



A série 'Acidentes Explicados pela Ciência' tem por objetivo mostrar os maiores e mais incríveis acidentes causados pelo homem mostrando essencialmente o que aconteceu sob o ponto de vista científico. As reações químicas aqui descritas não devem, em hipótese alguma, ser reproduzidas devido ao seu alto grau de periculosidade.

Chernobyl: a luta contra um inimigo 'invisível'

Conheça os detalhes sobre a radioatividade e suas consequências no maior acidente nuclear da história.

EMILIANO CHEMELLO
chemelloe@yahoo.com.br

Ao assistir um documentário sobre o acidente de Chernobyl, o que mais chamou a minha atenção foi a declaração de uma das vítimas, um senhor que havia lutado na segunda guerra mundial. Na entrevista, ele disse que preferia estar novamente na guerra que participou ao invés de enfrentar o acidente de Chernobyl pois, diferentemente da situação que passou, em que via o inimigo, os tanques, os mísseis, no desastre de Chernobyl o inimigo demonstrava-se 'invisível'.

O que foi o acidente de Chernobyl? Como ocorreu? Quais foram/são suas consequências? Este artigo irá esclarecer estas e outras questões fundamentais sobre o maior desastre nuclear da história.

A fim de tornar compreensível este acidente, são necessários alguns conhecimentos fundamentais. Para isto, é importante saber o que é a radioatividade, como funciona uma usina nuclear, para posteriormente compreendermos o que aconteceu em Chernobyl e quais as consequências para a humanidade.

O que é radioatividade?

A radioatividade é um fenômeno que ocorre nos átomos, mais especificamente no núcleo de alguns tipos de átomos. Estes 'tipos de átomos' que tem seu centro instável são átomos geralmente ditos 'pesados' (com um grande número de prótons no núcleo e, conseqüentemente, elevada massa – daí a expressão 'pesados'). O fenômeno da radioatividade emitida pelo urânio, tório, actínio, polônio e rádio foi descoberto e estudado por grandes nomes da ciência, como Roentgen, Becquerel, Marie e Pierre Curie (estes dois últimos, marido e mulher), entre o final e início dos séculos IX e XX.

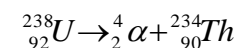
Desde então, o homem dedica-se aplicando este conhecimento para fins nobres e para outros não tão nobres assim. Surgiram usinas nucleares, que produzem energia elétrica. Há também aplicações na medicina. Porém, também existiram as duas bombas nucleares na segunda guerra mundial e a guerra fria que nos deixou com um grande medo de uma possível guerra nuclear entre EUA e URSS. Felizmente ela não ocorreu.

Voltando ao átomo, esta 'instabilidade nuclear' citada anteriormente se deve, em grande parte, a uma 'competição' entre a força de repulsão próton x próton (*papo de cientista*: força de repulsão de Coulomb) com a interação nuclear chamada 'força forte', que faz

com que as partículas do núcleo estejam 'coladas' umas nas outras. Esta competição de forças é ganha pela força de atração (força forte) quando há poucos prótons no núcleo, tornando o átomo estável. Mas, a medida que o número de prótons aumenta, a força de repulsão (interação de Coulomb) também aumenta, tornando o átomo instável.

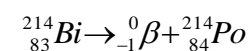
Todos os átomos acima de 82 prótons no núcleo são instáveis (radioativos). Esta instabilidade é aliviada pela emissão de, essencialmente, três tipos de radiação: α (alfa), β (beta) e γ (gama). Vejamos os detalhes de cada uma destas radiações.

Exemplo de radiação α



A radiação α (núcleos de hélio) é emitida e proporciona ao átomo emissor (no exemplo, o urânio) transformar-se em outro átomo (tório) com um número atômico (que é igual ao número de prótons) duas unidades menor e com uma massa atômica (que é a soma dos prótons e nêutrons) quatro unidades menor.

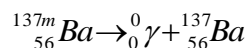
Exemplo de radiação β



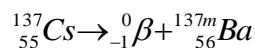
Na radiação β , um nêutron transforma-se em um próton (este último fica no núcleo, aumentando o número atômico do átomo produto em uma uni-

dade), um elétron (que é a radiação β^-)¹ e um antineutrino (uma partícula que interage pouco com a matéria, portanto, sem importância para este nosso assunto).

Exemplo de radiação γ



A radiação γ , ao contrário das radiações α e β , não é constituída de matéria, mas sim uma onda eletromagnética com grande frequência. Como tal, não altera o número de prótons e nêutrons do átomo produto em relação ao átomo emissor. Trata-se de uma espécie de ‘acomodação’ das partículas. Esta radiação ocorre no átomo de bário, conforme o exemplo, quando este é resultado da emissão de radiação β do átomo de césio 137.



Este bário, metaestável (${}^{137m}\text{Ba}$), adquire estabilidade emitindo radiação γ . Perceba, portanto, que o bário emite radiação γ devido a uma instabilidade adquirida em uma transformação radioativa (*papo de cientista*: transmutação), que tem como origem o isótopo radioativo do elemento césio, já tratado nesta série quando falou-se do acidente com ${}^{137}\text{Cs}$ em Goiânia, Brasil.

Esta emissão do bário é utilizada, por exemplo, em tratamentos contra o câncer. Mas, quando nos submetemos a este tipo de radiação de forma indevida, como veremos mais adiante, as consequências podem ser fatais.

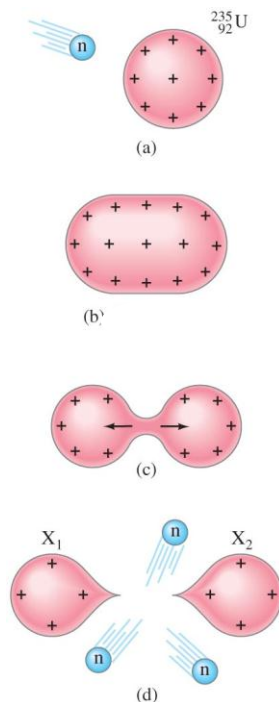
O que é fissão nuclear?

Em 1938, dois cientistas alemães, Otto Hahn e Fritz Strassmann, descobriram acidentalmente que o urânio, ao ser bombardeado com nêutrons, dava origem a átomos com metade de sua massa,

como o bário. Surgia, então, a descoberta que iria transformar o mundo: a fissão nuclear.

Como vimos anteriormente, há uma ‘competição de forças’ das partículas que existem no núcleo (*papo de cientista*: núcleons). Geralmente a força forte vence (talvez seja por isto que chamam ela de ‘forte’), mas há casos que há um equilíbrio tênue. É o caso do urânio 235 (${}^{235}\text{U}$), um tipo de átomo (*papo de cientista*: isótopo) do elemento urânio que possui potencial de fissão. Quando ele é bombardeado com um nêutron, este causa uma desestabilização no núcleo, como se fosse o ‘empurrão’ necessário para que um núcleo, já instável, se desintegre. Na fissão, temos a força de repulsão vencendo a força de atração. Mas, como isto ocorre?

Acompanhe a explicação com base na figura a seguir:



O núcleo do ${}^{235}\text{U}$ e o nêutron absorvido (a) formam o ‘núcleo composto’ (b), que constitui o estado excitado e com energia de excitação colocada em modos coletivos de vibração. Estes modos de vibração são capazes de ‘esticar’ o núcleo. Caso a energia de excitação é suficientemente grande, em uma dessas vibrações coletivas, o núcleo composto pode assumir uma forma

com dois blocos de núcleons separados por uma estreita ponte (c). Caso, entre esses blocos, a repulsão de Coulomb de longo alcance entre os prótons for mais intensa do que a interação nuclear atrativa de curto alcance, o núcleo composto se fragmenta (d).

Até aqui você pode estar se perguntando onde esta história de quebrar átomos vai chegar. O que tem de interessante em quebrar átomos? Bem, isto em particular não é útil (interessante para alguns, mas útil para poucos). O mais fantástico nesta história de destruição de átomos é a energia que a fissão nuclear proporciona. Isto sim é útil! Para você poder ter uma idéia, apenas dez gramas de ${}^{235}\text{U}$ fornecem a mesma energia produzida na explosão de 300 toneladas de TNT! Isto é muito útil em tempos modernos em que a demanda de energia é cada vez maior.

O ${}^{235}\text{U}$ é um isótopo com uma abundância de 0,7 %, ou seja, uma parte em 140 partes de urânio natural em média é o de massa 235 (veja **Figura 1**). Então, para tornar uma amostra de urânio um combustível nuclear, é necessário realizar um procedimento chamado ‘enriquecimento de urânio’. Esta etapa consiste basicamente e aumentar a concentração de ${}^{235}\text{U}$ para um valor adequa-

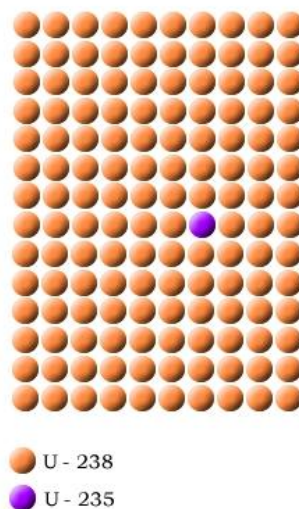


Figura 1 – Apenas 1 parte em 140 (ou seja, 0,7 %) de urânio natural é o isótopo ${}^{235}\text{U}$.

¹ Há também a possibilidade de um próton transformar-se num nêutron, emitindo uma partícula denominada pósitron, constituindo a radiação β^+ .

do para que este seja utilizável na fissão. Na seção 'para saber mais' há detalhes destes processo e não vamos aqui detalhá-lo.

O problema da fissão é que, uma vez que os átomos são partidos, novos nêutrons são formados e outros átomos são partidos, e assim por diante, fazendo disso uma reação em cadeia. Quando a fissão ocorre de forma desenfreada, temos a bomba atômica! Mas, quando controlamos este processo, temos o que chamamos de usina nuclear.

A fissão nuclear essencialmente tem duas aplicações: armas nucleares e usinas nucleares. Nas armas, deseja-se uma reação em cadeia, a qual necessita de uma concentração grande de ^{235}U . Já a usina nuclear não necessita de uma alta concentração de ^{235}U . Mesmo assim, com baixa concentração, as energias envolvidas no processo em uma usina nuclear são grandes. Será que uma usina pode explodir como uma bomba? Vejamos o próximo capítulo deste artigo para respondermos a esta pergunta.

Como funciona uma usina nuclear?

O esquema simplificado de uma usina nuclear está ilustrado na **Figura 2**. Em essência, a fissão nuclear libera energia. Esta, por sua vez, aquece a água líquida que transforma-se em vapor. Este vapor gira a turbina que possui a capacidade de gerar eletricidade, a qual é transportada por uma série de etapas intermediárias até chegar na sua casa. As barras de controle ficam próximas ao combustível nuclear, evitando que o processo de fissão ocorra desenfreadamente. Estas barras são geralmente feitas de boro ou cádmio, elementos que absorvem nêutrons e impedem que estes promovam a fissão de outros átomos de ^{235}U .

Como vimos anteriormente, o urânio extraído da natureza tem apenas 0,7 % de

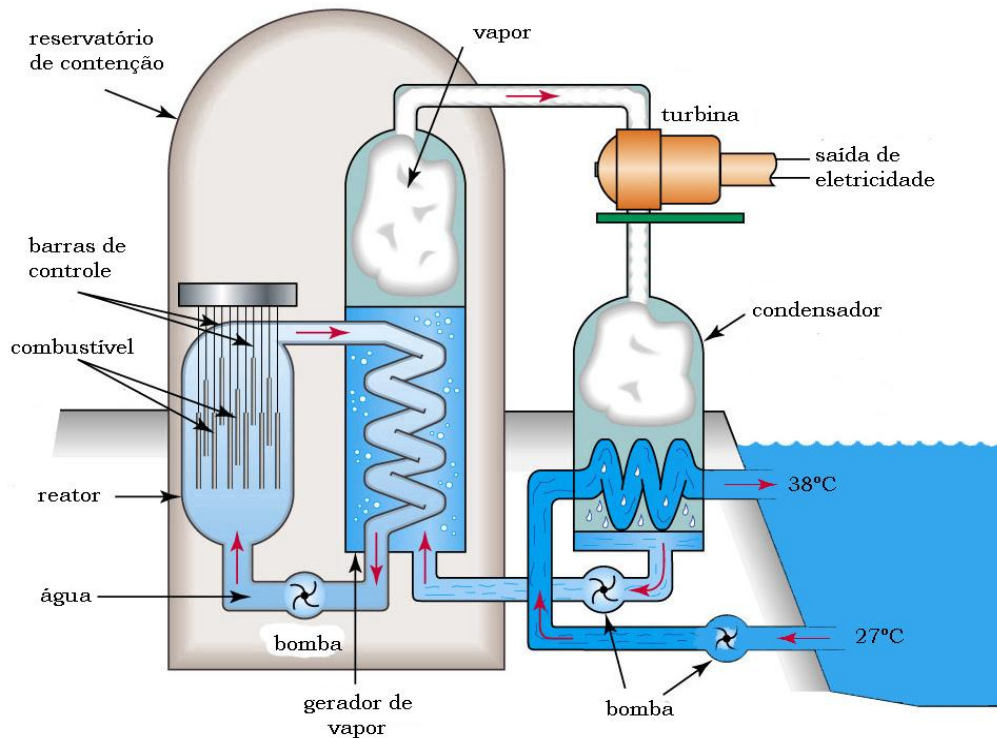


Figura 2 – Diagrama do funcionamento simplificado de uma usina nuclear.

^{235}U , o qual é potencialmente fissível. Então, se faz necessária o enriquecimento do urânio para que ele seja aplicado a em reatores nucleares. Este enriquecimento nada mais é que aumentar a concentração de ^{235}U para um valor em torno de 3 %. Já para se fazer uma bomba atômica, a concentração de ^{235}U deve ser em torno de 90 %, logo, em tese, é pouco provável uma explosão atômica no funcionamento de uma usina nuclear. Mas, como tratamos com vapor em altas temperaturas, se algo na operação der errado, acidentes podem acontecer. E aconteceram. O de Chernobyl é o exemplo mais trágico, mas outros acidentes ocorreram (como o de *Three Mile Island*, em 1979 nos EUA).

Além do combustível e das barras moderadoras, temos uma peça fundamental que é o agente refletor. Um refletor possível é o grafite (no reator utilizado em Chernobyl). Ele desacelera os nêutrons oriundo da fissão de um átomo de ^{235}U , que sai a aproximadamente 1600 km/s, velocidade que é reduzida a 1,6 km/s, a qual é mais eficaz para quebrar o próximo átomo de ^{235}U .

O que houve de errado em Chernobyl?

Ainda hoje o acidente de Chernobyl causa desconfiança quando falamos das usinas nucleares para geração de energia elétrica. Sabe-se que é uma fonte de energia limpa, pelo menos quando comparada com os combustíveis fósseis, com sistemas de segurança avançados (hoje), mas o acidente de 1986 faz com que fiquemos 'com um pé atrás' quando falamos em usinas nucleares. Vejamos o que aconteceu e, ao final desta exposição, ponderaremos a respeito da racionalidade deste 'medo'.

Na madrugada do dia 26 Abril de 1986, operadores estavam testando o reator quatro da estação nuclear de Chernobyl, Ucrânia, na época pertencente a URSS. Esta usina era responsável por 10 % da geração de energia elétrica utilizada na Ucrânia naquele ano. Desejava-se realizar testes associados a uma das maiores e mais recentes conquistas do regime comunista. Documentários e relatórios oficiais dizem que houve falha humana ao

realizar os testes em uma potência baixa (< 700 MW), fato previsto como perigoso nos manuais de procedimentos. O teste foi exigido do comitê estatal para o uso de energia atômica. Os governantes temiam a necessidade de utilizar o reator em caso de ataques por causa da guerra fria. No entanto, o engenheiro chefe (Anatoly Syatlov) desejava realizar o teste a 200 MW, a fim de preservar a água para resfriamento do reator. Por erros de operação, o reator teve sua potência abaixada até zero. Impaciente, o engenheiro chefe toma uma decisão fatal: o reator seria reativo sem que os sistemas de segurança (barras de controle) estivessem ativados (veja **Figura 3**). Estas barras de controle funcionam como se fossem os aceleradores e os freios do reator. A presença ou não delas faz o reator funcionar com menor ou maior potência. No reator de Chernobyl, eram 211 barras feitas de boro que encontravam-se espalhadas entre as barras de urânio, o combustível nuclear.

Diante da situação de perigo, os operadores alertaram o engenheiro chefe, o qual prosseguiu com a operação. Sem as barras de controle, a potência aumentou mais rapidamente, conforme o engenheiro chefe desejava. No entanto, esta mudança nos parâmetros de operação iria revelar falhas no projeto de construção do reator.

A usina de Chernobyl utilizava reatores do tipo RBMK (em russo, “Reator de Alta Potência no Canal”), atualmente obsoletos, que apresentavam instabilidade e usavam como combustível urânio não enriquecido. A tecnologia, em uso desde a década de 1950, utiliza a própria água que resfriava o reator para formar o vapor para mover as turbinas, num circuito unificado. Já nos reatores do modelo PWR, os mais utilizados no ocidente, como nas usinas de Angra 1 e 2 aqui no Brasil, existem três circuitos independentes, sendo que o líquido radioativo circula em

um circuito independente e isolado.

O modelo soviético, embora menos seguro, foi adotado por ser mais barato tanto na construção quanto no abastecimento por combustível de baixo enriquecimento. Havia, ainda, um fator estratégico: a grande quantidade de plutônio formada pelo funcionamento do reator RBMK poderia ser usada na fabricação de armas nucleares. Devemos lembrar o contexto histórico do acidente: guerra fria entre URSS e EUA. Alias, há quem diga que acidente tenha sido o primeiro passo para a queda do regime comunista.

É importante salientar as implicações políticas que rodeavam o funcionamento dos reatores em Chernobyl. A expansão nuclear era um dos grandes objetivos do regime comunista. Para tanto, priorizou-se a implantação mais rápida dos reatores, sem no entanto dar a devida atenção aos aspectos de segurança. Houve um apressamento na inauguração do reator número quatro em Chernobyl por questões políticas. A segurança ficou em segundo plano. Alias, o teste aqui narrado deveria ter sido feito antes que o reator fosse inaugurado. Mas não foi (infelizmente) o que aconteceu.

Devido ao pequeno número de barras de controle, a radiatividade concentrou-se na parte inferior do reator. O teste consistia em desligar as turbinas que alimentavam água, a fim de testar os geradores de emergência a *diesel*. Se algo desse errado, a água no reator seria insuficiente para capturar o calor gerado pelo reator e um acidente era possível. Ao serem desligadas as turbinas, menos água foi enviada ao reator e, conseqüentemente, mais vapor se formou. De forma repentina, a potência do reator começou a aumentar rapidamente. Para freá-la, acionou-se as barras de controle. O problema é que as barras de boro possuíam carbono grafite em suas pontas. No instante em que entraram

no reator, o grafite causou aumento na potência (centenas de vezes), não uma redução como era de se esperar das barras de controle. Elas nunca deveriam ter sido retiradas durante a operação do reator.

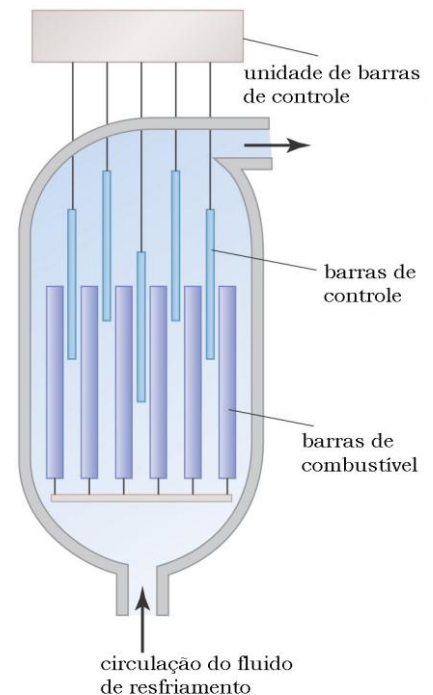


Figura 3 – Detalhes das partes principais que constituem um reator nuclear.

Houve uma série de falhas humanas e do reator que resultaram na explosão do mesmo, conforme já relatado (veja **Figura 4**). Antecipamos que não houve, neste trágico episódio, uma explosão nuclear, como as que ocorreram nas bombas atômicas da segunda guerra, mas somente uma explosão não nuclear resultante da alta pressão de vapor de

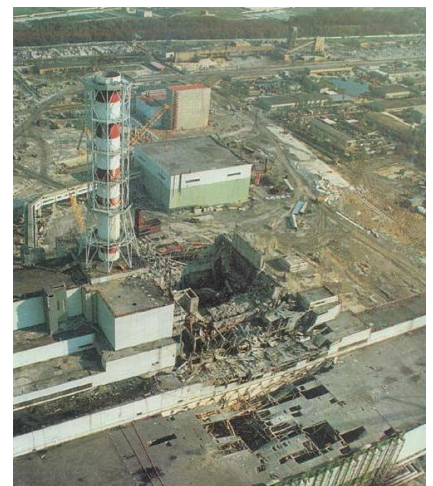
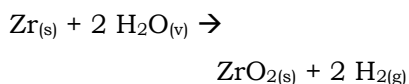


Figura 4 – Foto aérea dos destroços da explosão do reator número quatro da usina de Chernobyl, Ucrânia.

água existente no reator. A radioatividade deriva do material radioativo que saiu do reator e foi arremessado para fora. Este material radioativo, por sua vez, foi levado pelo vento para boa parte da Europa.



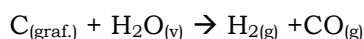
Algumas parte do reator (varetas que dão suporte ao combustível nuclear) são feitas de uma liga de zircônio (zircaloy). Da mesma forma que o alumínio, o zircônio forma uma fina camada de óxido de zircônio que o protege contra a oxidação. Porém, em temperaturas elevadas, esta camada de óxido se decompõe, possibilitando a seguinte reação:



Gás hidrogênio é extremamente explosivo. Na usina de *Three Mile Island*, nos EUA, em 1979, formou-se 1000 m³ de gás hidrogênio no reator. Felizmente neste caso, o hidrogênio pode ser removido antes de uma possível explosão.

Ainda contribuindo para a grande explosão em Chernobyl, temos a água que, na temperatura em que foi aquecida (em torno de 1000 °C) e sob pressão, reage com o carbono grafite formando uma mistura explosiva conhecida como gás

d'água, conforme a equação abaixo:



Esta mistura de gases juntamente com a pressão de vapor de água que estava sendo gerada, foi responsável pela grande explosão que espedaçou a tampa do reator que tinha uma massa de mil e duzentas toneladas! O grafite do reator, quando aquecido, pega fogo, o que gerou um grande incêndio. E pior: 50 toneladas de combustível nuclear foram lançados na atmosfera, dez vezes mais que a bomba de Hiroshima! As consequências disto, como veremos a seguir, são catastróficas.

Quais as consequências da radiação?

Todos conhecem o incrível Hulk, certo? Bem, na eventual hipótese de alguém não conhecer este herói da ficção, vamos a um pequeno resumo de sua história.

Um físico nuclear, em um experimento que dá errado (como o de Chernobyl), é bombardeado por radiação gama. Após este evento, ele passa a adquirir super poderes, oriundos da mutação genética que a radiação gama gerou, que incluem uma força fora do comum, com músculos que rasgam as roupas do físico durante a sua transformação no Incrível Hulk, nome como ficou conhecido o monstro da cor verde que lhe caracteriza. O que há de verdade e de mentira nesta fantástica história de

ficção? Vejamos neste último capítulo do artigo os efeitos da radioatividade no ser humano.

A radioatividade está em todo lugar e somos afetados por ela desde o momento que somos concebidos até a nossa morte. O ar que você respira, o chão que você pisa, a água que você bebe, o lugar que você vive, essencialmente, todo o ambiente ao seu redor contém a radioatividade. A medicina usa a radioatividade em alguns exames e tratamentos (conforme mostra a **Tabela 1**). Será a radioatividade benéfica ou vilã? Vejamos algumas considerações.

A radiação que estamos expostos por toda a nossa vida compreende o que é chamado de 'radiação de fundo'. A maior parte dessa radiação é natural e surge a partir de três fontes. Radiação que se origina a partir do sol e do espaço é chamada 'radiação cósmica'. A radiação cosmogênica é aquela que vem de radioisótopos formados/presentes na atmosfera, que podem surgir a partir da interação da radiação cósmica com as substâncias e elementos presentes. A terceira fonte de radiação natural é proveniente de radionuclídeos primordiais (elementos radioativos, que sempre estiveram presentes na terra) e é chamada de radiação terrestre (veja **Tabela 2**).

Dos 340 isótopos encontrados na natureza, apenas cerca de 70 são radioativos, incluindo todos os isótopos com números atômicos maiores que 83. Muitos destes radionuclídeos não contribuem significativamente para a nossa exposição à radiação devido a sua baixa abundância.

Tabela 1 - Exemplos de aplicações de radionuclídeos na medicina

Isótopo	Meia vida*	Uso
¹¹ C	20,3 m	Varredura do cérebro
⁵¹ Cr	27,8 d	Determinação do volume de sangue
⁵⁷ Co	270 d	Medida da absorção de vitamina B ₁₂
⁶⁰ Co	5,2 a	Terapia contra câncer
¹⁵³ Gd	242 d	Determinação da densidade óssea
⁶⁷ Ga	78,1 h	Varredura para procura de tumores de câncer
¹³¹ I	8,0 d	Terapia na tireóide
⁵⁹ Fe	44,4 d	Deteção de anemia
²²⁶ Ra	1600 a	Terapia contra câncer
²⁴ Na	14,6 h	Localização de obstruções no fluxo sanguíneo
³ H	12,2 a	Determinação da água total do corpo
¹³³ Xe	5,2 d	Imagem do pulmão

* abreviações: a = anos; d = dias; h = horas; m = minutos.

Tabela 2 – Relação de fontes naturais e artificiais de radiação e o percentual que elas correspondem a radiação nuclear total que estamos expostos.

Fonte	Exposição (%)
Fontes naturais	
Radônio	55
Radiação cósmica	8
Radiação terrestre	8
Radiação interna	11
Fontes geradas pelo homem	
Raios X (medicina)	11
Medicina Nuclear	4
Produtos consumidos	3
Outras fontes	< 1

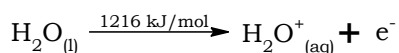
A tarefa de avaliar as consequências da radiação para nós, seres humanos, é complicada, pois estas consequências muitas vezes não são previsíveis, estando sujeitas a vários fatores, como tipo de radiação, tempo de exposição, local em que incide a radiação, entre outros. Apesar disso, tentaremos dar uma dimensão aproximada da exposição radioativa que diversas pessoas tiveram com o acidente de Chernobyl. Portanto, trataremos apenas das principais radiações provenientes do núcleo atômico (α , β e γ), desprezando os outros tipos de radiações existentes (veja **Figura 5**).

Os raios γ e muitas das partículas α e β produzidas em reações nucleares tem energia mais do que suficiente para quebrar ligações químicas interatômicas, arrancando elétrons e produzindo espécies com carga positiva (*papo de cientista*: íons). Portanto, os produtos do decaimento radioativo são exemplos da conhecida **radiação ionizante**.

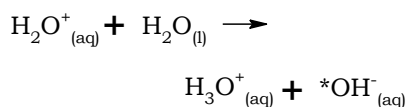
A ionização de átomos (e moléculas) nos tecidos vivos resulta no dano aos mesmos, tais como queimaduras e alterações moleculares que podem levar à ‘doença de radiação’,

câncer e defeitos no nascimento de filhos de pessoas contaminadas. Até mesmo os cientistas que trabalharam pela primeira vez com estes materiais radioativos e que, por não estarem cientes dos perigos, alguns deles sofreram por isso. Marie Curie, por exemplo, notável cientista ganhadora do prêmio Nobel, morreu da leucemia causada pelos muitos anos de exposição à radiação dos elementos rádio, polônio, e outros radionuclídeos que ela trabalhava.

No caso da água (principal constituinte do nosso corpo), quando a radiação incide sobre ela, há remoção de um elétron, conforme equação abaixo:



O íon de carga positiva proveniente da ionização reage com outra molécula de água para formar H_3O^+ e uma espécie com número de elétrons ímpar chamada radical livre hidroxila:



A rápida reatividade química destes radicais livres como a hidroxila com biomoléculas, muitas vezes ameaçam o bom funcionamento da célula. Portanto, a radiação pode provocar alterações no mecanismo bioquímico que controla o crescimento da célula. Isto é mais provável (ou mais perigo) de ocorrer nos tecidos em que as taxas de divisão celular são normalmente mais rápidas. A medula óssea é um deles, onde bilhões de glóbulos brancos (chamados leucócitos) são produzidos a cada dia para fortalecer nosso sistema imunológico. Danos a nível molecular na medula óssea podem levar à leucemia, uma produção descontrolada de leucócitos que, por não estarem devidamente formados, não pode destruir invasores patogênicos que, por ventura, entram em nosso organismo. Dependendo da imu-

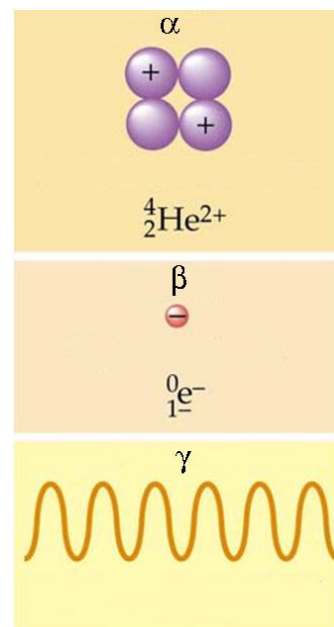


Figura 5 – Principais tipos de radiação de origem nuclear: α , β e γ .

nidade da pessoa, pode haver óbito.

Como vimos, somos atingidos deste os nossos primeiros dias de vida por radiação, fato que se estende até nossa morte. Porém, se a dose de radiação recebida for grande, estas complicações tornam-se mais intensas.

Esta exposição à radiação é expressa no SI (sistema internacional de unidades) em gray (Gy). Um gray é equivalente a absorção de 1 J/kg (joule por quilograma, ou seja, energia por uma certa massa). Embora a unidade gray expresse a quantidade de radiação ionizante a qual o organismo é exposto, ela não permite estabelecer uma relação entre a energia absorvida e a quantidade de tecido lesado. Diferentes produtos das reações nucleares afetam diferentemente os tecidos vivos. Para levar em consideração estas diferenças, valores da eficácia biológica relativa (do inglês *Relative Biological Effectiveness* – RBE) tem sido estabelecidos para as várias formas de radiação ionizante. Quando a dosagem em grays é multiplicada pelo fator RBE da forma de radiação, o produto gera uma nova unidade: sieverts (Sv). A **Tabela 3** resume os efeitos das radiações a partir da

Tabela 3 – Efeitos esperados a partir do grau de absorção da radiação nuclear.

Dose (Sv)	Efeitos tóxicos
0,05 – 0,25	Possibilidade (baixa) de desenvolvimento de câncer ou mutações genéticas do DNA
0,25 – 1,0	Redução temporária na contagem de glóbulos brancos
1,0 – 2,0	Doença da radiação: fadiga, vômitos, diarreia, prejuízo ao sistema imunológico.
2,0 – 4,0	Doença da radiação severa: sangramento intestinal, destruição da medula óssea
4,0 – 10,0	Morte, geralmente devido a infecções, dentro de semanas.
> 10,0	Morte em horas.

dose em que o ser humano é exposto.

Um RBE de 20 para partículas α pode levar a conclusão de que estas constituem a maior ameaça à saúde quando falamos em radioatividade. Mas isto não é verdade, pois as partículas α são tão grandes que têm pouco poder de penetração. Elas são interrompidas por uma folha de papel, a sua roupa, ou mesmo uma camada de pele morta. Por outro lado, se você ingerir ou respirar um emissor de radiação α , os danos no tecido podem ser graves, porque as partículas α , pesada, não precisa viajar muito longe para causar dano celular. Raios γ são considerados a forma mais perigosa de radiação que emana de uma fonte fora do corpo, porque eles têm o maior poder de penetração entre as principais formas de radiação, conforme ilustra a **Figura 6**.

Os moradores do assentamento de Pripjat, onde estava localizada a usina de Chernobyl, começaram a ser retirados do local somente no dia seguinte, as 14 h (cerca de 36 horas após o acidente). Foi preciso uma semana para retirar os 135 mil habitantes e criar uma zona de exclusão de 30 km da usina. Este tempo, no entanto, foi mais do que suficiente para contaminar boa parte da população desinformada.

Estima-se que a explosão da usina liberou para a

atmosfera cerca de 200 vezes mais radioatividade que as bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki juntas. Muitos dos bombeiros e trabalhadores da usina foram expostos a mais de 1 Sv de radiação. Pelo menos 30 deles morreram nas semanas após o acidente. Muitos dos mais de 600.000 trabalhadores que limpavam a área ao redor do reator apresentaram sintomas de 'doença da radiação', e cerca de 5 milhões de pessoas na Ucrânia, Bielorrússia e Rússia foram expostas à precipitação nos dias seguintes ao acidente. A nuvem de radioatividade libertada por Chernobyl espalhou-se rapidamente por toda a Europa do Norte (veja **Figura 7**). Dentro de duas semanas, o aumento dos níveis de radioatividade foram detectados ao longo de todo o Hemisfério Norte. O acidente pro-

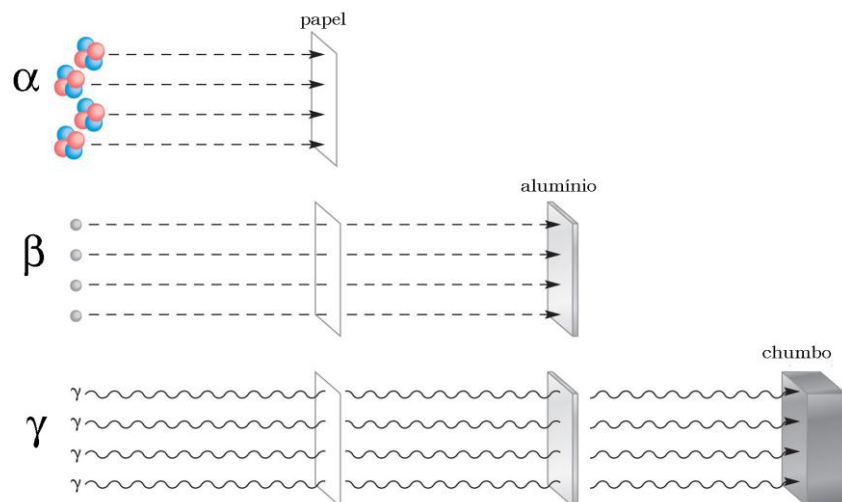


Figura 6 – Ilustração do poder de penetração das radiações α , β e γ .

duziu um aumento global da exposição à radiações ionizantes estimada entre 0,05 e 0,5 mSv / ano. Considerando que a exposição anual natural a radiação fica em uma faixa de 1,5 a 6 mSv/ano, trata-se de uma fração significativa.

Estudos dos efeitos biológicos da radiação do acidente de Chernobyl indicou um aumento de 200 vezes no incidência de câncer de tireóide em crianças. Os nascidos nesta região oito anos após o acidente tinham o dobro do número de mutações em seu DNA.

Os números oficiais dizem que 4000 pessoas deverão morrer de câncer devido a exposição à radiação. Porém, há outros cientistas que dizem que o acidente pode ser responsável por 25 mil casos em todo o mundo, 10 mil só na Rússia, num período de 70 anos. Muitos soldados, na tentativa de evitar mais contaminação, foram expostos a altas doses de radiação (veja **Figura 8**)

Novamente temos lados positivos nesta história. De lá para cá, não houve nenhum acidente nuclear significativo, graças talvez as cinco convenções internacionais de segurança que foram realizadas nestes quase vinte e cinco anos após Chernobyl. Hoje, os reatores nucleares possuem regras mais rígidas de segurança, mas o risco nunca é zero.

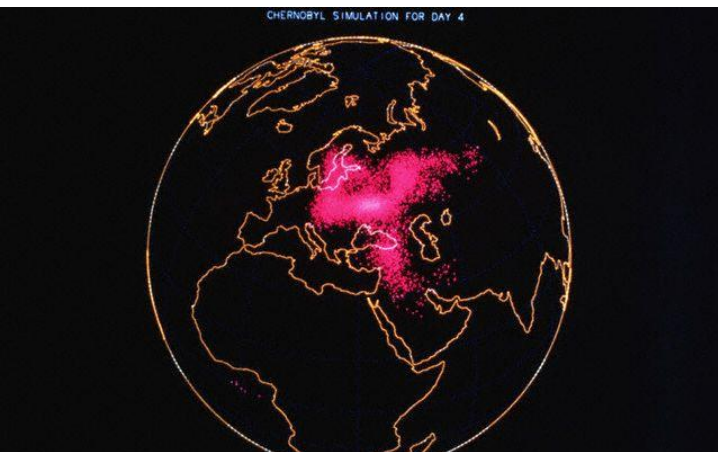


Figura 7 - A figura mostra uma simulação da disseminação do material radioativo em todo o Hemisfério Norte após 4 dias do acidente em Chernobyl.

O **Emiliano Chermello** é licenciado em química pela Universidade de Caxias do Sul e Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela mesma instituição. Leciona em escolas de ensino médio e pré-vestibular na Serra Gaúcha.



Visite o site:
www.quimica.net/emiliano



Figura 8 - Liquidatários (ou 'bio-robôs' como assim ficaram sendo conhecidos) limpando o teto do reator. No início, as autoridades tentaram limpar os restos radioativos usando robôs japoneses e russos, mas eles não funcionaram adequadamente com a extrema radiação. Por isto, as autoridades decidiram utilizar seres humanos para o trabalho. Os soldados não podiam ficar geralmente mais de 40 segundos cada vez que subiam no teto do reator, tamanha era a radioatividade naquele local. Muitos já morreram ou sofrem de problemas de saúde graves. Observem as 'nuvens brancas' intercaladas na foto, resultado da radiação no local.

Para saber mais:

→ Photo Essay Time Magazine
<http://www.time.com/time/photoessays/chernobyl>

→ Entenda o processo de enriquecimento do urânio
<http://ultimosegundo.ig.com.br/mundo/entenda+o+processo+de+enriquecimen-/n1237592517990.html>

→ Apostilas do CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear)
<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>

→ Topical Conference on Plutonium and Actinides - p. 215 e 216; 219 e 220, Disponível em:
<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/docs1/00326352.pdf>

→ Documentário Discovery Channel
<http://www.youtube.com/watch?v=EwS9-dC-dKg>

→ Infográfico sobre o acidente
http://n.i.uol.com.br/ultnot/infografico/0425_chernobyl.swf

→ Wilson, R. A visit to Chernobyl. *Science* 26 June 1987: Vol. 236. n°. 4809, pp. 1636 – 1640.

→ Atwood, C. H. Chernobyl – What Happened? *J. Chem. Educ.*, 1988, 65 (12), p 1037.

→ Wildlife defies Chernobyl radiation
<http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/4923342.stm>

→ Growing Up with Chernobyl
<http://www.nslr.ttu.edu/personnel/RJBaker/Publications/346-Grow-ing%20up%20with%20Chernobyl-Chesser%20and%20Baker-2006.pdf>

Este material pode ser reproduzido por completo ou parcialmente, desde que seja citada a fonte.