



Nesta Edição

- SEÇÃO ENTREVISTA: Lucas Gomes Padilha Filho.
- PRIMÓRDIOS DA RADIOLOGIA NO BRASIL.
- MAS... O QUE É A RADIOATIVIDADE?
- ENVENENAMENTO RADIOATIVO: "As Meninas do Rádio".
- EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO.
- A MEDICINA NUCLEAR E SUAS APLICAÇÕES.

RADIAÇÃO IONIZANTE, EFEITOS BIOLÓGICOS E RADIOPROTEÇÃO

Editorial

Nesta edição temática "RADIAÇÃO IONIZANTE, EFEITOS BIOLÓGICOS E RADIOPROTEÇÃO" o Jornal da Química Inorgânica aborda a radiação ionizante, seus mecanismos de interação com a matéria, os efeitos da exposição na saúde das pessoas e a importância da proteção radiológica ocupacional. Sua elaboração contou com a participação dos discentes do curso de Química-Licenciatura, do Campus do Agreste da UFPE, matriculados no componente curricular eletivo 'Introdução à Química Nuclear', em 2020.

Abrimos esta edição com a entrevista de Lucas Gomes Padilha Filho, publicada no site do Conselho Nacional de Técnicos em Radiologia (CONTER), fazendo um alerta sobre o impacto prejudicial do ensino precário na cultura da proteção radiológica e resumindo, para nossos leitores, como ocorreu o funcionamento do primeiro equipamento



de raios-x no Brasil para, na sequência, abordarmos alguns conceitos básicos sobre radioatividade e mecanismos de decaimento nuclear. Em seguida, partindo do contexto histórico da descoberta do rádio, apresentamos o relato do caso conhecido como "As Meninas do Rádio" que se constitui um marco na história da radioproteção. Encerramos discutindo alguns aspectos sobre os efeitos biológicos da radiação e Medicina Nuclear. UMA BOA LEITURA!

SEÇÃO ENTREVISTA

Nesta seção da sua edição temática “RADIAÇÃO IONIZANTE, EFEITOS BIOLÓGICOS E RADIOPROTEÇÃO” a Equipe Editorial do JQI está reproduzindo para seus leitores a entrevista concedida por **Lucas Gomes Padilha Filho** publicada no site do Conselho Nacional de Técnicos em Radiologia (CONTER), em 25/02/2019, fazendo um alerta sobre o impacto prejudicial do ensino precário na cultura da proteção radiológica. Padilha Filho, que na época presidia da Comissão Nacional de Radioproteção e Dosimetria (CNRD), foi categórico em discurso afirmando: “Já encontrei profissionais, inclusive médicos, que não tinham a menor noção sobre radioproteção”, apesar de considerar ser possível mudar esta realidade. A exposição aos raios X sem um rigoroso controle das doses pode causar danos biológicos sendo necessário conhecer e usar os recursos que garantem a proteção radiológica, tanto aos profissionais quanto aos pacientes. Mas, na prática, a realidade é outra com essa área do conhecimento ocupando pouco espaço na formação dos profissionais e sua aplicação no mercado de trabalho ainda é insipiente.



Fonte da imagem com edição JQI:

<http://conter.gov.br/>

Lucas Padilha Filho tem graduação em Física pela Fundação Técnico Educacional Souza Marques (1986) e Mestrado em Medicina (Radiologia) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1999). Atualmente é Diretor da Divisão de Saúde e Segurança do Trabalhador (DSST), Supervisor Geral de Radioproteção, Físico da UFRJ e Professor Adjunto da Fundação Técnico Educacional Souza Marques. Foi Coordenador Geral dos cursos de Graduação Tecnológica em Radiologia e Graduação Tecnológica em Citologia da Universidade Estácio de Sá. Tem experiência na área de Medicina, com ênfase em Física Médica - Controle de Qualidade. É Membro do Conselho da Sociedade Brasileira de Proteção Radiológica (SBPR) e presidiu, até 2020, a Comissão Nacional de Radioproteção e Dosimetria do Conselho Nacional de Técnicos em Radiologia (CONTER).

➤ Acesse a entrevista, na íntegra, em:
<http://conter.gov.br/site/noticia/entrevista-25-02-2019>



CONTER - Como o senhor explicaria o que é radiação ionizante para quem nunca ouviu falar no assunto?

Padilha Filho - Imagine um círculo. Imaginou? Agora, sobre a linha do círculo coloque algumas bolas de gude. Lance uma outra bola de gude em direção as que estão sobre o círculo. Se você acertou o seu possível alvo e retirou a bola de gude da circunferência, criou-se uma região vazia. Isso é ionização. Deste modo, podemos comparar este modelo simplificado de ionização com o que ocorre na natureza. Para se retirar um elétron é necessário ter energia suficiente para ionizar átomos e moléculas, ou seja, é necessário ser capaz de arrancar um elétron de um átomo ou molécula.

CONTER - A radiação pode fazer mal? Quais os riscos para a segurança e para a saúde de profissionais e pacientes que entram em contato com os raios X?

Padilha Filho - A radiação pode, sim, fazer mal, caso não seja utilizada de forma correta. A legislação brasileira exige que todos os pedidos de exames radiológicos sejam justificados, que o processo seja otimizado e que se tenham limites para doses de exposição dos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE). Mas não há limite para o paciente, desde que sejam os pedidos de exames justificados por médico ou dentista. Lembro que nossos equipamentos devem passar por testes de aceitação, realizar controle de qualidade periódicos, garantindo que as doses sejam tão baixas quanto exequível, mas que tenham qualidade necessária para o diagnóstico. Quando você ioniza, cria um desequilíbrio eletrônico no átomo ionizado. Dependendo da quantidade de átomos ionizados e sua importância na formação das células, moléculas e tecidos, podem desencadear reações desde uma simples morte celular, até desenvolvimento de tumores, ou até mesmo a morte do tecido e ou órgãos, acarretando riscos à saúde do paciente e do IOE. Em exames de raios X geral (tórax, extremidades, etc.) os riscos são muito pequenos. O riscos maiores são nos exames de intervenções e tomografia computadorizada, pois as doses são mais elevadas. Para os profissionais que trabalham atrás de biombos, suas doses são bem insignificantes. Nossos dosímetros não conseguem registrar essas doses, por serem minimizadas pelos biombos, que devem ser instalados corretamente e possuir seus cálculos de blindagens adequados à carga de trabalho da sala de raios X.

CONTER - Como o senhor avalia a situação da Radiologia no Brasil atualmente?

Padilha Filho - Com a descoberta dos raios X, em 8 de novembro de 1895, pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen, a medicina muda sua concepção do diagnóstico e, em 1897, o Brasil inicia sua história com a instalação do primeiro aparelho de raios X, em Formiga, Minas Gerais, fabricado pela Siemens, levado por José Carlos Ferreira Pires. Se pudéssemos voltar na história, diríamos que 125 anos atrás, estávamos na crista da onda da nova tecnologia. Percebe-se que a evolução tecnológica hoje é muito rápida, em meses novos equipamentos surgem, bem como melhorias significativas no diagnóstico de doenças com imagens mais nítidas. A Radiologia precisa de profissionais mais envolvidos, diferenciados e que procurem acompanhar

(continuação) a velocidade das evoluções tecnológicas. Depois de 125 anos, percebe-se que a nossa diferença tecnológica não é de dois anos, mas sim de dez anos ou mais. O nosso país ainda importa tecnologia, caixas fechadas, com segredos a desvendar. Nossas fábricas são montadoras, nossa tecnologia é importada e nossos pesquisadores estão deixando o nosso lindo Brasil. Precisamos criar uma cultura da qualidade e de radioproteção. Ainda hoje vejo profissionais que não tem a menor ideia de como usar ou interpretar um fantom. A Medicina, que dispõe de instrumentos mais precisos para realização de diagnósticos, precisa que todos nós, profissionais envolvidos da área radiológica, sejamos diferenciados.

CONTER - Como a CNRD pode contribuir para criar uma cultura de radioproteção no Brasil?

Padilha Filho - A ideia da CNRD é manter as discussões abertas sobre a radioproteção, buscando dentro de nossa sociedade aspectos que nos levem a desenvolver métodos de informação, auxiliando os Conselhos de Radiologia na criação de metodologias e instrumentos de divulgação da radioproteção, bem como trazer para nossos debates profissionais e órgãos que possam nos auxiliar neste desenvolvimento.

CONTER - Como levar a cultura da radioproteção para outros profissionais, como médicos e enfermeiros, por exemplo?

Padilha Filho - Quando você leva a cultura para nossos profissionais, cria-se uma reação em cadeia, pois estamos dentro de um ambiente multidisciplinar e em médio a longo prazo, essa interação e as discussões serão desenvolvidas em todos ambientes da radiologia. É um processo de cultura que deverá ser constante e bem longo.

CONTER - Falta atenção da academia para a área da radioproteção?

Padilha Filho - Com certeza, falta. Em 1999, quando defendi minha dissertação de mestrado, em meus estudos dos currículos das escolas de formação de cirurgiões-dentistas do eixo Rio de Janeiro e São Paulo, pude ver que eram dedicadas apenas duas horas à radioproteção durante formação desses profissionais, o que não é diferente na formação dos médicos. Os profissionais que mais tem contato e maior tempo dedicado aos estudos da radioproteção ainda são os físicos-médicos e os tecnólogos em radiologia.

CONTER - Quais são os obstáculos para aprendizagem da proteção radiológica e para o aproveitamento das tecnologias disponíveis?

Padilha Filho - Na indústria existe a cultura de investir na manutenção preventiva para evitar falhas e quebras de equipamentos, trocando os mesmos quando chegam

(continuação) aos seus limites de uso e da vida média dos aparelhos, pois uma fábrica parada por erros ou por quebras de equipamentos gera custos altíssimos e muitos prejuízos. Na área da saúde, nossos gestores não enxergam desta forma: não realizam controles de qualidade. Só fazem manutenção quando os equipamentos apresentam erros ou param de funcionar. Nossos profissionais envolvidos na execução dos exames não têm a menor noção de controle de qualidade e/ou controle de dose e não se interessam em participar destes controles quando estes acontecem em suas unidades. Não há estímulo do governo para desenvolvimento de novas tecnologias e a que temos é toda importada. Esses descasos são os nossos maiores obstáculos.

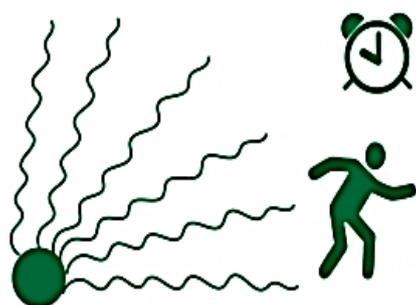
CONTER O Brasil é capaz de inovar nesse sentido e de fazer melhor uso das tecnologias de radioproteção?

Padilha Filho - Com certeza o Brasil é capaz de inovar. Nossas universidades têm os melhores profissionais, mas é necessário maiores investimentos e maior dedicação ao tema, além de uma maior participação da área de saúde no processo.

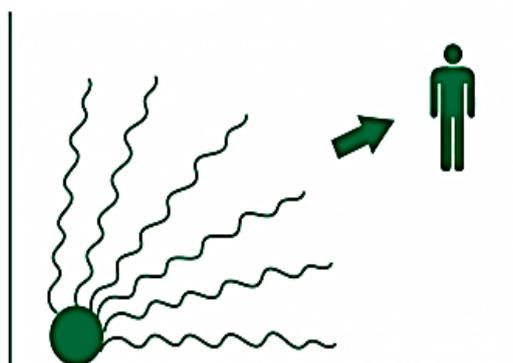
VOCÊ SABIA... “O tempo, a distância e as medidas de proteção minimizam sua exposição à radiação da mesma forma que o fariam para protegê-lo contra a superexposição ao sol” (conforme ilustrado na figura abaixo). Fonte: Nuclear Regulatory Commission.

<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/protects-you/protection-principles.html>

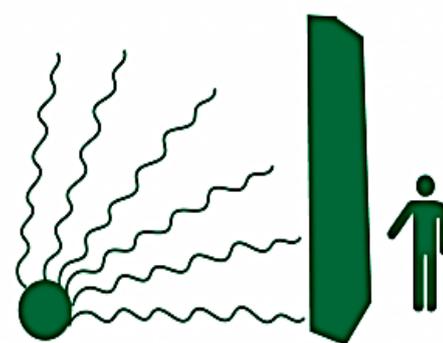
PARA REDUZIR A EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO:



LIMITAR O TEMPO



AUMENTAR A DISTÂNCIA



USAR BLINDAGEM

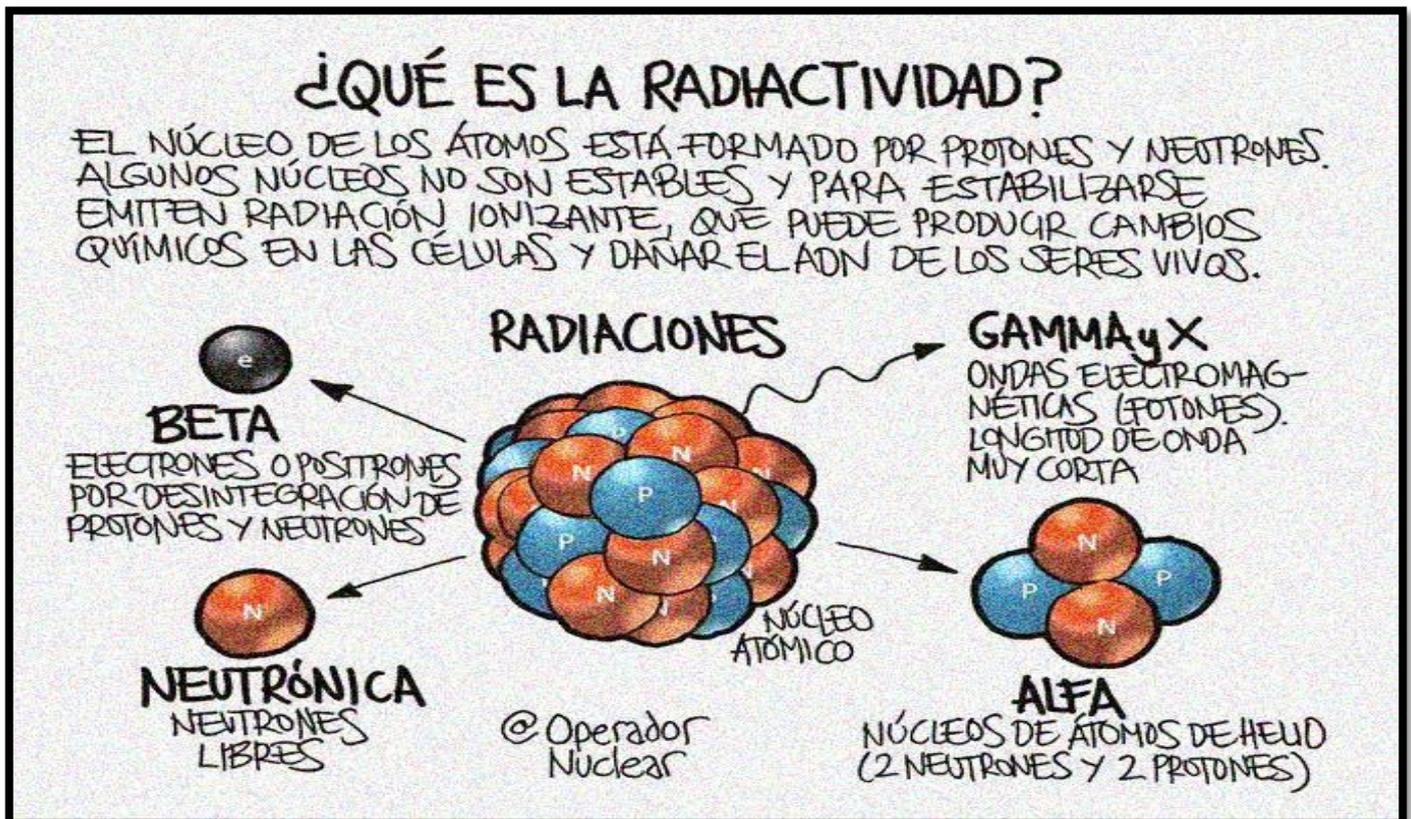
<https://www.epa.gov/radiation/protecting-yourself-radiation>



Imagem o aparelho de raios-X. Hoje, o equipamento está no Museu de Cirurgia em Chicago. Fonte: <http://www.imaginologia.com.br/extra/upload%20historia/Dr-Jose-Carlos-Ferreira-Pires.pdf>

Apenas três anos depois de Roentgen ter descoberto os Raios X, em 1895 na Alemanha, o Dr. José Carlos Ferreira Pires fazia funcionar o primeiro equipamento dessa natureza na município de Formiga, no interior do estado de Minas Gerais, Região Sudeste do Brasil. O equipamento, cujas ampolas estão expostas no Centro de Memória da Medicina, foi fabricado pela Siemens e veio transportado para o Brasil em navio e posteriormente, “ora em lombo de burro e ora em carro de boi”, chegou ao seu destino. Como neste Município ainda não havia energia elétrica utilizou-se, primeiramente, de pilhas Leclancher, porém, como os resultados não foram satisfatórios, instalou-se um motor fixo à gasolina como gerador elétrico. Assim, em 1898 o médico fez seu equipamento funcionar a contento. Enquanto viveu, procurou estar atualizado com a técnica e ainda encomendou outros tipos de tubos e ampolas produzidas por indústrias francesas e alemãs. Nesse empreendimento, o Médico, Doutor em Medicina, contou com o auxílio de sua esposa, Dra. Matilde Guilhermina Faria Pires que colaborava em seus atendimentos clínicos bem como nas experimentações com essa nova técnica, cujas observações e pesquisas permitiram a publicação de inúmeros trabalhos em revistas científicas e congressos. Devido ao total amadorismo e despreocupação com a devida proteção faleceu de “anemia cerebral” mas, documentação reunida posteriormente indica como causa provável da sua morte uma leucemia. O aparelho de Raios-X era rudimentar e cada radiografia exigia uma exposição de pelo menos vinte minutos. Mesmo dispondo desse equipamento rudimentar, que no entanto era o mais moderno na época, o médico fazia diagnósticos radiológicos e praticava radioterapia com relativo sucesso. FICOU CURIOSO? Leia mais sobre o assunto em “Os primórdios das radiações na medicina no Brasil” de Cuperschmid; Campos (2005) que o leitor do JQI pode acessar no link seguinte: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2005/full/1703.pdf>

MAS... O QUE É A RADIOATIVIDADE?



Fonte da imagem sem tradução JQI: <https://twitter.com/operadornuclear/status/1098300143298850816?lang=pt>

Nesta seção da edição temática “RADIÇÃO IONIZANTE EFEITOS, BIOLÓGICOS E RADIOPROTEÇÃO” a Equipe Editorial do JQI apresenta uma abordagem introdutória sobre radioatividade tendo como referência o livro “Introduction to Health Physics” (CEMBER; JOHNSON, 2009) complementada com os infográficos de Alfredo García Fernández publicados no perfil @OperadorNuclear no Twitter. Fernández é um divulgador bastante ativo da Ciência e Tecnologia Nuclear agraciado com o Prêmio de Comunicação da Sociedade Nuclear Espanhola destacando-se pela criatividade e facilidade na comunicação com o público. É engenheiro técnico de telecomunicações, licenciado em Comunicação Audiovisual e possui licença de Operador e Supervisor, outorgadas pelo Conselho de Segurança Nuclear, que o habilita para atuar na Central Nuclear de Ascó, em Tarragona (Espanha). O JQI recomenda aos seus leitores acessar este perfil no Twitter.

Inicialmente apresentamos para nossos leitores a definição de radioatividade proposta por Cember; Johnson (2009, com tradução do JQI). De acordo com estes Autores trata-se de transformações nucleares espontâneas de átomos instáveis (radionuclídeos, nota do JQI) que resultam na formação de novos elementos. Essas transformações são caracterizadas por um dos vários mecanismos de decaimento radioativo, entre os quais a emissão das partículas: ALFA (α), BETA (β^-), PÓSITRON (β^+) além do processo de CAPTURA DE ELÉTRON ORBITAL (ou captura eletrônica). Essas transformações estão criativamente representadas no infográfico que abre esta seção e todas elas podem, ou não, ser acompanhada da emissão de radiação gama (γ). Neste

infográfico ainda estão destacadas a emissão de nêutrons livres (neutrônica) e fótons de raios X (@OperadorNuclear).

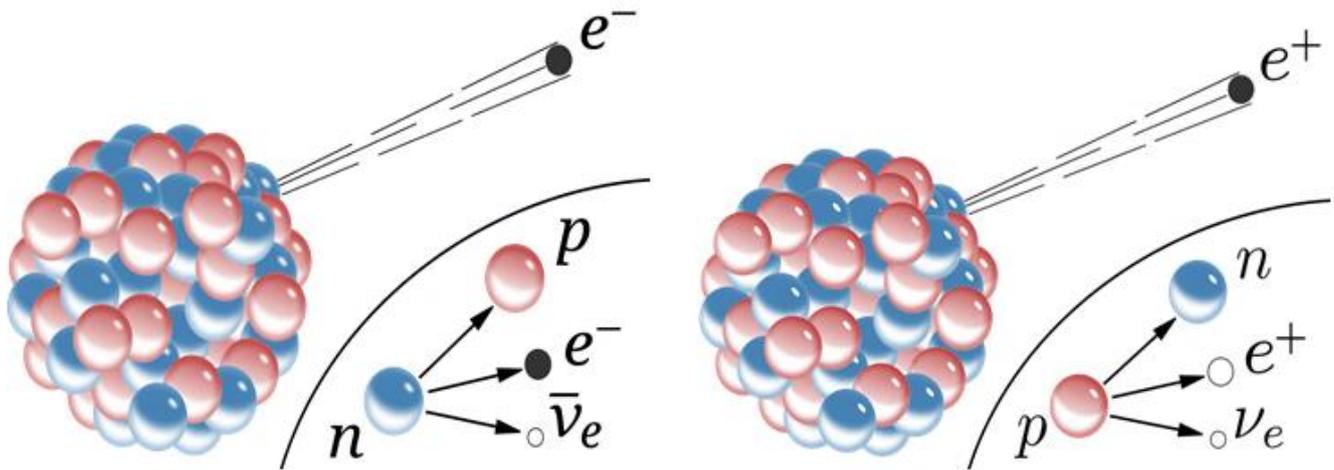
No Quadro seguinte o leitor do JQI pode observar os diferentes tipos de decaimento radioativo que foram destacados por Cember; Johnson (2009) ao conceituar radiatividade, destacando ainda: as equações nucleares, a representação esquemática de cada tipo de transformação radioativa além das alterações correspondentes na quantidade de nucleons (prótons e nêutrons), especificamente no número atômico (Z) e no número de massa (A). Na equação nuclear (X) representa o nuclídeo Pai e (Y) o nuclídeo Filho formado no processo de decaimento nuclear:

TIPO	EQUAÇÃO NUCLEAR	REPRESENTAÇÃO	MUDANÇAS NOS NÚMEROS ATÔMICO (Z) E DE MASSA (A)
Decaimento ALFA	${}^A_ZX \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$		A: reduzido de 4 unidades Z: reduzido de 2 unidades
Decaimento BETA	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^A_{Z+1}Y$		A: não é alterado Z: aumenta em 1 unidade
Decaimento GAMA	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_0\gamma + {}^A_ZY$		A: não é alterado Z: não é alterado
Emissão de PÓSITRON	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{+1}e + {}^A_{Z-1}Y$		A: não é alterado Z: reduzido em 1 unidade
Captura de ELÉTRON	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^A_{Z-1}Y$		A: não é alterado Z: reduzido em 1 unidade

Fonte com tradução do JQI <https://socratic.org/>

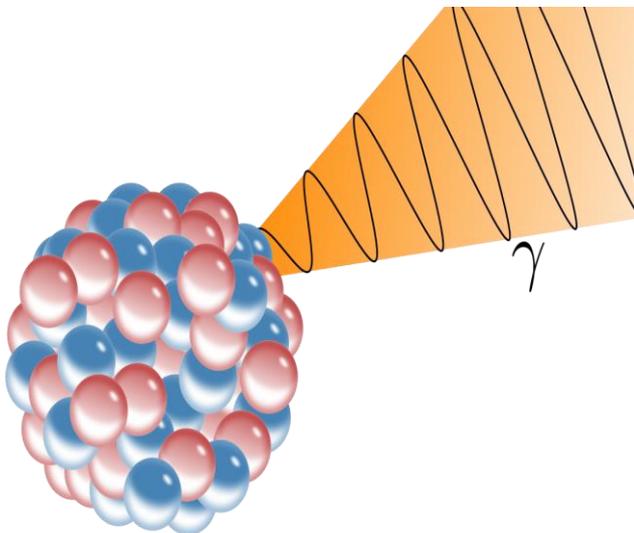
Uma análise detalhada das informações sobre estes modos de decaimento radioativo permite concluir que: (i) No DECAIMENTO BETA um núcleo atômico com excesso de nêutrons se transforma num próton emitindo um elétron (β^-) e um antineutrino do elétron ($\bar{\nu}_e$). (ii) Na EMISSÃO DE PÓSITRON por um núcleo atômico com deficiência de nêutrons, um próton transforma-se num nêutron liberando um pósitron (β^+ , antipartícula do elétron) e um neutrino do elétron (ν_e). Nos dois processos o núme-

-ro de nucleons ($A = P + N$) não se altera mas o número atômico ($Z = P$) aumenta de uma unidade no processo de emissão beta (e^-) enquanto diminui de uma unidade na emissão de pósitron (e^+). Estes processos estão representados esquematicamente a seguir. Obs. símbolos se referem à e^- (elétron); n (nêutron); p (próton); e^+ (pósitron, a antipartícula do elétron); $\bar{\nu}_e$ (neutrino e antineutrino do elétron, com barra):



Fonte da imagem sem edição JQI: <https://en.m.wikipedia.org/>

“É quanto à emissão gama γ ” ↓



Fonte da imagem sem edição JQI:
<https://en.m.wikipedia.org/>

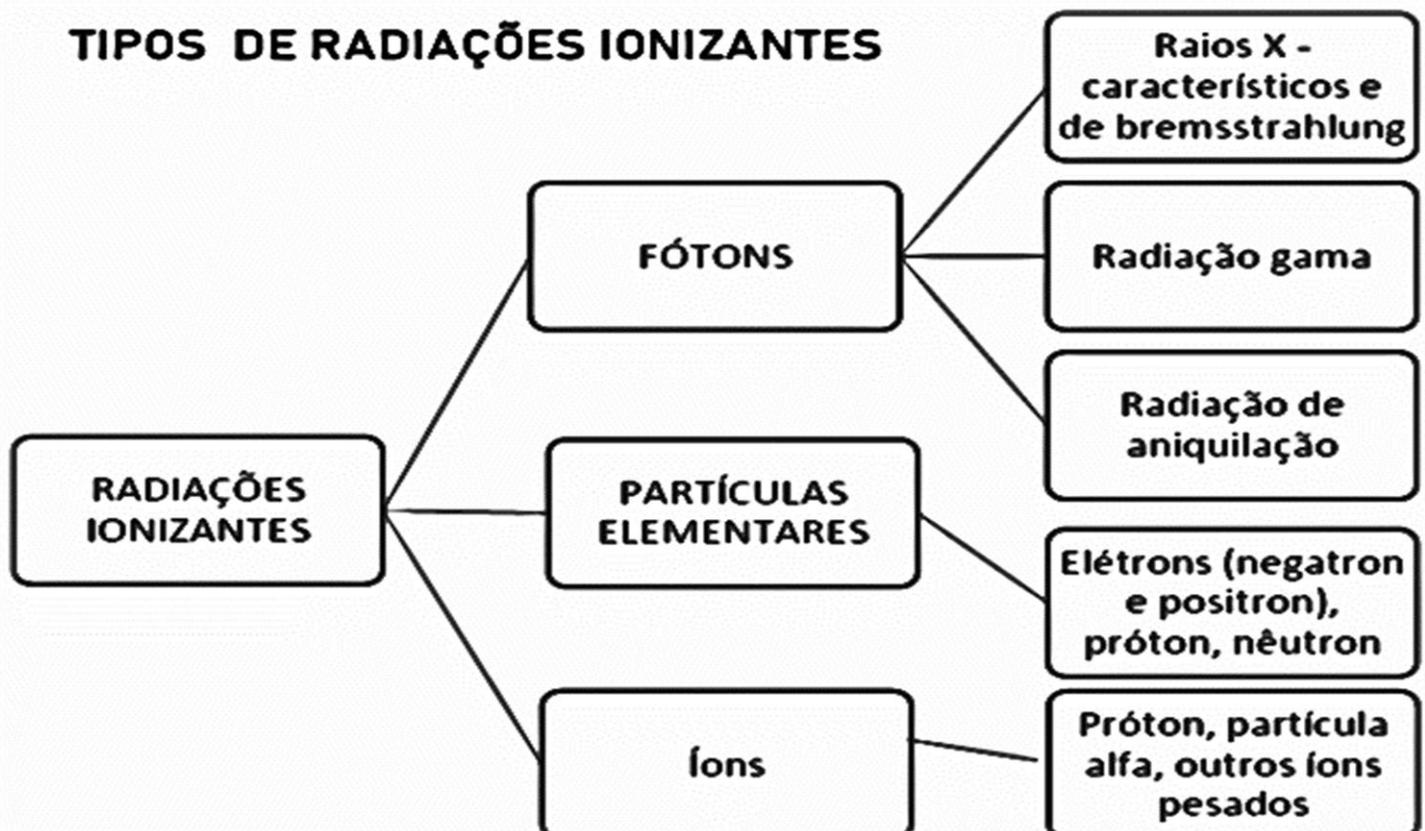
No DECAIMENTO GAMA um núcleo atômico no estado excitado retorna ao estado fundamental liberando o excesso de energia na forma de fótons gama (radiação eletromagnética de frequência elevada). Neste processo, representado esquematicamente na figura ao lado, o número atômico (Z) e o número de nucleons (A) não são alterados. Portanto os átomos X e Y são iguais, ou seja, têm os mesmos valores de número atômico e número de massa mas diferem quanto ao estado de excitação do núcleo atômico. São, portanto, isômeros nucleares.

Tanto os raios X como os raios gama são radiação eletromagnética de alta frequência (comprimentos de onda na faixa aproximada de 10^{-11} a 10^{-9} m). Os raios X são originados no rearranjo dos estados eletrônicos dos átomos, nas transições eletrônicas de um estado excitado para um estado excitado de energia inferior ou para o estado fundamental. Por sua vez os raios gama são originados no processo de desexcitação nuclear. Portanto, tanto os raios-X como os raios gama ocupam a faixa de maior frequência do espectro eletromagnético mas diferem quanto a origem.

Cember; Johnson (2009, com tradução do JQI) observa ainda que as propriedades radioativas de um dado nuclídeo – átomo caracterizado por um número atômico ($Z=P$) e um número de massa ($A=P+N$) – são determinadas apenas por considerações nucleares, independente dos estados físico e químico do radionuclídeo. Sendo assim são características exclusivas dos respectivos radionuclídeos e não podem ser alteradas por qualquer meio. Estes Autores destacam ainda que o modo de decaimento radioativo de um dado nuclídeo depende da energia disponível para a transição que, por sua vez, é definida por dois fatores descritos a seguir:

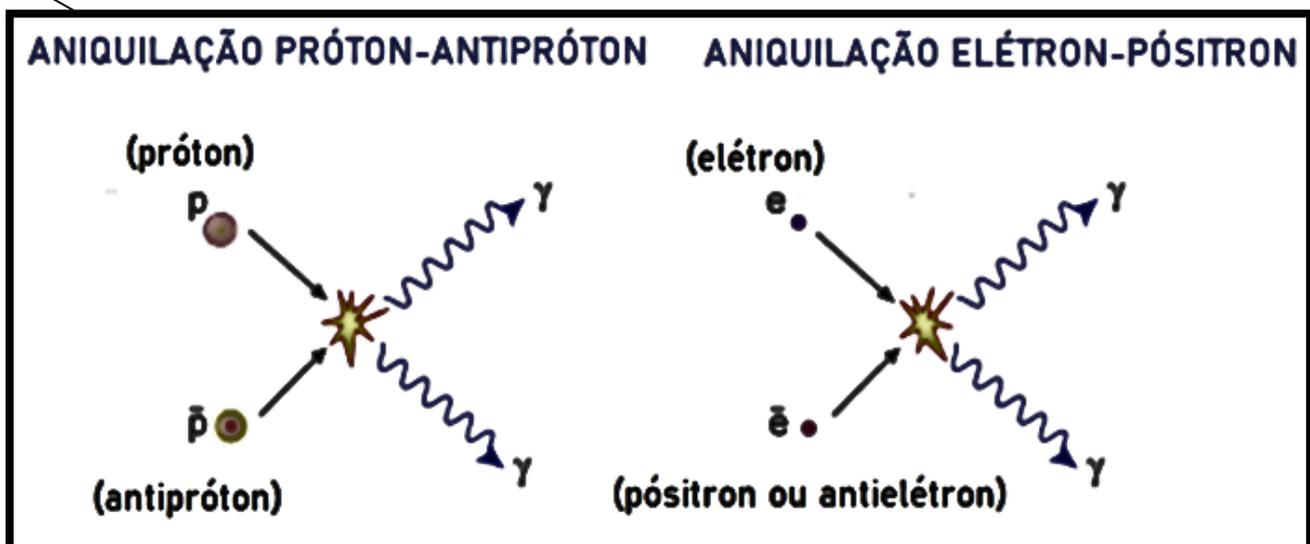
1. **O tipo particular de instabilidade nuclear**, isto é, se a razão entre a quantidade de nêutrons (N) e prótons (P) no núcleo atômico (N/P) é muito alta ou muito baixa para o nuclídeo específico.
2. **A relação massa-energia entre:** o núcleo pai (que sofre a transformação – ou decaimento), o núcleo filho (formado no processo de decaimento) e a partícula emitida.

No âmbito desta discussão também é importante destacar que as radiações podem ser IONIZANTES ou NÃO IONIZANTES. As radiações ionizantes têm energia suficiente ionizar átomos e moléculas. O diagrama seguinte mostra os diferentes tipos de radiações ionizantes:



A IUPAC inclui na categoria das **RADIAÇÕES IONIZANTES**: (i) Os fótons com energia superior à dos fótons da luz ultravioleta incluindo os raios X, raios gama e fótons de aniquilação. (ii) As partículas elementares com carga (prótons, elétrons, pósitrons). (iii) As partículas elementares sem carga (nêutrons). (iv) Íons incluindo: prótons, partículas alfa e outros íons pesados. Os fótons de raios X e gama e nêutrons livres são indiretamente ionizante. As partículas carregadas são diretamente ionizantes.

MAS... O QUE SÃO FÓTONS DE ANIQUILAÇÃO? São fótons produzidos no processo de interação da partícula com sua antipartícula resultando com a conversão do par em fótons de aniquilação. A partícula e sua antipartícula diferem apenas no sinal oposto da carga elétrica. No diagrama seguinte tem-se uma representação esquemática de dois processos de aniquilação: (i) do próton com o antipróton; (ii) do elétron com o pósitron:

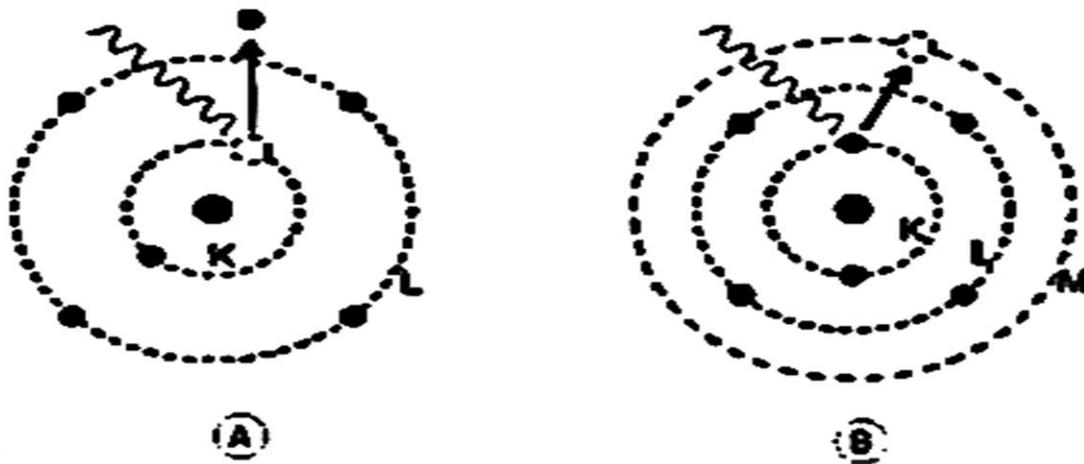


Fonte da imagem com edição e tradução do JQI: <https://www.quora.com/>

Os físicos médicos trabalham na área da saúde e aplicam seu conhecimento da Física ao desenvolvimento e uso de tratamentos, dispositivos e tecnologias de radiação médica. Garantem o funcionamento correto e muitas vezes estão envolvidos diretamente com o diagnóstico e tratamento do paciente, bem como com a segurança radiológica e desenvolvimento de produtos. Tanto a formação como a atuação dos físicos médicos estão fundamentadas nos preceitos da Radioproteção e Dosimetria das radiações ionizantes. Nesta perspectiva é necessário compreender os diferentes mecanismos de interação das radiações com a matéria. Na maioria das vezes essas interações envolvem transferência de energia da radiação para a matéria com a qual interage. Considerando a composição elementar da matéria, cujos átomos são constituídos por núcleos e elétrons extranucleares, a radiação pode interagir com um, ou com ambos, constituintes da matéria. A probabilidade de ocorrência de qualquer tipo de interação bem como o seu poder de penetração depende do tipo e da energia da radiação bem como da natureza do meio absorvedor. Em todos os casos a interação da

radiação com a matéria resulta na **EXCITAÇÃO** e **IONIZAÇÃO** dos átomos absorvedores. Em última análise, a energia que é transferida para um tecido humano ou para o material de blindagem (um escudo) da radiação é dissipada como calor (CEMBER; JOHNSON, 2009, p.145 com tradução do JQI).

MAS... Como ocorrem os processos de **EXCITAÇÃO** e **IONIZAÇÃO** dos átomos absorvedores pela interação da radiação ionizante com um dado material? Os dois processos estão representados esquematicamente na figura seguinte, tendo como exemplo um átomo do elemento químico carbono ($Z=6$). No processo de ionização (A) um fóton incidente, com energia igual ou maior que a energia de ligação de um elétron da camada K, remove esse elétron do campo elétrico nuclear para um ponto infinito, deixando o átomo com carga global positiva. Na excitação (B) um fóton incidente transfere sua energia para um elétron da camada K possibilitando sua transição dessa camada interna para uma órbita vazia. Neste evento o elétron ganha energia e, como resultado, o átomo é deixado num estado excitado.

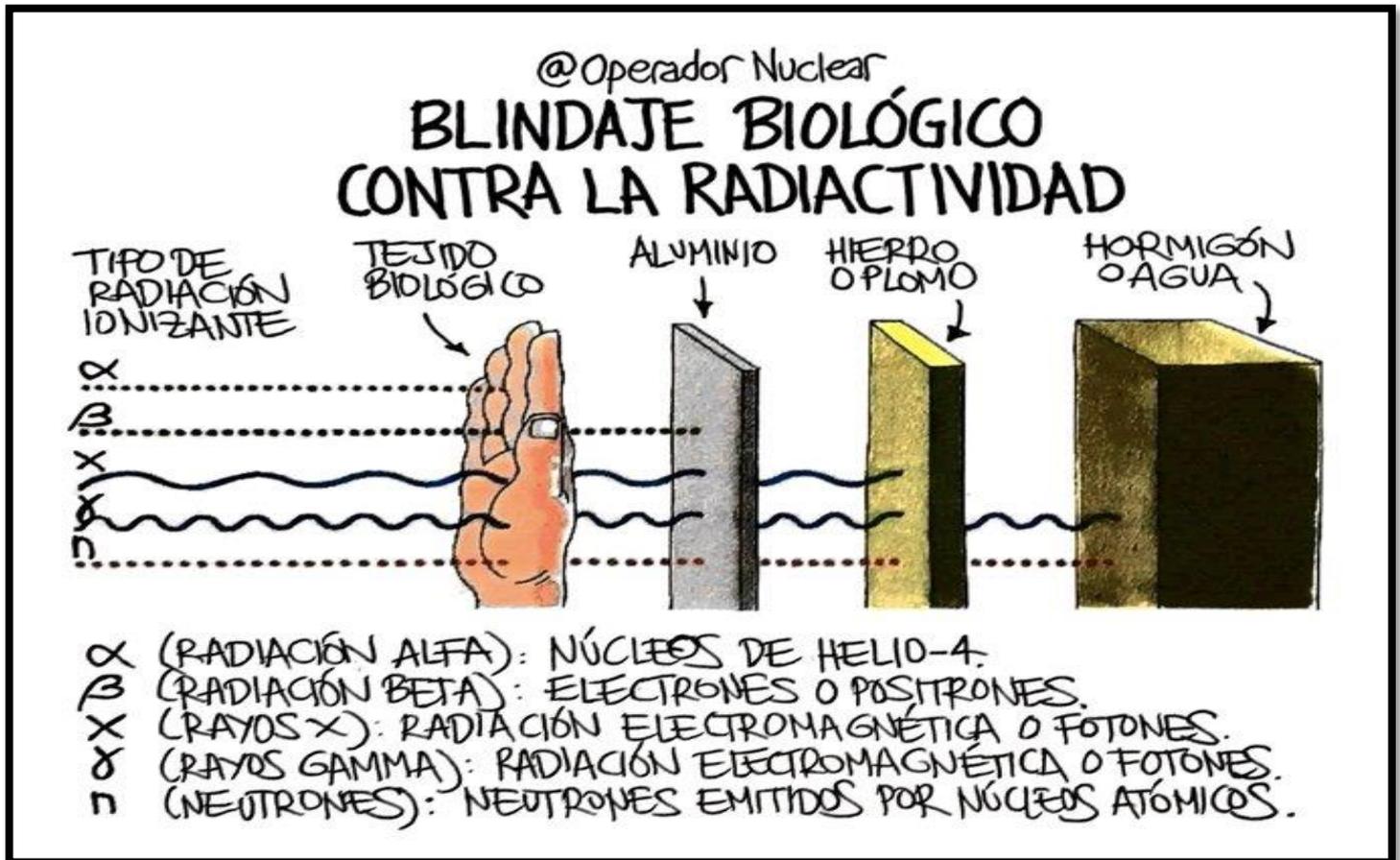


Fonte da imagem sem edição JQI: <https://radiologykey.com/>

É importante ressaltar que uma dada radiação pode ser ionizante num meio material mas não ser ionizante em outro. Na dosimetria e proteção radiológica os principais meios materiais levados em consideração são: o ar, a água, os tecidos biológicos e seus substitutos em termos dos materiais denominados por “TECIDOS-EQUIVALENTES” (SABOL; WENG, 1995).

De acordo com o Relatório 44 da Comissão Internacional de Unidades e Medições de Radiação (ICRU) “tecido-equivalente” é qualquer material que simula uma parte do corpo humano ou um tecido humano em sua interação com radiação (ionizante ou não ionizante) e qualquer volume de material tecido-equivalente usado para simular essas interações é chamado de “phantom”. Assim, *phantoms* são objetos usados como simuladores para avaliar o transporte da radiação ionizante pelo corpo humano, possuindo diferentes formas, tamanhos e composições (SIRICO ET AL. 2018).

Com base nas considerações anteriores o JQI apresenta uma reprodução (sem tradução) do infográfico, publicado no perfil @OperadorNuclear no Twitter, exemplificando alguns materiais que usados na proteção (blindagem) biológica contra a radioatividade:



Fonte da imagem sem edição JQI: <https://twitter.com/operadornuclear/status/1098300143298850816?lang=pt>

Neste infográfico estão representadas esquematicamente algumas categorias de radiações ionizantes e materiais de blindagem específicos constatando-se que:

- A RADIAÇÃO ALFA (núcleos de hélio-4) tem o menor poder de penetração sendo barrada pela pele humana (tecido biológico) ou mesmo por uma folha de papel ou chapa de alumínio com 10^{-2} mm de espessura. Sendo uma partícula com massa e carga elevada (+2) é diretamente ionizante e com poder de ionização elevado (cerca de 10^4 par de íon formado por mm ar).
- A RADIAÇÃO BETA (elétrons e pósitrons) tem maior poder de penetração que a radiação alfa. São barradas por materiais de baixo número atômico, como uma chapa fina de alumínio com poucos mm de espessura. Tratando-se de partículas com carga e massa menores – cargas -1 e +1, respectivamente; massa $9,109 \times 10^{-31}$ kg) são radiação diretamente ionizante mas com poder de ionização moderado.
- RAIOS X (radiação eletromagnética, ou fótons) com poder de penetração mais elevado. São destituídas de carga, portanto indiretamente ionizante, e com poder de ionização baixo. Usa-se como blindagem camada mais espessas de metais, tais como: ferro ou chumbo.
- RAIOS GAMA (radiação eletromagnética, ou fótons) e NÊUTRONS emitidos por núcleos atômicos. São blindados por uma camada espessa de concreto ou água. Tem elevado poder de penetração e baixo poder de ionização (cerca de 1 par de íon formado por mm ar para os fótons gama).

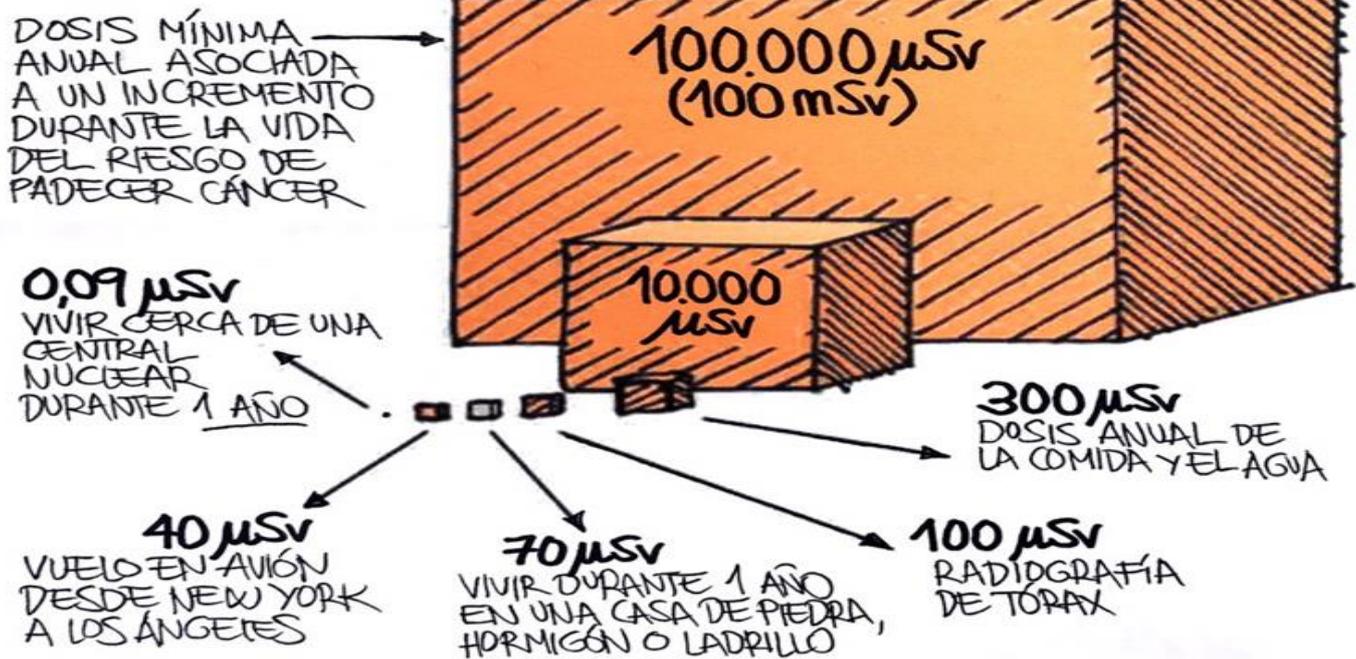


Fonte da imagem sem edição JQI: <https://twitter.com/OperadorNuclear/status/1117641724023726081/photo/1>

A exposição à radiação ionizante pode ocorrer através dos processos de CONTAMINAÇÃO e IRRADIAÇÃO. A contaminação radioativa consiste no contato não intencional da pessoa e a retenção de material radioativo, geralmente pó ou líquido, podendo ser externa ou interna. A irradiação é a exposição à radiação mas não ao material radioativo, ou seja, sem envolver contaminação. Essas duas formas de exposição radioativa estão ilustradas no Infográfico acima, publicado no perfil @OperadorNuclear no Twitter, reproduzido e ilustrando essa discussão sem tradução do JQI. Na CONTAMINAÇÃO EXTERNA o material radioativo entra em contato com a pele ou roupa de uma pessoa, da qual pode vir a se desprender ou ser esfregada, contaminando outras pessoas e objetos. Na CONTAMINAÇÃO INTERNA um material radioativo entra no corpo de forma não intencional por ingestão, inalação ou através de fissuras existentes na pele. A contaminação interna e externa produz irradiação mas e irradiação não produz contaminação, portanto durante uma radiografia uma pessoa não se contamina. O infográfico destaca que a radiação atravessa o corpo humano em função da sua energia.

DOSIS RADIATIVA EN PERSPECTIVA

@OperadorNuclear



Fonte da imagem sem edição JQI: <https://twitter.com/OperadorNuclear/status/1095720628144009216/photo/1>

A Equipe Editorial do JQI finaliza esta seção reproduzindo o infográfico publicado no perfil @OperadorNuclear no Twitter, cuja temática é “DOSES RADIOATIVAS EM PERSPECTIVA” (tradução nossa) evidenciando a dose mínima anual de radiação associada ao aumento do risco para desenvolver o câncer durante a vida de uma pessoa – igual a 100.000 μSv (ou 100 mSv) – possibilitando ao leitor fazer uma análise comparativa desse parâmetro com os valores das doses estimadas em diferentes contextos de exposição à radiação, tais como: (i) A dose de radiação de uma pessoa morando perto de uma central nuclear durante um ano (0,09 μSv). (ii) A dose de uma pessoa durante uma viagem aérea de Nova York à Los Angeles (40 μSv) (iii) A dose de uma pessoa durante uma radiografia de tórax (100 μSv). (iv) A dose anual decorrente da alimentação e ingestão de água (300 μSv).

Os efeitos biológicos da radiação dependem da absorção de energia sendo aproximadamente proporcionais à concentração média de energia que é absorvida no tecido irradiado. Portanto a DOSE DE RADIAÇÃO nos dirá sobre seu efeito biológico num órgão ou tecido podendo ser medida de várias maneiras: (i) DOSE ABSORVIDA é a concentração de energia depositada no tecido em decorrência da exposição à radiação., cuja unidade no sistema internacional (SI) é o gray (1Gy = 1J/kg). DOSE EQUIVALENTE é uma quantidade que leva em consideração as propriedades prejudiciais dos diferentes tipos de radiação. Por exemplo: Numa imagem radiográfica do ombro a dose absorvida é a quantidade de energia depositada num pequeno volume de tecido enquanto que a dose equivalente define o impacto do tipo de radiação (raios-X) naquele tecido. É calculada multiplicando a dose absorvida média no órgão ou tecido pelo fator de ponderação da radiação. A unidade SI é o sievert (1Sv = 1J/kg). DOSE EFETIVA é a soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecido. A unidade SI é o sievert (1Sv = 1J/kg). QUER SABER MAIS? Em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073470.pdf

ENVENENAMENTO RADIOATIVO: “AS MENINAS DO RÁDIO”



Fonte da imagem com edição JQI: <https://www.buzzfeed.com/>

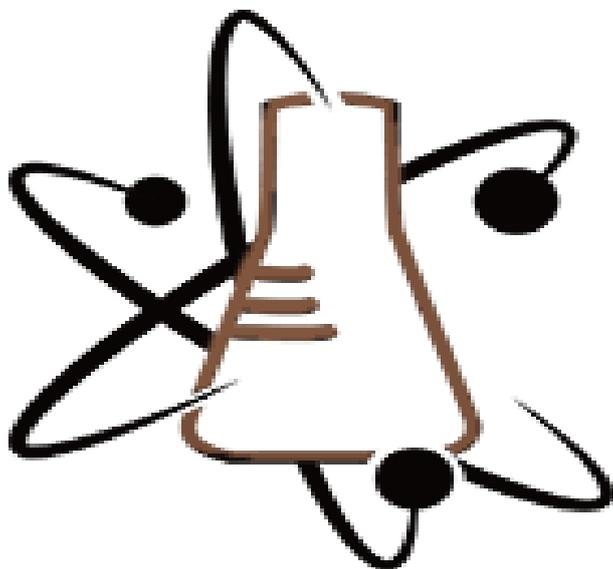
Nesta seção da sua edição temática “RADIAÇÃO IONIZANTE EFEITOS, BIOLÓGICOS E RADIOPROTEÇÃO” o JQI apresenta uma breve discussão histórica sobre a descoberta de novos elementos radioativos no final do século XIX tendo como referência o artigo de Fernando P. Carvalho¹ “Marie Curie and the Discovery of Radium” seguida do relato de caso envolvendo um grupo de mulheres jovens cuja atividade laboral de pintoras de mostradores de relógio, no início do século XX, resultou na exposição e envenenamento radioativo por contaminação interna do elemento químico rádio, tendo como referência o artigo “Radium Girls” de Richard B. Gunderman e Angela S. Gonda². Trata-se de um caso emblemático sobre os efeitos deletérios do uso ocupacional da radiação ionizante no início do século XX no âmbito social, laboral, político, jurídico e midiático, sendo precursor da discussão sobre proteção radiológica.

A descoberta e o estudo químico dos elementos polônio (${}_{84}\text{Po}$) e rádio (${}_{88}\text{Ra}$) pelo casal de cientistas Marie e Pierre Curie com colaboração de Bémont M. G., no final do Século XIX, é o marco do nascimento da RADIOQUÍMICA: área da Ciência Química dedicada aos materiais radioativos. Este campo de estudo inclui as atividades de: (i) Pesquisa e produção de radionuclídeos e seus compostos pelo processamento de materiais radioativos artificiais ou de ocorrência natural. (ii) Aplicação de técnicas químicas nos estudos nucleares. (iii) Aplicação da radioatividade na investigação de problemas químicos, bioquímicos ou biomédicos (IUPAC94 com tradução do JQI).

¹ https://static.springer.com/sgw/documents/1426305/application/pdf/Carvalho_Marie+Curie+and+the+Discovery+of+Radium.pdf

² <https://pubs.rsna.org/doi/10.1148/radiol.14141352>

Trata-se, portanto, de uma área que exige dos estudiosos e dos profissionais deste campo de atuação um conhecimento aprofundado dos aspectos teóricos e aplicados da radioquímica, além dos fundamentos das ciências básicas e da matemática.



Fonte com edição do JQI <https://pls.llnl.gov/>

No seu artigo "Marie Curie and the Discovery of Radium" Carvalho (2011) narra de forma bem interessante e detalhada a história da descoberta dos elementos radioativos polônio e rádio, no final do Séc. XIX. O Autor deixa evidente que Marie Curie demonstrou, em todas as pesquisas que realizou, possuir uma mente curiosa e aberta às novas descobertas ao mesmo tempo em que mantinha a aplicação infalível do método científico quando formulava hipóteses, planejava experimentos, interpretava e relatava os resultados dos seus estudos. Além disso combinou com perseverança o trabalho árduo e meticuloso de laboratório ao mesmo tempo em que lutava por financiamento de ensino e pesquisa na Universidade, num contexto de época em que essas atividades não eram de fácil acesso para uma mulher. Assim, durante a análise de outra amostra de minério de urânio iniciou um processo de separação traba-

-lhoso e demorado buscando extrair um elemento radioativo misterioso. Seu marido e cientista, Pierre Curie juntou-se a Ela nesta pesquisa que também contou com a colaboração do Gustav Bémont, químico e professor da *École de Physique et Chimie de la Ville* (Paris).

Na ocasião os pesquisadores só dispunham de um galpão abandonado no pátio da Escola de Física cujo telhado de vidro não oferecia abrigo completo contra a chuva. Além disso, o calor era sufocante no verão e o frio intenso do inverno que só diminuía um pouco com o calor irradiado nas proximidades de um fogão de ferro (CARVALHO, 2011). Para ter uma ideia visual destas condições experimentais sugerimos que nossos leitores assistam ao filme "Radioactive" (2019), que está disponível na Netflix.



Fonte com edição <https://www.spaceandmotion.com/>

Marie Curie tratou o minério de urânio seguindo a metodologia química de Fresenius, separando várias frações e medindo a atividade radioativa de cada uma delas. Na fração do bismuto a atividade medida foi muito intensa e, conforme foi comunicado à *Académie des Sciences*, os cientistas acreditavam tratar-se de uma substância extraída da pechblenda que continha, na sua composição, um metal desconhecido com propriedades analíticas próximas às do bismuto (CARVALHO, 2011).

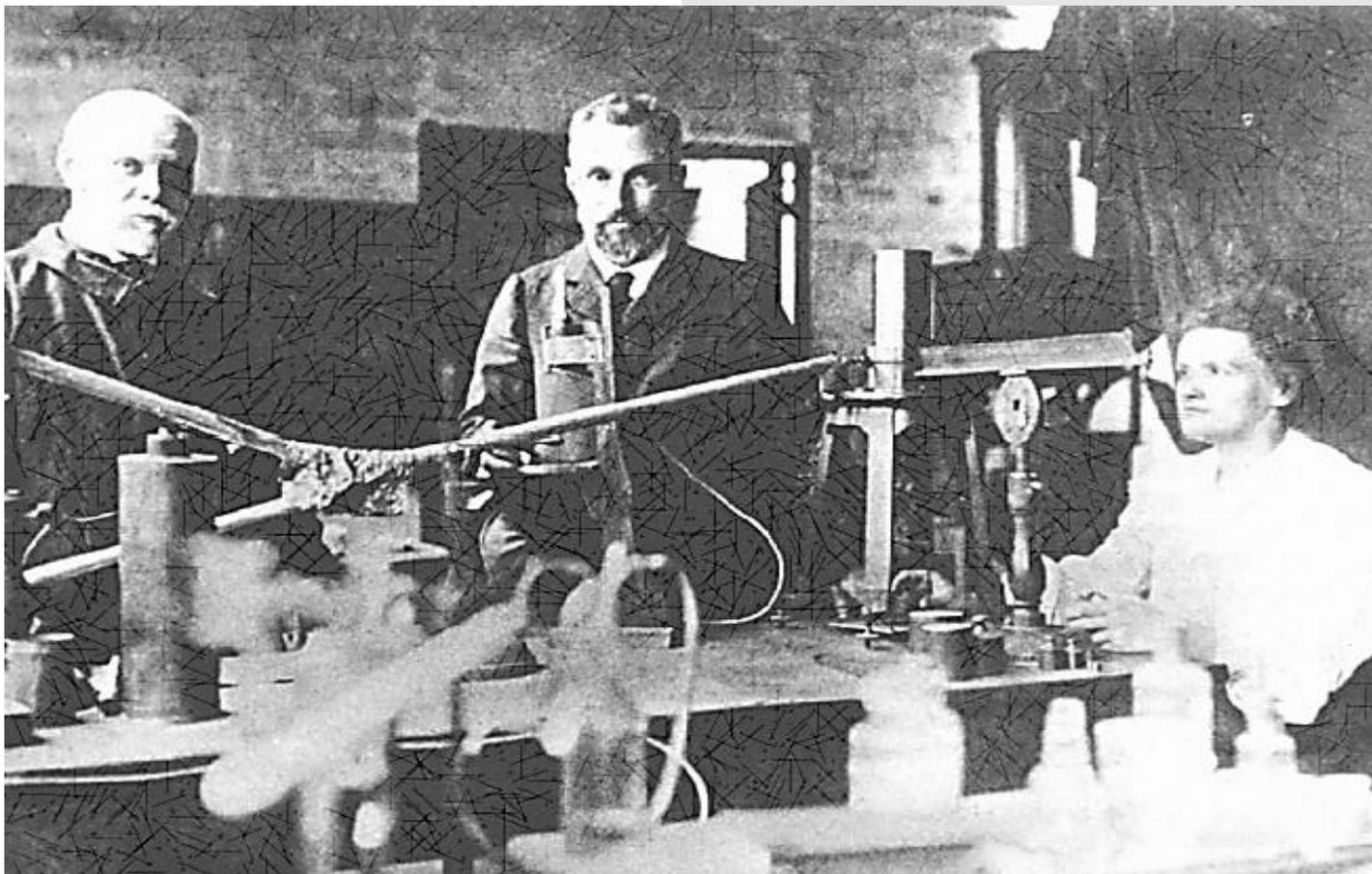


Fig. 2 Marie Curie, Pierre Curie (no centro) e seu técnico de laboratório (à esquerda) no laboratório da *Lhomond, Faculté de Sciences*, Paris. Na bancada, o eletrômetro de Curie usado para medir a ionização do ar por radioatividade (CARVALHO, 2011, com edição e tradução do JQI).

Na ocasião declararam que sendo confirmada a existência deste metal, propunham batizá-lo de Polônio, em referência ao País de origem de Marie Curie. Assim, em 13 de julho 1893, o símbolo Po foi manuscrito pela primeira vez, no caderno de laboratório, por Pierre Curie. O anúncio da descoberta do novo elemento, mais radioativo que o urânio, foi publicado no *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* com a palavra “radioativa” sendo citada pela primeira vez (CARVALHO, 2011 apud CURIE & CURIE, 1898).

A pesquisa dos Curie sobre a radioatividade do minério de urânio teve continuidade e, durante o processo de separação físico-química do minério, observaram que outra fração, contendo bário, apresentava atividade elevada. Diante destas evidências experimentais formularam a hipótese da presença de

outra substância nesta fração do minério com comportamento químico próximo ao do bário. Planejaram e realizaram o procedimento experimental buscando validar esta hipótese. Assim, o processo de separação levou a obtenção de um sal cloreto, 900 vezes mais radioativo que o urânio metálico (CARVALHO, 2011).

A análise por espectroscopia de emissão atômica revelou que as linhas espectrais observadas não combinavam com as de nenhum elemento conhecido até então. A intensidade das linhas de emissão aumentava, juntamente com a radioatividade, em função da purificação do cloreto ao mesmo tempo em que as linhas espectrais de bário diminuía de intensidade. Com base nestes resultados concluíram haver forte evidência de que a substância obtida continha um novo elemento cuja atividade radioativa parecia ser enorme e para o qual propu -

-seram o nome “rádio”. Assim, em 18 de novembro de 1898 a palavra “rádio”, seguida por uma pergunta marcada, foi anotada pela primeira vez no caderno de laboratório dos Curie (CARVALHO, 2011).

A aceitação desta descoberta pela comunidade científica dependia ainda da separação, purificação e caracterização química deste suposto elemento com a confirmação, por espectroscopia de emissão, de que seu espectro era diferente daqueles dos elementos já conhecidos. Marie Curie iniciou então um longo procedimento para isolar o rádio a partir dos rejeitos de processamento de urânio da mina *Joachimstal*, fornecidos pela Áustria. Assim conseguiu obter um precipitado de alguns miligramas de cloreto de rádio (RaCl_2), a partir de uma tonelada de minério (CARVALHO, 2011).

Ainda segundo este Autor, Marie Curie, em 21 de julho de 1902, usando uma amostra com 0,129g de cloreto de bário-rádio – que poderia conter apenas cerca de 1 parte de rádio em 1000 partes de bário – determinou pela primeira vez a massa atômica deste novo elemento em 223,3. Mais tarde, Ela iria corrigir esse valor para 225 ± 1 e para 226,4 (valor real: 226,0254). Assim, pela primeira vez, foi obtida uma amostra de cloreto de rádio em quantidade visível e com atividade radioativa um milhão de vezes superior a do urânio.

Em novembro de 1903. Marie Curie defendeu sua Tese de Doutorado na Universidade de Sorbonne (Paris) com o tema *“Recherches sur les Substances Radioactives”* – Pesquisa de substâncias radioativas, tradução do JQI. No mesmo ano a Academia Real de Ciências da Suécia premiou a Cientista, juntamente com Pierre Curie e Henri Becquerel com o Nobel de Física pela descoberta da radioatividade. Esta mesma Academia, em

1911, concedeu a Marie Curie o Prêmio Nobel de Química, pela descoberta e caracterização dos novos elementos químicos: rádio e polônio (CARVALHO, 2011).



Antoine Henri
Becquerel
Prize share: 1/2

Pierre Curie
Prize share: 1/4

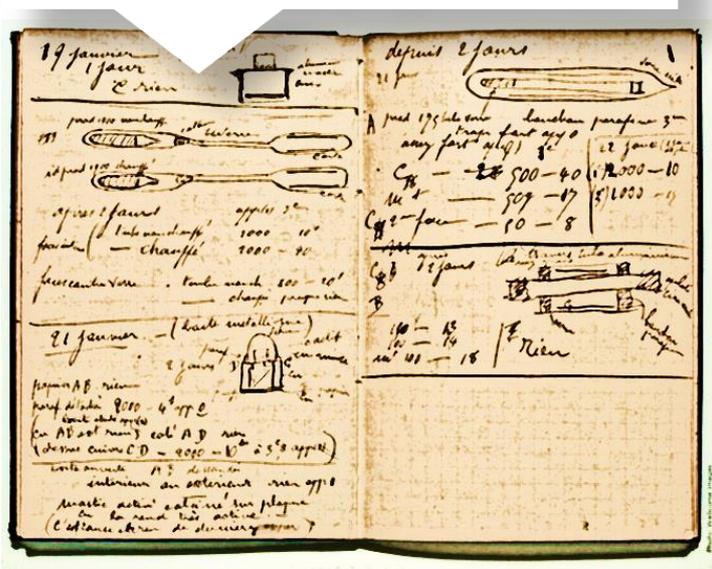
Marie Curie,
nascida Sklodowska
Prize share: 1/4

Em 1911, após a adoção do “curie” (símbolo Ci) como unidade padrão de radioatividade, Marie Curie, atendendo ao Comitê Internacional de Padrões de Rádio, preparou um padrão primário com 21,99 mg de cloreto de rádio puro num tubo de vidro selado. Os padrões secundários de rádio, certificados para outros países, foram preparados com relação a este padrão primário, agora depositado no *Bureau International de Poids et Mesures* em Sevres, perto de Paris (CURIE, 1912 apud (CARVALHO, 2011).



Padrões de rádio armazenados em um contentor de cobre com janela de vidro. Permanecem a maior parte do tempo fechados num recipiente de aço e enterrados sob uma pilha de tijolos de chumbo. Crédito: J. Stoughton / NIST.

Marie Curie morreu de leucemia em 4 de julho de 1934, resultado de anos de exposição à radiação do urânio e dos seus produtos de decaimento ao longo das suas atividades de pesquisa. Seu caderno de laboratório com os registros experimentais, realizados no período de 1899 a 1902, ainda é radioativo e será por 1500 anos (@NobelPrize).



<https://twitter.com/nobelprize/status/1146744976761655297?lang=pt>

E... SOBRE O ELEMENTO RÁDIO: O rádio (${}_{88}\text{Ra}$) é um elemento químico do Grupo 2 da Tabela Periódica com número atômico igual a 88. Trata-se, portanto, de um metal alcalino terroso que, em solução aquosa, encontra-se apenas na forma iônica com estado de oxidação (+2). Esse íon divalente, devido ao seu caráter altamente básico, é dificilmente complexado. A maior parte dos compostos de rádio são sais brancos quando preparados mas que tornam-se amarelados e finalmente acinzentados, com o passar do tempo, devido à autodecomposição do rádio com emissão de partículas alfa (α) (MOLINARI; SNODGRASS, 1990 apud COSTA, 2016).

São conhecidos mais de trinta isótopos deste elemento químico, todos

radioativos (radioisótopos). A faixa dos valores do número de massa (ou de nucleons) destes radioisótopos varia de 201 a 235, como pode ser conferido no print da Tabela de Nuclídeos apresentado a seguir, com os valores do número de massa dos respectivos radioisótopos destacados em azul:

Home

Table of Nuclides

Ra Find

88-Ra

Available Isotopes

Ra-201 (1#ms)	Ra-202 (31ms)	Ra-203 (36ms)
Ra-204 (60ms)	Ra-205 (220ms)	Ra-206 (240ms)
Ra-207 (1.38s)	Ra-208 (1.110s)	Ra-209 (4.71s)
Ra-210 (4.0s)	Ra-211 (13.2s)	Ra-212 (13.0s)
Ra-213 (2.73m)	Ra-214 (2.46s)	Ra-215 (1.67ms)
Ra-216 (182ns)	Ra-217 (1.63us)	Ra-218 (25.2us)
Ra-219 (10ms)	Ra-220 (17.9ms)	Ra-221 (28s)
Ra-222 (33.6s)	Ra-223 (11.43d)	Ra-224 (3.66d)
Ra-225 (14.9d)	Ra-226 (1.600ky)	Ra-227 (42.2m)
Ra-228 (5.75y)	Ra-229 (4.0m)	Ra-230 (93m)
Ra-231 (104.0s)	Ra-232 (4.0m)	Ra-233 (30s)
Ra-234 (30s)	Ra-235 (3#s)	

Fonte: <http://atom.kaeri.re.kr/nuchart/?zlv=2>

NÚMERO DE MASSA (A) =
Número de prótons (P) e nêutrons (N)
no núcleo atômico.



NÚMERO ATÔMICO (Z)=
Número de prótons no núcleo atômico.

SÍMBOLO (X):
Abreviação usada para representar o átomo.

Fonte: elaboração JQI

Verifica-se ainda que os tempos de meia-vida ($T_{1/2}$) destes radioisótopos situam-se na faixa de valores entre 182 ns (^{216}Ra) a 1.600 anos (^{226}Ra). Dentre os isótopos do rádio apenas quatro são naturais, ou seja, existem na natureza integrando as series radioativas do: Urânio-235, Urânio-238 e Tório-232. Estes isótopos naturais do elemento rádio e suas características radioativas estão destacados a seguir:

^{223}Ra da série do U-235
Um emissor alfa (α)

^{224}Ra da série do Th-232
Um emissor alfa (α)

^{226}Ra da série do U-238
Um emissor alfa (α)

^{228}Ra da série do Th-232
Um emissor beta (β)

Tratando-se de um elemento com atividade radiológica elevada e várias vezes superior à do Urânio, como já foi destacado anteriormente, é necessário que seu manuseio seja feito seguindo as recomendações gerais de proteção radiológica, que inclui o uso de: roupas de proteção apropriada; pinças para manusear o material evitando-se, assim, o contato direto com o mesmo; máscaras e protetores faciais, entre outras, no sentido de minimizar o contato com o material radioativo. Ressalta-se a importância da higiene rigorosa ao manusear materiais radioativos para prevenir a contaminação interna.

O rádio-226, por causa de sua longevidade relativa ($T_{1/2}=1600$ anos), é o isótopo natural mais comum deste elemento, constituindo cerca de uma parte por trilhão da crosta terrestre. Todo o rádio natural é essencialmente ^{226}Ra . As fontes terrestres são: (i) O mineral uraninita (óxido de urânio) e vários outros minerais de urânio em pequenas quantidades. (ii) Os minerais de tório em quantidades ainda menores. Três destes minerais de urânio e suas composições químicas estão destacados a seguir:

$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \times 8-12 \text{H}_2\text{O}$
autunita



UO_2
uraninita ou
pechblenda

$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \times 12 \text{H}_2\text{O}$
torbenita

Minerais de Urânio fontes de rádio
<https://en.wikipedia.org/>

1 tonelada de
pechblenda
(UO_2) produz
cerca de um
sétimo de um
grama de
rádio

Um litro de
água do mar
contém cerca
de 89
femtogramas
(10^{-15}g) de
rádio.

Um quilograma da
crosta terrestre
contém cerca de
900 picogramas
(10^{-12}g) de rádio

O Departamento de Saúde Pública de Massachusetts, respondendo às perguntas frequentes da população sobre os efeitos da exposição à radiação de rádio na saúde das pessoas faz as seguintes considerações:

- Todas as pessoas estão expostas a baixos níveis de radiação pois o elemento rádio ocorre naturalmente no meio ambiente estando presente: no solo, na água, nas rochas, carvão e plantas e até mesmo em alimentos.
- Altos níveis de concentração deste elemento ocorrem, frequentemente, nos resíduos das instalações antigas de processamento e fabricação de rádio, ou nas instalações de fábricas antigas que usavam este material e que não foram limpas de forma adequada.
- O gás radônio (Rn) é um subproduto do decaimento radioativo do rádio que pode estar presente em edifícios, principalmente nos porões. A maioria das exposições ao radônio em edifícios é proveniente do radônio vindo do solo.
- O potencial para efeitos na saúde depende da quantidade total de radiação à qual a pessoa é exposta. Em geral, quanto maior a quantidade de exposição à radiação do rádio, maior a probabilidade de desenvolver um efeito adverso à sua saúde.
- A exposição ao rádio por um período de muitos anos pode resultar em um aumento do risco para alguns tipos de câncer, principalmente de pulmão e ósseo. Foi demonstrado que doses mais elevadas de radiação do rádio causam efeitos: no sangue (anemia), nos olhos (catarata), nos dentes (dentes quebrados) e ossos (redução do crescimento ósseo). Fonte com tradução JQI: <https://www.mass.gov/>.

Um caso pioneiro de dermatite pela exposição à radiação foi relatado em 1900, dois anos após a descoberta do rádio, pelo físico francês Antoine Becquerel que carregou uma pequena ampola contendo este elemento no bolso de sua jaqueta resultando na ulceração da sua pele como descrito no relato seguinte (com tradução do JQI):

"O Sr. Becquerel, trazendo um pequeno tubo selado com alguns decigramas de cloreto de bário radífero, com alto nível de atividade [800.000 vezes a atividade do urânio], passou pelo mesmo experimento. O produto radífero foi encerrado num tubo de vidro selado cujo volume cilíndrico tinha cerca de 10^{-15} mm de comprimento e 3 mm de diâmetro. O tubo, envolto numa folha de papel, estava dentro de uma pequena caixa de papelão. Nos dias 3 e 4 de abril, essa caixinha foi colocada várias vezes no bolso de sua jaqueta sendo o tempo total de exposição avaliado em 6 horas. No dia 13 de abril, ele descobriu que a radiação através do tubo, da caixa e das roupas produzia uma mancha vermelha na pele que ficava mais escura nos dias seguintes marcando, em vermelho, o tamanho oblongo do tubo, com formato oval de 6×4 cm². Em 24 de abril, a pele despreendeu-se e a parte central ulcerou com secreção. A ferida foi tratada por 1 mês com curativo com óleo e calçar. Os tecidos necrosados desprenderam-se e, no dia 22 de maio, ou seja, 49 dias após a irradiação, a ferida foi reparada, deixando uma cicatriz marcando a posição do tubo. (MOULD, 2017, p.78)

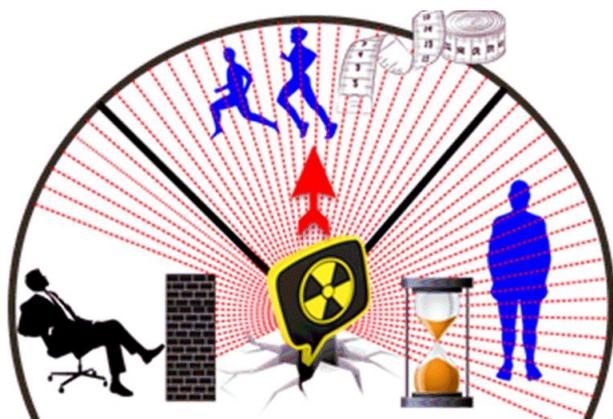
Pierre e Marie Curie também fizeram experimentos desta natureza com o intuito de aprender mais sobre essa substância. Neste sentido Pierre Curie fixou um tubo cheio de rádio em seu braço durante dez horas, o que resultou no aparecimento de uma lesão de pele, sugerindo, então, o uso de rádio para atacar o tecido canceroso assim como havia atacado o tecido saudável.

A imagem seguinte mostra a lesão feita propositalmente por Pierre Curie em seu braço com um sal de rádio publicada em um jornal francês:



Fonte com edição do JQI <https://www.blogs.unicamp.br/>

A presença de rádio não significa que efeitos adversos à saúde estejam ocorrendo ou possam ocorrer. Baixos níveis de exposição à radiação do rádio são normais e não há evidências de que esses níveis de exposição sejam prejudiciais. O potencial para efeitos na saúde vai depender de vários fatores, incluindo: a **quantidade de rádio**; a **quantidade do tempo de exposição** ao material radioativo; a **proximidade da fonte radioativa** além da existência de **alguma proteção à exposição radioativa (ou blindagem)**. Por exemplo, concreto ou chumbo bloqueiam a radiação.



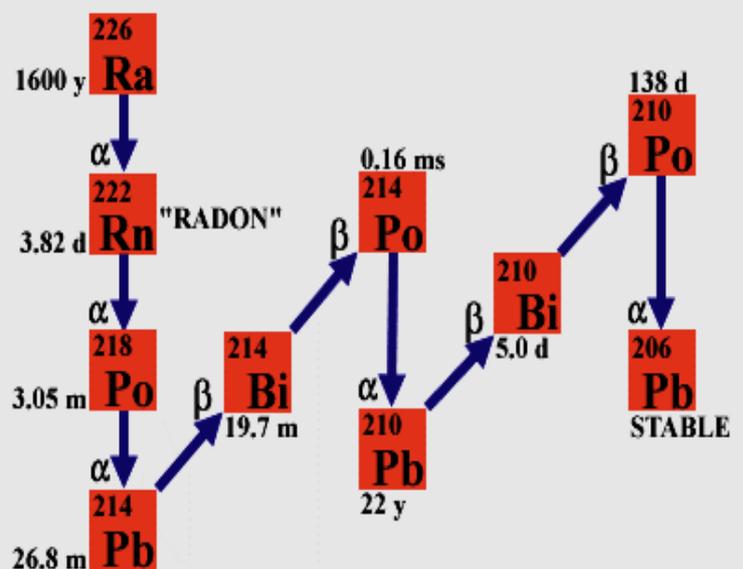
<https://www.researchgate.net/>

Após estas considerações sobre a atividade do rádio no contexto histórico, científico e da proteção radiológica o JQI apresenta para seus leitores o caso de exposição laboral à radiação do rádio, que ficou conhecido como:

"As meninas do rádio" ↓

Gunderman; Gonda (2015), durante o centenário da Sociedade Radiológica da América do Norte (tradução do inglês *Radiological Society of North America*) publicaram, no periódico *Radiology*, um artigo sobre o caso das "Meninas do Rádio" (tradução do inglês *"Radium Girls"*). Na opinião destes Autores trata-se de um dos capítulos mais notórios, porém pouco conhecido, da história da radiologia Americana que resultou na morte trágica de um grupo de jovens mulheres em decorrência da atividade laboral como pintoras de ponteiros de relógios no início do século. XX.

Já foi destacado nesta seção os isótopos do rádio, todos radioativos, dos quais o Ra-226, com tempo de meia-vida de 1600 anos, é o mais estável. A seguir pode-se observar a cadeia (sequência) de decaimento radioativo deste isótopo até formar chumbo-206 estável:



Fonte com edição do JQI <https://www.nist.gov/image-23773>

Nesta cadeia de decaimento o rádio-226 (meia-vida de 1600 anos) decai por emissão alfa produzindo o gás radônio-222 (meia-vida de 3,82 dias) iniciando uma série de decaimentos sucessivos, com emissão de partículas alfa ou beta. O tempo de meia-vida da maioria dos radionuclídeos nesta série de decaimento são curtos, variando na faixa de milissegundos (10^{-3} segundos) a dias, exceto o chumbo-210 (meia-vida de 22 anos). Além disso, na grande maioria destas transformações, as emissões alfa e beta são acompanhadas pela emissão de fótons gama. Como já discutido antes essas radiações (α ; β ; γ) são ionizantes.

Quando uma partícula ou fóton de radiação ionizante interage com os átomos de um dado material pode resultar no fenômeno de emissão de luz denominado RADIOLUMINESCÊNCIA. O fenômeno é devido ao processo de excitação e desexcitação de elétrons atômicos. Durante a colisão da radiação – partícula ou fóton – com um átomo ou molécula de um dado material pode haver transferência de energia para um elétron orbital no estado fundamental possibilitando a sua transição para nível mais energético (estado excitado). Esse elétron, ao retornar para o seu estado fundamental libera o excesso de energia na forma de um fóton de luz.

A primeira aplicação industrial do fenômeno de radioluminescência foi na fabricação de tintas luminosas contendo um radioisótopo natural do rádio. Por ser emissor de luz azul suave adicionou-se sulfeto de zinco e outras substâncias aumentando o grau de luminescência do material. A partir de 1908, uma tinta luminescente com uma mistura de rádio e sulfeto de zinco dopado com cobre foi usada para pintar os mostradores de instrumentos e relógios possibilitando -

-lhes brilho esverdeado (GUNDERMAN; GONDA, 2015). A imagem reproduzida a seguir mostra a radioluminescência de um desses mostradores de relógio de rádio, fabricado em 1950, exposto à luz ultravioleta:



. <https://en.wikipedia.org>

Ainda de acordo com estes Autores essas tintas que brilhavam no escuro eram parte da mania pelo uso do rádio que varreu os Estados Unidos e a Europa nas décadas de 1910 e 1920. Neste contexto o rádio foi adicionado a uma ampla variedade de produtos, incluindo: pastas de dente, cremes faciais, comida, água potável e produtos como o "Radithor" e "Revigator".

VOCÊ SABIA?



Foto de Autor desconhecido licenciado em [CC BY-SA-NC](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

O "Radithor" foi fabricado de 1918 a 1928 pela *Bailey Radium Laboratories, Inc.* em New Jersey. O proprietário e chefe dos laboratórios da empresa era William J. A. Bailey. O produto, bastante caro, foi anunciado como "Uma Cura para os Mortos-Vivos" ou "Sol Perpétuo". Dizia-se ainda que curava a impotência, entre outros males.

No ano de 1918, “Radithor” passou a ser fabricado pelo *Bailey Radium Laboratories* numa época em que acreditava-se nos benefícios e poder revigorante da radioatividade para o organismo humano. O produto líquido era fabricado a base de dois isótopos do rádio: Ra-226 e Ra-228. Ebenezer McBurney Byers foi um rico e famoso industrial americano que veio a falecer, em 1932, em consequência exposição radiativa pela ingestão do “Radithor”. Byers admitiu que havia consumido, diariamente, uma garrafa deste produto acumulando, grandes quantidades de rádio nos ossos que acarretaram consequências graves à sua saúde inclusive a perda da sua mandíbula ainda em vida. Byers foi enterrado num caixão blindado com chumbo e quando seu corpo foi exumado para estudo, em 1965, seus restos mortais ainda eram altamente radioativos. O valor de atividade radioativa medido na ocasião foi de 225.000 becquerels.

Becquerel (símbolo Bq) é a unidade de medida do Sistema Internacional (SI) para a atividade de um radionuclídeo. O nome becquerel foi adotado pela 15ª Conferência Geral de Pesos e Medidas em 1975, sendo:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

(desintegração por segundo)



Eben Byers com sua mandíbula construída cirurgicamente em 1932 (Fonte: Imgur)

Mas, o rádio também foi usado por médicos habilitados. Um deles foi o ginecologista americano Howard Kelly, um dos fundadores do *Johns Hospital Hopkins*, que aplicou este elemento no tratamento de doenças malignas, como o câncer cervical e uterino. Em 1915, Kelly experimentou a aplicação de rádio no colo do útero e até a implantação sementes de radônio em tumores maiores de pacientes (GUNDERMAN; GONDA, 2015).

Os Autores destacam também a importância de rever e refletir sobre a história das “Meninas do Rádio” que, na época, capturou a imaginação popular para os perigos da exposição a níveis elevados da radioatividade além de chamar a atenção do público para um novo ponto de intersecção entre: ciência, medicina, indústria, judiciário, legislativo e órgãos do executivo contribuindo, para novos modelos de procedimentos judiciais, legislação e publicidade (GUNDERMAN; GONDA, 2015).



<https://www.horobox.com/en/review-detail/american-radium-glowing-girls> com edição do JQI



Laboratório de Cristalização de rádio, em Orange - NJ.
<https://pt.wikipedia.org/>

Uma das marcas mais populares de tinta radioluminescente foi a “Undark”. Uma das empresas americanas mais fortemente envolvida na produção e na aplicação dessa marca de tinta foi o *United States Radium Corporation*, que tinha um fábrica em Orange, New Jersey. Esta empresa estava envolvida tanto na extração e purificação do rádio como na produção da tinta e sua aplicação em produtos (GUNDERMAN; GONDA, 2015).

Segundo estes Autores muitas mulheres jovens foram empregadas por esta Companhia como pintoras dos mostradores de relógios que, na época, eram particularmente populares nas Forças Armadas Americanas. Outras empresas, em todo o País, também desenvolviam atividades semelhantes como a *Radium Dial Company*, localizada em Ottawa, Illinois. As mulheres que trabalharam nessas plantas ingeriram rádio pois foram instruídas, por seus supervisores, para lambar as pontas dos

Charlotte Purcell demonstrando como apontar o pincel com os lábios <https://lettersfromeff.com/>

pincéis, feitos com pelos de camelo, no sentido de manter um ponto fino. Neste contexto essas mulheres não tinham ideia da ameaça que o rádio representava para a saúde delas. Na época, a mídia e a publicidade generalizada tenderam a criar uma impressão oposta, ou seja, de que o rádio oferecia inúmeros benefícios para a saúde das pessoas. Algumas até usaram a tinta radioativa pintando seus lábios, unhas e dentes.



Pintoras de indicadores de radio trabalhando em uma fábrica.. Fonte: <https://pt.wikipedia.org/>

Essas mulheres realizavam um trabalho manual meticuloso pintando os mostradores minúsculos de relógios (alguns tinham apenas 3,5 centímetros de largura) seguindo obedientemente a técnica, conforme haviam sido instruídas “deslizando os pincéis entre os lábios para apontar um ponto fino”. Mas, nesta atividade, cada vez que afinavam os pincéis com a boca também ingeriam quantidades pequenas da tinta verde brilhante à base de rádio (GUNDERMAN; GONDA, 2015).

A atividade era bem remunerada. Numa dessas empresas as pintoras chegaram a receber vários centavos por mostrador pintado. Estimando-se que pintavam cerca de 250 mostradores por dia, calcula-se uma renda semanal na faixa de 20 a 25 dólares. No entanto, na realização desta atividade delicada e lucrativa podem ter ingerido, no período de seis meses, até 4000 μ g de rádio.

Ao longo de várias décadas, cerca de 4000 mulheres, foram empregadas nos Estados Unidos como pintoras dos mostradores dos ponteiros de relógio e diversos outros produtos comerciais – olhos de bonecos, interruptores de luz, números de residências (GUNDERMAN; GONDA, 2015).

Em 10 de abril de 1917, Grace Fryer, com 18 anos, começou a trabalhar como pintora de mostradores na *United States Radium Corporation* (USRC) em Orange, New Jersey. Em 1920, quando se desligou da empresa para trabalhar como caixa de um banco, apresentou problemas de saúde com perda dos dentes e infecções dolorosas na sua mandíbula. Consultou-se com um dentista e as radiografias indicaram o estado de decomposição da sua mandíbula. Em seguida, consultou vários médicos mas nenhum deles deu um diagnóstico preciso sobre a causa de seus problemas. Logo outras mulheres

Apareceram, nos consultórios em New Jersey, apresentando problemas de saúde semelhantes. Em pouco tempo, ficou aparente que havia uma relação comum entre estes casos pois todas elas tinham sido empregadas pela USRC (GUNDERMAN; GONDA, 2015).

Os Autores relatam que Fryer, em 1925, iniciou a busca por um advogado para ajuizamento de uma ação judicial. Nesse contexto foi procurada por um “especialista” em rádio da *Columbia University* que, após realizar um exame minucioso do seu caso concluiu que estava tudo bem e que seus problemas de saúde não podiam ser atribuídos ao rádio dos EUA. Na verdade tratava-se de um toxologista que, além de ter sido contratado pela U.S. Radium, não tinha licença para a prática médica. As conclusões de Frederick Flinn não persuadiram a Jovem que persistiu na tentativa de convencer a todos sobre a veracidade das suas afirmações.

No início da década de 1920, Cecil Drinker, que mais tarde se tornaria reitor do *Harvard School of Public Health*, foi solicitado pela U.S. Radium para investigar as condições de trabalho na empresa. No seu relatório final, submetido a empresa em 1924, apresentou as seguintes conclusões: (i) A força de trabalho estava sendo contaminada pelo rádio. (ii) Um grupo de trabalhadores mais antigos haviam desenvolvido doenças do sangue. (iii) Pelo menos um químico desenvolveu áreas de necrose nas mãos e em outros locais do corpo. Um trecho deste relatório, transcrito a seguir, descreve a amplitude da contaminação:

Amostras de poeira coletadas na sala de trabalho e em vários locais e cadeiras não utilizadas pelos trabalhadores estavam luminosos no quarto escuro. Seus cabelos, rostos, mãos, braços,

pescoços, além das vestimentas (vestidos, roupas íntimas e até espartilhos) eram luminosos. Uma das garotas apresentou manchas luminosas nas pernas e coxas. A parte de trás do corpo de outra era luminosa quase até a cintura” (CASTLE; DRINKER; DRINKER, 1925 apud GUNDERMAN; GONDA, 2015)

No entanto, quando o relatório de Drinker chegou ao Governo de Nova Jersey, havia sido alterado indicando que os funcionários da USRC gozavam de boa saúde. Quando Alice Hamilton, professora do *Harvard School of Public Health*, tomou conhecimento deste fato escreveu à Katherine Drinker, esposa de Cecil Drinker, alertando-a sobre a existência de uma versão alterada do relatório deles. O casal ficou indignado e Cecil Drinker decidiu publicar seu relatório numa revista científica, mesmo diante das objeções da *U.S. Radium*. A Empresa parece ter tido participação na campanha desinformativa na tentativa de manchar a reputação das pintoras ao sugerir que seus problemas de saúde eram atribuíveis à sífilis (GUNDERMAN; GONDA, 2015).

Em 1927 o advogado Raymond Berry assumiu o caso de Grace Fryer. Na ocasião outras ex-funcionárias juntaram-se à causa: Edna Hussman, Quinta McDonald, Katherine Schaub, Albina Larice. Popularmente apelidadas por “Meninas do Rádio”, elas buscaram compensação no valor de \$250.000 por cada ferimento. A primeira audiência ocorreu em janeiro de 1928. Na ocasião duas das reclamantes acamadas não conseguiram levantar os braços para fazer o juramento antes prestar seu testemunho. Enquanto o processo avançou, a U.S. Radium solicitou a sua interrupção alegando que vários dos seus funcionários estavam de férias na

Europa. O juiz concordou e, assim, “As Meninas do Rádio” teriam que esperar até setembro, antes que pudessem ser ouvidas. Sem saber se sobreviveriam tanto tempo, este adiamento deixou-as desoladas. Novamente Alice Hamilton intercedeu encaminhando o caso delas para apreciação de Walter Lippmann, colunista de jornal, que protestou contra a decisão judicial na imprensa de Nova York escrevendo:

Esta é uma maldita
caricatura de justiça. Não há
desculpa possível para um atraso
tão grande. As mulheres estão
morrendo. Se alguma vez um caso
exigiu julgamento imediato, é o caso
de cinco mulheres aleijadas que
estão lutando por um dólares
miseráveis para facilitar seus
últimos dias na terra”
(GUNDERMAN; GONDA, 2015).

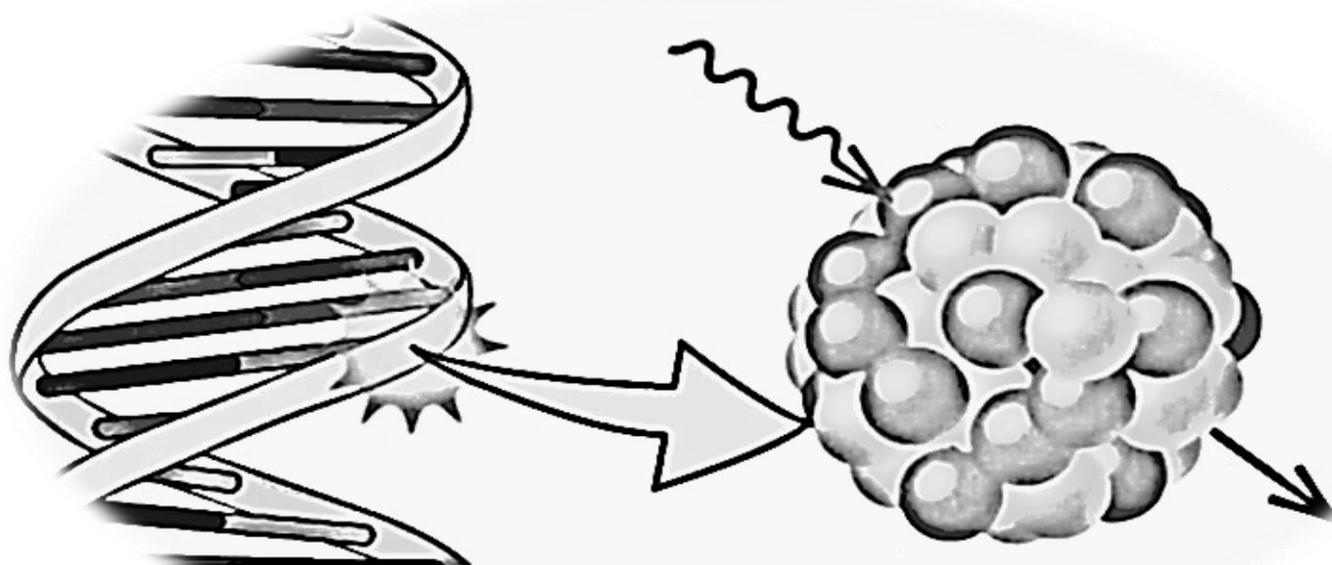
Muito tem sido narrado sobre os detalhes da luta exaustiva dessas mulheres buscando reparação judicial. Mas, a imprensa, o advogado de defesa e os clamores do público contribuíram para que o Juiz decidisse marcar a audiência para o mês de junho. Houve especulação generalizada sobre o que cada uma delas iriam fazer com o valor da indenização de \$250.000. Mas, como resultado de acordo comum entre as partes a U.S. Radium concedeu para cada reclamante uma indenização de \$10.000, uma anuidade vitalícia de \$600 além de assumir o custo de todas as despesas médicas. No período de uma década, todas as “Meninas do Rádio” morreram em decorrência dos problemas de saúde relacionados com a exposição à radiação do rádio cujas sequelas foram: anemia, fraturas nos ossos, infecção na mandíbula e sarcomas (GUNDERMAN; GONDA, 2015).

Seria natural supor que este caso, com ampla repercussão, poria fim ao uso de rádio em produtos comerciais tais como os mostradores de relógios radioluminescentes. Na década de 1930 houve uma redução substancial desta produção. No entanto, após a eclosão da segunda Guerra Mundial a demanda deste produtos voltou a crescer porém com a sua manufatura estando atrelada às medidas de segurança em vigor na época (GUNDERMAN; GONDA, 2015).

Mas, como destacado por estes Autores, até se estabelecer as medidas de segurança radiológica na linha de fabricação destes produtos foram muitos os malefícios decorrentes da exposição à radiação do rádio. Além do episódio das “Meninas do Rádio” sabe-se que Sabin Arnold von Sochocky, inventor da tinta à base de rádio e cofundador da empresa que se tornou a U.S. Radium, morreu aos 45 anos em sua residência em East Orange, NJ. Ele tinha perdido todos os dentes e vários dedos. Sua morte, em 1928, foi atribuída ao envenenamento por rádio.

Em meados da década de 1920, os radiologistas já eram bastantes cientes de algumas sequelas decorrentes da exposição à radioatividade com a publicação de vários artigos sobre a doença da radiação em pacientes submetidos ao tratamento do câncer. Alguns médicos já reconheciam a necessidade de proteção radiológica nos locais de trabalho, conforme citado num artigo de Radiologia publicado em 1924. Mas, a história das “Meninas do Radio” só foi referenciada pela primeira vez por um dentista – não pelos profissionais da Radiologia – que apresentou o caso formalmente na *American Medical Association* nos anos de 1924, 1925 e 1929 (GUNDERMAN; GONDA, 2015).

EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES



Fonte da imagem com edição JQI: <https://wou.edu/chemistry/courses/online-chemistry-textbooks/ch103-allied-health-chemistry/ch103-chapter-3-radioactivity/>

Nesta seção da sua edição temática “RADIAÇÃO IONIZANTE EFEITOS, BIOLÓGICOS E RADIOPROTEÇÃO” o JQI apresenta uma breve discussão sobre os efeitos biológicos da radiação ionizante, tendo como referência o artigo de Emico Okuno (2013): “Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia” e o capítulo 4 da apostila “Radioproteção e dosimetria: fundamentos” (TAUHATA ET AL, 2014) disponível como material didático no site do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD)¹. Iniciamos esta discussão apresentando para o leitor do JQI o conceito de radiação que, segundo Emico Okuno (2013) pode ser entendida como energia que se propaga através de qualquer meio, a partir de uma fonte emissora. Trata-se pois de energia em trânsito na forma de:

- **PARTÍCULAS ENERGÉTICAS**, atômica ou subatômica, produzidas em reatores ou aceleradores de partículas (partículas alfa, elétrons, pósitrons, prótons, nêutrons etc.) ou que são emitidas espontaneamente por núcleos atômicos radioativos (partículas alfa, elétrons, pósitrons, nêutrons).
- **ONDAS ELETROMAGNÉTICAS** constituídas por campos elétrico e magnético oscilantes e perpendiculares entre si e que se propagam no vácuo à velocidade da luz (3×10^8 m/s). Uma onda eletromagnética é caracterizada pelo seu comprimento de onda (λ) ou frequência da onda (ν) sendo o espectro eletromagnético constituído por uma ampla faixa de frequências características dos diferentes tipos de radiações incluindo: ondas de rádio, micro-ondas, radiação infravermelha, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama como mostrado esquematicamente no final da página seguinte.

¹ <http://www.ird.gov.br/index.php/material-didatico/send/36-apostilas/105-radioprotecao-e-dosimetria-fundamentos-final-i>

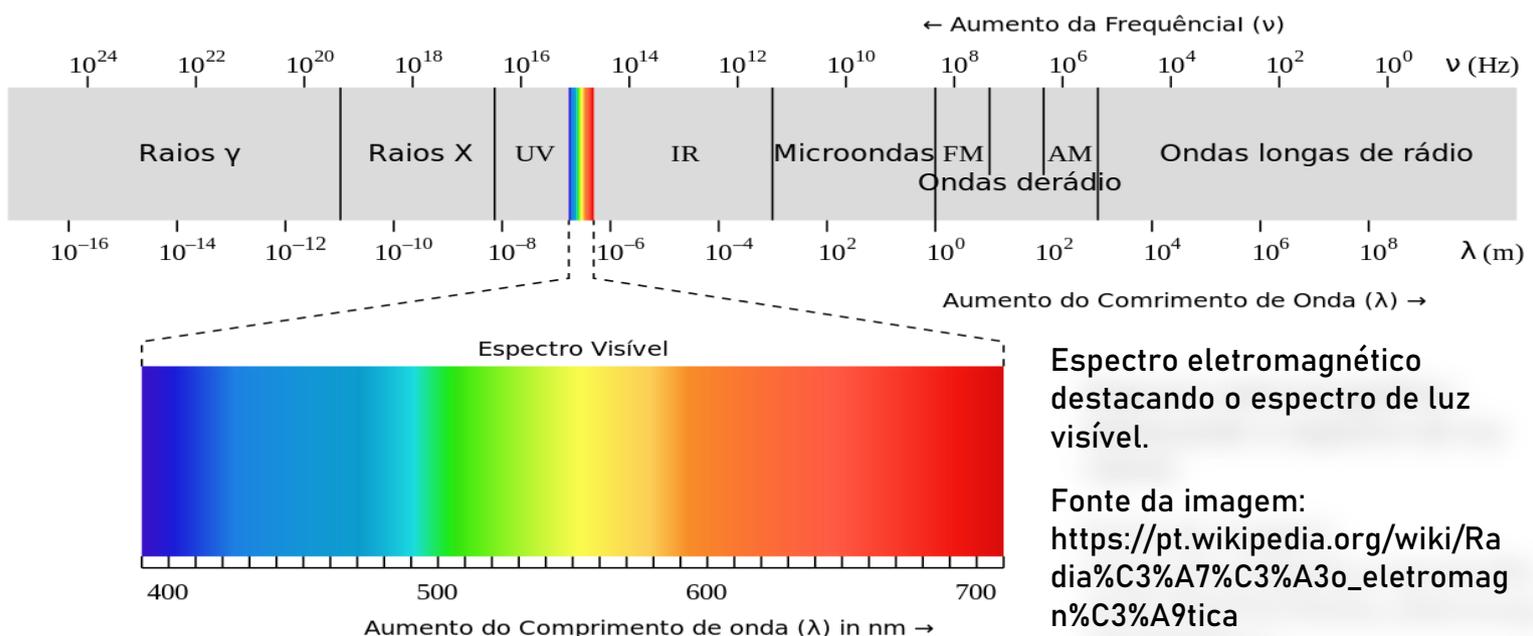
Durante vários séculos houve muita polêmica quanto à natureza da luz, se ela era uma onda ou se era constituída de partículas. A teoria mais moderna – desenvolvida por Max Planck e por Albert Einstein, a partir de 1901, e posteriormente por Louis de Broglie – considera a dualidade partícula-onda. De acordo com essa Teoria uma onda eletromagnética é emitida e propaga-se em forma de pequenos pacotes de energia chamados fótons. A energia (E) de cada fóton (partícula) é calculada a partir da Equação (1) que correlaciona o caráter de partícula com o de onda (OKUNO; YOSHIMURA, 2010; OKUNO et al. 1982 apud OKUNO, 2013):

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (1)$$

- (h) é a constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J·s $\approx 4,14 \times 10^{-15}$ eV·s);
- (c) é a velocidade da luz (3×10^8 m/s);
- (ν) é a frequência da onda eletromagnética ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$);
- (λ) é o comprimento da onda eletromagnética.

Emiko Okuno (2013) ressalta ainda que qualquer tipo de radiação interage com os corpos, inclusive o humano, depositando energia neles. No entanto, a forma de interação vai depender do tipo e da energia da radiação bem como das características do meio absorvedor. Neste contexto também já foi discutido nesta edição que as radiações podem ser ionizantes ou não-ionizantes.

A radiação ionizante transporta energia suficiente para remover elétrons dos átomos ou das moléculas. Neste processo forma-se o par de íons: negativo (o elétron ejetado) e positivo (o átomo que perdeu um elétron) sendo esse processo o evento inicial do dano biológico provocado pela radiação. Os elétrons estão ligados ao núcleo atômico por forças elétricas atrativas cujas intensidades são dependentes da localização. Quanto mais próximo do núcleo maior é a força atração do elétron, com carga negativa, ao núcleo positivamente carregado. Por exemplo, os valores das energias de ligação dos elétrons nas camadas K (mais interna) e na camada de valência de um átomo de tungstênio são iguais, respectivamente, a 69.500 eV e 7,9 eV (EMIKO OKUNO, 2013).



A radiação pode arrancar qualquer elétron de um átomo desde que tenha energia maior ou igual à sua energia de ligação no átomo. Assim, partículas eletricamente carregadas, tais como as partículas alfa e beta (elétrons e pósitrons) quando possuem energia suficiente, são consideradas radiação ionizante e vão ionizando os átomos que encontram na sua trajetória num dado meio material até perder toda sua energia (EMIKO OKUNO, 2013).

Na representação esquemática do espectro eletromagnético, na página anterior, são identificadas as diferentes categorias de radiação eletromagnética (REM) na sequência crescente dos comprimentos de onda (λ), em metros. Neste espectro apenas os raios X e raios gama ($\lambda < 10^{-8}\text{m}$) são radiações ionizantes, ou seja, têm energia suficiente para ionizar os átomos dos materiais com os quais interagem. No entanto, diferentemente das partículas carregadas, os fótons de raios X e raios gama perdem toda (ou quase toda) energia numa única interação com os átomos do material ejetando elétrons. Esses elétrons, por sua vez, irão ionizar os átomos do material até perderem toda energia – ionização secundária (EMIKO OKUNO 2013).

Mas, também é possível que os fótons de raios X e gama atravessem um dado material sem interagir com ele. Teoricamente, não há material ou forma de blindar todos os fótons sendo esse um dos motivos da necessidade de proteção radiológica que dita as regras quanto ao nível de radiação que as pessoas expostas podem receber (EMIKO OKUNO, 2013).

Já foi explicado anteriormente, que além do processo de ionização dos átomos induzido pela radiação ainda

pode ocorrer a excitação dos elétrons atômicos que são deslocados de seus orbitais de equilíbrio e ao retornarem ao estado energético original emitem a energia excedente na forma de luz ou de raios X característicos (TAUHATA, 2014).

Este Autor destaca ainda que a excitação dos elétrons atômicos pode causar mudanças estruturais nas moléculas que contêm os átomos excitados. Se a energia de excitação ultrapassar a energia de ligação entre os átomos (intramolecular) pode ocorrer quebra das ligações induzindo alterações moleculares. Calcula-se que metade da quantidade de energia da radiação incidente transferida para o tecido humano induz o processo de excitação atômica. No entanto os efeitos biológicos decorrentes desse processo são menores do que aquelas resultantes do processo de ionização dos átomos do material. Mas, quando as moléculas alteradas compõem uma célula esta pode sofrer, direta ou indiretamente, as consequências das alterações, a partir da produção de radicais livres, íons e elétrons.

Tauhata (2014) destaca ainda que efeitos biológicos da radiação ionizante são dependentes de fatores tais como: (i) O tipo de radiação; (ii) A dose e da taxa de dose; (iii) O tipo de célula e do tecido irradiado. Ressalta que, apesar de tais efeitos nem sempre serem nocivos ao organismo humano, no caso da radiação induzir alterações numa substância que tem um papel crítico no funcionamento da célula pode resultar na morte celular. Em muitos órgãos e tecidos o processo de perda e reposição celular faz parte do seu mecanismo operacional normal. Mas, quando a mudança tem caráter deletério ocorre dano celular sendo os

mais importantes aqueles relacionados à molécula de DNA, cujas aberrações cromossômicas ocorrem em função: (i) De alterações nos açúcares ou nas bases do DNA (substituições ou deleções); (ii) Da quebra de ligações simples e duplas nas moléculas de DNA ou de ligações cruzadas (DNA-DNA e DNA-proteínas).

Shuchi Bhatt², especialista em Radiodiagnóstico na *University College of Medical Sciences* (UCMS), em Delhi-Índia, classifica os efeitos biológicos da radiação em dois grupos em função da forma como as respostas – sintomas ou efeitos – relacionam-se à dose, ou seja, à quantidade de radiação recebida como indicado no diagrama seguinte:



- Os EFEITOS DETERMINÍSTICOS² são aqueles cuja gravidade das respostas aumenta com o aumento da dose. Por exemplo, quanto maior a exposição ao sol e maior a 'dose' de luz solar recebida por uma pessoa, mais severa é a queimadura solar.
- Os EFEITOS ESTOCÁSTICOS² são aqueles cuja probabilidade de ocorrência aumenta com o aumento da dose de radiação, mas cuja gravidade permanece inalterada com o aumento da dose. Por exemplo, a

probabilidade de adquirir câncer de pele aumenta com o aumento da exposição ao sol².

Os efeitos determinísticos se desenvolvem devido à morte celular por dose de radiação alta. Surgem acima de determinado limite de dose (ou limiar de dose) que é consideravelmente mais elevado do que os níveis de doses tanto da radiação natural como da exposição ocupacional em operações normais. A gravidade do efeito depende da dose e para um valor de dose elevado o efeito é observado de em todas as células expostas de forma grave².

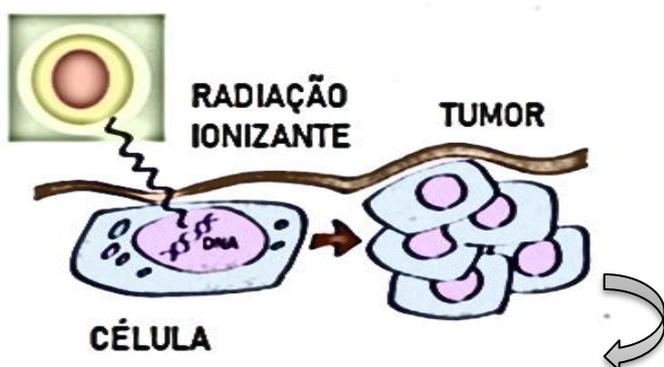
Os efeitos estocásticos se desenvolvem devido ao processo de mutação induzido por baixa dose de radiação. Neste caso, a dose limite não é conhecida com precisão. Observa-se que o câncer em diferentes órgãos do corpo aparece acima de intervalos de dose diferentes. A gravidade do efeito estocástico independe da dose mas, a frequência de aparecimento do efeito (probabilístico) no grupo da população exposto é dependente da dose e, na maioria dos casos, aumenta de forma linear com a dose². A figura seguinte mostra essa dependência da dose de radiação para os dois tipos de efeitos:



² <https://ucms.ac.in/Lectures-C-2020/BSc%20Biological%20effects%20of%20Radiation.pdf>

Na figura anterior o Leitor do JQI pode identificar com mais clareza as diferenças características entre as duas categorias de efeitos biológicos da radiação observando-se, a partir das respectivas curvas, que: (i) os efeitos carcinogênicos e hereditários às vezes se manifestam espontaneamente – incidência espontânea – e também podem ser acelerados como resultado da exposição à doses muito baixas de radiação. (ii) Os efeitos determinísticos apresentam um certo limiar de dose de exposição que leva à morte celular (Fonte da imagem com edição do JQI <https://www.researchgate.net/>).

As mutações somáticas – aquelas que ocorrem em células responsáveis pela formação de tecidos e órgãos (células somáticas) – podem acontecer em qualquer divisão celular: desde a primeira clivagem do óvulo fertilizado até divisões celulares que substituem as células de um indivíduo adulto. Essas variantes não são transmitidas para a geração seguinte mas a célula com a mutação irá transmitir a alteração para todas as suas células descendentes (TAUHATA, 2014).



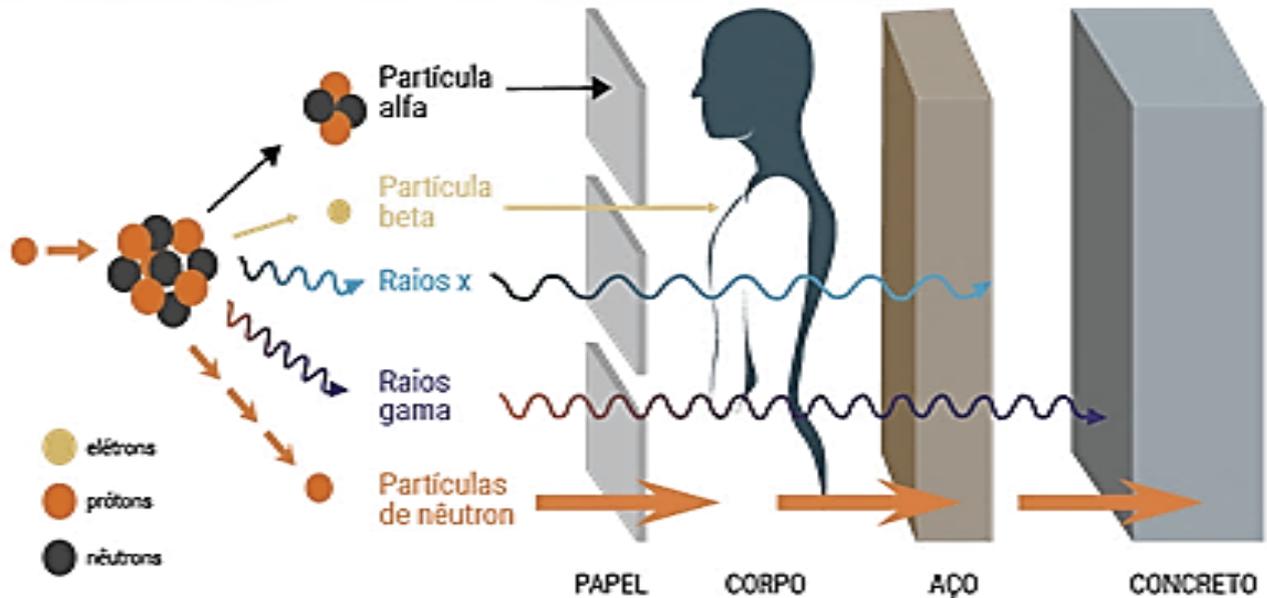
- Alterações na molécula de DNA podem produzir o processo de transformação neoplásica, cuja célula modificada mantendo sua capacidade reprodutiva pode originar um câncer. O crescimento desordenado e autônomo com acúmulo progressivo de células neoplásicas resultará num tumor cancerígeno (TAUHATA, 2014). Fonte da imagem: <https://amanf.org.br/tag/cancer/>

Quando o corpo humano é exposto à radiação é comum a ocorrência, nos locais atingidos pela radiação, de muitos elétrons, íons livres e radicais produzidos na quebra de ligações além de energia cinética adicional devido a transferência de energia da radiação para o material tecidual, por colisão. Como já informado anteriormente, parte significativa desta energia é responsável pela excitação dos átomos e moléculas e pode ser dissipada sob a forma de fótons no processo de desexcitação (TAUHATA, 2014).

Devido ao modo de interação e ao poder de penetração elevado os efeitos da REM ionizante (raios X e raios gama, γ) ocorrem de forma mais distribuída ao longo do meio material com o qual interagem. No caso das partículas beta (β^-) os efeitos são mais superficiais sendo o poder de penetração da ordem de vários milímetros, dependendo da energia da partícula. Por sua vez, a radiação alfa (α) não obtém êxito para penetrar um décimo de milímetro na pele de uma pessoa. Portanto, os efeitos decorrentes das exposições externas a este tipo de radiação são pouco relevantes. Mas, no caso de ocorrer contaminação interna, por inalação ou ingestão de radionuclídeos alfa-emissores, essas partículas podem danificar seriamente as células de alguns órgãos ou tecidos, pelo fato de serem emitidas em estreito contato ou no seu interior (TAUHATA, 2014).

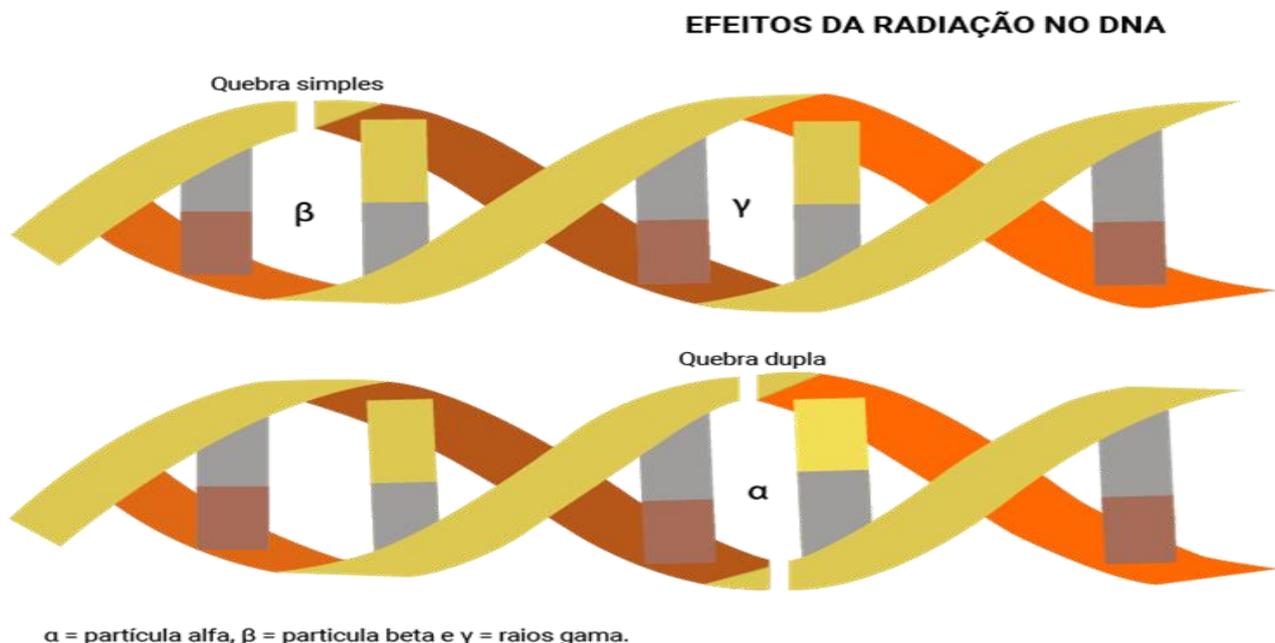
Assim, pode-se concluir que o poder de penetração dessas radiações varia inversamente com o aumento da carga e da massa das partículas. Quanto menos penetrante maior será o poder ionizante dessas radiações. Na figura seguinte o leitor do JQI pode comparar o poder de penetração dos diferentes tipos de radiações e esta relação citada:

- Ilustração mostrando os diferentes tipos de radiações ionizantes (partículas e ondas eletromagnéticas) e o poder de penetração em materiais específicos observando-se que quanto maior a carga e a massa da partícula menor é o seu poder de penetração e maior sua capacidade de ionização



Fonte com edição do JQI: <https://radioprotecaonapratica.com.br/>

Tauhata (2014) também ressalta que os átomos e moléculas atingidos pela radiação estão dentro das células que têm um metabolismo próprio e possuem uma grande variedade de substâncias. Assim há uma tendência da neutralização gradual dos íons e radicais formados buscando-se restaurar o equilíbrio químico. Esta etapa físico-química dura cerca de 10^{-10} segundos e nela, os radicais livres, os íons e agentes oxidantes podem atacar algumas moléculas importantes da célula, inclusive as substâncias que compõem o cromossomo – uma estrutura organizada que contém o material genético (DNA). A figura seguinte mostra esquematicamente os efeitos das radiações ionizantes no DNA com quebra simples (β e γ) e dupla (α):

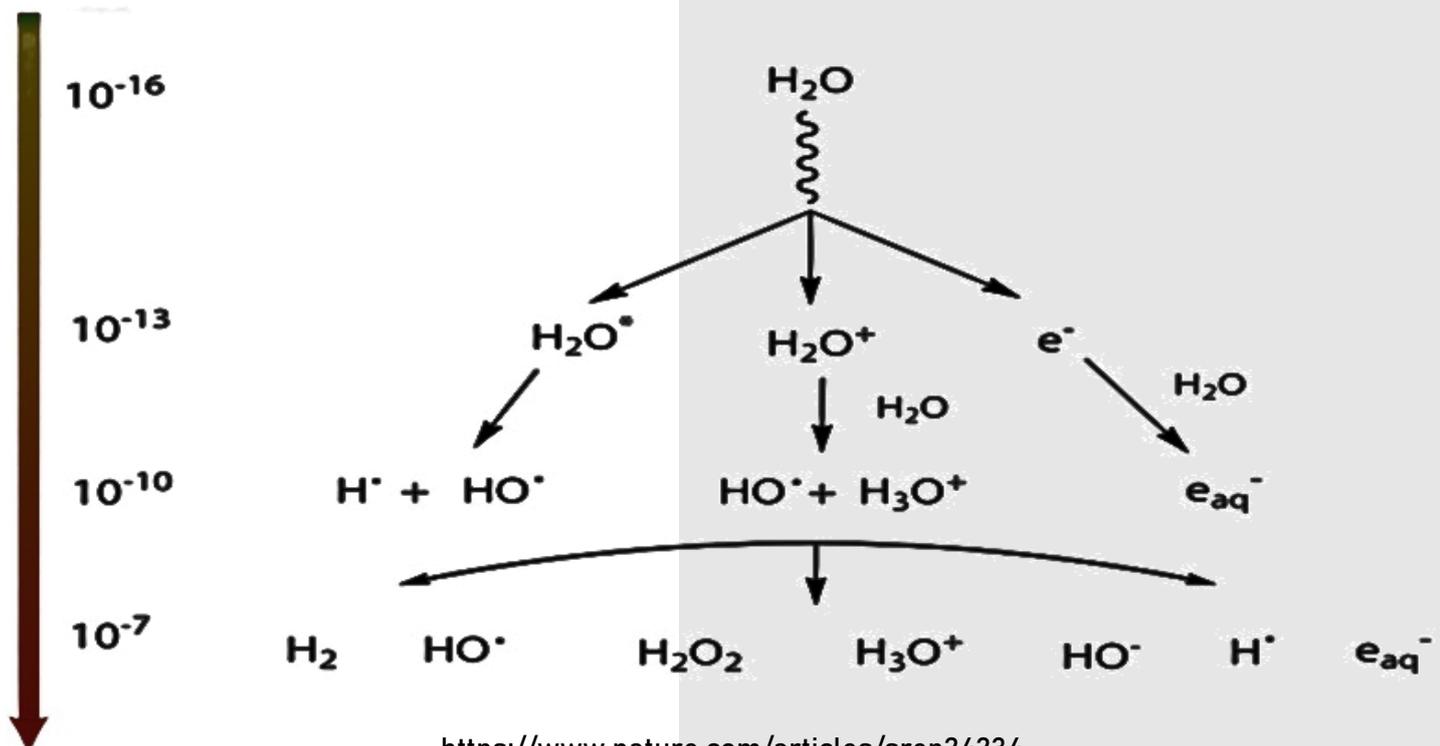


Fonte <https://pontobiologia.com.br/>.

As células do nosso corpo são constituídas por 70% de água. Assim, no estágio inicial, logo após a interação com a radiação, irá ocorrer a radiólise das moléculas de água com formação do radical ($\text{H}_2\text{O}^\bullet$) e das entidades químicas carregadas: o íon (H_2O^+) e elétron (e^-). Na sequência temporal há produção de outras espécies químicas, neutras e carregadas (H_2 , H_3O^+ , H_2O_2 , OH^-) e também radicais livres da água, H^\bullet e OH^\bullet (TAUHATA, 2014).

A Figura seguinte mostra as etapas reacionais do processo de radiólise da molécula de água com a escala temporal destes eventos químicos:

TEMPO (s)



<https://www.nature.com/articles/srep24234>

Segundo (TAUHATA, 2014), os efeitos biológicos da radiação é uma fase em que o tempo para aparecer os sintomas pode ir de minutos, horas ou dezenas de anos, mas isso depende dos sintomas. Mudanças químicas causadas pela radiação podem danificar uma célula de várias formas, causando a morte prematura, impedindo ou retardando o processo de divisão celular ou ainda induzindo uma mudança permanente que é passada para células das gerações posteriores.

Mas, segundo (TAUHATA, 2014) a forma como um organismo irá reagir pela exposição à radiação depende de diversos fatores relacionados a seguir:

- A quantidade total de radiação recebida;
- A quantidade total de radiação recebida anteriormente pelo organismo, sem recuperação;
- A textura orgânica individual;
- O dano físico recebido simultaneamente com a dose de radiação;
- O intervalo de tempo durante o qual a quantidade total de radiação foi recebida.

No caso de uma quantidade pequena de efeitos biológicos o organismo tem capacidade para se recuperar facilmente, sem que a pessoa perceba esses efeitos. Como exemplo pode-se citar a exposição de uma pessoa à radiação X ou gama causando a redução da quantidade de leucócitos, plaquetas e hemácias. Após algumas semanas os níveis anteriores da contagem destes elementos no sangue irão ser restabelecidos através dos efeitos biológicos reparadores operados pelo tecido hematopoiético (TAUHATA, 2014, p. 122).

As reações teciduais são aquelas que provêm de uma dose elevada e somente surgem acima de certo limiar de dose, cujo valor depende do tipo de radiação e do tecido que é irradiado. Um dos principais efeitos é a morte celular. Se poucas células morrem, o efeito pode ser fraco o bastante para não causar problemas, entretanto, quando o número de células mortas de um órgão é muito elevado sua função biológica pode ser afetada. Quanto maior a dose de radiação mais grave é

o efeito biológico resultante. É o caso, por exemplo da queimadura, uma lesão traumática na pele provocada pela radiação, cujos sintomas podem variar de um simples avermelhamento até a formação de grandes bolhas na pele (OKUNO, 2013).



Queimaduras - dermatite de radiação,
<https://www.dalynpharma.com/en/>

Estudos epidemiológicos que foram feitos com os sobreviventes das bombas atômicas, lançadas pelos EUA no Japão, mostraram que há sequelas muito tardias que causam “danos nos tecidos e são doenças vasculares cardíacas e cerebrais além da opacificação do cristalino, ou “catarata” (OKUNO, 2013).



Névoa significativa na córnea do pássaro tordo (*Erithacus rubecula*), Estudo da frequência elevada de cataratas em pássaros de Chernobyl. By Timothy Alexander Mousseau; Anders Pape Møller DOI: [10.1371/journal.pone.0066939](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066939)

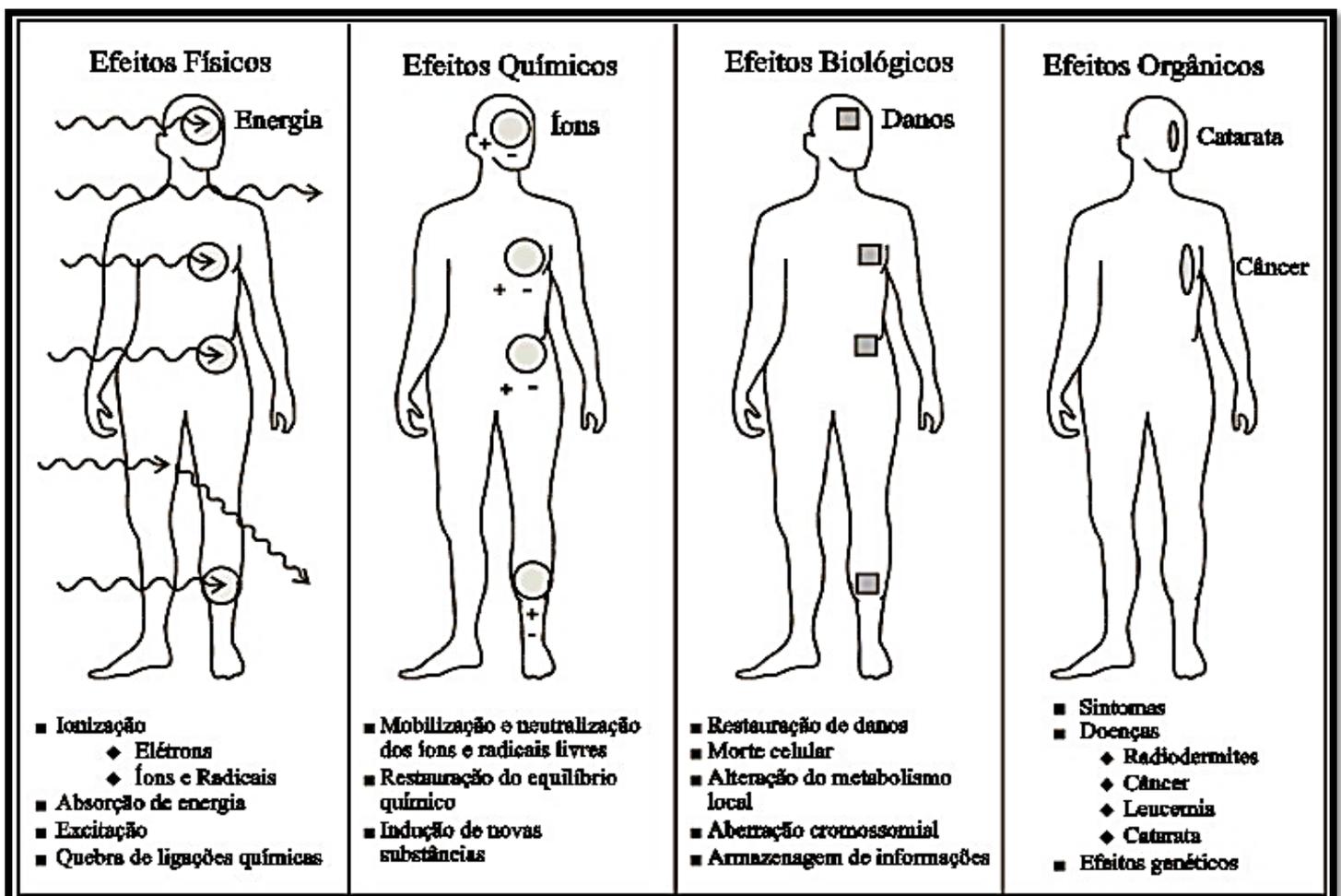
A imagem ao lado é uma reprodução do desenho criado por SUSUMU HORIKOSHI retratando o que vivenciou, na época com 6 anos de idade, quando estava a cerca de 30km do hipocentro da bomba nuclear de Hiroshima relatando que:

após ter visto um flash e ouvido um rugido alto como se um raio tivesse atingido as proximidades logo, do outro lado da montanha, uma nuvem em forma de cogumelo se ergueu no céu. À medida que a nuvem aumentava gradualmente, ela cintilava prata brilhante sob o sol. A memória ainda me assombra... (IMAGEM CORTESIA DO MUSEU MEMORIAL DA PAZ DE HIROSHIMA).



<https://alfastudio.com/>

Okuno (2013) resume ainda a sequência temporal dos diversos estágios dos efeitos biológicos da radiação: (1) ESTÁGIO FÍSICO: em que ocorre a ionização de um átomo em cerca de 10^{-15} s. (2) ESTÁGIO FÍSICO-QUÍMICO: quando ocorrem as quebras das ligações químicas das moléculas que sofreram ionização, com duração em torno de 10^{-6} s. (3) ESTÁGIO QUÍMICO: quando os fragmentos da molécula se ligam a outras moléculas, com duração de poucos segundos. (4) ESTÁGIO BIOLÓGICO: que pode durar dias, semanas ou até várias dezenas de anos quando surgem efeitos bioquímicos e fisiológicos com alterações morfológicas e funcionais dos órgãos.



De acordo com Okuno (2013) logo após a descoberta dos raios X e da radioatividade, no final do século XIX, deu-se início ao uso desenfreado da radiação em diversos contextos. Então, os médicos começaram a perceber o potencial da radiação para retirar pintas, manchas de nascença e matar células. No entanto, a Comissão Internacional de Unidades e Medições de Radiação (ICRU, sigla em inglês) só seria criada 30 anos mais tarde com a finalidade de estabelecer as grandezas e unidades da Física das radiações, os critérios de medidas e os métodos de comparação entre outras atribuições.

Ainda segundo Okuno (2013) três anos depois foi criada a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, sigla em inglês) com a incumbência de elaborar normas de proteção radiológica e estabelecer limites de exposição à radiação para indivíduos expostos ocupacionalmente e o público em geral. Essas comissões se reúnem regularmente para elaborar novas normas ou atualizar as já existentes. Cada país tem um órgão específico que faz adequações nas normas internacionais e as adota para regulamentar o uso das radiações. No Brasil, tal órgão é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).



O Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), sediado em Recife e vinculado à CNEN, tem a missão de contribuir para o bem estar da sociedade, em especial das regiões Norte e Nordeste do Brasil, por

meio da pesquisa, desenvolvimento e inovação; da formação de recursos humanos; e produtos e serviços nas áreas nuclear e correlatas.



https://twitter.com/CRCN_NE/status/1402312336048889862/photo/1

Estas Comissões e órgãos reguladores são importantes pois a população acha-se exposta à radiação natural e artificial (durante a realização de exames radiológicos médicos e odontológicos). O Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR, sigla em inglês) avalia informações científicas sobre os efeitos da exposição à radiação em humanos e no meio ambiente, tentando descobrir, da forma mais confiável, quais efeitos podem ser associados aos diferentes níveis de exposição que, como já discutido nesta edição depende do tipo de radiação, do tempo de exposição e da quantidade de energia depositada no material.

A dose efetiva média anual de radiação natural global por pessoa é cerca de 2,4 mSv e varia entre 1 mSv a 10 mSv, dependendo do local onde as pessoas vivem. O gás radônio presente no interior das construções ou outros radionuclídeos presentes nos materiais de construção aumentam a exposição à radiação natural (UNEP, 2016).

Em 2006, nos Estados Unidos, foi dado um alerta quando o Conselho Nacional de Proteção e Medições de Radiação (NCRP, sigla em inglês) constatou que a dose anual individual média havia aumentado de 3,6 mSv, em 1980, para 6,2 mSv em 2006. Análises mostraram isso foi devido ao aumento na quantidade de exames por tomografia computadorizada. Assim, tiveram início as recomendações para se submeter a esse tipo de exame somente quando não houver outra forma de diagnóstico, além da necessidade de se realizar controle de qualidade de equipamentos com regularidade, pois das radiações a que estamos expostos, essas são as únicas que podem ser diminuídas (OKUNO, 2013).

A ICRP, na sua publicação n° 118 de 2012 definiu dose limiar como sendo a dose estimada que causa incidência de reações teciduais em 1% dos tecidos irradiados sendo:

- O limiar de dose para indução de catarata foi estabelecido em 0,5 Gy, tanto para exposição aguda quanto crônica.
- O limiar de dose proposto para doenças circulatórias, tanto para morbidade quanto para mortalidade foi fixado em 0,5 Gy.

Relembrando mais uma vez...

- O gray (abreviatura Gy) mede a energia média da radiação ionizante depositada por unidade de massa da matéria.

Mas... Em quais princípios se baseia a Proteção Radiológica?

A proteção radiológica se baseia em três princípios:

Da **JUSTIFICATIVA**: qualquer exposição à radiação deve ser justificada de modo que o benefício supere qualquer malefício à saúde.

Da **OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO**: a proteção radiológica deve ser otimizada de forma que o número de pessoas expostas e a probabilidade de exposições que resultem em doses mantenham-se tão baixos quanto possa ser razoavelmente exequível, considerando os fatores econômicos e sociais.

Da **LIMITAÇÃO DE DOSE**: as doses individuais devem obedecer aos limites estabelecidos em recomendações nacionais que se baseiam em normas internacionais.

Mas... Você já ouviu falar do acrônimo
ALARA?

ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) é um acrônimo para a expressão "tão baixo quanto razoavelmente exequível". Este é um princípio de segurança de radiação, com o objetivo de minimizar as doses a pacientes e trabalhadores, empregando para tal todos os métodos razoáveis existentes.



<https://www.ceer.es/pt-pt/principio-alara/>

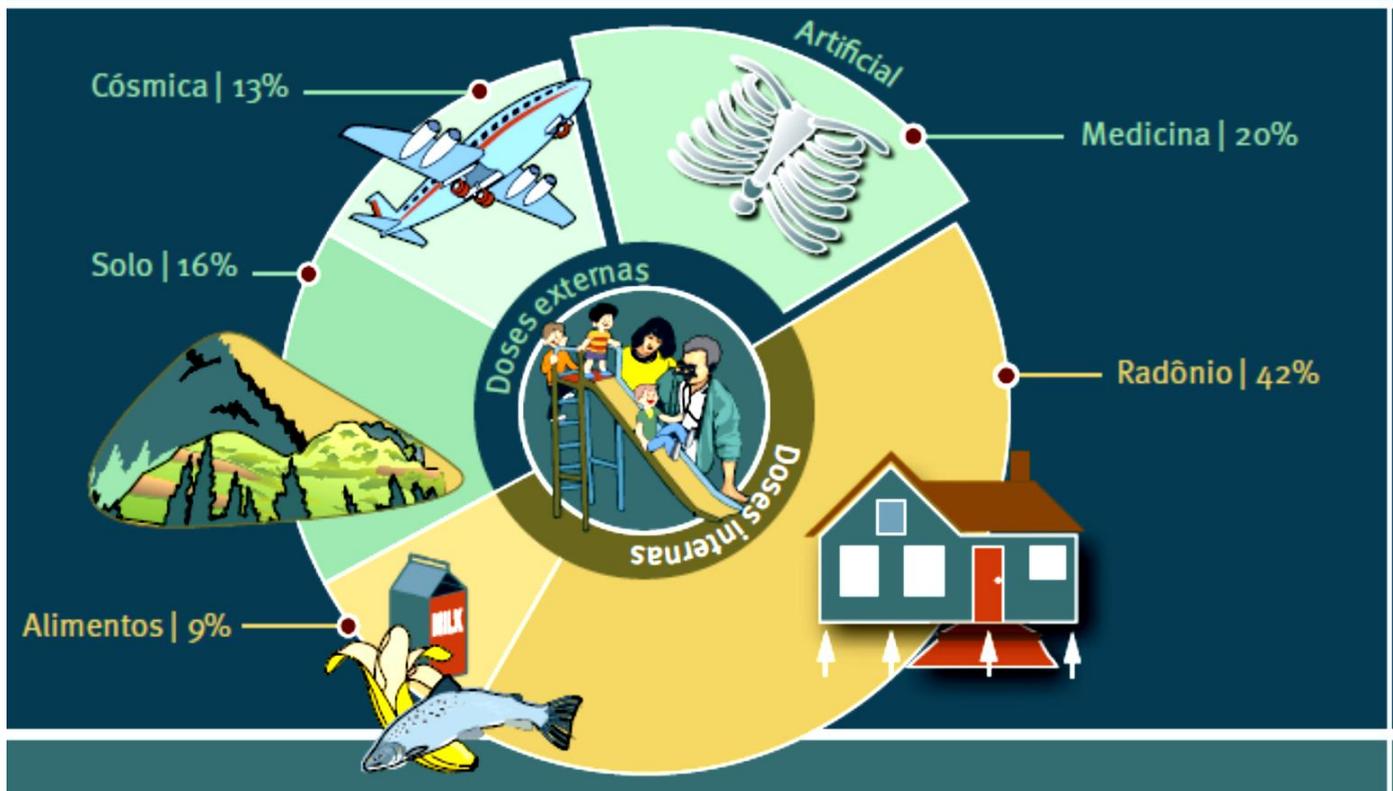
Nesta perspectiva, o Princípio ALARA na radioproteção baseia-se na identificação, avaliação, análise e implementação de medidas de controle da radiação. Os três pilares do Princípio ALARA para a redução das exposições às radiações externas e manutenção de doses, já abordados ao longo desta edição, são: (1) TEMPO: quando o tempo de exposição direta é minimizado ocorre a redução da dose de radiação absorvida; (2) DISTÂNCIA: quanto maior a distância da fonte geradora de radiação, menor será a dose recebida; (3) BLINDAGEM: recorrendo-se à materiais de absorção, como por exemplo o chumbo, é possível reduzir significativamente as doses de radiação.

Finalizamos esta seção ressaltando que uma pessoa pode apresentar o que se CHAMA SÍNDROME AGUDA DA RADIAÇÃO ao ser exposta num intervalo de tempo pequeno de até alguns dias à radiação. Essa síndrome pode variar com a dose: (i) Se a dose absorvida no corpo todo for de 0,25 a 1 Gy, algumas pessoas podem ter náusea, diarreia e depressão no sistema sanguíneo; (ii) Se for entre 1 e 3 Gy, além de sintomas anteriores, pode ter forte infecção causada por agentes oportunistas; (iii) Entre 3 e 5 Gy pode ocorrer hemorragia, perda de pelos e esterilidade temporária ou permanente; (iv) Ao redor de 10 Gy ocorre a inflamação dos pulmões, e para doses maiores os efeitos incluem danos no sistema nervoso e cardiovascular levando o indivíduo à morte em poucos dias (OKUNO, 2013).

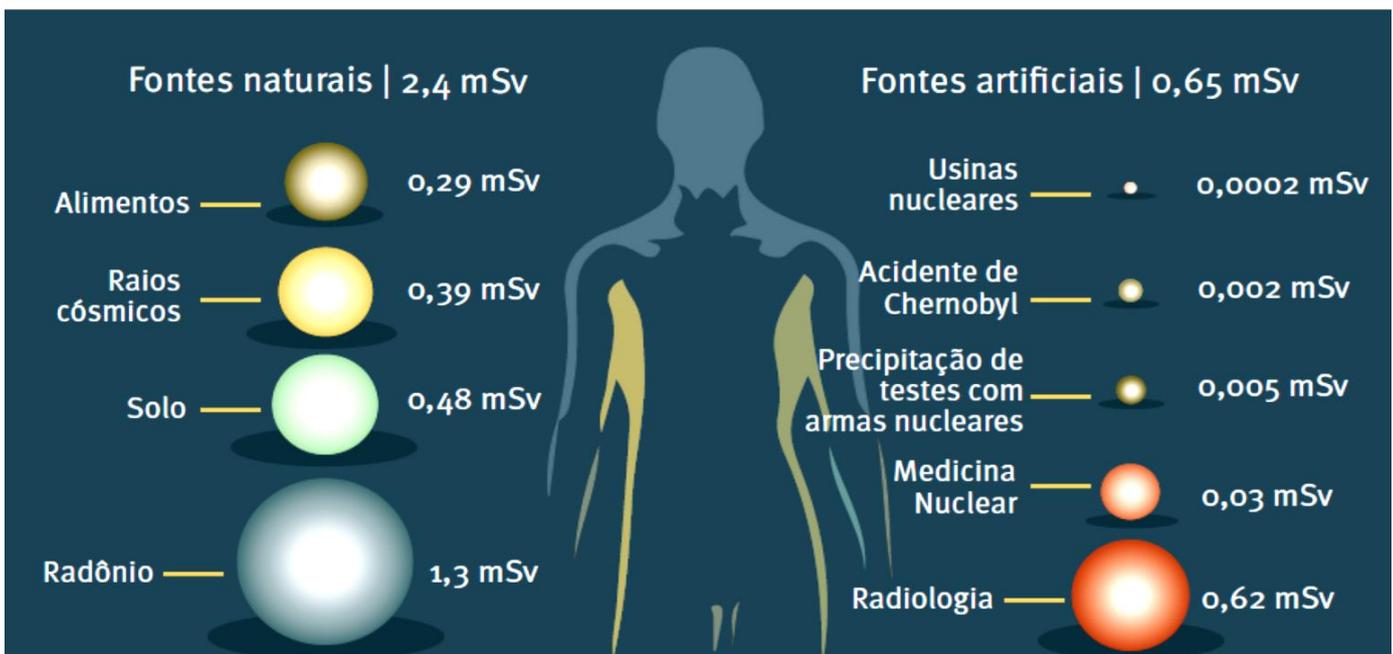
Mais informações sobre níveis de exposição

Fonte das imagens
<http://www.aben.com.br/Arquivos/544/544.pdf>

Distribuição mundial de exposição à radiação

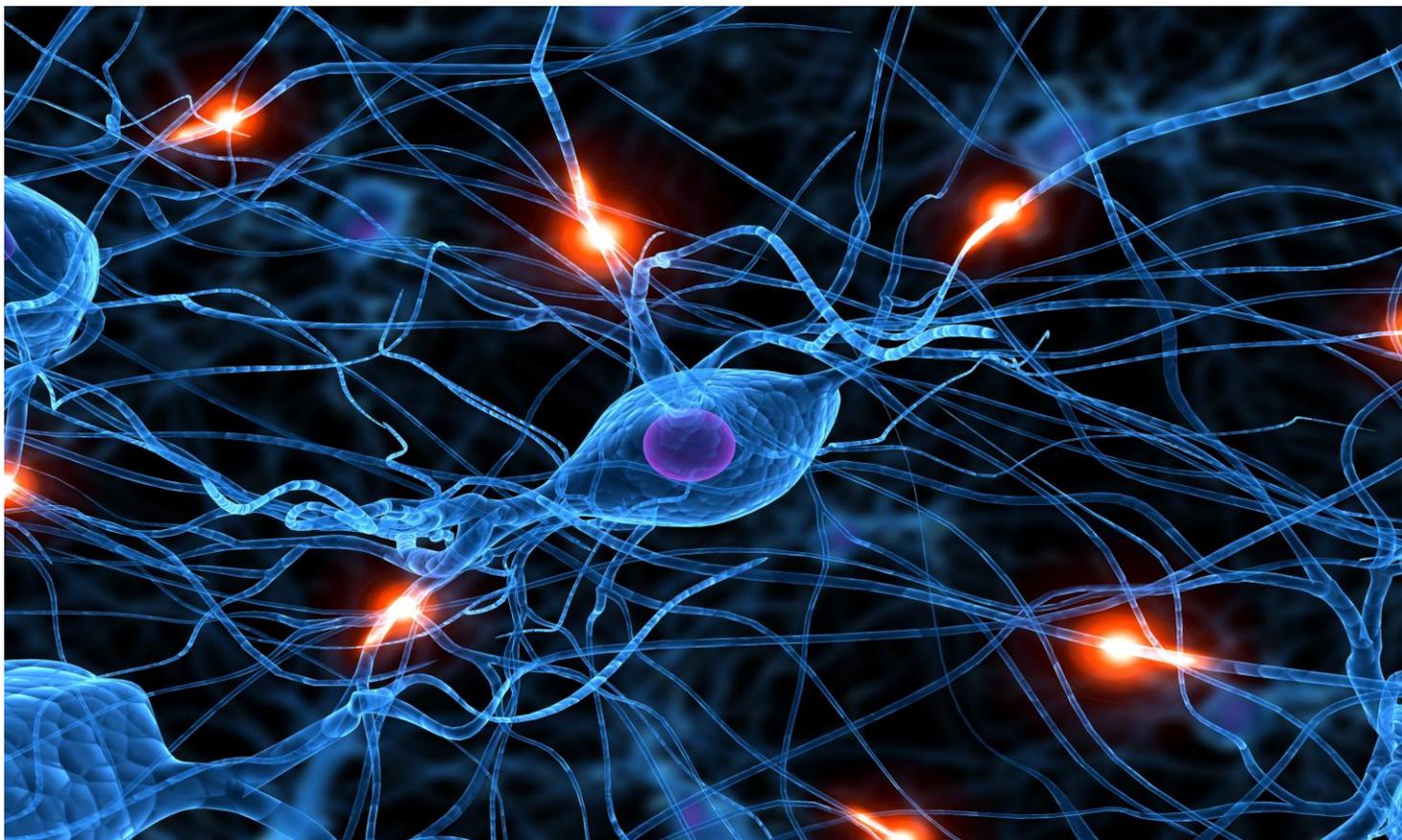


Exposições médias do público por fontes de radiação*



* Estimativas arredondadas de dose efetiva para uma pessoa, em um ano (média mundial).

VOCÊ SABIA?



Fonte: <https://www.wickhosp.com/blog/what-is-nuclear-medicine/>

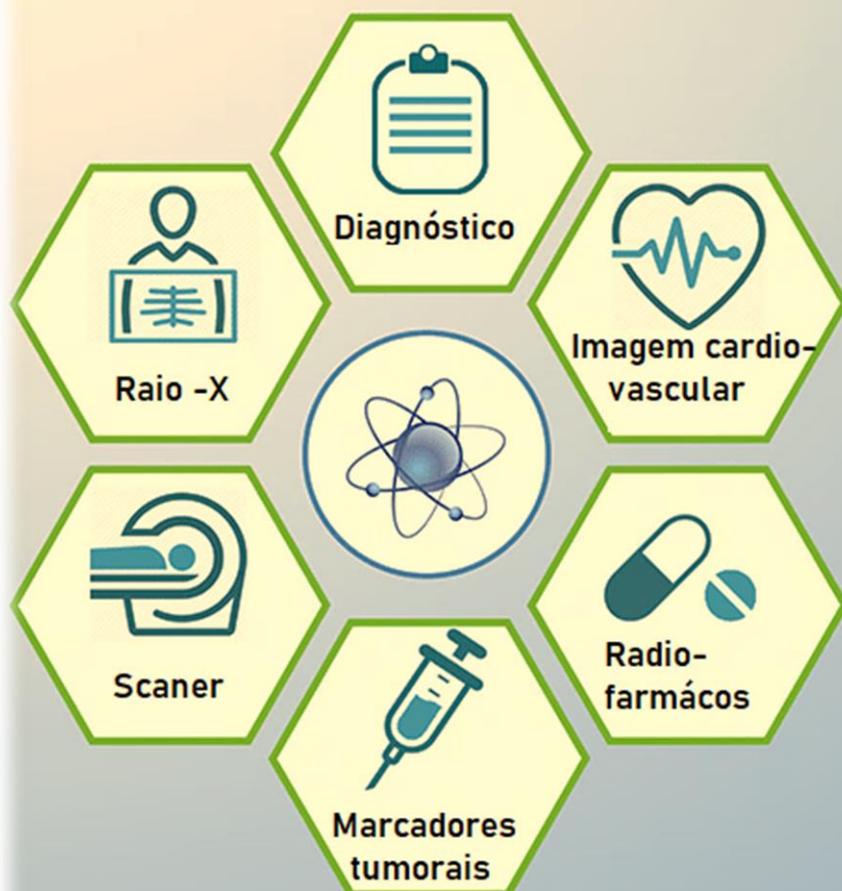
De acordo com a Sociedade Brasileira de Medicina Nuclear (SBMN) a medicina nuclear é uma especialidade médica que utilizando métodos seguros, praticamente indolores e não invasivos, emprega materiais radioativos com finalidade diagnóstica e terapêutica. Usa quantidades mínimas de substâncias radioativas (os radiofármacos) como ferramenta para acessar o funcionamento dos órgãos e tecidos vivos realizando imagens, diagnósticos e tratamentos de várias doenças com grandes benefícios para a saúde da população em todo o mundo. Ambos os processos usam radiação e isótopos radioativos (ou radioisótopos) com uma em cada duas pessoas se beneficiando com esta especialidade médica ao longo da vida.

Na Medicina Nuclear, também conhecida como Imagem Molecular, pode-se observar a anatomia humana detectando a radiação emitida depois que um traçador ou radioisótopo é administrado por via intravenosa, deglutição ou inalação. As imagens são capturadas por uma “câmera gama” especial e, em seguida, processadas por um computador apropriado, onde podem ser visualizadas para interpretação por um radiologista ou cardiologista especialista da medicina nuclear. As imagens produzidas não só fornecem aos médicos uma visão dos órgãos de um indivíduo, mas, ao contrário das radiografias tradicionais, mostram a estes profissionais como o corpo funciona, permitindo-lhes avaliar se certos órgãos e funções corporais estão funcionando adequadamente. Algumas das aplicações mais comuns desta área médica é na detecção de doenças cardíacas, gastrointestinais, ósseas, da tireoide, pulmonares e sua extensão no corpo. Cada órgão pode ser fotografado e avaliado quanto à funcionalidade com alguns exames podendo ser feitos em cerca de 30 minutos ou em dois dias.

VOCE SABIA?

Nesta perspectiva a medicina nuclear geral nos ajuda a entender como a doença pode estar se espalhando e avaliar como certos medicamentos ou tratamentos estão funcionando. Também pode nos ajudar a identificar indivíduos em risco de doenças. Trata-se de uma ferramenta de diagnóstico vital porque pode detectar doenças nos primeiros estágios. Como a doença começa no nível celular, essas alterações microscópicas podem ser detectadas em um momento em que o tratamento e a intervenção podem tornar a doença muito mais tratável. Assim a medicina nuclear pode frequentemente detectar doenças antes que outras imagens convencionais e exames diagnósticos sejam capazes de revelar e em muitas áreas permite que os médicos sejam mais proativos do que reativos no tratamento de um paciente, o que, por sua vez, melhora a saúde e salva inúmeras vidas. No infográfico apresentado a seguir pode-se identificar algumas aplicações importantes da Medicina Nuclear no diagnóstico e no tratamento através do uso da radiação e isótopos radioativos:

APLICAÇÕES DA Medicina Nuclear



MEDICINA NUCLEAR
É USADA PARA
Diagnóstico e
tratamento

AMBAS AS TÉCNICAS
USAM:
Radiação e isótopos
radioativos

1 EM CADA 2 PESSOAS
irão se beneficiar
com a Medicina
Nuclear ao longo da
vida

Fonte com tradução do JQI:

<https://www.foronuclear.org/en/resources/infographics/applications-of-nuclear-medicine/>

REFERÊNCIAS

- CARVALHO F. Marie Curie and the Discovery of Radium. In: The New Uranium Mining Boom. Springer Geology. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22122-4_1.
- CEMBER, H.; Johnson, T. E. Introduction to Health Physics. McGraw-Hill Companies (2009), fourth edition. ISBN: 978-0-07-142308-3, MHID: 0-07-142308-7.
- COSTA, Alice Miranda Ribeiro. Estudo dos radionuclídeos naturais-Ra-226, Ra-228 e Pb-210-em alguns registros sedimentares do Atlântico Sudoeste ao longo do Holoceno. Tese de Doutorado. **Universidade de São Paulo**.
- MOULD, R.F. History Of Medicine Pierre Curie, 1859–1906. **Current Oncology**, v, 14, nº 2, 2017.
- OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. **Estudos Avançados**, v. 27, nº 77, São Paulo: 2013. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/53961>
- SABOL, J. ; WENG, P. -S. Introduction to Radiation Protection Dosimetry. World Scientific, 1995.
- SIRICO, A. C. A. et al. Determinação das propriedades de atenuação de materiais radiologicamente equivalentes a tecidos humanos utilizando um equipamento DECT. **Revista Brasileira de Física Médica**, v.12. n.2, 2018.
- TAUHATA, Luiz et al. Capítulo 4 - Efeitos Biológicos da Radiação. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. 10ª revisão. Rio de Janeiro - **IRD/CNEN**, 2014. p.108-144. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/documentos/FundamentosCORv10.pdf>
- UNEP. Radiação: efeitos e fontes. **Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente**. 2016. ISBN: 978-92-807-3604-5.