nuclear que é uma especialidade médica que usa pequenas quantidades de substâncias radioativas para tratamento terapêutico na glândula da tireoide. O objetivo do trabalho é fazer uma revisão bibliográfica da aplicação do decaimento radioativo na Medicina Nuclear especialmente na glândula da tireoide.

No capítulo dois, vamos abordar como se deu a descoberta do núcleo do átomo e suas implicações dentro do contexto da Física nuclear, suas propriedades nucleares e o decaimento radioativo envolvendo alfa, beta e gama.

No capítulo três, mostrando a importância do decaimento radioativo no estudo da aplicação da tireoide uma área da medicina que tem evoluído bastante nos últimos anos e as aplicações de isótopos radioativos, de que forma pode ser usado como traçador nos diagnósticos de nódulos e o uso da radioterapia como tratamento.

No capítulo quatro, considerações finais e as consequências do uso de radioisótopos no como tratamento na glândula da tireoide.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Descoberta do Núcleo

A física nuclear, a partir de 1896, tem um marco especial, com Becquerel descobrindo a radiatividade com Urânio; essa descoberta estimulou outros cientistas a pesquisar sobre o assunto, como elementos radiativos podem emitir radiação sem fontes externas (JEWET, 2012, P.305).

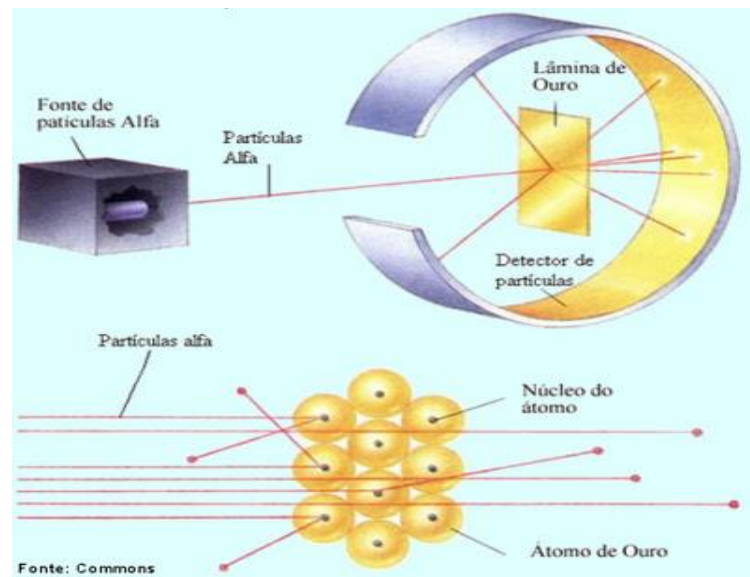
Com a descoberta de J.J. Thomson 1897 dos elétrons, ele mediu a razão entre sua carga e massa. Em 1909, Millikan completou suas primeiras medidas da carga do elétron. Então, Thomson propôs um modelo segundo o qual o átomo seria constituído por uma esfera carregada positivamente com um diâmetro da ordem de $10^{-10}m$ e com elétrons distribuídos ao longo do volume da esfera como se fossem passas no interior de um bolo esférico.

Rutherford tem uma participação especial na ciência devido seu experimento, mostrando elemento radioativo polônio dentro de um bloco de chumbo por um orifício emitindo partículas alfas atravessando uma lamina de ouro, percebeu que as trajetórias dos raios desviavam quando colidiam com o núcleo do átomo de ouro e seguiam caminho normal sem interferência.

Ou seja, com as experiências de Rutherford, realizadas no início da década de 1910, evidenciaram que somente um núcleo concentrando a maior parte da massa do átomo, poderia produzir o desvio apreciável das partículas alfa usadas no experimento (LUIZ, 2009 p.273).

A partícula alfa é uma partícula composta por dois prótons e dois nêutrons, tendo a mesma estrutura de núcleo do átomo de hélio.

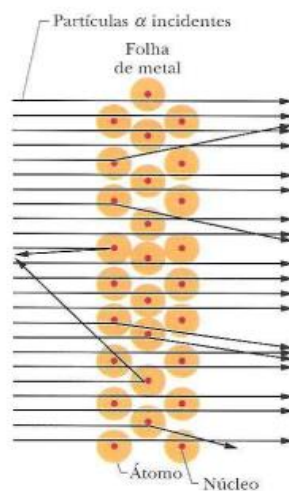
Figura 1: Experimento para detecção de partícula alfa



Fonte: Wikimedia Commons.

A figura 2 mostra como as partículas alfa, incidente no núcleo do átomo de Ouro, e desvia sua trajetória, enquanto outras partículas quando não colidem com o núcleo seguem seu caminho normal.

Figura 2: Esquema ilustrando o comportamento das partículas incidente no núcleo do átomo de ouro



Fonte: RESNICK, 2009, p.305

Como Rutherford percebeu através da experiência que a parte central do átomo possui uma massa a qual a soma de prótons e nêutrons, por isso os raios alfa desviaram de rota quando colidiam com o núcleo do átomo de ouro.

Em 1911 Ernest Rutherford sugeriu que a carga positiva estava concentrada no centro do átomo, formando um núcleo, e que além disso, o núcleo era responsável pela maior parte da massa do átomo (RESNICK, 2009, P.304).

2.2 Propriedades dos Núcleos

As propriedades dos núcleos são importantes por caracterizarem interações forte da estrutura dos núcleons, em relação as outras interações como a interação fraca, eletromagnética e gravitacional; essas forças que regem nosso universo; há tentativas por parte dos cientistas de unificarem as quatro forças em uma teoria, por enquanto o campo de pesquisa está aberto.

Quando estamos interessados nas propriedades dessas partículas como espécie nucleares e não como parte dos átomos elas são chamadas de nuclídeos (RESNICK, 2009 P.305).

Usando a terminologia da física nuclear, os núcleons são constituídos de prótons que é representado pela letra Z e o número de nêutrons é representado pela letra N . Somando o número de prótons e nêutrons temos o número de massa, e representada pela letra A .

Os nuclídeos com o mesmo número atômico Z e diferentes números de nêutrons N são chamados de isótopos.

Radionuclídeos sofrem um processo espontâneo de decaimento (ou desintegração), no qual emitem uma ou mais partículas e se transformam em um nuclídeo diferente.

As propriedades de alguns Nuclídeos são de grande importância, porque apresentam núcleos estáveis, devida a abundância isotópica, ou seja,

elementos químicos com o mesmo número atômico, no caso de núclídeos radioativos é dada a meia vida, como mostra a tabela abaixo.

Figura 3: Representa as propriedades de alguns Núclídeos

Núclídeo	Z	N	A	Abundância/ Meia-vida ^a	Massa ^b (u)	Spin ^c	Energia de Ligação (MeV/núcleon)
¹ H	1	0	1	99,985%	1,007 825	$\frac{1}{2}$	—
⁷ Li	3	4	7	92,5%	7,016 004	$\frac{3}{2}$	5,60
³¹ P	15	16	31	100%	30,973 762	$\frac{1}{2}$	8,48
⁸⁴ Kr	36	48	84	57,0%	83,911 507	0	8,72
¹²⁰ Sn	50	70	120	32,4%	119,902 197	0	8,51
¹⁵⁷ Gd	64	93	157	15,7%	156,923 957	$\frac{3}{2}$	8,21
¹⁹⁷ Au	79	118	197	100%	196,966 552	$\frac{3}{2}$	7,91
²²⁷ Ac	89	138	227	21,8 anos	227,027 747	$\frac{3}{2}$	7,65
²³⁹ Pu	94	145	239	24 100 anos	239,052 157	$\frac{1}{2}$	7,56

Fonte: RESNICK, 2009, p.306

Terminologia

O número atômico caracteriza o átomo, identificando que elemento químico pertence na tabela periódica e dessa forma identificar os possíveis elementos radioativos. Conhecer a estrutura nuclear e seus constituintes, como a simbologia que o representa como número atômico, número de nêutrons e massa atômica.

Então a soma do número de prótons e número de nêutrons é conhecida como número de massa, representada pela letra **A**. O número de massa é representado pela soma do número atômico com número de nêutrons (RESNICK, 2009, P.306).

$$A = Z + N \quad (1)$$

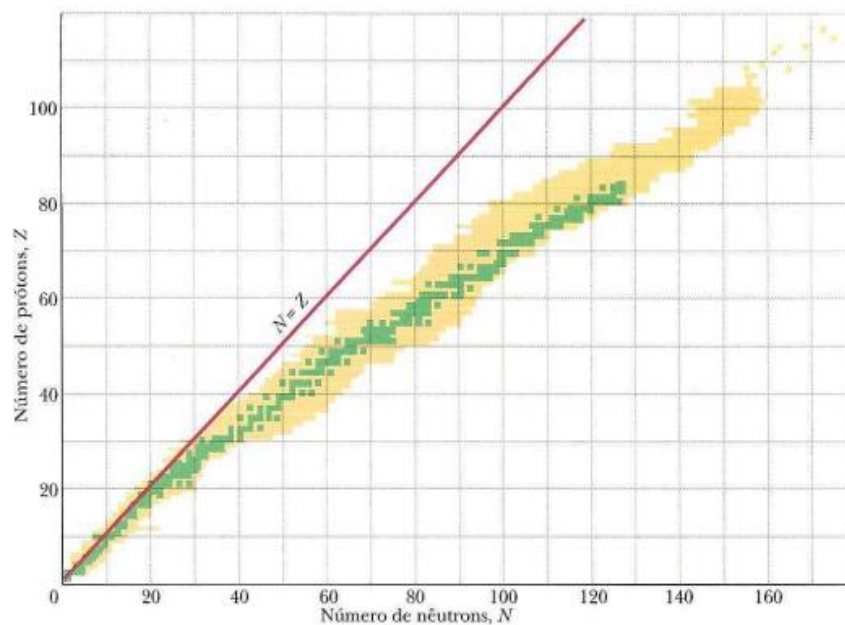
Classificação de Nuclídeos

Os átomos neutros de todos os isótopos de um elemento possuem o mesmo número de elétrons, as mesmas propriedades químicas e ocupam a mesma posição na tabela periódica dos elementos.

Os nuclídeos podem ser organizados em uma carta de nuclídeos, ou seja, cada nuclídeo é representado através de um par de coordenadas, uma para o número de prótons e outra para o número de nêutrons.

O gráfico da figura 3 mostra que os nuclídeos estáveis de pequena massa tem aproximadamente o mesmo número de prótons e número de nêutrons, porém os nuclídeos pesados tem excesso de nêutrons, ou seja a figura mostra que não tem nuclídeos estáveis acima de número atômico 83 (RESNICK, 2009, P.307).

Figura 4: Representa nuclídeos conhecidos



Fonte: RESNICK, 2009, p.307

2.3 Decaimento Radioativo

O decaimento radioativo é um processo de instabilidade nuclear, onde são emitidas partículas alfa, beta e gama, cada uma com particularidades distintas. Segundo Eisberg é um processo importante, porque conforme emite partículas, vai se transformando em outro elemento radioativo até adquirir estabilidade nuclear.

Um processo que é particularmente importante no decaimento radioativo é o decaimento alfa, o qual ocorre comumente em núcleos cujo número atômico é maior que $Z= 82$. Nesse processo, um núcleo pai instável decai nos núcleos filhos através da emissão de uma partícula α , ou seja, o núcleo ${}^2\text{He}^4$ (EISBERG, 1983, P.698).

Dizer que as leis que governam o mundo subatômico são estatísticas, seria mensurar que a física quântica dispõe de ferramentas como a mecânica quântica, física moderna e física estatística de postulados e leis que estudam o mundo atômico com mais propriedade.

O decaimento radioativo foi a primeira indicação de que as leis que governam o mundo subatômico são estatísticas” (RESNICK, 2009, P.312).

Embora seja difícil prever quais serão os núcleos a decair, podemos dizer que uma amostra contém N núcleos radioativos, a taxa de decaimento dos núcleos:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad (2)$$

em que λ , a constante de desintegração (ou constante de decaimento), tem um valor diferente para cada radionuclídeo. A unidade de λ no SI é o inverso do segundo (S^{-1}), ou seja, isso evidencia que a constante de decaimento é uma grandeza que mostra a fração de que se desintegra na unidade de tempo.

A constante de desintegração representa um valor fixo para cada átomo radioativo como exemplo podemos citar o elemento Ra 226 (Rádio) que possui uma constante de decaimento $\lambda = \frac{1}{2300} \text{ano}^{-1}$. Isso significa que para cada 2300 átomos de rádio, provavelmente 1 átomo se desintegra no intervalo de um ano (SARDELHA; MATEUS, 1991, P.310).

Podemos citar outro exemplo sobre a natureza da constante de desintegração como o elemento Tório 234 que possui sua constante de decaimento $\lambda = \frac{1}{35} \text{dia}^{-1}$. Isso mostra que, para cada 35 átomos de tório 234, um átomo se desintegra no intervalo de um dia (SARDELHA; MATEUS, 1991, P.311).

Para determinar N, vamos usar a técnica de separação de variáveis usada das equações diferenciais, onde N em função do tempo t, escrevendo fica

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad (3)$$

em que integramos ambos os lados

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t_0}^t dt, \quad (4)$$

reescrevendo a equação (4) fica

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - t_0), \quad (5)$$

onde N_0 é número de núcleos radioativos em um instante inicial arbitrário t_0 , ou seja, fazendo $t_0 = 0$ e transformando a diferença de logaritmos no logaritmo de uma fração, verificamos que :

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t. \quad (6)$$

Multiplicando ambos os lados da eq. (6) e sabendo da matemática elementar que a função exponencial é inversa logaritmo, temos

$$\begin{aligned} \frac{N}{N_0} &= e^{-\lambda t}, \\ N &= N_0 e^{-\lambda t}. \end{aligned} \quad (7)$$

Onde N_0 é número de núcleos radioativos no instante $t=0$ e N é o número de núcleos que restam na amostra em um instante $t > 0$.

Estamos interessados na taxa de decaimento $R(= -dN/dt)$ em vez do valor N , derivando a eq. (7) em relação ao tempo, temos

$$\begin{aligned} R &= -\frac{dN}{dt}, \\ R &= \lambda N_0 e^{-\lambda t}, \end{aligned}$$

$$R = R_0 e^{-\lambda t} . \quad (8)$$

A equação (8) representa uma forma alternativa do decaimento radioativo onde R_0 é a taxa de decaimento no instante $t=0$ e R é a taxa de decaimento em um instante $t > 0$, manipulando matematicamente eq. (2) em termos da taxa de decaimento R a expressão se torna

$$R = \lambda N, \quad (9)$$

em que R e N representam o número de núcleos radioativos que ainda não decaíram, devem ser calculados ou medidos para o mesmo valor de t .

Em homenagem a Henri Becquerel, o descobridor da Radioatividade e outros como Pierre Curie e Marie Curie, criou-se algumas unidades no sistema internacional (SI) :

$$1 \text{ becquerel} = 1Bq = 1 \text{ decaimento por segundo}$$

Uma outra unidade que continua sendo utilizado até os dias de hoje em homenagem a madame Marie Curie:

$$1 \text{ curie} = 1 Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq$$

A meia-vida $T_{1/2}$ de um radionuclídeo que é o tempo necessário para que R e N caiam a metade do valor inicial. Para determinar a meia-vida vamos recorrer a equação (8) e fazer algumas mudanças de variáveis como $t = T_{1/2}$ e

$$\frac{1}{2} R_0 = R_0 e^{-\lambda T_{1/2}} .$$

Tomando o logarítmo de ambos os lados e explicitando $T_{1/2}$ fica:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} . \quad (10)$$

2.3.1 Decaimento Alfa

A partícula alfa é um núcleo do átomo de hélio com dois prótons e dois nêutrons unidos. A emissão alfa ocorre geralmente para núcleos muito pesados para serem estáveis, ou seja, os núcleos desses átomos apresentam instabilidade nuclear.

“Em um processo de decaimento radioativo, o núcleo de um átomo com massa m_i sofre uma transformação usualmente resultando em um nuclídeo diferente, acompanhada da emissão de uma ou mais partículas” (RESNICK, 2004, P.277).

Quando um núcleo emite uma partícula alfa, os seus valores de Z e N diminuem de duas unidades e A diminui de quatro.

Os decaimentos nucleares ocorrem sempre que um núcleo, contendo um certo número de núcleons, se encontra em um estado cuja energia não é a mais baixa para um sistema com esse número de núcleons (EISBERG, 1983, P.698).

Ocorre que em alguns casos uma reação nuclear produzida nos aceleradores de partículas é responsável pelo aparecimento de núcleons instáveis enquanto que em outros casos, está ligada a fenômenos naturais que ocorreram há bilhões de anos quando nosso universo ainda estava se formando (EISBERG, 1983, P. 698).

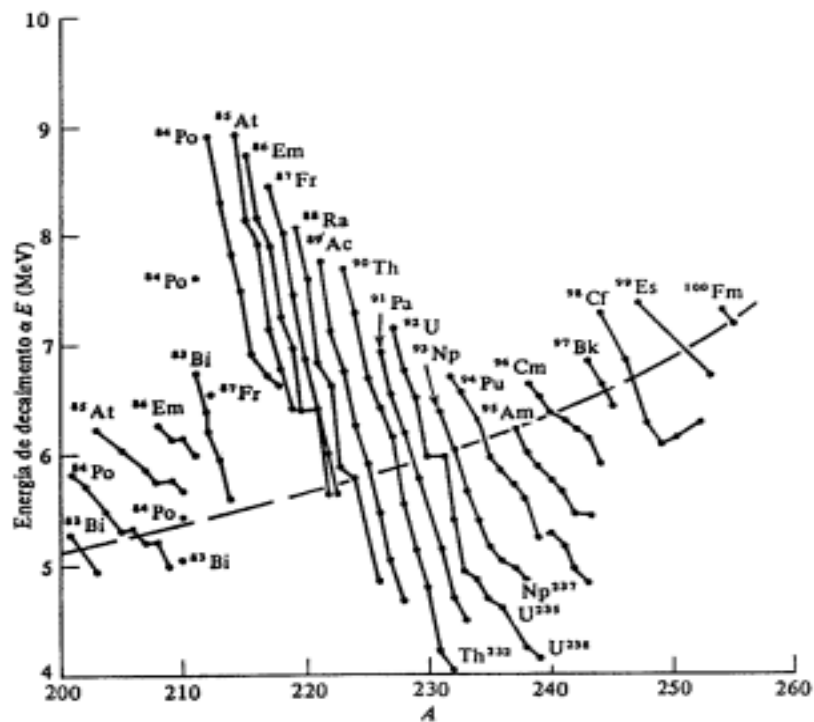
A figura 5 mostra como os núcleos pais decaem devido sua instabilidade nuclear transformando-se em núcleos filhos, então a energia E de decaimento alfa, representa o núcleo pai por $M_{Z,A}$, núcleo filho por $M_{Z-2,A-4}$ e a partícula alfa por $M_{2,4}$, podemos verificar a energia em função do núcleo pai, filho e a partícula alfa através da relação

$$E = [M_{Z,A} - (M_{Z-2,A-4} + M_{2,4})]c^2. \quad (11)$$

A linha tracejada representa o comportamento geral dos núcleos pais de se tornarem cada vez mais instáveis devido ao decaimento alfa.

O modelo gráfico pode ser explicado pelo modelo de camadas, gota líquida e pelos números mágicos, que foge ao escopo deste trabalho.

Figura 5: Energia de decaimento alfa dos núcleos situados na região de emissão alfa



Fonte: EISBERG, 1983, p.699

Uma partícula alfa é um núcleo do átomo de hélio (^4He), com dois prótons e dois nêutrons unidos, com spin total igual a zero. A emissão alfa ocorre geralmente para núcleos pesados demais para serem estáveis, como menciona (LUIZ, 2009, p.276).

As partículas alfa são completamente barradas por uma folha comum de papel e seu alcance não ultrapassa mais que dez ou dezoito centímetros.

Entre as radiações ionizantes, as partículas alfa são as mais pesadas e de maior carga e por isso elas são menos penetrantes que as partículas beta e a radiação gama (LUIZ, 2009, P.276).

Para que ocorra um decaimento a massa inicial precisa ser maior que a massa final, ou seja um núcleo pai se transforma por decaimento em um núcleo filho, até adquirir estabilidade nuclear, como menciona (RESNICK, 2004, P.277).

O decaimento somente será possível se $m_i > m_f$, colocando de outra forma, de acordo com a conservação de energia, a energia total antes do decaimento (a energia de repouso $m_i c^2$ do átomo inicial, o qual supõe-se que esteja em repouso no nosso sistema de referência) precisa ser igual a energia total após o decaimento (a energia total de repouso $m_f c^2$ de todos os produtos finais somados a sua energia cinética total K_f (RESNICK, 2004, P. 277).

Os raios alfa possuem carga elétrica positiva, os raios beta negativa e os raios gama não possuem carga alguma. Nesse caso, a energia inicial de repouso precisa ser maior que a final, vamos nos apropriar da lei da conservação onde a diferença das energias é igual a energia cinética.

$$m_i c^2 = m_f c^2 + K_f , \quad (12)$$

ou seja, é conveniente definir o valor Q para o decaimento como sendo a diferença entre as energias de repouso inicial e final:

$$Q = m_i c^2 - m_f c^2 . \quad (13)$$

A variação de energia liberada Q é igual a energia cinética final, como mostra a equação 14, pois o núcleo sofre um processo de desintegração ou decaimento de partículas alfa, com uma certa diferença de energia de repouso e final, como menciona (RESNICK, 2004, 277).

Na realidade, Q é a energia liberada no decaimento. Se o núcleo inicial que sofre o processo de decaimento está em repouso, o valor Q fornece a energia cinética total de todos os produtos do decaimento (RESNICK, 2004, P.277).

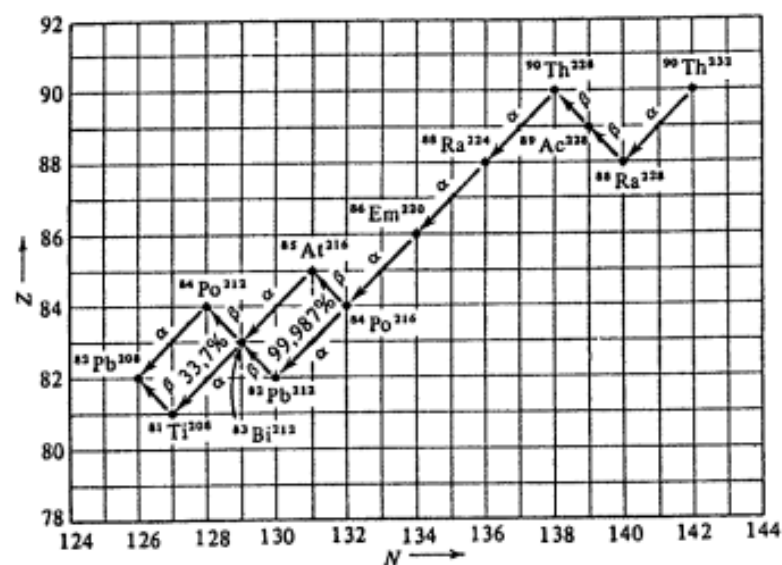
$$Q = K_f . \quad (14)$$

Decaimento Beta

Existem três tipos diferentes de decaimento beta: beta negativo, beta positivo e captura de elétrons; beta negativo é o próprio elétron, beta positivo também chamado de pósitron (LUIZ, 2009, P.276).

Para EISBERG, uma descrição mais completa do processo que ocorre em uma série radioativa $4n$ é apresentada na série do elemento químico tório em que temos três decaimentos espontâneos e um artificial.

Figura 6: representa os processos de decaimento que ocorre na série $4n$

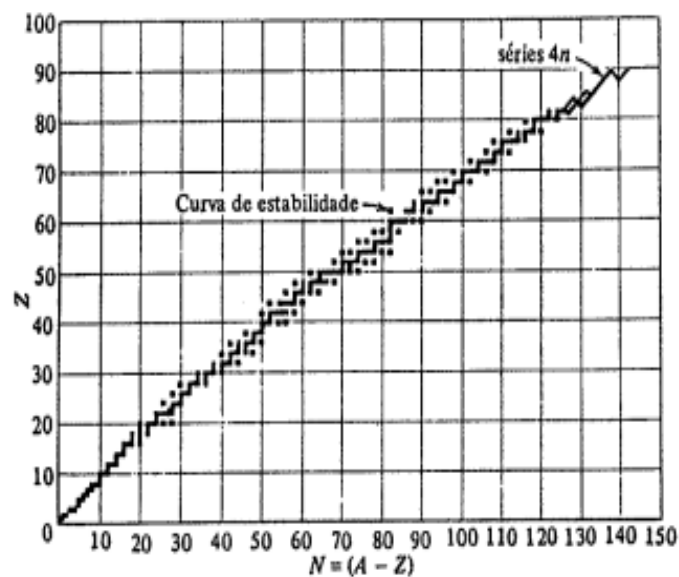


Fonte: EISBERG, 1983, p.706

Para a série radioativas, o decaimento beta relaciona um núcleo Z, A que, após emitir um elétron carregado negativamente, transforma-se no núcleo $Z+1, A$. Existem também dois outros tipos de decaimento beta.

A figura 7 mostra as séries radioativas do decaimento beta para igualar tanto quanto for possível a inclinação média do caminho traçado pelos diversos decaimentos com a inclinação média da “curva de estabilidade” colocado de outra forma a energia do decaimento alfa de um núcleo é, relativamente, pequena se o núcleo no qual ele deve se transformar se encontra muito distante da curva de estabilidade.

Figura 7: Ilustrando porque o decaimento beta na série $4n$ e em outras séries



Fonte: EISBERG, 1983, p.706

Podemos nos perguntar como um núcleo pode emitir elétron se não existe nenhum elétron no núcleo.

A resposta para essa questão envolve o processo de emissão de partícula β^- , pois a transformação de um nêutron em um próton juntamente com um elétron e uma partícula chamada *antineutrino* (LUIZ, 2009, P.276).

Decaimento Gama

Existem raios emitidos por muitos dos núcleos das séries radioativas. Os raios gamas fótons de radiações eletromagnética, que liberam a energia excedente, quando os núcleos efetuam transições, por decaimento gama, de estados excitados para estados de energia mais baixa, como menciona EISBERG.

A técnica mais precisa de determinação da energia de raios gama consiste na análise de suas difrações por uma rede cristalina em que os espaçamentos internos sejam conhecidos (EISBERG, 1983, p.725).

No decaimento gama existe algumas diferenças em relação as outras radiações como a beta e a alfa, a radiação gama não possui massa e são penetrante na matéria, sendo detido por parede espessa de concreto ou de chumbo, das três radiações a gama é que podem causar danos a saúde do ser humano (LUIZ, 2009, p.277).

São constituídas por partículas, a radiação gama é formada por ondas eletromagnéticas emitidas por núcleos instáveis logo em seguida a emissão de partículas alfa ou beta (LUIZ, 2009, P.277).

Existem raios gama emitidos por muitos dos núcleos das séries radioativas. Os raios gamas são fótons de radiação eletromagnética que liberam a energia excedente quando os núcleos efetuam transições, por decaimento gama, de estados excitados para estados de energia mais baixa (EISBERG, 1983, p.725).

A emissão de uma partícula alfa ou beta, o núcleo resultante desse processo, ainda com excesso de energia, procura estabilizar-se, emitindo esse excesso em forma de onda eletromagnética, da mesma natureza da luz, sem carga elétrica, mas com energia, denominada radiação gama (CARDOSO, P. 16).

CAPÍTULO 3

APLICAÇÕES DA FÍSICA NA MEDICINA NUCLEAR

A Medicina Nuclear é um campo em expansão e possui muitas aplicações com isótopos radioativos, tem a mesma configuração eletrônica e o mesmo comportamento químico dos isótopos estáveis do mesmo elemento.

Dentro de diversas aplicações temos Danos por Radiação, Detectores de Radiação.

O grau e o tipo de dano dependem de vários fatores, incluindo o tipo e a energia da radiação e as propriedades da matéria.

Em sistemas biológicos, é comum separar os danos por radiação em duas categorias: somáticos e genéticos (JEWETT, 2012, P.354).

Dano somático é aquele associado a qualquer célula, exceto as reprodutivas. Pode levar ao câncer ou alterar seriamente as características de organismo específico.

Dano genético afetam somente as células reprodutivas. Danos aos genes em células reprodutoras podem levar a uma descendência defeituosa.

O nosso objeto de estudo são os usos da radiação na medicina nuclear que podem ser utilizada a energia das radiações, traçadores radioativos, medicina nuclear, radioisótopos na medicina e aplicações na Tireoide.

3.1 Os Benefícios das radiações no tratamento da tireoide

A medicina nuclear faz uso comum do Iodo radiativo em estudo da tireoide. Quase todo Iodo ingerido ou é eliminado ou armazenado na tireoide e as reações químicas do corpo não distinguem entre o isótopo instável ^{131}I e o isótopo estável ^{127}I .

Uma pequena quantidade de ^{131}I é injetada no paciente e velocidade com a qual ela fica concentrada na tireoide fornece uma medida da função da tireoide.

3.2 Traçadores Radioativos

As radiações emitidas por radioisótopos podem atravessar a matéria e, dependendo da energia que possuam, são detectadas (“percebidas”) onde estiverem, através de aparelhos apropriados. Dessa forma, o deslocamento de um radioisótopo pode ser acompanhado e seu percurso ou “caminho” ser “traçado” num mapa do local. Por esse motivo, recebe o nome de detectores de radiação traçador radioativo.

Traçadores Radioativos - Radioisótopos que, usados em “pequeníssimas” quantidades, podem ser “acompanhados” por detectores de radiação (CARDOSO, P.36).

3.3 Medicina Nuclear

Dessa forma, podem-se fazer exames de imagem para detectar onde estão sendo captados os radioisótopos, uma vez que estes emitem radiação que pode ser captada por uma gama-câmara (um aparelho que capta radiação). Cada tipo de elemento emite preferencialmente algum tipo específico de radiação alfa, beta e gama (SALES, 2016, 790).

A medicina nuclear se utiliza de substâncias radioativas para diagnosticar e tratar alguns tipos específicos de doenças. Uma vez administradas no paciente (vias oral, intravenosa, subcutânea ou inalatória), as substâncias radioativas irão se acumular em

determinados tipos específicos de tecidos, de acordo com as características da substância administrada e do tecido do paciente.(SALES, 2016, P. 790)

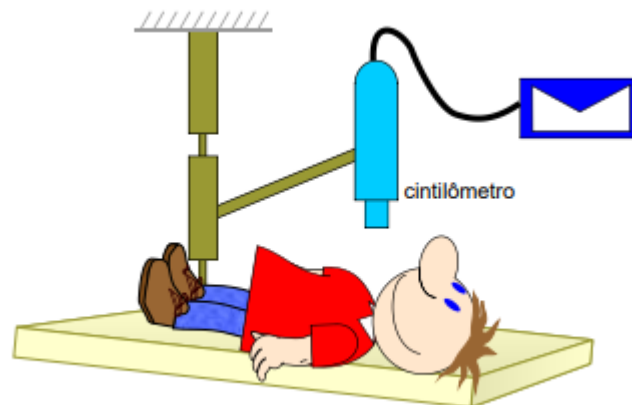
A Medicina Nuclear é a área da medicina onde são utilizados os radioisótopos, tanto em diagnósticos como em terapias. Radioisótopos administrados a pacientes passam a emitir suas radiações a partir do órgão onde têm preferência em ficar. Um exemplo prático bem conhecido é o uso do iodo, que emite partícula beta, radiação gama e tem meia-vida de oito dias.

O elemento iodo, radioativo ou não, é absorvido pelo organismo humano preferencialmente pela glândula tireoide, onde se concentra. O funcionamento da tireoide influi muito no comportamento das pessoas e depende de como o iodo é por ela absorvido. (CARDOSO, P.36).

No diagnóstico de tireoide, o paciente suspeito com tumor na tireoide, ingere uma solução de iodo-131, que vai ser absorvido pela glândula. “Passando” um detector pela frente do pescoço do paciente, pode-se observar se o iodo foi muito ou pouco absorvido em relação ao normal (padrão) e como se distribui na glândula (CARDOSO, P.5).

A cintilografia é um exame de imagem da medicina nuclear, que utiliza doses mínimas de substâncias radioativas no diagnósticos de diversas patologias. Essas doses mínimas ajudam no mapeamento pelo organismo para gerar os contrastes.

Figura 8: mostra um aparelho usado na cintilografia



Fonte: CARDOSO, p.5

O detector é associado a um mecanismo que permite obter um “desenho” ou mapeamento, em preto e branco ou colorido, da tireoide. Um diagnóstico, no caso um radiognóstico, é feito por comparação com um mapa padrão de uma tireoide normal.

3.4 Os Radioisótopos na Medicina

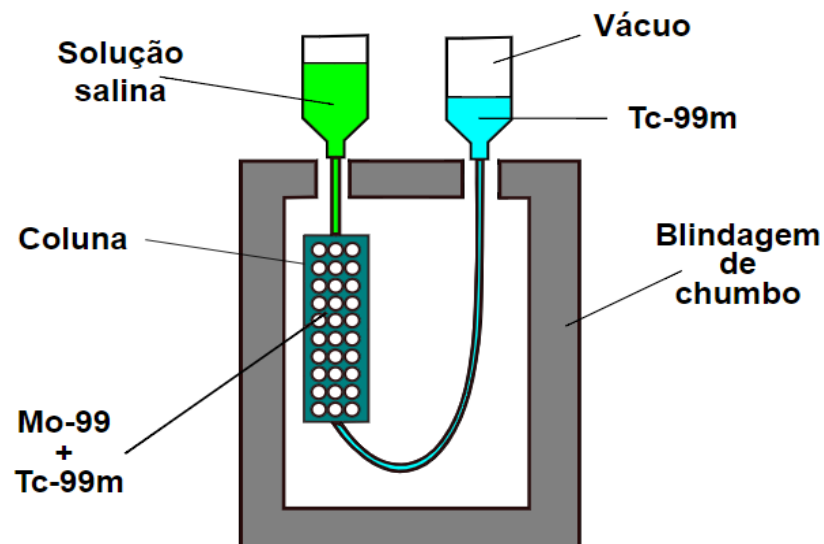
Os radiofármacos usados em medicina no Brasil são, em grande parte, produzidos pela CNEN (Centro Nacional de Energia Nuclear) através de seus institutos (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN/MG, Instituto de Engenharia Nuclear - IEN/RJ e Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/SP).

Para CARDOSO, o tecnécio-99 ($Tc-99m$) é utilizado, para obtenção de mapeamentos (cintilografia) de diversos órgãos: cintilografia renal, cerebral, hepato-biliar (fígado), pulmonar e óssea; diagnóstico do infarto agudo do miocárdio e em estudos circulatórios; cintilografia de placenta.

A figura 9 mostra a estrutura interna de um gerador de tecnécio onde temos uma solução salina e nessa solução a presença de molibdênio e

tecnécio dentro de uma estrutura de blindagem de chumbo, sendo produzido tecnécio, para utilização nas radioterapias de pacientes.

Figura 9: estrutura interna de um gerador de tecnécio



Fonte: wikipedia

3.5 A Radioterapia

A radioterapia teve origem na aplicação do elemento pelo casal Curie, para destruir células cancerosas, e foi, inicialmente, conhecida como “Curieterapia” que tratava com rádio. Posteriormente, outros radioisótopos passaram a ser usados, apresentando um maior rendimento.

O iodo-131 também pode ser usado em terapia para eliminar lesões, identificadas nos radiodiagnósticos da tireoide, aplicando-se, no caso, uma dose maior do que a usada nos diagnósticos.

O iodo radioativo apresenta as características ideais para aplicação em medicina, tanto em diagnóstico como em terapia: tem meia-vida curta de 8,02 dias; é absorvido preferencialmente por um órgão (a tireoide); é eliminado rapidamente do organismo.

3.5.1 Histologia, os hormônios e as funções das glândulas da Tireoide

A tireoide é formada por inúmeros folículos esféricos constituídos por células foliculares tireoidianas que circundam o coloide, líquido proteínico que contém grande quantidade de tireoglobulina (Tg), precursor proteico dos hormônios tireoidianos.

É uma glândula extremamente vascularizada, que produz e armazena hormônios em grande quantidade, os quais participam da regulação do metabolismo de todas as células do organismo, como menciona SALES:

A tireoide é um dos maiores órgãos endócrinos do corpo, pesando cerca de 15 a 20 g. Localiza-se na região anterior do pescoço, sobre a cartilagem tireoide. Tem dois lobos unidos pelo istmo e, eventualmente, pode estar presente um terceiro lobo, o piramidal. (SALES, 2016, p.768).

A glândula tireoide, em forma de borboleta, está localizada logo abaixo da laringe (caixa de voz). É composta pelos lobos direito e esquerdo, um de cada lado da traqueia, conectados por um istmo (passagem estreita) anterior a traqueia (TORTORA, 2009, p.670).

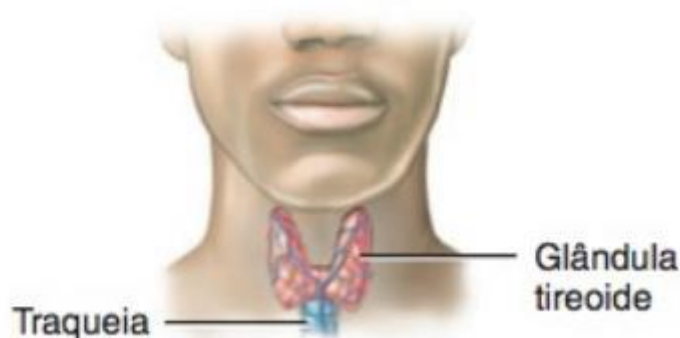
Os hormônios locais ou circulantes do sistema endócrino contribuem para homeostasia (estado de equilíbrio de diversas funções e composições químicas do corpo humano), ou seja regulando a atividade e o crescimento de células-alvo no corpo (Tortora, 2009, p.635).

Conforme entram na puberdade, os adolescentes começam a desenvolver diferenças notáveis na aparência e no comportamento. É nesse

período que o sistema endócrino se mostra em evidência mostrando as transformações no corpo humano.

A figura 10 mostra a localização frontal da glândula da tireoide possui a forma de uma borboleta na região da traqueia, logo abaixo da região conhecida como “Pomo de Adão” ou popularmente conhecida como “gogó”.

Figura 10: mostra a parte frontal da tireoide



Fonte: TOTORA, 2010, p.653

A tireoide é composta por dois tipos principais de células: foliculares, originadas no endoderma da faringe embrionária e produzem T3 (tri-iodotironina) e T4 (tetraiodotironina ou tiroxina), e parafoliculares (ou células C, por serem células claras que se coram muito pouco à microscopia), com origem neuroendócrina é responsáveis pela produção de calcitonina, um hormônio importante para a regulação do metabolismo do cálcio no organismo (SALES, 2016, p.766).

O preparo para radioiodoterapia uma dieta pobre em iodo normal tem cerca de 100 a 300 $\mu\text{g}/\text{dia}$ de iodo, e geralmente não atrapalha a realização de exames diagnósticos de tireoide, como a cintilografia puramente diagnóstica. Por isso, muitos médicos não orientam dieta pobre em iodo antes de exames com função puramente diagnóstica (SALES, 2016, P.796).

No entanto, quando o objetivo do iodo radioativo é fornecer uma dose ablativa ou terapêutica, sabe-se que uma dieta com $< 50 \mu\text{g}/\text{dia}$ de iodo é capaz de aumentar em 2 vezes a quantidade de iodo radioativo absorvido pelos tumores, e por isso deve ser sempre

indicada por um período de 14 dias antes da dose (SALES, 2016, P.796).

O iodo radioativo funciona como traçador no organismo quando absorvido pela região afetada, então uma quantidade menor que 50 µg/dia, os nódulos podem absorver o dobro do iodo radioativo, por isso um intervalo de tempo de 14 dias antes da dose.

As substâncias mais ricas em iodo que devem ser radicalmente evitadas antes da RIT (radioiodoterapia) são os contrastes iodados, medicações iodadas (amiodarona, lugol, iodeto de potássio), frutos do mar, cosméticos (tinturas de cabelo e esmaltes, por exemplo) e antissépticos iodados, como polvidine e mercúrio

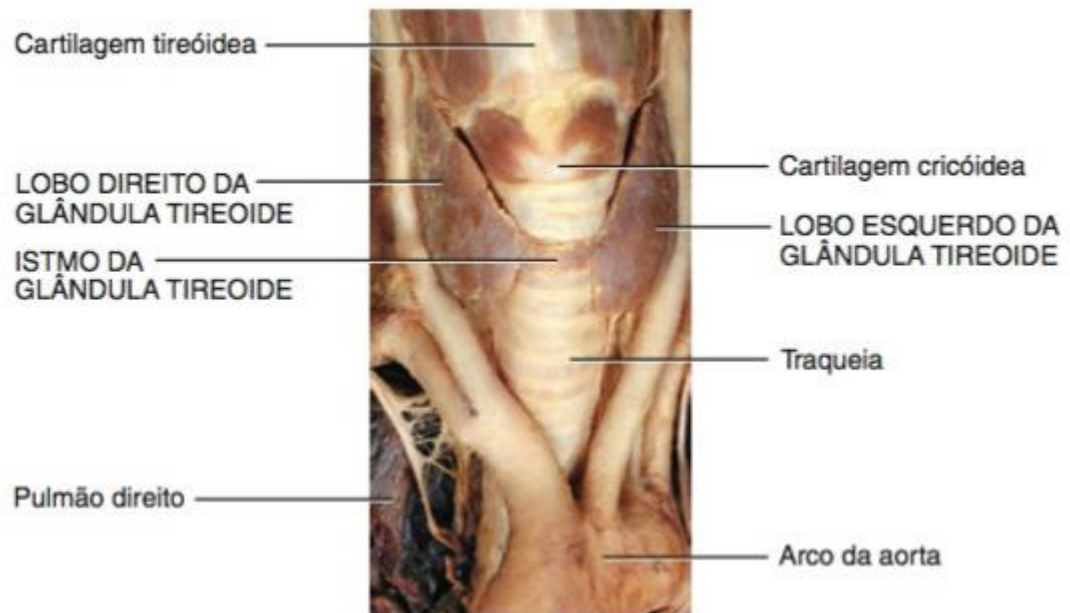
Deve-se evitar idealmente nos 3 meses antes da RIT (ou, no mínimo, 1 mês antes): Contrastes radiológicos iodados Colposcopia Antissépticos iodados (polvidine, mercúrio, álcool iodado) Lugol, iodeto de potássio, polivitamínicos que contenham iodo Xaropes que contenham iodo Amiodarona. Evitar 1 mês antes da RIT: Levotiroxina Esmaltes, xampu iodado, tintura de cabelo, bronzeador iodado (SALES, 2016, P.796).

Não comer durante 14 dias antes da RIT: Sal iodado (pode comprar sal não iodado) ou qualquer comida muito salgada, como salgadinhos, enlatados, embutidos, alimentos industrializados, batata frita industrializada, carnes defumadas ou carne de sol, presunto, salsicha, bacon, cereais industrializados, frutas secas industrializadas, enlatadas ou em calda, pizza, pães industrializados, maionese, molho shoyu, azeitonas e cogumelos Laticínios: leite, queijo, iogurte, sorvetes, requeijão, tofu, leite de soja, chocolate frutos do mar: peixes de águas salgadas, camarão, ostra, lula, polvo, algas, como SALES, menciona.

A glândula Tireoide é a única glândula endócrina que armazena seus produtos de secreção em grandes quantidades em geral, suprimentos para aproximadamente 100 dias (TORTORA, 2010, P.651).

A figura 11 mostra em detalhes a glândula da tireoide e suas estruturas como as cartilagens tireóidea e cricóidea que estão na traqueia, os lobos direito, esquerdo e o istmo.

Figura 11: vista anterior da glândula da tireoide



Fonte: TORTORA, 2010, P.652

Classificação ultrassonográfica dos nódulos da tireoide

Na classificação ultrassonográfica temos diversos tipos de graus que podemos elencar como Grau 1: benígno (frequência de malignidade de 0%): cisto puro simples, sem indicação de punção. Grau 2: benígno (frequência de malignidade de 3,6%): Nódulo misto espongiforme Múltiplos nódulos sólidos isoecogênicos ou hiperecogênicos, com ou sem calcificações grosseiras .Grau 3: indeterminado (frequência de malignidade 50%):

Nódulo único sólido isoecogênico cisto com crescimento de componente sólido em sua parede nódulo sólido com área líquida central.

Nódulo único sólido hipoeecogênico Grau 4: suspeito para câncer papilífero (frequência de malignidade de 94,3%): Nódulo sólido, hipoeecogênico, irregular, com microcalcificações e vascularização central (SALES, 2016,P.788).

A figura 12 mostra a imagem da tireoide com suas características, formato de uma borboleta que fica na traqueia, é responsável pela produção de hormônios T3 e T4, importante para regulação de outros órgãos do ser humano, responsável pelo crescimento corporal e controla o batimento cardíaco.

Figura 12: mostra a vista detalhada da glândula tireoide



Fonte: TORTORA, 2010, p.652

Para SALES, estão descritos alguns traçadores utilizados em medicina nuclear como flúor (utilizado na PET para marcar a glicose): meia-vida muito curta, de 2 h . O Tc um dos marcadores mais utilizados em medicina nuclear. Administrado por via intravenosa. Tem meia-vida de 6 h. Emite grande quantidade de radiação gama, que consegue atravessar os tecidos e ser captada pela gama câmara, e quase nada de alfa e beta. O Tc é captado pela tireoide pelo receptor NIS (cotransportador sódio/iodeto).

O Iodo também é captado fisiologicamente pela tireoide pelo receptor NIS. Tem meia-vida longa, de 7 a 8 dias, e características de radioatividade diferentes se for I^{123} (mais radiação gama) ou I^{131} (mais radiação beta). Administrado por via oral (líquido ou comprimido), mencionado por SALES.

O Tc é um marcador captado pela tireoide pelo NIS (o mesmo receptor que capta iodo). É um marcador barato, com meia-vida curta, de 6 h, e emite grande parte de radiação gama, que é mais bem captada pela gama câmara para formar a imagem. Emite bem pouca radiação alfa e beta (SALES, 2016, P.792).

Para SALES, a cintilografia realizada com o Tc consegue mostrar a melhor imagem de tireoide, com maior resolução e menos borrada, e por isso é o marcador atualmente mais utilizado nesse tipo de exame para a aquisição da imagem.

3.5.2 Consequências da radiação ionizante e dosagem máxima que o corpo humano pode suportar

As consequências da radiação ionizante são grandes para o ser humano, devido o alcance superficial e potência de penetração das partículas.

Danos causados pela radiação também depende da potência penetrante da radiação. A partícula alfa causam danos extensivos, mas penetram somente a uma profundidade superficial em um material devido a forte interação com outras partículas carregadas (JEWETT, 2012, P.354).

Várias unidades foram utilizadas historicamente para medir a quantidade da dose, de qualquer radiação que interaja com uma substância.

Roentgen (R) é a quantidade de radiação ionizante que produz uma carga elétrica de $3,33 \times 10^{-10}$ c em 1 cm^3 de ar em condições padrão (JEWTT, 2012, P.354).

De modo equivalente, roentgen é também a quantidade de radiação que aumenta a energia de 1 kg de ar por $8,76 \times 10^{-3}$ J, para a maior parte das aplicações o roentgen foi substituído pelo rad (dose de absorvida de radiação).

Rad é a quantidade de radiação que aumenta a energia de 1Kg de material absorvedor por 1×10^{-2} J.

Embora o rad seja uma unidade física, não é a melhor para medir o grau do dano biológico produzido pela radiação, porque não depende somente da dose, mas também do tipo de radiação.

O fator RBE (efetividade biológica relativa) para um tipo de radiação específica é o número de rads da radiação X ou gama que produz o mesmo dano biológico que 1 rad da radiação sendo utilizado (JEWTT, 2012, P.354).

Temos que, rem (equivalente radiação no homem) é o produto da dose em rad e fator RBE:

Dose em rem = dose em rad x RBE (dose de radiação em rem).

A radiação de nível baixo de fontes naturais, como raios cósmicos e rochas radiativas, causam-nos uma dose de aproximadamente de 0,13 rem por ano. Essa radiação, chamada de radiação de fundo, varia com a geografia, sendo seus principais fatores a altitude (exposição aos raios cósmicos) e geologia (gás radônio emitido por algumas formações rochosas, depósitos de minerais naturalmente radioativas).

O limite superior da taxa de dose de radiação é aproximadamente de 0,5 rem por ano, porém varias atividades envolvem exposições muito mais altas a

radiação e, por isso, um limite superior de 5 rem por ano, foi ajustado para exposição do corpo inteiro.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO

A Física Nuclear tem um alcance importante na Medicina Nuclear, no sentido de usar suas teorias e experimentos de radiação, para diagnósticos de tratamento de câncer, através de elementos radioisótopos descobertos pelos grandes cientistas do século XX.

Hoje, sua aplicabilidade no ramo de radioterapia tem se mostrado promissora, pois permite uma identificação rápida do nódulo e se faz um tratamento antecipado da doença.

Nosso objeto de estudo foi a glândula da tireoide, através de técnicas de manipulação de radioisótopos como tratamento de radioterapia para identificar diagnósticos do nódulo. Isso nos mostra a enorme importância dos fenômenos nucleares nos diagnósticos de doenças desafiadoras.

REFERÊNCIAS

CARDOSO. E. M . Apostila educativa . **A Energia Nuclear. Comissão Nacional de Energia Nuclear.** 3ed

Comissão Nacional de Energia Nuclear Rua General Severiano, 90 - Botafogo - Rio de Janeiro - RJ - CEP 22294-900 <http://www.cnem.gov.br>

EISBERG, Robert. e RESNICK, Robert. Física Quântica. **Átomos Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**, Editora Campos, 2 Ed., Rio de Janeiro, 1983.

HALLIDAY, David , RESNICK, Robert e KRANE, Kenneth., Física 4. 2004, 5 Ed., Editora LTC – Livros Técnicos Científicos.

JEWETT, John; SERWAY, Raymond. Física para Cientistas e Engenheiros, Editora CEGAGE Learning, São Paulo, 2012.

LUIZ, ADIR M. **Problemas de Física** 4.Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2009.

HALLIDAY, David ; RESNICK, Halliday e WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física 4.** 8 Ed., LTC

TORTORA, G., J., DERRICKSON, B. **Princípios de anatomia e fisiologia.** 12 Ed. Guanabara Koogan. 2009.

SALES, Patricia., HALPENR, Alfredo., CERCATO, Cintia. **O essencial em ENDOCRONOLOGIA.** 1 Editora Guanabara Roca LTDA. Rio de Janeiro, 2016.

YONG, Hugh, D., FREEDMAN, Roger. A., & SEARS – ZEMANSKY 12 Ed. **Ótica e Física Moderna**, volume 4. Pearson Education do Brasil , São Paulo, 2003.

SUELLEN, R., SANTANA, D., LISBOA, N., BASTOS, E., PEDRO, J., SILVA, K., **Guia de Elaboração de Trabalhos Acadêmicos, Revista Ampliada e Atualizada**, 2Ed, UFPA- Biblioteca Central, 2021.

MARCONI, Marina & LAKATOS, Eva., **METODOLOGIA DE TRABALHOS CIENTÍFICOS**: procedimentos básicos, pesquisa bibliográfica, projeto e relatório, publicações e trabalhos científicos. 6 ed- São Paulo, 2001.

SARDELHA, Antônio; MATEUS, Edegar; **CURSO DE QUÍMICA – Físico-Química**. 9 ed. Editora Ática, 1991.