

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE FÍSICA

FABRÍCIA DA SILVA GONÇALVES

**100 anos de acidentes envolvendo radiação: Uma análise histórico-científica dos  
principais eventos**

Uberlândia

2023

FABRÍCIA DA SILVA GONÇALVES

**100 anos de acidentes envolvendo radiação: Uma análise histórico-científica dos principais eventos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Física Médica

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Perini

Uberlândia

2023

FABRÍCIA DA SILVA GONÇALVES

**100 anos de acidentes envolvendo radiação: Uma análise histórico-científica dos principais eventos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Física Médica.

Uberlândia, 02 de fevereiro de 2023.

Banca Examinadora:

---

Profa. Dra. Ana Paula Perini – UFU

Orientadora

---

Prof. Dr. Lucio Pereira Neves - UFU

Membro

---

Prof. Dr. Mauricio Foschini - UFU

Membro

Dedico este trabalho à minha família, aos meus professores e amigos, que estiveram presentes durante essa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os professores que tive contanto durante a minha formação acadêmica, em especial, a minha orientadora Profa. Dra. Ana Paula Perini. Obrigada por toda a paciência, incentivo, carinho e compreensão. Agradeço a Universidade Federal de Uberlândia e o Instituto de Física, pelos grandes ensinamentos.

Agradeço também a minha família e amigos por todo o suporte fornecido, os meus pais, irmãos, e principalmente as minhas sobrinhas por sempre estarem presentes ao meu lado, dando todo o apoio possível e incentivos para que eu obtivesse minha formação acadêmica.

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro da UFU, e pelas agências de fomento Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio das pelas bolsas de Produtividade em Pesquisa 312124/2021-0 (Ana Paula Perini) e 314520/2020-1 (Lucio Pereira Neves), pelo Programa MAI DAI 403556/2020-1, pelo Projeto UNIVERSAL 407493/2021-2 e Projeto INCT 406303/2022-3; e FAPEMIG, por meio dos projetos APQ-02934-15, APQ-03049-15 e APQ-04215-22.

*“Philosophy is what every man does, seeking to understand (through reflection) his being and his world, while Science is looking for evidence of our thinking about being and the world.”*

(Thomson Dablemond)

## RESUMO

Para que aconteça o processo de construção do conhecimento científico é preciso que haja a incorporação de conceitos já estudados, assim o discernimento a respeito de acidentes envolvendo radiação se faz importante para a otimização dos procedimentos envolvendo o uso da radiação, bem como o aprimoramento da proteção radiológica. Dessa forma, com finalidades informativas, esse trabalho traz uma revisão da bibliografia encontrada em bancos de pesquisas acerca do tema, acidentes envolvendo radiação no período de 100 anos, desde 1920 a 2020. Para a realização da revisão, foi feito o fichamento de artigos e livros, separando informações sobre valores de doses de radiação, países, elementos radioativos envolvidos, e tipos de eventos classificados em diferentes categorias mais recorrentes, com diferentes incidências ao longo dos anos, para auxílio no estudo, analisando o contexto histórico-científico da época. Com a apresentação de gráficos e tabelas classificando acidentes bem como a recorrência, foi possível observar que acidentes com irradiadores seguidos de acidentes de criticalidade e acidentes com fontes órfãs ocorrem com maior frequência, e os países com maior incidência de acidentes são: China, União das Repúblicas Socialistas Soviéticas e Estados Unidos da América. Contudo, a carência de certas informações a respeito dos acidentes, demonstra que se faz necessária pesquisa em diversas literaturas para a busca de eventos reportados de modo tardio, além de informações acerca de procedimentos de controle e protocolos de segurança, colaborando assim, para a ampliação do conhecimento na área.

**Palavras-chave:** Contexto Histórico-Científico. Acidentes. Radiação.

## ABSTRACT

For the construction of scientific knowledge to take place, concepts that have already been studied need to be incorporated, so discernment regarding accidents and involving radiation becomes important for the optimization of procedures involving its use, as well as the improvement of radiological protection. Thus, with informative purposes, this work brings a review of the bibliography found in research banks about accidents involving radiation in the period of 100 years, from 1920 to 2020. To accomplish the review, articles and books were registered, separating information about dose values, countries, elements, and types of events classified into different most recurrent categories, with different events over the years, analyzing the historical-scientific context. With the presentation of graphs and tables classifying accidents as well as recurrence, it was possible to observe that accidents with radiators, followed by criticality accidents and accidents with orphan sources occur more frequently, and the countries with the highest incidence of accidents are China, Union of Soviet Socialist Republics and United States of America. However, the lack of certain information regarding accidents demonstrates the need for research in different literatures in order to search for events reported late, in addition to information about control procedures and safety protocols, thus contributing to the expansion of knowledge in the area.

**Keywords:** Historical-scientific context. Accidents. Radiation.



## LISTA DE ABREVIATURAS

### Meses

Jan Janeiro

Fev Fevereiro

Mar Março

Abr Abril

Mai Maio

Jun Junho

Jul Julho

Ago Agosto

Set Setembro

Out Outubro

Nov Novembro

Dez Dezembro

### Países e Regiões

ARG Argentina

BEL Bélgica

BGD Bangladesh

BGR Bulgária

BLR Bielorrússia

BRA Brasil

CHE Suíça

CHL Chile

CHN China

DEU Alemanha

DZA Argélia

EGY Egito

EST Estónia

GEO Geórgia

HUN Hungria

IRN Irão

ISR	Israel
ITA	Itália
JPN	Japão
KOR	Coréia do Sul
MEX	México
NOR	Noruega
ONA	Oceano Atlântico
ONG	Oceano Glacial Ártico
ONP	Oceano Pacífico
PER	Peru
RUS	Rússia
SLV	El Salvador
THA	Tailândia
TUN	Tunísia
TUR	Turquia
UK	Reino Unido
USA	Estados Unidos da América
USSR	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
YUG	Yugoslávia
ZAF	África do Sul

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1 – 100 principais acidentes com valores de dose no período de 100 anos avaliados neste trabalho.....	22
Tabela 2 – Número de acidentes a cada década avaliados neste trabalho.....	30
Figura 1 – Número de acidentes a cada década, no período de 1920 a 2020, avaliados neste trabalho.....	31
Tabela 3 – Classificação e quantificação de acidentes nos últimos 100 anos avaliados neste trabalho.....	33
Figura 2 – Distribuição da classificação e quantificação de acidentes e nos últimos 100 avaliados neste trabalho.....	33
Tabela 4 – Incidência de acidentes e por países avaliados neste trabalho.....	34
Tabela 5 – Quantidade de acidentes envolvendo radiação, avaliados neste trabalho, mais frequentes em relação aos países com o maior índice de recorrência.....	38
Tabela 6 – Análise de acidentes do tipo A-ir com fonte $^{60}\text{Co}$ nos países com maior incidência de acidentes avaliados neste trabalho.....	39

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Objetivo .....</b>	<b>15</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÕES.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Contexto Histórico .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Contexto Científico .....</b>	<b>16</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Unidades analisadas.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.1 Unidades antigas .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.2 Unidades atuais .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.3 Fatores de Conversão .....</b>	<b>19</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>19</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>39</b>
<b>Referências.....</b>	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios das civilizações havia uma fascinação sobre a natureza e seus elementos, e com os avanços em diversos campos como astronomia e matemática surgiram mais tarde, no século XVII, os primeiros cientistas, dentre os quais de acordo com o historiador John Gribbin no seu livro publicado em 2002, William Gilbert (1544-1603) fora o primeiro (GRIBBIN, 2002). Séculos depois, no final do século XIX, Willian Crookes (1832-1919) um físico britânico com ligações espíritas inventou um tubo, onde submetia gases a baixas pressões alegando ter descoberto matéria radiante, o que não foi bem aceito no meio científico (FARA, 2009). No entanto, utilizando do tubo de Crookes um professor alemão, Wilhelm Röntgen (1845-1923) realizou uma descoberta, em 1895, que marcou o mundo da ciência e da medicina, a descoberta dos raios X, sendo laureado com o primeiro Nobel da Física, em 1901 (GLASSER *et al.*, 1993).

Com repercussão mundial da radiografia da mão de Anna Ludwig (1839-1919), realizada pelo seu marido Röntgen (PANCHBHAI, 2015), não demorou muito para que cientistas, inventores e médicos dedicassem seus estudos para as características dos elementos da natureza, levando a descobertas como a do francês Henri Becquerel (1852-1908) sobre fenômenos radioativos em 1896, e a da química e física polonesa Marie Sklodowska (1867-1934) sobre a radioatividade (XAVIER *et al.*, 2007). Tamanho foi o impacto da palavra radiação, que no início do século XX começou a ser amplamente utilizada em procedimentos médicos, produção de energia e pesquisas científicas, entretanto, pela fascinação gerada pela palavra e a carência de estudos acerca dos efeitos, diversos produtos foram difundidos como remédios, brinquedos e conveniências.

Dentre os produtos lucrativos pela fascinação com a radiação, vale citar o *Laboratório de Energia Atômica U-238* criado pela fábrica de brinquedos Gilbert em meados de 1950 (MARSH, 2020), a pasta de dente radioativa (*Doramad*) que possuía “energia vital” para a defesa e branqueamento dos dentes com tório em sua composição (ROBISON, 2015), o chocolate com rádio (*Radium Schokolade*) criado pela empresa Alemã Burk&Braun na década de 1930 (ODHAMMAR, 2022), e o remédio *Radithor* que seria a cura de todas as doenças, sendo uma mistura de água e rádio e, foi utilizado durante a década de 1920 até o choque advindo da morte do magnata Eben Byers, em 1932 (MACKLIS, 1990), impacto esse que

causou comoção em diferentes âmbitos, levando a uma má fama da radiação, que até então era vista como remédio milagroso.

Concomitantemente havia o início de fenômenos que influenciaram a história de maneira que seus resultados colaboraram para a era da tecnologia na medicina e na produção de energia, como os primeiros tratamentos médicos e a primeira usina de produção de energia nuclear inaugurada em 1954 na antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (USSR), na cidade de Obninsk (ICHIKAWA, 2016), alavancando o futuro da ciência. Entretanto, com a escassez de estudos no que se refere aos efeitos da radiação em materiais biológicos, muitos acidentes envolvendo radiação ionizante tomaram lugar, principalmente em meados do século XX. Isto acarretou cada vez mais a associação de radiação com algo temeroso, impulsionando estudos voltados para a proteção radiológica.

Estes estudos tiveram início 12 meses após a descoberta dos raios X (CLARKE e VALENTIN, 2005), sendo o engenheiro alemão Wolfram Fuchs (1865-1908) o primeiro a alertar sobre os efeitos do uso de radiações ionizantes sem proteção, recomendando que as exposições fossem o mais curtas possíveis, com distâncias de 30 centímetros entre a área irradiada e a fonte, e a utilização de vaselina na área a ser exposta (KANG, 2016). Ainda durante a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) diversos países começaram a restringir a exposição à radiação, além disso, em 1928, com criação da Comissão Internacional de Proteção Radiológica formada através do Congresso Internacional de Radiologia (LINDELL, 1978), a proteção radiológica se tornou mais rigorosa. Contudo, ainda ocorreram a dispersão de acidentes ocorridos sem a devida proteção radiológica, dado os contextos históricos de cada região.

Diante do exposto é plausível afirmar que a radiação pode causar sérios danos se não for utilizada com cautela, fazendo necessário o estudo da proteção radiológica para que haja o equilíbrio entre benefício e dano, sendo a radiação uma importante ferramenta para o diagnóstico e a solução de casos clínicos, além de colaborar na produção de energia. Por conseguinte, o estudo de acidentes envolvendo radiação é de extrema importância, posto que com a compreensão de eventos do passado é possível identificar vulnerabilidades e elaborar estratégias para evitar acidentes semelhantes no futuro. Além disso, esse estudo pode ajudar a reconhecer e compreender ações de controle de curto e longo prazo, corroborando para a otimização da proteção radiológica e preservando a segurança de trabalhadores, bem como pacientes e civis envolvidos.

## 1.1 Objetivo

Esse trabalho de conclusão de curso possui como objetivo principal a compilação de dados bibliográficos acerca de acidentes radiológicos nos últimos 100 anos, desde 1920 a 2020, analisando contexto histórico e científico, além das medidas tomadas para a proteção radiológica, dados os acidentes mais recorrentes, com a finalidade de trazer informação a futuros pesquisadores e demais interessados no assunto, bem como colaborar para a otimização da proteção radiológica.

## 2 FUNDAMENTAÇÕES

Para as análises dos acidentes envolvendo radiação é importante entender as mudanças históricas ocorridas no século XX, cujo fora um período de grandes mudanças no mundo, algumas influenciadas pelas duas grandes guerras mundiais, a ascensão e queda da União Soviética, o desenvolvimento de armas atômicas, a introdução da tecnologia moderna e a disseminação da globalização. Houve também, o advento de movimentos de direitos civis, o crescimento de organizações internacionais, e o desenvolvimento da Internet. Sendo marcado por níveis sem precedentes de descobertas científicas, invenções de novas tecnologias e a corrida para explorar o espaço sideral (AGAR, 2012). Serão destacados a seguir eventos cronológicos sobre os fatos históricos e científicos com maiores influências em diversos países durante as décadas de 1920 a 2020.

### 2.1 Contexto Histórico

O século XX foi um período de mudanças e avanços significativos em muitas áreas, com enormes avanços na tecnologia, indústria e comunicação que transformaram o mundo. Foi um período em que ocorreram as duas Guerras Mundiais, a Grande Depressão e a Guerra Fria (AGAR, 2012). A seguir são citados diversos eventos que exerceram influência no mundo, durante o período de 1920 a 2020.

**Década de 1920:** Os famosos anos 20, chamados de anos loucos, foram caracterizados pela prosperidade econômica. São introduzidos os primeiros rádios e decolam os primeiros voos comerciais. No entanto, no final da década, ocorre A Grande Depressão que começa com

a queda da bolsa de valores em Nova York no ano de 1929, durando até o início dos anos 1930 (KARNAL, 2007).

**Década de 1930:** Franklin D. Roosevelt nos Estados Unidos inaugura o período do "*New Deal*", com foco no bem-estar social e na recuperação econômica. A Segunda Guerra Mundial começa em 1939, terminando em 1945, com as bombas atômicas lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki no Japão, e as Nações Unidas são estabelecidas (AGAR, 2012).

**Década de 1940:** Os anos do pós-guerra trazem o surgimento da Guerra Fria em 1947, ocasionando a polarização mundial, além do início da Corrida Espacial.

**Década de 1950:** Os primeiros computadores são desenvolvidos. A União Soviética lança o primeiro satélite artificial, denominado Sputnik. Nos Estados Unidos, o movimento pelos direitos civis ganha força.

**Década de 1960:** O movimento pelos direitos civis atinge seu auge e a Guerra do Vietnã começa. Os primeiros seres humanos pisaram na lua.

**Década de 1970:** O fim da Guerra do Vietnã marca o início de um período de agitação política nos Estados Unidos.

**Década de 1980:** A Guerra Fria termina com a queda do Muro de Berlim em 1989, e os primeiros protocolos de internet são desenvolvidos (BLAINEY, 2010).

**Década de 1990:** A União Soviética é dissolvida e os Estados Unidos experimentam um *boom* econômico.

**Década de 2000:** O mundo é transformado pelo surgimento da era digital, e a Guerra ao Terror começa (AGAR, 2012).

**Década de 2010:** O mundo é abalado por desastres naturais como o terremoto e o tsunami de 2011 no Japão e, o tufão Haiyan de 2013 nas Filipinas (RITCHIE *et al.*, 2022).

## 2.2 Contexto Científico

O século XX foi uma época de tremendo avanço no campo da ciência. Ele viu o desenvolvimento de novas tecnologias, o aumento do conhecimento científico e o surgimento de novas disciplinas. O desenvolvimento da bomba atômica e a corrida espacial são duas das realizações científicas mais significativas do século XX. Dentre outros acontecimentos, tem-se:



**Década de 1920:** Os cientistas Niels Bohr e Werner Heisenberg propuseram os princípios da mecânica quântica, que expandiram as ideias da teoria quântica de Max Planck do início do século XX (AGAR, 2012).

**Década de 1930:** Na Alemanha, Lise Meitner, Otto Hahn e Fritz Strassmann descobrem o processo de fissão nuclear, no qual os átomos se dividem para produzir energia.

**Década de 1940:** Os Estados Unidos iniciam o Projeto Manhattan, um programa de pesquisa ultrassecreto para desenvolver a primeira bomba atômica do mundo.

**Década de 1950:** James Watson e Francis Crick descobriram a estrutura do DNA, revelando o projeto de toda a vida (AGAR, 2012).

**Década de 1960:** Theodore Maiman inventou o primeiro laser funcional, que viria a revolucionar a comunicação, a cirurgia e o entretenimento (TOWNES, 2007).

**Década de 1970:** O primeiro microprocessador do mundo é lançado, inaugurando a era moderna da tecnologia da computação.

**Década de 1980:** Apple lança o Apple II, um dos primeiros computadores pessoais, revolucionando a forma como as pessoas interagem com a tecnologia (SCHMIDT e ZIMOCH, 2007).

**Década de 1990:** A *World Wide Web* conecta computadores ao redor do mundo, criando a internet como a conhecemos hoje (AGAR, 2012).

**Década de 2000:** Todo o genoma humano é mapeado pela primeira vez pelo Projeto Genoma Humano (COLLINS *et al.*, 2003).

**Década de 2010:** É lançado o DARPA *Robotics Challenge*, criando robôs capazes de realizar tarefas complexas (KROTKOV *et al.*, 2018).

### 3 METODOLOGIA

Na realização desse trabalho, foram realizadas pesquisas em livros, sites acadêmicos, bem como bibliotecas online sobre o tema proposto. A pesquisa se deu pela compilação das informações na forma de fichamento de dados mais relevantes à pesquisa, tais como: locais onde ocorreram os acidentes envolvendo radiação, período, classificação de acidentes quanto aos tipos, doses de radiação observadas e elementos envolvidos. A partir dos dados foram elaborados tabelas e gráficos com análises relacionadas à recorrência de acidentes em relação as décadas, além de dados tabelados acerca dos tipos de eventos e incidência em cada país,

considerando os 100 principais acidentes com valores de dose encontrados para o período de 100 anos, desde 1920 a 2020, com os artigos e livros utilizados referenciados.

O embasamento da metodologia do trabalho foi feito utilizando um levantamento de dados a partir de bancos de pesquisa, ou seja uma metodologia detalhada no sentido de encontrar informações minuciosas de eventos em plataformas de pesquisa, dentre elas o próprio site da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), os Periódicos da CAPES, repositórios de Universidades nacionais como a Biblioteca Digital da Universidade Federal de São Paulo (USP), o Pantheon Repositório Institucional da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), assim como a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), repositórios de Universidades internacionais como Cornell University arXiv, e diversos bancos de artigos e livros publicados como o Institute of Educational Science (ERIC), e a plataforma Google Scholar.

As palavras-chave utilizadas nas pesquisas foram principalmente: Cronologia de acidentes, Cronologia científica do século XX, Cronologia histórica no século XX, História da Radiação e Radioatividade, História da Proteção Radiológica e Acidentes com nomes específicos e datas determinadas. E em inglês: *Chronology of accidents, Scientific chronology of the 20th century, Historical chronology in the 20th century, History of Radiation and Radioactivity, History of Radiation Protection and Accidents with specific names and specific dates.*

Assim, os critérios usados foram valores de doses estimados, e principais acontecimentos citados na história voltados para os acidentes do período de 1920 a 2020. Com essa linha de raciocínio foi possível selecionar 100 principais acidentes de diversos países ao longo dos anos no período de 100 anos com início em 1920, com valores de doses adaptados para unidades atuais por meio de conversões, sendo estes citados na Tabela 1, além de uma análise da quantidade de eventos com contexto histórico e científico de 1920 a 2020 apresentados na Tabela 2 e no Gráfico 1, bem como uma classificação adaptada de (JONHSTON, 2022) dos tipos mais comuns de eventos mostrada na Tabela 3 e no Gráfico 2. Na Tabela 4 foi mostrada a incidência dos tipos de eventos, e sua frequência nos 36 países e regiões analisados no trabalho em questão, e a partir dos dados da Tabela 4 foi feita a Tabela 5, com a quantidade de acidentes envolvendo radiação mais frequentes em relação aos países com o maior índice de ocorrência. Por fim, uma análise de casos de acidentes com irradiadores foi apresentada na Tabela 6.

Para o desenvolvimento das análises dos resultados, algumas grandezas dosimétricas foram utilizadas, sendo suas unidades descritas nas seções a seguir.

### 3.1 Unidades analisadas

As unidades radiológicas são fundamentais para a análise de quantidades de dose, facilitando, assim, os aprimoramentos da proteção radiológica acerca das situações. Algumas unidades dosimétricas não são mais usadas após a implementação do Sistema Internacional de Medidas (SI), no entanto, unidades antigas como o rad e rem ainda são usadas por alguns médicos e cientistas, predominantemente em países como os Estados Unidos da América (CONNOR, 2019).

#### 3.1.1 Unidades antigas

Dentre as unidades radiológicas antigas ou tradicionais, utilizadas nesse trabalho, se encontram o rem (do inglês *Roentgen Equivalent Man*) e o rad (do inglês *Radiation Absorbed Dose*), em que o rem é uma unidade de dose equivalente, e o rad é uma unidade relacionada a dose absorvida. Dessas unidades o rad ainda é utilizado em aplicações médicas atualmente, no entanto, as unidades do SI são mais comumente encontradas em dados de proteção radiológicas (TAUHATA *et al.*, 2011).

#### 3.1.2 Unidades atuais

Em relação às unidades radiológicas atuais tem-se o Sievert (Sv) para medição de grandezas de proteção e o Gray (Gy) para medição de grandezas físicas. O Sievert é a unidade no SI para dose equivalente ou dose efetiva, e o Gray é a unidade no SI utilizada para dose absorvida (TAUHATA *et al.*, 2011).

#### 3.1.3 Fatores de Conversão

A partir das informações citadas é possível realizar a conversão entre as unidades, posto que rem e Sievert medem a dose equivalente ou dose efetiva, e seu fator de conversão é dado por  $100 \text{ rem} = 1 \text{ Sv}$ . No caso das unidades rad e Gy, que medem dose absorvida, o fator de conversão é dado por  $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$  (CÁRDENAS, 2010).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio da seleção de artigos e livros em plataformas de pesquisa, os dados encontrados foram compilados em tabelas e gráficos para o auxílio da análise do tema proposto,

em relação aos contextos históricos dos procedimentos de proteção radiológica em acidentes recorrentes, com maior incidência em países no decorrer de 100 anos, com início em 1920.

Em relação aos tipos de acidentes mais recorrentes foi observado, dado o espaço amostral de 100 principais acidentes, nos 36 países e regiões analisados, como sendo acidentes com irradiadores de radiação, seguidos de acidentes de criticalidade e acidentes com fontes órfãs. Dentre os países com maior incidência de acidentes tem-se a China (CHN), antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (USSR) e Estados Unidos da América (USA).

Na Tabela 1 são dispostos os seguintes dados referentes aos acidentes: década, o mês e ano, classificação junto com a quantidade de acidentes (referentes à classificação mostrada na Tabela 3), cidades e países onde aconteceram, com respectivos valores de dose, tanto nas unidades antigas rem e rad quanto nas equivalentes atuais encontradas no Sistema Internacional de medidas (SI), respectivamente Sv (Sievert) e Gy (Gray), e elementos radioativos relacionados. A Tabela 2 detém da quantidade dos principais acidentes compreendidos durante as décadas de 1920 a 2020, dados distribuídos na Figura 1, e a disposição da classificação de acidentes encontra-se na Figura 2. Na Tabela 3 estão apresentadas as classificações para os tipos de acidentes de acordo com (JONHSTON, 2022). Na Tabela 4 encontram-se a quantidade de acidentes específicos referentes aos países analisados, com a interseção dos acidentes mais recorrentes nos países com maior incidência na Tabela 5. Por fim, na Tabela 6 é apresentada uma análise de casos de acidentes com irradiadores de radiação, com fonte  $^{60}\text{Co}$ , nos países com maior incidência.

Tabela 1 – 100 principais acidentes com valores de dose no período de 100 anos avaliados neste trabalho

(continua)

<b>Década</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Nome/Cidade</b>	<b>Clas.</b>	<b>País</b>	<b>Dose</b>	<b>Elemento</b>	<b>Referência</b>
1920~1929	1920	Meninas do Rádio	A-i	USA	10000 rem (100 Sv)	Ra	(DIAS <i>et al.</i> , 2019)
1940~1949	Ago 1945	Hiroshima Bombardeio	NW	JPN	80000 rad (800 Gy)	U	(BENNETT, 2005)
1940~1949	Ago 1945	Nagasaki Bombardeio Atômico	NW	JPN	200000 rad (2000 Gy)	Pu	(BENNETT, 2005)
1940~1949	Ago 1945	Experimento Los Alamos	AC	USA	510 rem (5,1 Sv)	Pu	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1940~1949	Mai 1946	Experimento Los Alamos	AC	USA	2100 rem (21 Sv)	Pu	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1950~1959	1950	Rio Techa Resíduos Radioativos	A-d	USSR	790 rad (7,9 Gy)	Cs	(AKLEYEV, 2021)
1950~1959	Mar 1953	Empresa Mayak	AC	USSR	1000 rad (10 Gy)	Pu	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1950~1959	Mar 1954	Castelo Bravo, Atol de Bikini	NT	ONP	300 rad (3 Gy)	Li	(KUNKLE e RISTVET, 2013)
1950~1959	Abr 1957	Empresa Mayak	AC	USSR	3000 rad (30 Gy)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1950~1959	Set 1957	Chelyabinsk, Resíduos	A-d	USSR	150 rem (1,5 Sv)	Pu	(NIKIPELOV <i>et al.</i> , 1989)
1950~1959	Jan 1958	Empresa Mayak	AC	USSR	6000 rad (60 Gy)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1950~1959	Jun 1958	Oak Ridge, Tennessee	AC	USA	460 rem (4,6 Sv)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1950~1959	Out 1958	Vinca, Yugoslavia	AC-RR	YUG	430 rem (4,3 Sv)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1950~1959	Dez 1958	Acidente, Los Alamos	AC	USA	12000 rem (120 Sv)	Pu	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)

Tabela 1 – 100 principais acidentes com valores de dose no período de 100 anos avaliados neste trabalho

(continua)

<b>Década</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Nome/Cidade</b>	<b>Clas.</b>	<b>País</b>	<b>Dose</b>	<b>Elemento</b>	<b>Referência</b>
1960~1969	Mar 1960	Lockport, Nova York	A-x	USA	1000 rad (10 Gy)	-	(GERBER <i>et al.</i> , 1961)
1960~1969	Jun 1960	Moscow Suicídio Radiológico	I-s	USSR	1750 rad (1,75 Gy)	Cs	(ILYIN <i>et al.</i> , 2004)
1960~1969	Out 1960	Submarino K-8, Mar de Barents	A-NR	ONG	200 rem (2 Sv)	-	(NILSEN <i>et al.</i> , 1996)
1960~1969	Jan 1961	Reator SL-1, Idaho RTA	AC-RR	USA	350 rad (3,5 Gy)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1960~1969	Jul 1961	Submarino K-19	A-NR	ONA	6000 rem (60 Sv)	-	(NILSEN <i>et al.</i> , 1996)
1960~1969	Jul 1961	Combinação Química na Sibéria	AC	USSR	200 rem (2 Sv)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1960~1969	1961	Suíça Exposição Acidental	A	CHE	300 rem (3 Sv)	H-3	(IAEA, 1988)
1960~1969	Mar 1962	Fonte Órfã México	A-os	MEX	5200 rad (5,2 Gy)	Co	(IAEA, 1988)
1960~1969	Jan 1963	Fonte Órfã Sanlian, PRC	A-os	CHN	8000 rem (80 Sv)	Co	(IAEA, 1988)
1960~1969	Mar 1963	Acidente em Arzamas-16, Sarov	AC	USSR	550 rem (5,5 Sv)	Pu	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1960~1969	Jul 1964	Wood River, Rhode Island	AC	USA	10000 rem (100 Sv)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1960~1969	1964	Exposição acidental Alemanha	AC	DEU	1000 rad (10 Gy)	H-3	(IAEA, 1988)

Tabela 1 – 100 principais acidentes com valores de dose no período de 100 anos avaliados neste trabalho

(continua)

<b>Década</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Nome/Cidade</b>	<b>Clas.</b>	<b>País</b>	<b>Dose</b>	<b>Elemento</b>	<b>Referência</b>
1960~1969	Dez 1965	Reator de Mol, Bélgica	AC	BEL	500 rem (5 Sv)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1960~1969	Out 1967	Harmarville, Pensilvânia	A-ir	USA	600 rem (6 Sv)	-	(ORTIZ <i>et al.</i> , 2000)
1960~1969	Abr 1968	Acidente em Chelyabinsk-70	AC	USSR	3000 rem (30 Sv)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1960~1969	Ago 1968	Acidente em Wisconsin	A-mr	USA	450 rad (4,5 Gy)	Au	(RICKS <i>et al.</i> , 2000)
1960~1969	Set 1968	Exposição Acidental Alemanha	A-s	DEU	100 rad (1 Gy)	-	(SCHNEIDER <i>et al.</i> , 1969)
1960~1969	Dez 1968	Empresa Mayak	AC	USSR	2450 rem (24,5 Sv)	Pu	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1970~1979	Fev 1971	Acidente em Irradiador	A-ir	USA	260 rad (2,6 Gy)	Co	(BECK, 1980)
1970~1979	Fev 1971	Acidente em Kurtchatov	AC	USSR	330 rem (3,3 Sv)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1970~1979	Mai 1971	Acidente em Kurtchatov	AC	USSR	6000 rem (60 Sv)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1970~1979	1971	Fonte Órfã em Chiba	A-os	JPN	130 rem (1,3 Sv)	Ir	(ORTIZ <i>et al.</i> , 2000)
1970~1979	Fev 1972	Acidente em Irradiador, Sichuan	A-ir	CHN	147 rad (1,47 Gy)	Co	(ZIQIANG <i>et al.</i> , 1996)
1970~1979	Dez 1972	Acidente médico, Wuhan	A-s	CHN	245 rad (2,45 Gy)	Co	(ZIQIANG <i>et al.</i> , 1996)
1970~1979	Mai 1974	Local de teste de Semipalatinsk	NT	USSR	150 rem (1,5 Sv)	-	(ADUSHKIN e LEITH, 2001)

Tabela 1 – 100 principais acidentes com valores de dose no período de 100 anos avaliados neste trabalho

(continua)

<b>Década</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Nome/Cidade</b>	<b>Clas.</b>	<b>País</b>	<b>Dose</b>	<b>Elemento</b>	<b>Referência</b>
1970~1979	Jun 1974	Parsippany, Nova Jersey	A-ir	USA	400 rem (4 Sv)	Co	(ORTIZ <i>et al.</i> , 2000)
1970~1979	1975	Acidente com Raio X	A-x	DEU	100 rad (1 Gy)	-	(UNSCEAR, 2000)
1970~1979	Mai 1975	Acidente em Irradiador, Brescia	A-ir	ITA	1200 rem (12 Sv)	Co	(IAEA, 1988)
1970~1979	Jul 1976	Moscow, Russia, USSR	A-ir	USSR	400 rad (4 Gy)	Co	(ILYIN <i>et al.</i> , 2004)
1970~1979	1976	Acidente com Raio X	A-x	DEU	100 rad (1 Gy)	-	(UNSCEAR, 2000)
1970~1979	Jan 1977	Sasolburg, Transvaal	A-rg	ZAF	116 rad (1,16 Gy)	Ir	(UNSCEAR, 2000)
1970~1979	Set 1977	Rockaway, Nova Jersey	A-ir	USA	200 rem (2 Sv)	Co	(ORTIZ <i>et al.</i> , 2000)
1970~1979	1977	Exposição Acidental, Gyor	A-rg	HUN	120 rad (1,2 Gy)	-	(UNSCEAR, 2000)
1970~1979	1977	Zona de Oleoduto, Peru	A-s	PER	200 rad (2 Gy)	Ir	(UNSCEAR, 2000)
1970~1979	Mai 1978	Fonte órfã, Setif	A-os	DZA	140 rem (1,4 Sv)	Ir	(IAEA, 1988)
1970~1979	Dez 1978	Combinação Química da Sibéria	AC	USSR	250 rad (2,5 Gy)	Pu	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1970~1979	1978	Auto exposição	I-s	UK	152 rad (1,52 Gy)	Ir	(UNSCEAR, 2000)
1970~1979	1979	Acidente Radiografia Parana	A-x	ARG	94 rad (0,94 Gy)	-	(UNSCEAR, 2000)



Tabela 1 – 100 principais acidentes com valores de dose no período de 100 anos avaliados neste trabalho

(continua)

<b>Década</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Nome/Cidade</b>	<b>Clas.</b>	<b>País</b>	<b>Dose</b>	<b>Elemento</b>	<b>Referência</b>
1980~1989	Set 1980	Acidente em Shanghai	A-ir	CHN	500 rad (5 Gy)	Co	(ZIQIANG <i>et al.</i> , 1996)
1980~1989	Set 1982	Acidente em Irradiador, Kjeller	A-ir	NOR	2200 rem (2,2 Sv)	Co	(IAEA, 1988)
1980~1989	Set 1983	Acidente em Constituyentes	AC	ARG	3700 rad (3,7 Gy)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1980~1989	Dez 1983	Fonte órfã, Cidade Juarez	A-osd	MEX	450 rem (4,5 Sv)	Co	(BECK, 1980)
1980~1989	Ago 1985	K-431 submarine, Chazhma Bay	A-NR	USSR	220 rad (2,2 Gy)	-	(NILSEN <i>et al.</i> , 1996)
1980~1989	1985	Fonte Órfã, Heilongjiang	A-os	CHN	1000 rem (10 Sv)	Cs	(MOULD, 2000)
1980~1989	Abr 1986	Acidente de Chernobyl, Ucrânia	A-PR	USSR	1600 rem (16 Sv)	-	(MOULD, 2000)
1980~1989	Mai 1986	Exposição Acidental, Kaifeng	A-ir	CHN	350 rad (3,5 Gy)	Co	(MOULD, 2000)
1980~1989	Set 1987	Acidente de Goiânia, Goiás	A-osd	BRA	700 rad (7 Gy)	Cs	(IAEA, 1988)
1980~1989	1987	Acidente em Zhengzhou	A-ir	CHN	135 rad (1,35 Gy)	Co	(UNSCEAR, 2000)
1980~1989	1988	Acidente em Zhao Xian	A-ir	CHN	520 rad (5,2 Gy)	Co	(UNSCEAR, 2000)
1980~1989	Fev 1989	Acidente em San Salvador	A-ir	SLV	800 rem (8 Sv)	Co	(IAEA, 1990)
1980~1989	1989	Acidente com fonte, Bangladesh	A-s	BGD	230 rad (2,3 Gy)	Ir	(UNSCEAR, 2000)

Tabela 1 – 100 principais acidentes com valores de dose no período de 100 anos avaliados neste trabalho

(continua)

<b>Década</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Nome/Cidade</b>	<b>Clas.</b>	<b>País</b>	<b>Dose</b>	<b>Elemento</b>	<b>Referência</b>
1980~1989	1989	Acidente em Witbank	A-rg	ZAF	225 rem (2,25 Sv)	Ir	(UNSCEAR, 2000)
1990~1999	Jun 1990	Acidente em Soreq	A-ir	ISR	1500 rad (15 Gy)	Co	(IAEA, 1993)
1990~1999	Jun 1990	Acidente em Shanghai	A-ir	CHN	1200 rad (12 Gy)	Co	(ZIQIANG <i>et al.</i> , 1996)
1990~1999	Out 1991	Acidente em Irradiador, Nesvizh	A-ir	BLR	1250 rem (12,5 Sv)	Co	(ORTIZ <i>et al.</i> , 2000)
1990~1999	Nov 1992	Fonte Órfã, Jilin, Xinzhou	A-os	CHN	800 rad (8 Gy)	Co	(ORTIZ <i>et al.</i> , 2000)
1990~1999	Nov 1992	Acidente em Irradiador, Wuhan	A-ir	CHN	360 rad (3,6 Gy)	-	(UNSCEAR, 2000)
1990~1999	Out 1994	Fonte roubada, Tammiku	I-t	EST	400 rad (4 Gy)	Cs	(ORTIZ <i>et al.</i> , 2000)
1990~1999	Fev 1995	Zheleznodorozhny	I-a	RUS	800 rad (8 Gy)	Cs	(ILYIN <i>et al.</i> , 2004)
1990~1999	Jan 1996	Fonte Órfã, Jilin, Xinzhou	A-os	CHN	290 rad (2,9 Gy)	Cs	(GENYAO <i>et al.</i> , 1997)
1990~1999	Jun 1996	Fonte Órfã, Tbilisi	A-os	GEO	590 rem (5,9 Sv)	Ra	(IAEA, 2014)
1990~1999	Jul 1996	Fonte Órfã, Gilan	A-os	IRN	450 rem (4,5 Sv)	Ir	(UNSCEAR, 2000)
1990~1999	Jun 1997	Acidente em Arzamas-16, Sarov	AC	RUS	4850 rem (48,5 Sv)	U	(MCLAUGHLIN <i>et al.</i> , 2000)
1990~1999	Set 1997	Acidente de Radiografia Itália	A-rg	ITA	89 rem (0,89 Sv)	Co	(IAEA, 2000)

Tabela 1 – 100 principais acidentes com valores de dose no período de 100 anos avaliados neste trabalho

(continua)

<b>Década</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Nome/Cidade</b>	<b>Clas.</b>	<b>País</b>	<b>Dose</b>	<b>Elemento</b>	<b>Referência</b>
1990~1999	Jan 1998	Acidente com fonte, Harbin	A-s	CHN	500 rad (5 Gy)	Co	(HAN <i>et al.</i> , 2020)
1990~1999	Dez 1998	Fonte Órfã, Istanbul	A-os	TUR	310 rem (3,1 Sv)	Co	(UNSCEAR, 2000)
1990~1999	Fev 1999	Fonte Órfã, Yanango	A-os	PER	150 rem (1,5 Sv)	Ir	(UNSCEAR, 2000)
1990~1999	Abr 1999	Fonte Órfã, Henan	A-os	CHN	610 rem (6,1 Sv)	Co	(HAN <i>et al.</i> , 2020)
1990~1999	Set 1999	Acidente em Toki-mura	AC	JPN	1800 rem (18 Sv)	U	(UNSCEAR, 2000)
2000~2009	Jan 2000	Fonte Órfã, Samut Prakarn	A-os	THA	200 rem (2 Sv)	Co	(IAEA, 2002)
2000~2009	Mar 2000	Acidente com fonte, Xuchang	A-s	CHN	140 rad (1,4 Gy)	Co	(HAN <i>et al.</i> , 2020)
2000~2009	Jun 2000	Fonte Órfã, Meet Halfa	A-os	EGY	750 rad (7,5 Gy)	Ir	(EL-NAGGAR <i>et al.</i> , 2001)
2000~2009	Ago 2000	Fonte Órfã, Samara	A-os	RUS	275 rad (2,75 Gy)	Ir	(ILYIN <i>et al.</i> , 2004)
2000~2009	Dez 2001	Fonte Roubada, Liya	I-t	GEO	570 rad (5,7 Gy)	Sr	(IAEA, 2014)
2000~2009	Out 2004	Acidente em Shandong Jining	A-ir	CHN	2000 rad (20 Gy)	Co	(CHEN <i>et al.</i> , 2011)
2000~2009	Dez 2005	Fonte Órfã em Nueva Aldea	A-os	CHL	150 rad (1,5 Gy)	Ir	(IAEA, 2009)

Tabela 2 – 100 principais acidentes com valores de dose no período de 100 anos avaliados neste trabalho

(conclusão)

<b>Década</b>	<b>Mês/Ano</b>	<b>Nome/Cidade</b>	<b>Clas.</b>	<b>País</b>	<b>Dose</b>	<b>Elemento</b>	<b>Referência</b>
2000~2009	Mar 2006	Acidente em Irradiador, Fleurus	A-ir	BEL	460 rem (4,6 Sv)	Co	(IAEA, 2007)
2000~2009	Mar 2008	Fonte órfã, Rades	A-os	TUN	200 rem (2 Sv)	Ir	(IAEA, 2009)
2000~2009	Abr 2008	Acidente em Taiyuan	A-ir	CHN	1450 rad (14,5 Gy)	Co	(WANG <i>et al.</i> , 2015)
2000~2009	Mar 2009	Acidente de radiografia, Jinju	A-rg	KOR	20 rem (0,2 Sv)	Ir	(IAEA, 2011)
2010~2019	Mar 2011	Acidente em Fukushima	A-PR	JPN	24 rem (0,24 Sv)	U	(IAEA, 2011)
2010~2019	Jun 2011	Acidente em Stamboliyski	A-ir	BGR	530 rad (5,3 Gy)	Co	(BALAJEE e HADJIDEKOVA, 2021)
2010~2019	Jan 2012	Acidente em Chilca, Canete	A-rg	PER	460 rad (4,6 Gy)	Ir	(IAEA, 2018)
2010~2019	Mai 2014	Fonte Órfã, Nanjing,	A-os	CHN	150 rad (1,5 Gy)	-	(HAN <i>et al.</i> , 2020)
2010~2019	Ago 2019	Acidente em Nyonoksa, Russia	AC-RR	RUS	<10000 rad (100 Gy)	Cs	(SPYKMAN, 2020)
2020	Jan 2020	Acidente em Xinxiang, Henan	A-mx	CHN	95 rad (0,95 Gy)	-	(MAO <i>et al.</i> , 2021)

Fonte: Adaptado de (Johnston, 2022).

Clas. Classificações Tabela 1 (Johnston, 2022):

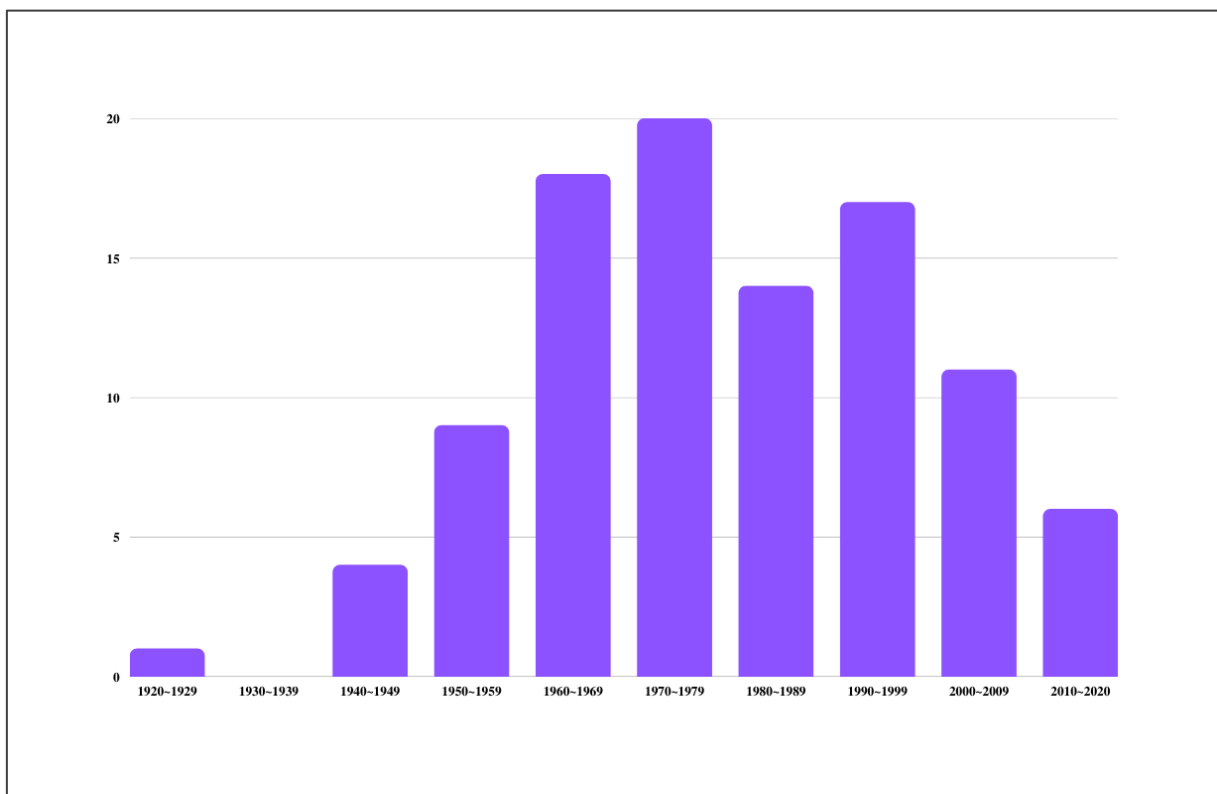
A	Acidente de radiação	A-mr	Acidente radioterapia médica	A-x	Acidente de raio-x
AC	Acidente de criticalidade	A-mx	Acidente radiológico médico	I-a	Exposição intencional de pessoa (agressão)
AC-RR	Acidente de criticalidade envolvendo reator de pesquisa	A-NR	Acidente envolvendo reator naval	I-s	Auto exposição intencional
A-d	Dispersão acidental de material radioativo	A-os	Acidente com fonte órfã	I-t	Exposições resultantes de roubo de fonte
A-i	Exposição interna acidental a radioisótopos	A-osd	Dispersão acidental de fonte órfã	NT	Teste de arma nuclear
A-ir	Acidente com irradiador	A-PR	Acidente envolvendo reator de potência	NW	Uso em combate de arma nuclear
		A-rg	Acidente com radiografia		
		A-s	Exposição acidental à fonte		

Tabela 2 - Número de acidentes a cada década avaliados neste trabalho

<b>Décadas</b> <b>[1920 a 2020]</b>	<b>Número de acidentes</b>
1920~1929	1
1930~1939	0
1940~1949	4
1950~1959	9
1960~1969	18
1970~1979	20
1980~1989	14
1990~1999	17
2000~2009	11
2010~2020	6
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 1 - Número de acidentes a cada década, no período de 1920 a 2020, avaliados neste trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Através da disposição demonstrada na Tabela 1, é possível observar que no espaço amostral observado há flutuações em relação aos valores de dose com o passar dos anos nos diferentes acidentes. Além disso, com a distribuição de acidentes ao longo das décadas apresentada na Figura 1, é visível um pico durante a metade do século XX, e dado o contexto histórico e científico abordado no capítulo 2 em Fundamentações, pode-se entender que esse pico ocorrido nas décadas de 1960 e 1970 detêm de influências dos avanços alcançados mundialmente, após o fim da Segunda Guerra Mundial, e em meados da Guerra Fria. Analisando a Tabela 2 e Figura 1 em relação às décadas é passível entender que o número baixo de acidentes nas décadas de 1920 a 1940, ocorre devido às recém-descobertas, e a limitação de tecnologias envolvendo radiações. O aumento significativo de acidentes nas décadas seguintes (1940 a 1980) pode ser atribuído ao aumento das práticas de usos industriais desenfreados, além do uso em guerras de armamento nuclear, bem como a escassez de compreensão e divulgação dos efeitos adversos do uso descontrolado das radiações. Efeitos esses estudados por diversos médicos, cientistas e estudiosos desde o advento da radioatividade, e, com tais estudos conclusivos dos efeitos prejudiciais, houve um aprimoramento das medidas de segurança e proteção radiológica em procedimentos clínicos, em adição ao controle por meio de protocolos de segurança, voltados para o uso de reatores nucleares, e armamento nuclear como o Tratado de não proliferação de armas nucleares (TNP), o que explica a redução de acidentes nas décadas seguintes de 1980 a 2020 (GASPAR, 2016). No geral, o número de acidentes envolvendo radiação sofreu flutuações significativas ao longo do último século.

Com a Tabela 3, em relação à quantificação e classificação de acidentes, é exposto que, em se tratando dos eventos principais da amostragem, os acidentes com irradiadores são os mais recorrentes, seguidos de acidentes de criticalidade e acidentes com fonte órfãs, dando a entender que, havia uma escassez de informação e falta de treinamento acerca do manuseamento e armazenagem de fontes radioativas, sendo este tópico objeto de estudos da proteção radiológica. Estes estudos foram aprimorados e compilados em normas, visando a segurança das pessoas envolvidas, posto que a Proteção Radiológica detêm de princípios como Justificação da Prática; Otimização que estabelece que os valores de doses utilizados devem ser tão baixos quanto possíveis - princípio ALARA do inglês (*As Low As Reasonably Achievable*) e Limitação de dose, além de diversos planos e protocolos para a utilização de material radioativo e fontes radioativas (CNEN, 2014).

Com o advento dos estudos voltados para a proteção radiológica, medidas e protocolos que visavam a segurança começaram a ser estudados, a partir disso, esforços foram realizados para passar os conhecimentos para trabalhadores com o intuito de evitar acidentes. Um exemplo



de acidente, ocorrido na empresa Mayak, em março de 1953, ocorreu devido à carência de monitoramento adequado para prever um possível acidente de criticalidade e, falta de treinamento dos responsáveis (MCLAUGHLIN *et al.*, 2000). Anos depois, em 1957, na mesma empresa Mayak, foi observado outro acidente, envolvendo a falta de instrumentação para regular parâmetros, com isso, foi estabelecida uma medida para prevenir acidentes de criticalidade, entretanto, como ainda houve acidentes, o projeto foi encerrado em 1958, demonstrado a escassez de conhecimento na época acerca da reatividade de sistemas e, a importância de se obter planos para a proteção radiológica (MCLAUGHLIN *et al.*, 2000).

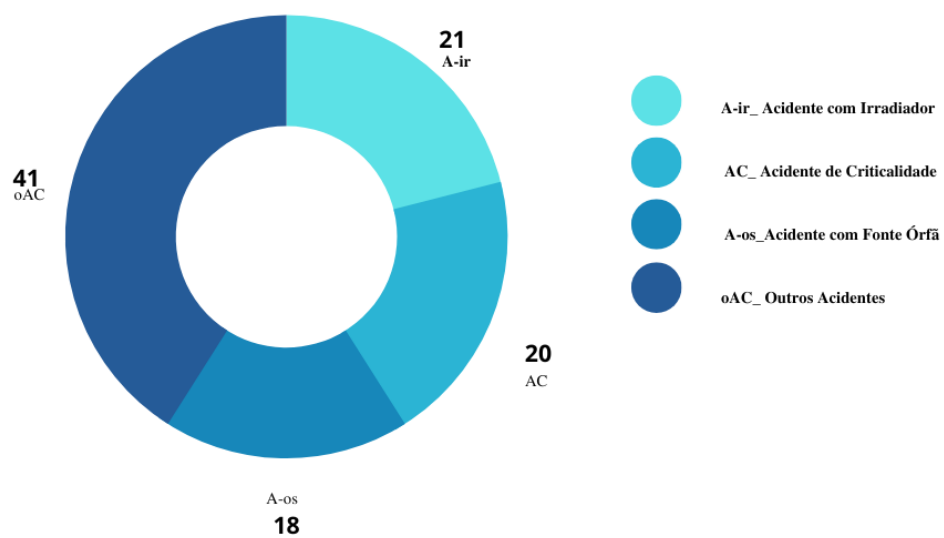
Com esforços para reduzir danos e aplicar medidas de proteção, após o acidente nuclear em Chernobyl, no ano de 1986, foi organizado um sistema para a monitoração meteorológica e radiológica, com a finalidade de entender os níveis de contaminação, além de medidas de proteção para que a população afetada não ingerisse alimentos contaminados (MOULD, 2000). Com isso, foram observados fatores de redução de taxa de dose esperada (EDR) e fatores de descontaminação (DF) (MOULD, 2000). A partir disso, é possível inferir que houve uma maior preocupação acerca dos efeitos da radiação no caminho para o aperfeiçoamento das técnicas voltadas para a proteção radiológica (MOULD, 2000).

Tabela 3 – Classificação e quantificação de acidentes nos últimos 100 anos avaliados neste trabalho

<b>Clas.</b>	<b>Classificação</b>	<b>Quantidade</b>
A-ir	Acidente com irradiador	21
AC	Acidente de criticalidade	20
A-os	Acidente com fonte órfã	18
A-s	Exposição acidental à fonte	6
A-rg	Acidente com radiografia	6
A-x	Acidente de raio-x	4
A-NR	Acidente envolvendo reator naval	3
AC-RR	Acidente de criticalidade envolvendo reator de pesquisa	3
NW	Uso em combate de arma nuclear	2
NT	Teste de arma nuclear	2
I-t	Exposições resultantes de roubo de fonte	2
I-s	Auto exposição intencional	2
A-PR	Acidente envolvendo reator de potência	2
A-osd	Dispersão acidental de fonte órfã	2
A-d	Dispersão acidental de material radioativo	2
I-a	Exposição intencional de pessoa (agressão)	1
A-mx	Acidente radiológico médico	1
A-mr	Acidente radioterapia médica	1
A-i	Exposição interna acidental a radioisótopos	1
A	Acidente de radiação	1
<b>Total</b>		<b>100</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 2 – Distribuição da classificação e quantificação de acidentes nos últimos 100 anos avaliados neste trabalho.



Fonte: Elaborada pela autora (2023)



Tabela 4 - Incidência de acidentes por países avaliados neste trabalho

(conclusão)

País	Incidência	A-ir	AC	A-os	A-s	A-rg	A-x	A-NR	AC-RR	NW	NT	I-t	I-s	A-PR	A-osd	A-d	I-a	A-mx	A-mr	A-i	A
EST	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HUN	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IRN	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ISR	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KOR	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOR	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ONA	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ONG	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ONP	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SLV	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
THA	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TUN	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TUR	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UK	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
YUG	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	100	21	20	18	6	6	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A partir das informações coletadas, foi demonstrado na Tabela 4, a incidência de acidentes envolvendo radiação, tendo em vista os países relacionados a cada tipo de acidente, e com base nas informações, foi possível inferir pela análise da Tabela 5, que os países com maior incidência de acidentes, no geral, em relação ao período de 1920 a 2020 são: China (CHN), a antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (USSR), e os Estados Unidos da América (USA). É importante citar que o espaço amostral compreende apenas os 100 principais acidentes envolvendo radiação reportados, posto que mesmo na atualidade ainda há diversos eventos não reportados ou com carência de informações.

Assim, em um panorama geral, pode-se perceber que países com setores de energia nuclear mais avançados tendem a ter mais acidentes. Isso se deve ao fato de processos mais complexos estarem envolvidos com a energia nuclear e, ao aumento do risco de exposição à radiação. Além disso, países com maior densidade populacional tendem a sofrer mais acidentes devido ao aumento do risco de exposição civil à radiação, e a gravidade dos acidentes de radiação pode variar consideravelmente de país para país. Isso se deve a diferenças nos padrões de segurança, bem como diferenças nos tipos de procedimentos. E, ao analisar os tipos de acidentes mais recorrentes por país, pode ocorrer uma identificação de áreas problemáticas com a finalidade de proporcionar melhorias, garantindo que os padrões de segurança sejam mantidos.

Tabela 5 - Quantidade de acidentes envolvendo radiação, avaliados neste trabalho, mais frequentes em relação aos países com o maior índice de recorrência

País	Incidência de acidentes			
	no geral	A-ir	AC	A-os
CHN	19	9	0	6
USSR	17	1	10	0
USA	13	4	5	0
Total	49	14	15	6

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Analisando os acidentes envolvendo irradiadores, em Instalações de Irradiação na antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (USSR) em 1976, em contraste com os Estados

Unidos da América (USA) em 1977 e a China (CHN) no período de 1980, é possível perceber variações nos valores de doses (Tabela 6). O maior valor de dose foi observado em Shangai (CHN) de 5,2 Sv, e o menor em Rockaway (USA) de 2 Sv (COEYTAUX *et al.*, 2015). Mesmo considerando o menor valor de 2 Sv, é possível observar que este valor excede os limites anuais permitidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que para dose efetiva de corpo inteiro é de 20 mSv para indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE). Sendo assim, é muito importante a disseminação de conhecimento acerca da proteção radiológica, que pode ser feita, por exemplo, por meio de treinamentos periódicos sobre o uso e meios de proteção da radiação para os IOE (CNEN, 2014).

Tabela 6 – Análise de acidentes do tipo A-ir com fonte de  $^{60}\text{Co}$  nos países com maior incidência de acidentes avaliados neste trabalho

<b>País</b>	<b>Cidade</b>	<b>Ano</b>	<b>Dose efetiva (Sv)</b>
CHN	Shangai	1980	5,2 Sv
USA	Rockaway	1977	2 Sv
USSR	Moscow	1976	4 Sv

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

## 5 CONCLUSÕES

Mediante as análises apresentadas, depreende-se que se faz necessário um estudo aprofundado de todos os eventos envolvendo radiações, desde o início de sua utilização, com enfoque nos diversos tipos de acidentes. A análise deve compreender as causas, procedimentos e protocolos tomados, compreendendo os contextos históricos e científicos para assimilar medidas e, colaborar para a otimização dos processos, potencializando a compreensão para a formação do conhecimento histórico-científico na temática da utilização de radiação com segurança, já que quando utilizada de forma controlada, a radiação é uma ferramenta que auxilia em diversas áreas.

Por conseguinte, o escopo geral da amostra de acidentes envolvendo radiação durante o período determinado, demonstra que houve uma intensificação na quantidade de eventos variados com danos visíveis, ao passo que a ciência contemplara avanços em diversas áreas. No entanto, mesmo com ininterrupta de avanços com a sucessão das décadas e a difusão de conhecimentos, os eventos danosos com radiação se mostraram cada vez mais ímpares, constatando os aperfeiçoamentos nas medidas de segurança, e normas de proteção radiológica.

Através da análise dos materiais apresentados, é possível discernir que, com esse estudo por meio de uma visão do contexto histórico e científico ocorre ampliação de conhecimentos acerca dos tópicos abordados, possibilitando uma visão ampliada dos principais acidentes ocorridos de 1920 a 2020, resultando em 100 anos de eventos para análise. Com a avaliação realizada neste trabalho, por meio das tabelas e gráficos, é possível verificar que acidentes com irradiadores, acidentes de criticalidade e com fontes órfãs são os tipos de acidentes mais frequentes, além da China, União das Repúblicas Socialistas Soviéticas e Estados Unidos da América serem os países com maior incidência destes eventos. A principal limitação no trabalho apresentado se demonstra no fato de que muitos acidentes carecem de informações e notificação quanto aos acontecimentos.

## REFERÊNCIAS

ADUSHKIN, Vitaly V.; LEITH, William. The containment of Soviet underground nuclear explosions. **Open-File Report**, 2001. Disponível em:

<<https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr01312>>. Acesso em: 2 jan. 2023.

AGAR, Jon. **Science in the Twentieth Century and Beyond**. Cambridge: Polity, 2012.

AKLEYEV, A. V. Early signs of chronic radiation syndrome in residents of the Techa riverside settlements. **Radiation and Environmental Biophysics**, v. 60, n. 2, p. 203–212, 2021. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33677652/>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

BALAJEE, A. S.; HADJIDEKOVA, V. Retrospective cytogenetic analysis of unstable and stable chromosome aberrations in the victims of radiation accident in Bulgaria. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, v. 861-862, p. 503295, 2021. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33551098/>>. Acesso em: 3 jan. 2023.



BECK, William L. Radiation accident dosimetry. **Nuclear Instruments and Methods**, v. 175, n. 1, p. 150–152, 1980. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0029554X80902876>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

BENNETT, Burton. Most radiation-related deaths happened in 1945. **Nature**, v. 437, n. 7059, p. 620–620, 2005. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005Natur.437..620B/abstract>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

BLAINEY, Geoffrey. **Uma breve história do século XX**. São Paulo: Fundamento Educacional, 2010.

CARDENAS, José Patricio Náhuel. Avaliação dosimétrica de detectores semicondutores para aplicação na dosimetria e micro dosimetria em reatores nucleares e instalações de radiocirurgia. 2010. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**. São Paulo, 2010. Disponível em <[doi:10.11606/T.85.2010.tde-20062011-153437](https://doi.org/10.11606/T.85.2010.tde-20062011-153437)> Acesso em: 6 jan. 2023.

CHEN, Y.; YAN, X.K.; DU, J.; *et al.* Biological dose estimation for accidental supra-high dose gamma-ray exposure. **Radiation Measurements**, v. 46, n. 9, p. 837–841, 2011. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011RadM...46..837C/abstract>>. Acesso em: 5 jan. 2023.

CLARKE, R; VALENTIN, J. A HISTORY OF THE INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Health Physics**, v. 88, n. 6, p. 717–732. 2005. Disponível em: <[https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/2005/05000/A\\_HISTORY\\_OF\\_THE\\_INTERNATIONAL\\_COMMISSION\\_ON.1.aspx](https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/2005/05000/A_HISTORY_OF_THE_INTERNATIONAL_COMMISSION_ON.1.aspx)>. Acesso em: 5 jan. 2023.

**CNEN - Normas para Proteção Radiológica**. Cnen.gov.br. 2014. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=3>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

COEYTAUX, K; *et al.* Reported Radiation Overexposure Accidents Worldwide, 1980-2013: A Systematic Review. **PLOS ONE**, v. 10, n. 3, p. e0118709, 2015. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0118709>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

COLLINS *et al.* The Human Genome Project: Lessons from Large-Scale Biology. Vol 300, 5617, pp 286-290. **Science**. 2003. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1084564>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

CONNOR, N. What is RAD-Gray-Conversion-Units-Definition. Radiation Dosimetry. 2014. Disponível em < <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-rad-gray-conversion-units-definition/>> Acesso em: 6 jan. 2023.

DIAS, ANDRESSA de J.R.; NASCIMENTO, ANDREIA V. do; VICENTE, ROBERTO; DELLAMANO, JOSE C. Caracterização de acidentes radiológicos industriais. São Paulo: **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - GRR**, fevereiro, 2019. (IPEN/GRR-REL-02/19). Aberto. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/29870>. Acesso em: 05 jan. 2023.

EL-NAGGAR, A. M.; MOHAMMAD, M. H.; GOMAA, M. A. "The Radiological Accident at Meet Halfa, Qaluobiya". Proceedings of the 4th International REAC/TS. Conference on the Medical Basis for Radiation Accident Preparedness. **Scientific Research Publishing**. Scirp.org. 2001. Disponível em: <<https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1066304>>. Acesso em: 7 jan. 2023.

FARA, Patricia. **Science: A Four Thousand Year History**. Oxford University Press Inc. New York, 2009.

GASPAR, Carlos. O regime de não-proliferação nuclear. **JANUS 2011-2012 - Portugal num mundo em mudanças**, p. 102–103, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ual.pt/handle/11144/923>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

GENYAO, Y; *et al.* "Joint report of the Jilin 192Ir radiation accident: a clinical study on a case of moderate degree bone marrow form of acute radiation sickness with extremely severe local radiation injury," online at **CRID**. 1997. Disponível em <<http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/eng/doc12350/doc12350-contenido.pdf>>. Acesso em 5 jan. 2023.

GERBER, G; *et al.* "Urinary excretion of several metabolites in persons accidentally exposed to ionizing radiation," **Radiation Research**, 15:314-318. 1961. Disponível em <<https://europepmc.org/article/MED/13704553>> Acesso em: 6 jan. 2023

GLASSER, C. M; *et al.* Surtos epidêmicos de dermatite causada por mariposas do gênero *Hylesia* (Lepidóptera: Hemileucidae) no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista de Saúde Pública**, v. 27, n. 3, p. 217–220, 1993. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/rsp/article/view/23968>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

GRIBBIN, John. *Science: A History 1543-2001*. Ed Allen Lane, 2002.

HAN, L. "Cytogenetic biodosimetry for radiation accidents in China". **Radiation Medicine and Protection**, 1:133-139. 2020. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/journal/radiation-medicine-and-protection/vol/1/issue/3>>.

Acesso em: 4 jan. 2023

IAEA. The Radiological Accident in Goiânia, Brazil. Annex I. Case study that considers the guidance and recommendations provided in this Safety Guide. **IAEA.org**.

Vienna. 1988. Disponível em:

<[https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:52009442](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:52009442)>. Acesso em: 6 jan. 2023.

IAEA. The Radiological Accident in San Salvador, Non-serial Publications. **IAEA**.

Vienna. 1990. Disponível em <<https://www.iaea.org/publications/3718/the-radiological-accident-in-san-salvador>> Acesso em: 4 jan. 2023.

IAEA. The Radiological Accident in Soreq, Non-serial Publications. **IAEA**. Vienna. 1993. Disponível em <<https://www.iaea.org/publications/3798/the-radiological-accident-in-soreq>> Acesso em 4 jan. 2023.

IAEA. The Radiological Accident in Lilo. Non-serial Publications. **IAEA**. Vienna. 2000. Disponível em <<https://www.iaea.org/publications/5968/the-radiological-accident-in-lilo>> Acesso em 3 jan. 2023.

IAEA. The Radiological Accident in Samut Prakarn. **IAEA**. Vienna. 2002. Disponível em <[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1124\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1124_scr.pdf)> Acesso em 3 jan. 2023.

IAEA. "Nuclear Safety Review for the Year 2006," **IAEA**. Vienna. 2007. Disponível em <[http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC51/GC51InfDocuments/English/gc51inf-2\\_en.pdf](http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC51/GC51InfDocuments/English/gc51inf-2_en.pdf)> Acesso em: 3 jan. 2023.

IAEA. "Nuclear Safety Review for the Year 2008," **IAEA**. Vienna. 2009. Disponível em <[http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC53/GC53InfDocuments/English/gc53inf-2\\_en.pdf](http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC53/GC53InfDocuments/English/gc53inf-2_en.pdf)> Acesso em 3 jan. 2023.

IAEA. "The Radiological Accident in Nueva Aldea". **IAEA**. Vienna. 2009. Disponível em <<http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/8117/The-Radiological-Accident-in-Nueva-Aldea>> Acesso em: 3 jan. 2023.

IAEA. "Overexposure of a field radiography worker," **IAEA**. Vienna. 2011. Disponível em <<http://www-news.iaea.org/ErfView.aspx?mId=d63406a6-5f14-4f40-8052-e3b70707646b>> Acesso em 3 jan. 2023.

IAEA. "Re-evaluation of INES rating; effect to the nuclear facilities from the earthquake on east area of Japan". **IAEA**. Vienna. 2011. Disponível em <<http://www-news.iaea.org/ErfView.aspx?mId=b8d002ae-78cc-435b-a9c6-21860bdb46cc>> Acesso em: 4 jan. 2023.

IAEA. The Radiological Accident in Lia, Georgia. Non-serial Publications. **IAEA**. Vienna. 2014. Disponível em <<https://www.iaea.org/publications/10602/the-radiological-accident-in-lia-georgia>> Acesso em 4 jan. 2023

IAEA. The Radiological Accident in Chilca. **IAEA**. 2018. Disponível em< [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1776\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1776_web.pdf) > Acesso em 5 jan. 2023.

ICHIKAWA, H. Obninsk, 1955: The World's First Nuclear Power Plant and "The Atomic Diplomacy" by Soviet Scientists. *Historia Scientiarum. Second Series: **International Journal of the History of Science Society of Japan***. v. 26, n. 1, p. 25–41. 2016. Disponível em: <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/historiascientiarum/26/1/26\\_25/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/historiascientiarum/26/1/26_25/_article/-char/ja/)>. Acesso em: 5 jan. 2023.

ILYIN, L. A.; *et al.* "Early medical consequences of radiation incidents in the former URSS territory". **11th International Congress of IRPA**. 2004. Disponível em <<http://irpa11.irpa.net/pdfs/7c20.pdf>> Acesso em: 6 jan. 2023.

JOHNSTON, R. **Database of radiological incidents and related events**. Johnstonsarchive.net. 2022. Disponível em: <<http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/radaccidents.html>>. Acesso em: 2 jan. 2023.

KANG, Keon Wook. History and Organizations for Radiological Protection. **Journal of Korean Medical Scienc**. v. 31, n. Suppl 1, p. S4, 2016. Disponível em: <<https://synapse.koreamed.org/articles/1023347>>. Acesso em: 5 jan. 2023.

KARNAL, L. Estados Unidos: a formação da nação. 4 ed. São Paulo: **Contexto**, 2007. Disponível em < <https://ensinarhistoria.com.br/decada-de-1920-os-anos-loucos/>> Acesso em 4 jan. 2023.

KROTKOV, E. *et al.* The DARPA Robotics Challenge Finals: Results and perspectives. The DARPA Robotics Challenge Finals: Humanoid Robots to The Rescue. **Springer Tracts in Advanced Robotics**. vol 121. 2018. Disponível em <[https://doi.org/10.1007/978-3-319-74666-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74666-1_1)> Acesso em: 4 jan. 2023.

KUNKLE, Thomas; RISTVET, Byron; THREAT, DEFENSE. CASTLE BRAVO: Fifty Years of Legend and Lore. A Guide to Off-Site Radiation Exposures. **DTIC**. 2013. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA572278>>. Acesso em: 6 jan. 2023

LINDELL, B. ICRP 1928-1978. **Radiological Protection Bulletin**, p. 5–9, 2022. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:9419357](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:9419357)>. Acesso em: 6 jan. 2023.

MACKLIS, Roger M. Radithor and the Era of Mild Radium Therapy. **JAMA: The Journal of the American Medical Association**, v. 264, n. 5, p. 614, 1990. Disponível em: <<https://jamanetwork.com/journals/jama/article-abstract/382766>>. Acesso em: 5 jan. 2023

MAO, Y; *et al.* Investigation and analysis of an extensive skin injury to the back caused by accidental irradiation in interventional procedure. **Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection**. p. 881–885. 2021. Disponível em: <<https://search.bvsalud.org/gim/resource/es/wpr-910411>>. Acesso em: 5 jan. 2023.

MARSH. "Fun with uranium!" in **IEEE Spectrum**, vol. 57, no. 2, pp. 52-52. 2020. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8976904>> Access em 4 jan. 2023.

MCLAUGHLIN, T. P.; *et al.* **A Review of Criticality Accidents 2000 Revision**. 2000. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/758324/>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

MOULD, R. F. Chernobyl Record: The Definitive History of the Chernobyl Catastrophe. **Institute of Physics Publ: Bristol**. 2000.

NIKIPELOV, B. V.; *et al.* "Accident in the southern Urals on 29 September 1957". **IAEA**. 1989. Disponível em: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/inf368.shtml>> Acesso em: 6 jan. 2023.

NILSEN, T; KUDRIK, I; NIKITIN, A. "8 Nuclear submarine accidents". 1996: The Russian Northern Fleet. **Bellona.org**. 1996. Disponível em: <<https://bellona.org/publication/the-russian-northern-fleet-sources-of-radioactive-contamination-2>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

ODHAMMAR, Fredrik. Strålande tider: När radium var ett säljande argument i hushållsvaror 1900-1930. **DIVA**. 2022. Disponível em: <<https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1693243&dswid=-6131>>. Acesso em: 4 jan. 2023.

ORTIZ, P. M; ORESEGUN, M; WHEATLEY, J. "Lessons from major radiation accidents". **International Radiation Protection Association**. 2000. Disponível em <<http://www.irpa.net/irpa10/cdrom/00140.pdf>> Acesso em: 5 jan. 2023.

PANCHBHAI, AratiS. Wilhelm Conrad Röntgen and the discovery of X-rays: Revisited after centennial. **Journal of Indian Academy of Oral Medicine and Radiology**, v. 27, n. 1, p. 90, 2015. Disponível em: <<https://www.jiaomr.in/article.asp?issn=0972-1363;year=2015;volume=27;issue=1;spage=90;epage=95;aulast=Panchbhai>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

RICKS, C; *et al.* "REAC/TS radiation accident registry: update of accidents in the United States,". **International Radiation Protection Association**. 2000. Disponível em <<http://www.irpa.net/irpa10/cdrom/00325.pdf>> Acesso em: 5 jan. 2023.

RITCHIE, H; ROSADO, P; ROSER, M. Natural Disasters. **Our World in Data**. 2022. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/natural-disasters#what-share-of-deaths-are-from-natural-disasters>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

ROBISON, Roger F. European Radium Sales. **Mining and Selling Radium and Uranium**, p. 83–107, 2014. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-11830-7\\_4#citeas](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-11830-7_4#citeas)>. Acesso em: 4 jan. 2023.

SCHMIDT, T.; ZIMOCH, D. About APPLE II Operation. **AIP Conference Proceedings**, 2007. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.2436085>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

SCHNEIDER, G; CHONE, B; BLONNIGEN, T. "Chromosomal aberrations in a radiation accident". **Radiation Research**. 40:613-617. 1969. Disponível em <<https://doi.org/10.2307/3573014>> Acesso em 6 jan. 2023.

SPYKMAN, I. Environmental Forensic Measurements Related to the 2019 **Explosion at the Nenoksa Test Site**.2019. Disponível em < <https://www.irs.uni-hannover.de/de/> > Acesso em: 4 jan. 2023.

TAUHATA, *et al.* GRANDEZAS e UNIDADES-. **Academia.edu**. 2011. Disponível em: < [https://www.academia.edu/36714730/GRANDEZAS\\_e\\_UNIDADES\\_](https://www.academia.edu/36714730/GRANDEZAS_e_UNIDADES_)>. Acesso em: 3 jan. 2023.

TOWNES, C. MAIMAN, H. (1927–2007). **Nature** 447, 654 (2007). Disponível em <<https://doi.org/10.1038/447654a>> Acesso em 3 jan. 2023.

UNSCEAR. "Annex E: Occupational radiation exposures". Sources and Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR. 2000. **Report to the General Assembly**. Volume I: Sources, UNSCEAR. 2000. Disponível em <<http://www.unscear.org/docs/reports/annexe.pdf>> Acesso em 5 jan. 2023.

WANG, Zhi-Dong; *et al.* Continuous cytogenetic follow-up, over 5 years, of three individuals accidentally irradiated by a cobalt-60 source. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, v. 779, p. 1–4, 2015. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25813720/>>. Acesso em: 2 jan. 2023.

XAVIER, A. M.; *et al.* Marcos da história da radioatividade e tendências atuais. **Química Nova**, v. 30, n. 1, 2007. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/qn/a/c4djyQQXBCLfrZNfFNWB7nC/?lang=pt>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

ZIQIANG, P; HUILING, C; SHENGEN, F. Exposure dose assessment and discussion on radioisotope production and application. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**. v. 206, n. 2, p. 239–249, 1996. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:27074888](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:27074888)>. Acesso em: 6 jan. 2023.