

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
TECNOLOGIA NUCLEAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CONSEQUÊNCIAS RADIOLÓGICAS DE UM ACIDENTE SEVERO EM UM REATOR
DE ÁGUA PRESSURIZADA**



PRIMEIRO-TENENTE RAFAEL CHAGRAS DE LIMA

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE RAFAEL CHAGRAS DE LIMA

CONSEQUÊNCIAS RADIOLÓGICAS DE UM ACIDENTE SEVERO EM UM REATOR
DE ÁGUA PRESSURIZADA

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear.

Orientador:

Prof. Walney Reis Fernandes, M.Sc.

PRIMEIRO-TENENTE RAFAEL CHAGRAS DE LIMA

CONSEQUÊNCIAS RADIOLÓGICAS DE UM ACIDENTE SEVERO EM UM REATOR
DE ÁGUA PRESSURIZADA

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial
à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

CT Leonardo Oldani Felix, M.Sc. – CIAA

Prof. Walney Reis Fernandes, M.Sc. – DDNM

CT (EN) Danilo Pinheiro Faria, M.Sc. – DDNM

Walney R. Fernandes

DB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me abençoar com saúde e força de vontade para realizar meus objetivos.

À minha esposa Thaiz pelo amor, carinho, companheirismo que, mesmo longe, se fez presente me auxiliando a superar as dificuldades.

Aos meus pais Kátia e Júlio pelo amor incondicional sendo minha base familiar.

Aos amigos Renan e Vanessa por toda amizade, apoio, consideração e incentivo na produção desse trabalho.

Ao meu orientador Walney pelo tempo despendido, e paciência ao passar orientações e conhecimentos.

Resumo

A energia nuclear desempenha um papel crucial na geração de eletricidade, mas os acidentes severos em reatores PWR, como *Three Mile Island*, *Chernobyl* e *Fukushima*, destacam os riscos significativos associados a essa tecnologia. Portanto, este trabalho teve como objetivo analisar e compreender as consequências radiológicas de um acidente em um reator nuclear do tipo PWR, considerando seus impactos na segurança nuclear, saúde pública e meio ambiente. Por meio deste estudo, foi possível identificar que em tais acidentes, a liberação de materiais radioativos tem consequências radiológicas graves. A exposição à radiação coloca em risco a saúde humana, com o potencial de causar câncer e outras doenças a curto e longo prazos. Além disso, a disseminação de substâncias radioativas no ambiente afeta a biodiversidade e o equilíbrio do ecossistema. Para mitigar esses riscos, medidas de prevenção, regulamentações rigorosas e constante desenvolvimento nos processos e capacitação pessoal são essenciais. A lição mais importante é aprender com os erros do passado e aprimorar constantemente a segurança na indústria nuclear, garantindo que a energia nuclear continue a ser não somente uma fonte confiável e segura de eletricidade, como também mantenha o alto grau de segurança nos outros ramos de aplicação. Nossas considerações finais são que, em um contexto mais amplo, este estudo contribuiu para a compreensão dos desafios e riscos associados à energia nuclear. E por fim, essas propostas visam aprofundar nosso conhecimento sobre a segurança e eficácia das operações de reatores nucleares. A implementação de pesquisas nessas áreas é essencial para garantir a integridade e o sucesso das operações nucleares e para mitigar os riscos associados a acidentes nucleares.

Palavras- chave: reator PWR; acidentes severos; consequências radiológicas.

Abstract

Nuclear power plays a crucial role in electricity generation, but severe accidents at PWR reactors such as *Three Mile Island*, *Chernobyl* and *Fukushima* highlight the significant risks associated with this technology. Therefore, this work aimed to analyze and understand the radiological consequences of an accident in a PWR-type nuclear reactor, considering its impacts on nuclear safety, public health and the environment. Through this study, it was possible to identify that in such accidents, the release of radioactive materials has serious radiological consequences. Exposure to radiation puts human health at risk, with the potential to cause cancer and other diseases in the short and long term. Furthermore, the spread of radioactive substances in the environment affects biodiversity and the balance of the ecosystem. To mitigate these risks, prevention measures, strict regulations and constant development of processes and personal training are essential. The most important lesson is to learn from past mistakes and constantly improve safety in the nuclear industry, ensuring that nuclear energy continues to be not only a reliable and safe source of electricity, but also maintains a high degree of safety in other sectors of application. Our final considerations are that, in a broader context, this study contributed to the understanding of the challenges and risks associated with nuclear energy. And finally, these proposals aim to deepen our knowledge about the safety and effectiveness of nuclear reactor operations. Implementing research in these areas is essential to ensure the integrity and success of nuclear operations and to mitigate the risks associated with nuclear accidents.

Keywords: PWR reactor; severe accidents; radiological consequences.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reação de fissão nuclear	17
Figura 2 – Percentual de reatores no mundo até 31 de dezembro de 2014.	18
Figura 3 – Esquema simplificado de uma usina do tipo PWR.	20
Figura 4 – Componentes do EC.....	21
Figura 5 – Componentes da vareta combustível.....	21
Figura 6 – Escala INES.	23
Figura 7 - Os processos que afetam o transporte de radionuclídeos na atmosfera.	28
Figura 8 – Transporte dos radionuclídeos no ecossistema.	30
Figura 9 – Fases do efeito biológico produzido pela radiação ionizante.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela com meia-vida de radioisótopos.	32
Tabela 2 – Sintomas e limites de dose para síndrome aguda da radiação.	35

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BWR	<i>Boiled Water Reactor</i> (Reator de Água Pressurizada)
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DNA	<i>Deoxyribonucleic Acid</i> (Ácido Desoxirribonucleico)
EC	Elemento Combustível
EUA	Estados Unidos da América
FBR	<i>Fast Breeder Reactor</i> (Reator Rápido Reprodutor)
GCR	<i>Gas-Cooled Reactor</i> (Reator Refrigerado à Gás)
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia Atômica)
INES	<i>International Nuclear and Radiological Event Scale</i> (Escala Internacional de Eventos Nuclear e Radiológicos)
LABGENE	Laboratório de Geração Núcleo-Elétrica
LWGR	<i>Light Water Graphite Reactor</i> (Reator de Água Leve Moderado à Grafite)
OMS	Organização Mundial de Saúde
PHWR	<i>Pressurized Heavy-Water Reactor</i> (Reator de Água Pesada Pressurizada)
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i> (Reator à Água Pressurizada)
RBMK	<i>Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy</i> (Reator Canalizado de Alta Potência)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TEPCO	<i>Tokyo Electric Power Company</i> (Empresa de Energia Elétrica de Tóquio)
TMI	<i>Three Mile Island</i>
USNRC	<i>Nuclear Regulatory Commission United States</i> (Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos)
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
USS	<i>United States Ship</i> (Navio dos Estados Unidos)

LISTAS DE SÍMBOLOS

CARACTERES ARÁBICOS

Bq	Becquerel
E	Constante matemática com valor aproximado de 2,7182
f	Fator de redução decaimento
Mrem	milirem
mSv	milisievert
MWe	Megawatt Elétrico
Q	Taxa de atividade liberada (Bq/s)
u	Velocidade média do vento (m/s)
²³⁵ U	Isótopo de urânio
UO ₂	Dióxido de Urânio
x	Distância entre o ponto de liberação e o ponto de interesse, na direção do vento (m)
y	Largura da pluma (na direção perpendicular ao campo de vento) (m)
z	Altura da pluma (m)

CARACTERES GREGOS

θ_z	Desvio vertical da pluma (m)
θ_y	Desvio lateral da pluma (m)
λ	Constante de decaimento radioativo (s ⁻¹)
π	Constante matemática com valor aproximado de 3,1415
X	Concentração de atividade (Bq/ m ³)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Apresentação do Problema.....	13
1.2 Justificativa e Relevância.....	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo Geral.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Energia Nuclear.....	16
2.2 Características do Reator PWR.....	17
2.3 Acidentes Severos em Reatores Nucleares.....	22
2.3.1 Acidente de <i>Three Mile Island</i>	23
2.3.2 Acidente de <i>Chernobyl</i>	24
2.3.3 Acidente de <i>Fukushima</i>	25
2.4 Consequências Radiológicas.....	27
2.4.1 Efeitos da Radiação.....	27
2.4.2 Dispersão da Radiação.....	27
2.4.3 Consequência da Radiação no Meio Ambiente.....	30
2.4.4 Consequência da Radiação na Saúde Humana.....	32
3 METODOLOGIA.....	36
3.1 Classificação da Pesquisa.....	36
3.2 Quanto aos fins.....	36
3.3 Quanto aos meios.....	37
3.4 Limitações do Método.....	37
3.5 Coleta e Tratamento de Dados.....	37
4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	39
5 CONCLUSÃO.....	40
5.1 Considerações Finais.....	41
5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos.....	41

REFERÊNCIAS.....	43
-------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A utilização de energia nuclear desempenha um papel crucial no fornecimento de eletricidade em muitas partes do mundo. No entanto, essa fonte de energia não está isenta de riscos e os acidentes severos em reatores PWR (*Pressurized Water Reactor*) podem ter consequências radiológicas substanciais [1]. Nas palavras de Scliar [2], as usinas termonucleares, assim como todos os grandes empreendimentos energéticos, envolvem riscos ambientais e sociais importantes. A memória do desastre de *Three Mile Island* nos EUA (Estados Unidos da América), *Chernobyl* na Ucrânia e o acidente de *Fukushima* no Japão são lembretes vívidos dos perigos intrínsecos associados à energia nuclear [1].

Este trabalho busca explorar, analisar e compreender em profundidade as implicações radiológicas de um acidente severo em um reator PWR. Compreender essas consequências é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de resposta a emergências, bem como para a tomada de decisões embasadas em relação à segurança nuclear e à gestão de resíduos radioativos.

Cada tópico desempenha um papel essencial na nossa compreensão da energia nuclear e de como a exposição radiológica pode afetar a vida humana e o mundo natural. Juntos, eles contribuirão para uma análise das consequências radiológicas de um acidente severo em um reator PWR, com o objetivo de aprimorar a segurança e a gestão dessa tecnologia de produção de energia.

1.1 Apresentação do Problema

A utilização da energia nuclear tem desempenhado um papel cada vez mais expressivo na geração de eletricidade em todo o mundo, oferecendo uma fonte de energia eficiente e de baixas emissões de carbono. No entanto, com os benefícios da energia nuclear vêm os desafios e riscos associados a acidentes severos em reatores nucleares, como os do tipo PWR. Esses acidentes podem ter sérias consequências radiológicas, afetando não apenas o meio ambiente, mas também a saúde e a segurança das comunidades próximas [3].

O desafio reside na necessidade de compreender e mitigar os impactos de tais acidentes, bem como no desenvolvimento de estratégias de prevenção eficazes. Em particular, as consequências radiológicas de um acidente severo em um reator tipo PWR podem incluir a liberação de materiais radioativos no ambiente, contaminação de áreas circundantes, riscos para a saúde humana e a necessidade de evacuação de populações afetadas. À medida que a demanda

por energia nuclear continua a crescer, é imperativo abordar essas preocupações de maneira abrangente e informada.

1.2 Justificativa e Relevância

Reatores do tipo PWR são amplamente utilizados em usinas nucleares em todo o mundo. O estudo das consequências de acidentes é relevante para a segurança de todas essas instalações. Segundo a pesquisa realizada, é possível inferir que a investigação das consequências radiológicas de acidentes em reatores PWR possui potencial para contribuir significativamente no aprimoramento das medidas de segurança. Essas melhorias podem desempenhar um papel fundamental na prevenção de acidentes futuros ou na atenuação de seus impactos, beneficiando assim a segurança das operações nucleares e a proteção radiológica como um todo.

Tendo como base de que as liberações de radionuclídeos para a atmosfera, oriunda de acidentes nucleares, acarretam efeitos danosos à saúde do homem e ao ecossistema, existe uma real necessidade de avaliar as possíveis consequências resultantes dessas liberações.

Os efeitos de um acidente severo são extensos e graves, como as preocupações ambientais de contaminação radiológica do solo, água e ar, afetando ecossistemas locais e a biodiversidade. No que tange à saúde pública, a exposição às radiações ionizantes provenientes de acidentes pode ter sérios impactos na saúde humana, incluindo o aumento do risco de câncer. Além do impacto econômico provenientes de medidas como evacuação, realocação, descontaminação do solo e estruturas, interdição do uso do solo e destruição dos produtos agrícolas [4].

A relevância deste TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) é ressaltada pelo potencial de desempenhar um papel fundamental na disseminação de conhecimento, promovendo um entendimento mais amplo dos riscos associados à energia nuclear e sublinhando a importância das medidas de segurança em operações nucleares. Isso contribui para diminuição do medo da energia nuclear baseado em desconhecimento do tema, proporcionando assim um maior nível de segurança em torno das operações nucleares e seu impacto no mundo em geral.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar e compreender as consequências radiológicas de um acidente severo em um reator nuclear do tipo PWR, considerando seus impactos na segurança nuclear, saúde pública e meio ambiente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Contextualizar importância da energia nuclear;
- Identificar e descrever as principais características dos reatores PWR;
- Definir, identificar e analisar casos de acidentes severos em reatores, investigando as causas, extensão e impactos radiológicos; e
- Avaliar os riscos para a saúde humana e o meio ambiente decorrentes de acidentes em reatores do tipo PWR, incluindo os efeitos da exposição à radiação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energia Nuclear

De um modo geral, a energia pode ser definida como a capacidade de realizar trabalho ou como o resultado da realização de um trabalho [5]. A produção de energia é uma das forças motrizes mais poderosas e essenciais para o funcionamento da sociedade moderna. A importância da energia na sociedade é incontestável, pois suas múltiplas formas e usos permeiam cada aspecto de nossas vidas, desde a iluminação de nossos lares e consumo de indústrias e hospitais [6]. Concordando com tais perspectivas, Simabukulo [6] afirma que o desenvolvimento tecnológico, o crescimento industrial e a melhora no padrão de vida em determinada sociedade são acompanhados pela evolução do consumo de energia através do aumento dos recursos energéticos.

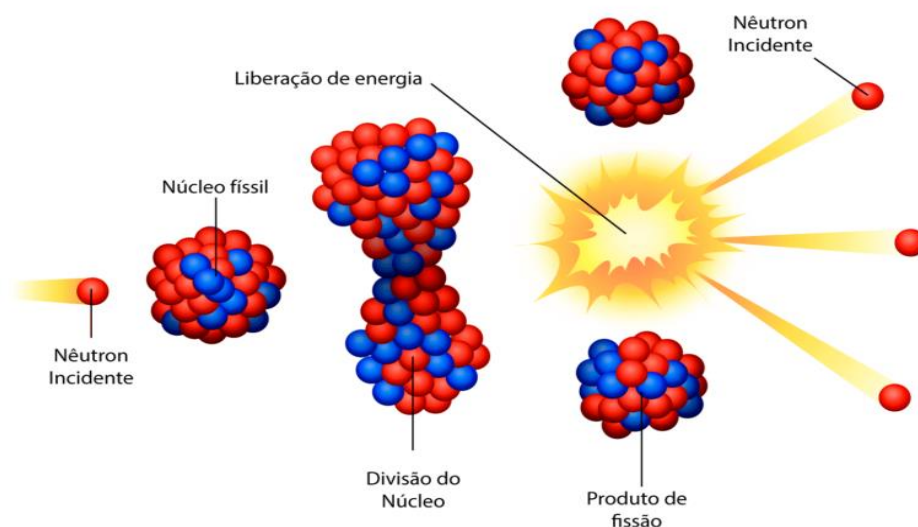
As fontes de energia podem ser categorizadas em dois grupos principais: as renováveis e as não renováveis. Energia renovável refere-se àquela proveniente de recursos que se reabastecem naturalmente, incluindo sol, vento, chuva, rios e resíduos orgânicos gerados por atividades domésticas e industriais. Por outro lado, as fontes de energia não renováveis são extraídas da natureza e têm uma quantidade limitada ou requerem milhares de anos para se formarem. Exemplos dessas fontes incluem o urânio, usado na geração de energia nuclear; o carvão, aplicado em usinas termoelétricas; e o petróleo, utilizado na produção de combustíveis fósseis, como gasolina, diesel e querosene [7].

A energia nuclear desempenha um papel significativo no panorama energético global devido às suas características distintas, que a tornam uma fonte valiosa. A notável densidade energética, com pouca massa de material nuclear produz quantidade substancial de energia, a torna eficiente em termos de recursos, pois requer menos combustível em comparação com outras fontes de energia. Possui baixa emissão de dióxido de carbono durante a geração de eletricidade, sendo atraente para não agravar problemas como efeito estufa, tornando uma das alternativas mais viável de fonte de energia limpa. Fonte constante de energia, a produção é ininterrupta não sofrendo ação de condições climáticas, a torna atrativa quando comparada a energias intermitentes como a solar e eólica, mantendo a estabilidade da rede elétrica. Além da redução da dependência de combustíveis fósseis, ao diversificar a matriz energética, sendo fundamental para segurança energética, proporcionando estabilidade dos preços da energia e questão estratégica [8].

A energia nuclear é uma forma de energia que é produzida a partir de reações nucleares, como a fissão nuclear (Figura 1), em que núcleos de átomos são divididos, liberando

uma quantidade significativa de energia. A energia nuclear, apesar de ser conhecida principalmente por seu uso em contextos bélicos, possui um potencial multifacetado que pode contribuir para a melhoria do bem-estar e da qualidade de vida da humanidade. Os primeiros esforços para a aplicação pacífica da energia nuclear surgiram imediatamente após o término da Segunda Guerra Mundial e dos devastadores bombardeios nucleares em *Hiroshima* e *Nagasaki*, ocorridos em 1945 [9].

Figura 1 – Reação de fissão nuclear



Fonte: Referência [10].

Desde então, o emprego das denominadas radiações ionizantes, obtidas a partir de radioisótopos ou aceleradores de partículas, tem sido estendido a setores tão diversos quanto a área da saúde, produção de alimentos e exploração de petróleo em profundidades oceânicas. Reatores nucleares de fissão são dispositivos que permitem a geração e controle de uma reação em cadeia de fissão de átomos resultando na produção de calor, nêutrons e de outros elementos, chamados produtos de fissão. Suas aplicações envolvem geração de energia elétrica, propulsão de embarcações, produção de radioisótopos e pesquisa [11].

2.2 Características do Reator PWR

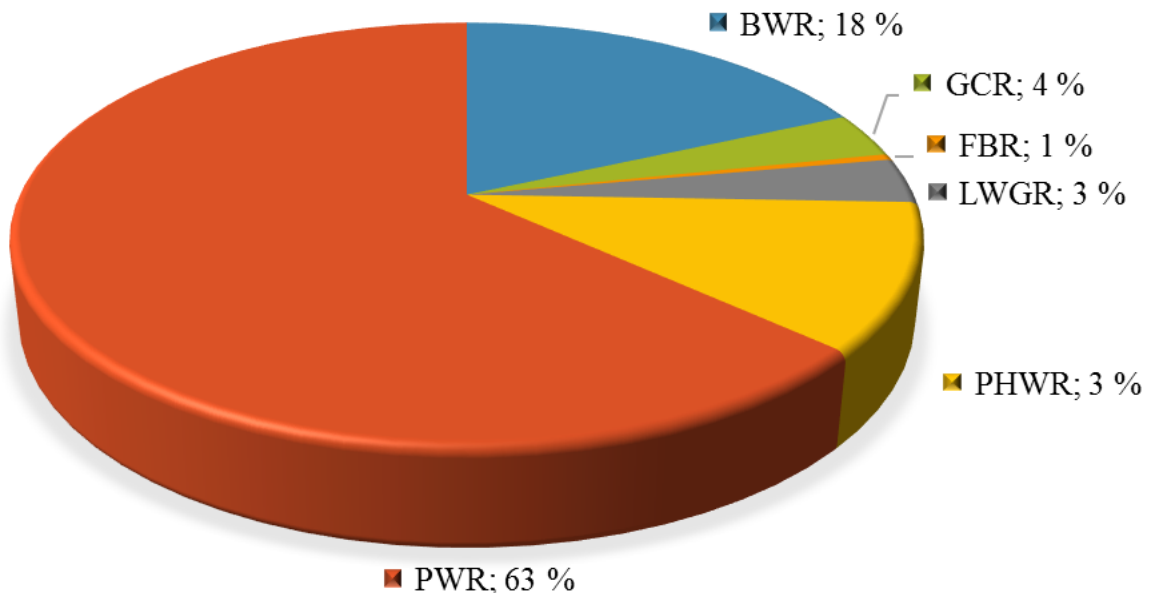
O primeiro reator PWR surgiu em meados da década de 50 para fins militares, especialmente para atender a necessidade de geração de energia na indústria naval. Baseado

nesta tecnologia deu-se o desenvolvimento em 17 de janeiro de 1955, pela Marinha dos EUA, do submarino USS *Nautilus* de propulsão nuclear, com reator do tipo PWR [12].

A primeira usina nucleoeletrica equipada com reator do tipo PWR, entrou em operação em *Pittsburg* nos EUA. A usina apresentava uma capacidade de geração de 60MWe, utilizava UO_2 enriquecido como combustível e foi descomissionada em 1982 [12].

Os reatores do tipo PWR, devido a capacidade de compactação maior que os demais reatores, como os moderados a grafite por exemplo, apresentam uma densidade de potência maior, definida como sendo a potência fornecida por unidade de volume no núcleo. Como consequência, o custo de um PWR é menor que o custo dos demais reatores para mesma potência fornecida. Conforme evidenciou a IAEA (*International Atomic Energy Agency*) [12] apud [13], a indústria nuclear possuía 438 reatores em operação espalhados pelo mundo em 2015. Importante mencionar que 277 reatores em atividade são do tipo PWR, que também produzem a maior parte da energia gerada por fonte nucleares (Figura 2). No mundo existem 70 reatores em fase de construção, 59 são do tipo PWR, comprovando a supremacia da utilização destes reatores, frente aos demais tipos desenvolvidos [12] apud [13].

Figura 2 – Percentual de reatores no mundo até 31 de dezembro de 2014.



Fonte: Referência [12] apud [13].

Os reatores comerciais do tipo PWR surgiram na Geração II dos reatores nucleares, que ocorreu entre meados da década de 60 até aproximadamente meados da década de 90, sendo uma característica desta geração a vida útil de aproximadamente 40 anos [14].

O reator PWR é basicamente dividido em três circuitos: primário, secundário e terciário. Quanto a composição, são constituídos dos seguintes componentes: prédio de contenção, vaso de pressão, núcleo do reator, pressurizador, bomba de refrigeração do primário, gerador de vapor, turbina a vapor e condensador (Figura 3).

O calor gerado pelo processo de fissão nuclear aquece o fluido moderador no circuito primário. Esse fluido é bombeado para o gerador de vapor, onde trocará calor com o fluido do sistema secundário, e retornará para o núcleo para retomar o ciclo. A bomba de refrigeração principal do reator nuclear tem a função de promover a circulação de fluido no circuito primário, e o pressurizador responsável por manter a pressão no sistema [12].

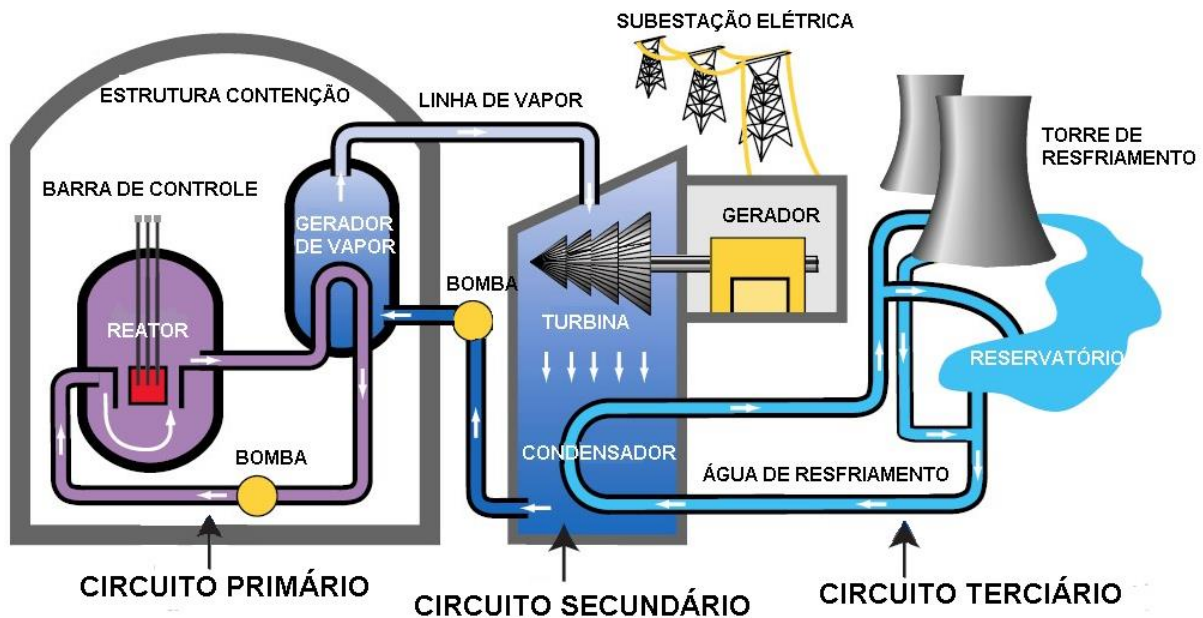
O circuito secundário tem a função de conduzir o vapor produzido no gerador de vapor, produto do calor do circuito primário, para as turbinas a fim de fazer as conversões de energia térmica em mecânica, na turbina, e mecânica em elétrica, no gerador. Após esse processo, os condensadores são responsáveis pela condensação do vapor até o estado líquido, e posteriormente o fluido é enviado ao gerador de vapor, onde o ciclo será retomado [12].

O circuito terciário tem a incumbência de retirar o calor do reator, sendo a água o fluido utilizado nesse processo. São dois tipos de ciclos, o ciclo fechado que consiste no uso de torres tipo seca ou úmida e o resfriamento direto [15]. De acordo com IAEA [15], 26% das usinas nucleares mundiais utilizam ciclo fechado de resfriamento enquanto 74% usam resfriamento do tipo direto, sendo que 45% realizam resfriamento diretamente com água do mar, 15% com lagos e 14% com rios.

A energia gerada pela fissão do combustível nuclear, no núcleo do reator, transforma-se rapidamente em calor, que aquece a água do sistema de refrigeração do reator. O calor produzido é transportado pela água do sistema primário aos geradores de vapor, por meio das bombas de refrigeração do primário, com circuito paralelo para cada bomba. Nos geradores de vapor, a água do sistema primário transfere seu calor através dos tubos destes geradores, para a água do sistema secundário que se transforma em vapor saturado. O vapor produzido é expandido nas turbinas as quais acionam o gerador elétrico, para transformar energia cinética em elétrica. Os tubos dos geradores de vapor promovem uma separação entre a água do sistema primário e a do sistema secundário evitando, assim, que substâncias radioativas, eventualmente presentes no sistema de refrigeração do reator, contaminem o circuito secundário [8].

No circuito secundário, a água de alimentação dos geradores de vapor é retirada do tanque de água de alimentação por meio das bombas de água de alimentação e preaquecida em trocadores de calor por extrações nas turbinas. O vapor, após sua expansão nas turbinas, sofre condensação nos condensadores, e o fluido resultante é conduzido pelas bombas de condensado principal, ao tanque de água de alimentação, a qual será promovida uma desgaseificação do mesmo. As bombas de água de refrigeração principal captam a água do mar, rio ou lago, forçam sua passagem pelos condensadores, que por sua vez, absorvem o calor resultante da condensação do vapor e a transferem na mesma fonte de água, obrigatoriamente em um ponto anterior da captação, onde este calor finalmente é rejeitado [12].

Figura 3 – Esquema simplificado de uma usina do tipo PWR.



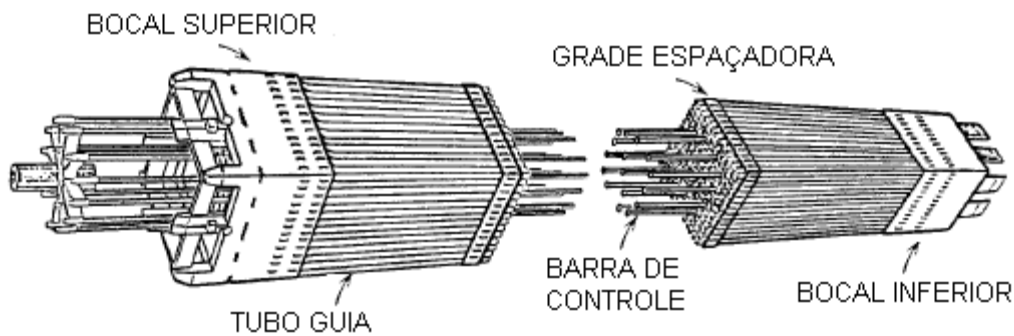
Fonte: Referência [16].

O reator PWR diferencia-se dos demais reatores pelo uso da água como moderador e refrigerante. Propriedades termodinâmicas da água permitem a operação do reator com elevadas pressões no estado líquido. A seção de choque para captura radiativa de nêutrons térmicos pela água é razoavelmente alta, fato que requer o uso de urânio ligeiramente enriquecido como combustível [17].

O núcleo dos reatores PWR é a região onde será colocado o elemento combustível nuclear. Estes elementos são estruturas, retangulares ou hexagonais, compostas por longas varetas constituídas de pastilhas cerâmicas de urânio enriquecido (3 a 5% - ^{235}U), que podem atingir em seu interior temperaturas entre 1788 a 2021°C [12].

O EC (Elemento Combustível) (Figura 4) é o componente do reator que contém o material combustível numa forma geométrica e estrutural bem definida. Os principais componentes do EC são: vareta combustível, tubo guia da vareta de controle, grades espaçadoras, barras de controle e bocais de extremidade [18].

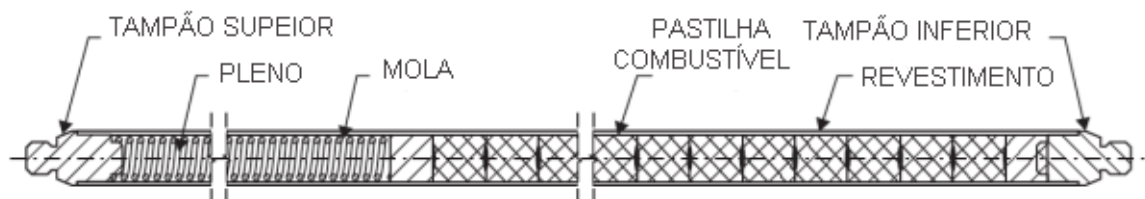
Figura 4 – Componentes do EC.



Fonte: Referência [19].

Desta forma, a vareta combustível (Figura 5) contém, de forma isolada, o material fissil. Ela é composta pelos seguintes componentes: pastilhas combustíveis, pleno, mola de fixação da coluna de pastilha, revestimento e tampões de extremidade [18].

Figura 5 – Componentes da vareta combustível.



Fonte: [20].

As pastilhas de UO_2 são geralmente revestidas em tubos feitos de liga de zircônio. Esses tubos formam a vareta combustível que, organizadas em conjunto formam o EC. Também denominadas de zircaloy, esta liga de grau nuclear de segurança, é constituída por zircônio, estanho, ferro e cromo, cujas características são: resistir à alta pressão e temperatura, prevenir corrosão da pastilha pelo refrigerante, isolar produtos de fissão, transferir calor da pastilha para o refrigerante e auxiliar a atividade neutrônica [21].

Ainda situado no reator, as barras de controle são peças móveis situadas na parte superior do EC, que são inseridas no reator em determinados momentos, a partir de acionamento mecânico com eletroímãs. Constituída de material com seção transversal de alta absorção para nêutrons térmicos como carboneto de boro ou liga de prata-índio-cádmio, as barras de controle têm a finalidade de alterar a reatividade do reator com a inserção ou retirada das barras do núcleo, através da absorção de nêutron. As barras de controle são importante dispositivo de segurança para homogeneizar a distribuição de potência e compensar o excesso de reatividade do núcleo. Além disso, são projetadas e utilizadas para: partida do reator, controle do reator, manobras de potência, desligamento do reator e desligamento em emergência.

2.3 Acidentes Severos em Reatores Nucleares

Embora a probabilidade e histórico de acidentes severos em toda história da indústria nuclear sejam ínfimas, principalmente quando comparada à outras indústrias como a termoelétrica, a gravidade e as consequências delas são extremas. É devido à este motivo que o setor é extremamente rígido no que tange ao licenciamento, regulamentação e operação de material nuclear [22].

O licenciamento nuclear é um processo complexo e demorado que demanda várias etapas. Antes da operação e construção de qualquer instalação nuclear, é exigido avaliação completa e aprovação das autoridades reguladoras. Isto inclui análise detalhada de todos os aspectos do projeto, desde o projeto da usina até o gerenciamento dos resíduos radioativos [23].

As normas nucleares são estabelecidas e monitoradas por instituições nacional e internacional como a CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) e IAEA. Conforme a indústria avança em pesquisas e obtém aprendizados devido à problemas ocorridos, as normas e regulamentações são atualizadas de forma a propiciar mais segurança ao setor, o que evidencia a preocupação constante e o compromisso de aprimoramento com a temática de segurança [23].

Apesar de rigorosos protocolos de segurança e regulamentações existentes, a ocorrência de acidentes nucleares, embora rara, permanece uma preocupação. Os acidentes nucleares são classificados por níveis, sendo o mais grave o acidente nuclear severo, que será abordado neste trabalho.

A IAEA criou a escala INES (*International Nuclear and Radiological Event Scale*) (Figura 6) para classificar, a partir de diversos parâmetros, os eventos que resultam na liberação de material radioativo no meio ambiente e na exposição à radiação dos trabalhadores e do

público. Ao todo são 7 níveis, sendo os 3 primeiros de incidentes e os 4 subsequentes acidentes [24].

Figura 6 – Escala INES.



Fonte: Referência [24].

De acordo com Tong [25], acidente severo em reator nuclear é um acontecimento provocado por múltiplas falhas, que resulta em alterações na configuração do núcleo do reator e em liberações significativas de radioatividade para fora do circuito primário. Na pior das hipóteses, o núcleo do reator funde e a contenção do reator é rompida.

Já a CNEN [26] considera que acidente severo é aquele que excede as bases de projeto e que acarreta falhas em estruturas, sistemas ou componentes, impedindo dessa forma a refrigeração do núcleo do reator conforme projetada, levando a uma degradação significativa do mesmo. São os casos de *Three Mile Island*, *Chernobyl* e *Fukushima*.

2.3.1 Acidente de *Three Mile Island*

O acidente ocorrido em TMI (Three Mile Island), o mais grave do Ocidente, e o terceiro do mundo, foi classificado como nível 5 na escala INES. De tal maneira que ocorreu a fusão parcial do reator 2 do tipo PWR da usina de TMI na *Pensilvânia*, nos EUA, em 28 de março de 1979, ocasionando à liberação de material radioativo na atmosfera via sistema de ventilação [27].

O acidente severo ocorreu devido à combinação de fatores como mau funcionamento de equipamento condicionado a má rotina de manutenção, problema relacionado ao arranjo e disposição dos consoles, alarmes e botões e fatores humanos.

Uma falha mecânica ou elétrica acionou o desligamento das bombas de água de alimentação que resfriavam o reator nuclear, resultando no desligamento automático da turbina-gerador da usina. Isso causou um aumento na pressão do sistema primário. Para controlar a pressão, uma válvula de alívio foi acionada, mas os indicadores na sala de controle mostraram erroneamente que a válvula estava fechada. Como resultado, a válvula emperrada reduziu significativamente a pressão do sistema primário, desligando as bombas de refrigeração do reator. A água de resfriamento de emergência ameaçou atestar o pressurizador e diminuir o fluxo de água. Com as bombas de refrigeração desligadas, o nível da água no reator caiu e o núcleo superaqueceu [28].

A USNRC (*Nuclear Regulatory Commission United States*) realizou estudos detalhados das consequências radiológicas do acidente, em que foi estimado que cerca de 2 milhões de pessoas nas áreas adjacentes do TMI, durante o acidente, receberam uma dose estimada de apenas 1mrem acima da dose de costume, e a dose máxima para uma pessoa nos limites do local teria sido inferior a 100 mrem. O material radioativo liberado alcançou até 16 km da usina, e um total de 140.000 pessoas foram evacuadas. Não houve registro de aumento do número de incidência de câncer na população local, tão pouco morte diretamente associada ao acidente [27].

O acidente foi um ponto de inflexão na indústria, e causou forte impacto na mentalidade de segurança e aprimoramentos dos processos. Suas consequências trouxeram mudanças radicais no que tange ao plano de resposta de emergência, treinamento de operadores do reator, engenharia de fatores humanos e proteção contra radiação [28].

2.3.2 Acidente de *Chernobyl*

Na madrugada de 26 de abril de 1986 ocorreu o pior acidente nuclear para fins pacíficos, na antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) na cidade de *Chernobyl*. O reator nº4, tipo RBMK (*Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy*), sofreu uma explosão que resultou na liberação descontrolada de toda a radioatividade contida em seu interior, a dispersão ocorreu pelos próximos 8 meses, com cerca de 50 toneladas de produtos nucleares. O evento foi classificado com o nível mais grave de acidentes, nível 7 na escala INES [29].

O acidente severo ocorreu devido à má condução do teste de segurança, falha de projeto do reator, negligência ao desativar os sistemas de segurança para prosseguimento do teste e postergação do teste para o turno da noite, com a equipe despreparada.

O reator 4 iria passar por um teste de resfriamento em caso de interrupção de energia. Para realização do teste, o reator deveria operar numa faixa de baixa potência, o que não é aconselhável pois causa instabilidade devido ao envenenamento por xenônio. Houve uma postergação do horário do teste, prolongando o período do reator operando em baixa potência, e alterando a equipe da tarde para noite que iria efetuar o teste [29].

Durante a realização do teste, as fissões aumentaram, a temperatura do núcleo do reator se elevou e, com isso, ocorreu a deformidade do mesmo. O reator estava instável e precisava ser desligado. Então, foi ordenado o arriamento das barras de controle, as quais, apesar de serem constituídas de boro, possuíam grafite na ponta e ao penetrarem no núcleo, a potência subiu de 7% para 50% em apenas 3 segundos. As barras começaram a derreter e a pressão do vapor a subir, o que gerou uma explosão de vapor, que destruiu a cobertura do reator [30].

As consequências do acidente foram catastróficas, tanto no que tange ao número de vítimas, quanto no aumento de incidência de câncer e contaminação do meio ambiente. Acredita-se que foi liberado cerca de quatrocentas vezes mais material radioativo do que nos bombardeamentos em *Hiroshima* e *Nagasaki* no Japão durante a Segunda Guerra Mundial. O vazamento de radionuclídeos foi tamanho, que foi registrado aumento de radioatividade pelos instrumentos em toda Europa até a costa leste dos EUA [30].

As fontes oficiais registram 59 mortes, porém não foram considerados outras variáveis como óbitos decorrentes de doenças provenientes da radiação ao longo do tempo. A OMS (Organização Mundial de Saúde) afirma que esse número é expressivamente maior, podendo chegar a quatro mil vítimas. Foi realizada evacuação no raio de 30 km do reator, totalizando 220.000 pessoas evacuadas [30].

2.3.3 Acidente de *Fukushima*

É indubitável que, no dia 11 de março de 2011, o Japão viveu seu pior dia após a Segunda Guerra Mundial. O país foi acometido de um dos maiores terremotos já registrados, que causou severos danos a todo território, seguido de um grande tsunami que devastou todo litoral. Essa sequência de eventos culminou no acidente nuclear de *Fukushima*, com a fusão

parcial de 3 reatores do tipo BWR (*Boiled Water Reactor*) e liberação de grande quantidade de radioatividade na atmosfera e no oceano [31].

O acidente severo ocorreu devido à combinação dos desastres naturais mais intensos que haviam sido previstos na concepção de projeto da usina. O terremoto *Tohoku*, um dos maiores tremores já registrados, atingiu 9,0 na escala *Richter*. O terremoto avariou a alimentação principal de energia da usina, e foi necessária utilização do sistema de emergência realizado por geradores a diesel. O abalo sísmico dessa intensidade estava dentro da margem de segurança do projeto. O sistema de segurança atuou e desligou os 3 reatores que estavam em funcionamento no instante. Entretanto, o terremoto deu origem a um grande tsunami de 15 metros de altura, maior do que havia sido previsto na base de projeto, e causou diversos e severos danos à usina. Danificou, destruiu e inundou instalações, edifícios e equipamentos, os acessos à usina foram também afetados tornando extremamente difícil o deslocamento para dentro da central. Por fim, avariou os diesel geradores de emergência que se encontravam no térreo e subterrâneo, dessa forma causando apagão de longa duração [31].

A usina não fora projetada para operar sem energia, e, com isso, foram perdidos todos os sistemas, como de segurança e instrumentação. Mesmo desligado, os reatores produzem calor devido ao calor de decaimento e, sem o sistema de resfriamento, a temperatura e pressão dos reatores aumentava sem controle. A perda resultante do resfriamento do núcleo do reator levou a três derretimentos parciais nucleares, três explosões de hidrogênio e conseqüentemente, liberação de material radioativo. A intensidade do acidente foi tamanha que foi classificado como nível 7 na escala INES [31].

A TEPCO (*Tokyo Electric Power Company*), empresa que operava as usinas nucleares da Central de *Fukushima*, divulgou a monitoração dos trabalhadores envolvidos no acidente, sendo 21 deles expostos a doses acima de 100mSv. Desses, 2 receberam doses entre 200 e 250mSv, 8 receberam doses entre 150 e 200mSv e os outros 11 registraram doses entre 100 e 150mSv. Não houve registro de doenças pela radiação na população local, tão pouco morte diretamente associada ao acidente [32].

Foi declarada uma zona de exclusão de raio de 30 quilômetros, totalizando cerca de 160.000 pessoas evacuadas. A radioatividade total liberada para o meio ambiente foi estimada pela TEPCO em cerca de 1/10 daquela liberada em *Chernobyl* [32].

O acidente abalou a confiança pública na indústria nuclear, por ter causas naturais como fato gerador do acidente e, principalmente, por tratar-se de um país desenvolvido e possuidor de tecnologia como o Japão, evidenciando falhas na regulamentação, medidas de preparação e gestão de acidentes e comunicação nacional e internacional [31].

2.4 Consequências Radiológicas

2.4.1 Efeitos da Radiação

Radiação nuclear é o nome dado às partículas ou ondas eletromagnéticas emitidas pelo núcleo durante o processo de reestruturação interna, para atingir a estabilidade. As radiações são produzidas por processos de ajustes que ocorrem no núcleo ou nas camadas eletrônicas, ou interação de outras radiações ou partículas. Ou seja, são produtos da otimização de sua estrutura e dinâmica, e são um fenômeno natural [33].

Em resumo, como afirmado pela UNEP (*United Nations Environment Programme*) [34], a radiação pode assumir diferentes formas, incluindo partículas (como partículas alfa, beta e nêutrons) e ondas eletromagnéticas (tais como raios gama e raios X). Cada uma dessas formas de radiação possui quantidades distintas de energia e, conseqüentemente, diferentes poderes de penetração em materiais. Essas diferenças nas energias de emissão e nos tipos de partículas resultam em efeitos diversos na matéria viva.

A radiação ionizante, que possui maior relevância no tema de estudo, é uma forma de radiação cuja energia é maior que a energia de ligação dos elétrons de um átomo com seu núcleo, desta forma arranca os elétrons orbitais. O átomo cujo elétron fora ejetado transforma-se em íon. Ao arrancarem, aleatoriamente, elétrons das camadas eletrônicas de átomos, as radiações ionizantes contribuem para romper, mesmo que momentaneamente, o equilíbrio entre as cargas positivas e negativas do átomo [33].

No processo de transferência de energia da radiação incidente para a matéria, ocorre transferência de energia para múltiplos átomos simultaneamente. Essa radiação é denominada diretamente ionizante. Por outro lado, as radiações desprovidas de carga, são classificadas como radiações indiretamente ionizantes, uma vez que interagem individualmente, transferindo sua energia para elétrons que, por sua vez, causam ionizações adicionais [33].

2.4.2 Dispersão da Radiação

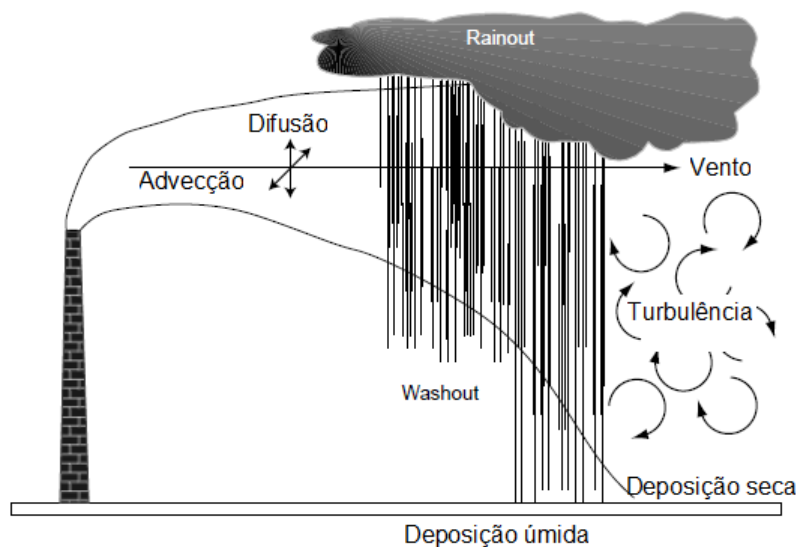
O interesse pelo comportamento dos radionuclídeos no meio ambiente é geralmente motivado pelos possíveis efeitos biológicos que eles possam causar, além da necessidade de se entender os processos geoquímicos ou ecológicos por meio da observação do transporte dos radionuclídeos. Uma vez detectado a liberação de material radioativo fora do limite de contenção dos reatores, é necessário entender como funciona o comportamento e transporte desse material na atmosfera para aumentar a eficiência das medidas de contingência [35].

Assim, a formulação de planos de emergência é baseada nos possíveis cenários de concentrações no ar e, portanto, requer modelos matemáticos de dispersão de radiação na atmosfera capazes de relacionar as fontes de liberação com o deslocamento da radiação.

A descrição da liberação de radionuclídeos no meio ambiente é conhecida como termo fonte. Ele representa o inventário radioativo localizado no interior do núcleo e a distribuição dos produtos de fissão no meio ambiente em caso de acidentes. De posse dos dados do termo fonte do reator, dados meteorológicos e topográficos da região, é possível modelar a dispersão dos radionuclídeos, calcular as concentrações e as doses de radiação [35].

Após liberado na atmosfera, o transporte das partículas (Figura 7) é dominado na horizontal pelo vento médio (advecção) e na vertical pela turbulência. E como consequência, o transporte e a dispersão de poluentes na atmosfera é, geralmente, descrito pela equação de advecção-difusão, usada para estimar o campo de concentração de radiação na baixa atmosfera [35].

Figura 7 - Os processos que afetam o transporte de radionuclídeos na atmosfera.



Fonte: Referência [35].

O modelo de pluma gaussiana, largamente aceito em avaliação radiológica, é aplicado, através da equação fundamental (Equação 1), para estimar a dispersão de liberações atmosférica de longo prazo.

$$X(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \theta_y \theta_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\theta_y^2} + \frac{z^2}{2\theta_z^2}\right)} \quad (1)$$

Onde:

Q = Taxa de atividade liberada (Bq/s)

u = Velocidade média do vento (m/s)

x = Distância entre o ponto de liberação e o ponto de interesse (m)

y = Largura da pluma (na direção perpendicular ao campo de vento) (m)

z = Altura da pluma (m)

θ_z = Desvio vertical da pluma (m)

θ_y = Desvio lateral da pluma (m)

X = Concentração de atividade (Bq/ m³)

Após dispersa na atmosfera, a pluma radioativa sofre o processo de depleção, processo pelo qual está nuvem é dispersa, diluída e enfraquecida ao longo do tempo e do espaço. Os processos de depleção são decaimento radioativo, precipitação e deposição seca e úmida [35].

A deposição seca ocorre quando as partículas radioativas, transportadas pelo ar, entram em contato com superfícies, como o solo, paisagens e edifícios. A aderência das partículas à superfície é influenciada por vários fatores, como tamanho das partículas e tipo de superfície. Partículas maiores tendem a se depositar mais rapidamente, enquanto partículas menores podem permanecer suspensas por mais tempo [35].

Já a deposição úmida, ocorre através da precipitação na forma de *rainout* e *washout*. O *washout* é o processo pelo qual partículas radioativas suspensas na atmosfera são capturadas por gotas de água, sem que as gotas de água atinjam o solo. E *rainout* é o processo de remoção durante a formação de nuvens cujo material radioativo serviu de núcleo de condensação ou nuvens que absorveram gases ou apresentaram impactação com material radioativo. Diferentemente do *washout*, as partículas capturadas pelas gotas de água da superfície, no processo de *rainout*, são depositadas no solo [36].

Por fim, o decaimento radioativo também retira material radioativo da atmosfera, à medida que as partículas radioativas na pluma emitem radiação e decaem, sua atividade diminui ao longo do tempo. Isso significa que a pluma radioativa enfraquece progressivamente à medida que as partículas radioativas se desintegram. O processo pode ser calculado pelo fator de redução f pela Equação 2.

$$f = e^{(-\lambda \frac{x}{u})} \quad (2)$$

Onde:

f = Fator de redução decaimento

u = Velocidade média do vento (m/s)

λ = Constante de decaimento radioativo (s^{-1})

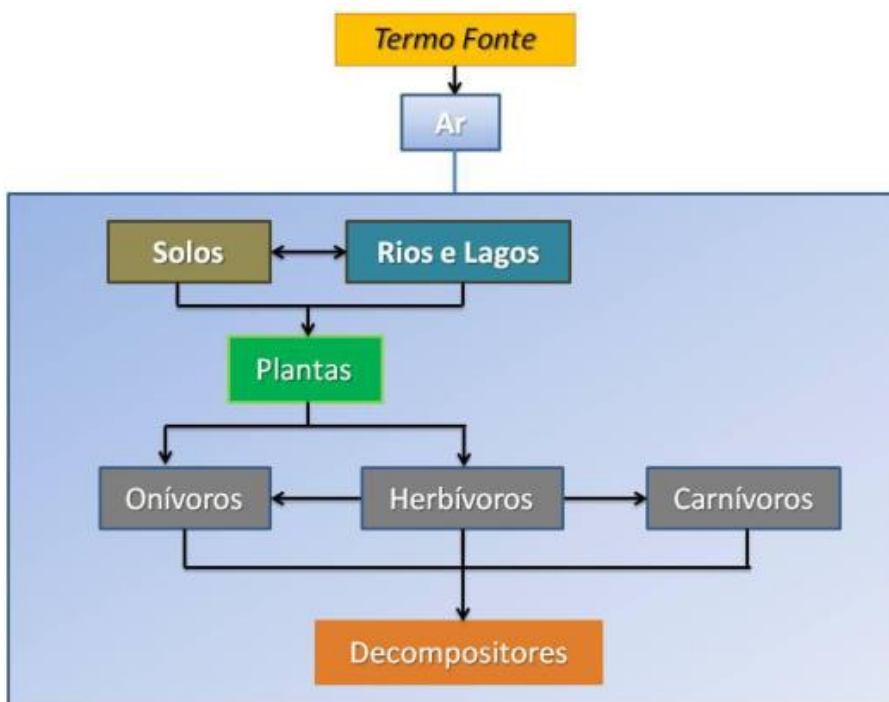
π = Constante matemática com valor aproximado de 3,1415

Uma vez liberado o material radioativo, é importante determinar os produtos de fissão que se encontravam no interior do núcleo, chamados de inventário radioativo. Os elementos iodo, céσιο, telúrio, rutênio, xenônio e criptônio são os responsáveis pela maior parte das consequências resultantes em acidentes.

2.4.3 Consequência da Radiação no Meio Ambiente

A liberação de radionuclídeos, seja de forma intencional ou acidental, resulta na contaminação de todos os componentes do ambiente. O material radioativo liberado no meio ambiente percorre diversos caminhos, por meio de mecanismos de transporte, irradiando organismos vivos e materiais inertes (Figura 8) [37].

Figura 8 – Transporte dos radionuclídeos no ecossistema.



Fonte: Referência [37].

A maior parte da descarga radioativa ocorre na forma de material dissolvido na atmosfera ou recursos hídricos. Quando a água ou o ar, contendo material radioativo, tem contato com vegetação ou plâncton, as partículas apresentam alta probabilidade de serem absorvidas e contaminarem.

Com isso, os radionuclídeos presentes no ecossistema podem se concentrar nas plantas, base da cadeia alimentar, por assimilação dos nutrientes do solo, deposição do ar ou absorção da água de plantas aquáticas. Uma vez contaminada a base da cadeia alimentar, o material liberado atinge toda a fauna do ecossistema. O transporte do termo fonte das plantas para os animais herbívoros ocorre por ingestão. Os herbívoros também absorvem radiação por outro meios, como inalação de ar e solo contaminado. Os radionuclídeos presentes nos tecidos dos herbívoros podem ser ingeridos pelos carnívoros através da predação [37].

Importante destacar que os danos ambientais causados pela exposição à radiação podem permanecer com alto nível de radioatividade por décadas. Isso ocorre devido ao efeito do decaimento radioativo. Radionuclídeos são elementos que, devido à sua natureza física, são instáveis e emitem energia na forma de decaimento radioativo, tendo como produto um radioisótopo com a energia cada vez menor, até, por fim, se tornar um elemento estável [38]. Essa meia-vida pode variar consideravelmente, indo de valores muito longos, da ordem de milhões de anos, até valores extremamente curtos, da ordem de milésimos de segundos [39]. Com base nesse princípio, é evidente que a contaminação do solo por radionuclídeos pode resultar em sua inadequação por um período que pode variar de dias a até milênios, como ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela com meia-vida de radioisótopos.

Radioisótopo	Meia-vida
Carbono-15	2,4 s
Xenônio-135	9 h
Fósforo-32	32 dias
Enxofre-35	87 dias
Cobalto-60	5,26 anos
Estrôncio-90	28,1 anos
Césio-137	30,17 anos
Rádio-226	$1,6 \cdot 10^3$ anos
Plutônio-239	$2,44 \cdot 10^4$ anos
Urânio-235	$4,5 \cdot 10^9$ anos

Fonte: Referência [40].

2.4.4 Consequência da Radiação na Saúde Humana

Quando discutimos os efeitos da radiação na matéria, é fundamental destacar que os maiores riscos se concentram na vida humana, na biodiversidade e na atmosfera. Esses seres vivos estão mais suscetíveis a sofrer danos devido a essa exposição. Entre esses riscos, ocultos por trás dos benefícios proporcionados pela radiologia médica, dos avanços na pesquisa nuclear e da aplicação da energia atômica, emerge um perigo significativo da exposição à radiação. De forma geral, os riscos para alguém exposto à radiação ionizante dependem do tempo de exposição, da distância da fonte, da energia da radiação e da atividade da amostra [41].

A exposição à radiação resulta em dois efeitos principais: os efeitos determinísticos, que estão associados à morte celular, incluindo as queimaduras por radiação; e os efeitos estocásticos, que envolvem alterações genéticas e cromossômicas, com o potencial de aumentar a taxa de mutação nas gerações subsequentes, aumentando o risco de câncer e outras desordens genéticas [42].

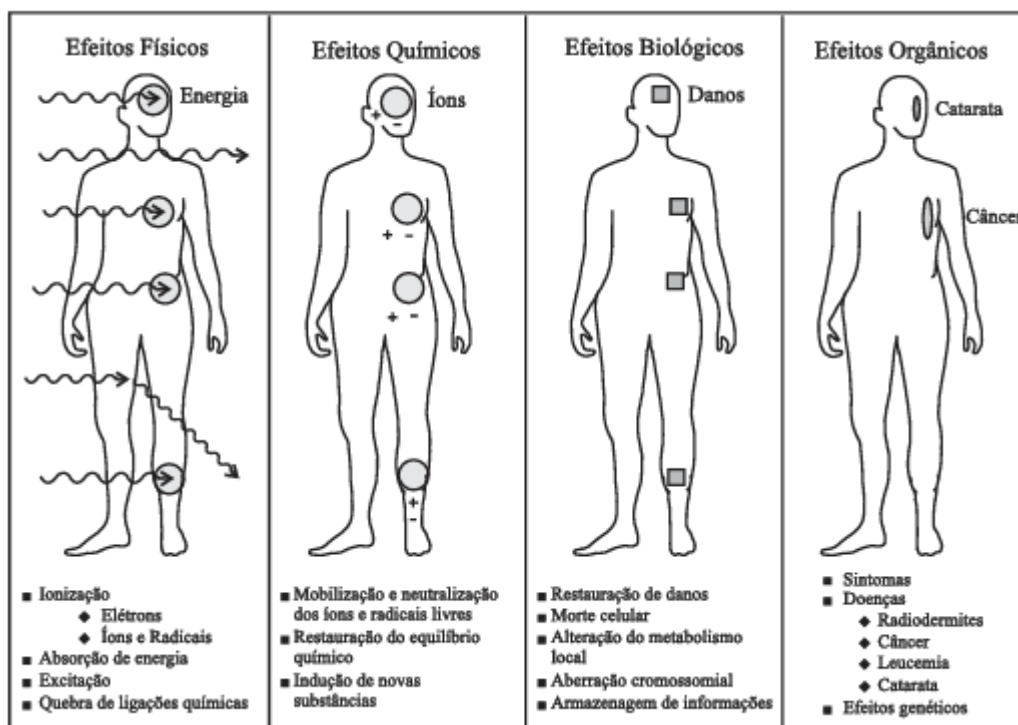
É importante considerar que o corpo humano é constituído por aproximadamente setenta trilhões de células, sendo que o DNA se encontra no núcleo de cada uma delas. Quando a radiação incide sobre as células, ela pode interagir de maneira a atravessá-las e, assim, desencadear a liberação de elétrons, resultando em uma desestabilização que pode ser temporária ou permanente. Esse processo de interação da radiação com o organismo humano ocorre em duas formas distintas: a ionização direta e a ionização indireta. Na ionização direta,

a radiação age de maneira direta sobre as moléculas de DNA, rompendo suas ligações químicas. Por outro lado, na ionização indireta, a radiação quebra moléculas de água, levando à formação de radicais livres que, por sua vez, têm a capacidade de ionizar outras moléculas de importância vital [43].

Em última análise, quando o número de células mortas ou danificadas pela incidência de radiação for expressiva, poderá acarretar com resultado a disfunção do órgão até a morte do mesmo. Ademais, pode ocorrer outro dano ao DNA, a mutação celular. Esse processo influencia as divisões celulares posteriores, e pode causar câncer [44].

Quando a quantidade ou a frequência de efeitos biológicos produzidos pela radiação começa a desequilibrar o organismo humano ou o funcionamento de um órgão, surgem sintomas clínicos denunciadores da incapacidade do organismo de superar ou reparar tais danos, que são as doenças [45]. Conforme evidencia a Figura 9.

Figura 9 – Fases do efeito biológico produzido pela radiação ionizante.



Fonte: Referência [45].

Em um evento estocástico, a probabilidade de ocorrência está diretamente relacionada à dose recebida, sem a presença de um limiar. Essas doses, embora estejam abaixo dos limites estabelecidos pelos órgãos reguladores, têm o potencial de induzir efeitos. As células que sofrem danos podem enfrentar a morte ao tentar se dividir ou recorrer a reparos

mediados por enzimas. A eficiência e a rapidez do reparo desempenham um papel crítico na integridade do DNA. Um reparo bem-sucedido pode restaurar o DNA à sua composição original sem consequências significativas. No entanto, reparos propensos a erros podem resultar em mutações na sequência de bases ou rearranjos mais substanciais. Essas falhas no reparo podem levar à morte reprodutiva da célula ou causar alterações no material genético das células sobreviventes, com possíveis consequências a longo prazo [42].

Já em um evento determinístico, o qual ocorre devido uma dose acima do limiar estabelecido, causando um grau de morte celular não compensado, com prejuízos detectáveis no funcionamento do tecido ou órgãos. Devido a intensidade da dose, geralmente predomina lesões imediatas como radiodermite, por exemplo.

Os estudos de pesquisas de toda comunidade nuclear em proteção radiológica vêm apresentando melhoras com aprimoramento de blindagem e arquiteturas para expor os operadores a doses cada vez menores, além do gerenciamento do tempo do indivíduo exposto a radiação, porém conforme afirma Tauhata [46], isto não é garantia que o operador não terá consequências.

“Para doses baixas, não haverá efeitos imediatos, mas há possibilidade de lesões a longo prazo. Os efeitos retardados, principalmente o câncer, complicam bastante a implantação de critérios de segurança no trabalho com radiações ionizantes. Não é possível, por enquanto, usar critérios clínicos porque, quando aparecem os sintomas, o grau de dano causado já pode ser severo, irreparável e até letal. Em princípio, é possível ter um critério biológico e espera-se algum dia ser possível identificar uma mudança biológica no ser humano que corresponda a uma mudança abaixo do grau de lesão. Por enquanto, utilizam-se hipóteses estabelecidas sobre critérios físicos, extrapolações matemáticas e comportamentos estatísticos”. [46].

O perigo das radiações para o indivíduo exposto pode atravessar gerações e tornar-se hereditário. A pessoa exposta pode apresentar efeito somático, quando o dano causado pela radiação aparece na pessoa irradiada, podendo ser imediato ou tardio. Ou pode apresentar o efeito genético, quando o dano é causado nas células das gônadas (ovários e testículos), e o efeito aparece nos descendentes da pessoa irradiada como resultado da alteração no material hereditário dos gametas [46].

Quando a pessoa é exposta a doses extremamente altas de radiação ionizante em um curto período de tempo, como os operadores e bombeiros no acidente de *Chernobyl*, o indivíduo irá contrair a síndrome aguda da radiação. Na síndrome aguda da radiação, o organismo desenvolve reações biológicas que podem se manifestar sob forma de sintomas que indicam alterações profundas provocadas pela radiação. Caracteriza-se inicialmente por anorexia, náusea e vômito, mas pode progredir para disfunções hematológicas, gastrointestinais, neurológicas, pulmonares e em algum outro órgão principal (Tabela 2). A

síndrome possui 4 etapas clínicas, é irreversível e o tratamento é apenas sintomático, e dependendo da intensidade da dose absorvida, pode ser fatal.

Tabela 2 – Sintomas e limites de dose para síndrome aguda da radiação.

FORMA	DOSE ABSORVIDA (Gray)	SINTOMAS
Infra-clínica	< 1	Ausência de sintomas, na maioria dos indivíduos
Reações leves generalizadas	1 a 2	Astenia, náuseas e vômitos de 3 a 6 horas após a exposição. Efeitos desaparecendo em 24 horas
Síndrome Hematopoiética Leve	2 a 4	Depressão da função medular (linfopenia, leucopenia, trombopenia, anemia). Máximo em 3 semanas após a exposição e voltando ao normal em 4 a 6 meses.
Síndrome Hematopoiética Grave	4 a 6	Depressão severa da função medular
Síndrome do Sistema Gastro-intestinal	6 a 7	Diarréia, vômitos, hemorragias
Síndrome Pulmonar	6 a 10	Insuficiência respiratória aguda
Síndrome do Sistema Nervoso Central	>10	Coma e morte. Horas após a exposição.

Fonte: Referência [46].

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

O estudo atual foi produzido com fundamentos em uma abordagem metodológica exploratória-descritiva como base, pois Oliveira [47] considera que a pesquisa exploratória tem como objetivo principal desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores. Portanto, foi um método que possibilitou a realização de uma investigação ampla sobre o tópico em análise. O autor Júnior [48], afirma que a pesquisa descritiva ocorre quando o pesquisador tem por objetivo descrever as características de certa população ou fenômeno e estabelecer relações entre as variáveis, sem sua manipulação. Isso, por sua vez, contribuiu para uma compreensão mais abrangente dos fenômenos em questão e a identificação de padrões subjacentes.

Mediante a utilização da abordagem descritiva, a análise e apresentação dos dados foram realizadas de maneira direta e detalhada, elucidando as características e relações identificadas durante o curso da investigação. A descrição dos resultados obtidos desempenhou um papel fundamental em aprimorar a compreensão dos elementos envolvidos no âmbito do tema em análise. Ao optar por adotar esta metodologia exploratório-descritiva, o objetivo foi promover um estudo amplo e claro acerca desse tópico, proporcionando uma análise criteriosa e embasada.

3.2 Quanto aos fins

Os objetivos principais deste estudo eram avaliar as consequências radiológicas de um acidente severo em um reator PWR e os impactos produzidos tanto na parte social como ambiental. E para que tal objetivo fosse alcançado foi adotada uma perspectiva metodológica que envolveu uma revisão extensa da literatura científica relacionada à história da radiologia nuclear, análise de acidentes passados, não somente em reatores PWR, como também outros acidentes nucleares com reatores diferentes, bem como as políticas e estratégias existentes para conter possíveis acidentes.

3.3 Quanto aos meios

Para coletar dados relevantes sobre a análise de consequências radiológicas e as características dos reatores PWR, foi empregado uma combinação de fontes, incluindo pesquisa em bases de dados acadêmicas e consulta a documentos técnicos de organizações reguladoras.

- **Primeira etapa:** Realização de estudo bibliográfico pertinente ao assunto;
- **Segunda etapa:** Seleção de arquivos de maior proximidade e relevância para o estudo;
- **Terceira etapa:** Análise dos dados, formulação do problema e hipóteses;
- **Quarta etapa:** Formulação do referencial teórico; e
- **Quinta etapa:** Discursões e conclusões sobre todo o estudo bibliográfico.

3.4 Limitações do Método

A coleta de dados reais durante um vazamento em um reator nuclear é extremamente desafiadora, devido à natureza perigosa e altamente controlada dessas instalações. Portanto, a disponibilidade de dados detalhados pode ser limitada, o que afeta a capacidade de modelar com precisão o evento, além da complexidade de simular esses eventos, que exige uso de *software* apropriados.

3.5 Coleta e Tratamento de Dados

Para realizar a pesquisa sobre as consequências radiológicas de um acidente severo em reatores PWR, foi essencial coletar dados confiáveis e relevantes de diversas fontes. As principais fontes de dados incluíram:

- **Literatura Científica:** Foram consultados artigos científicos, livros, relatórios técnicos e publicações acadêmicas relacionadas à energia nuclear, reatores PWR e acidentes nucleares passados.
- **Estudos de Caso:** Dados de estudos de casos de acidentes nucleares passados, como TMI, *Chernobyl* e *Fukushima*, foram analisados para entender as consequências radiológicas.

A coleta de dados envolveu pesquisas bibliográficas, revisões sistemáticas da literatura e consultas a bancos de dados acadêmicos, bem como revisão de documentos oficiais

de agências reguladoras. Foram identificadas palavras-chave relevantes, como "reator PWR", "acidentes nucleares", "consequências radiológicas" e "exposição à radiação", e “acidente severo” para guiar a pesquisa de literatura. As publicações selecionadas foram avaliadas quanto à sua relevância e qualidade, priorizando fontes confiáveis e revisadas por pares.

Os dados coletados foram submetidos a um processo de tratamento que envolveu análise e síntese, os dados foram analisados e sintetizados para identificar tendências, padrões e informações relevantes. A validade dos dados foi verificada para garantir sua confiabilidade.

4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A contextualização da importância da energia nuclear, conforme o objetivo, revelou que a energia nuclear desempenha um papel crucial no suprimento de eletricidade em muitas partes do mundo. Esta revisão do referencial teórico destacou a capacidade da energia nuclear de gerar quantidades excepcionais de eletricidade por meio da fissão nuclear. No entanto, também evidenciou que essa fonte de energia não está isenta de desafios e riscos significativos, particularmente no que diz respeito à gestão de resíduos radioativos.

Foi observado que as características específicas do reator tipo PWR desempenham um papel fundamental nas consequências radiológicas de um acidente. A presença de um sistema de refrigeração pressurizado, aliada ao uso de água como refrigerante e moderador, exerce um impacto significativo na diminuição da dispersão de materiais radioativos. Adicionalmente, a geometria do núcleo do reator PWR demonstrou influenciar substancialmente a liberação e disseminação de radioatividade [25].

Foi possível constatar, ao examinar os principais acidentes em reatores nucleares, que esses eventos deixaram marcas indeléveis na história da energia nuclear. Os desastres, como os ocorridos em TMI, *Chernobyl* e *Fukushima*, ressaltaram a importância da segurança e da regulamentação rigorosa na indústria nuclear. Eles também destacaram que o potencial de vazamento em um reator tipo PWR pode resultar em sérias consequências, tanto a nível local quanto global. Esses eventos trágicos servem como lembretes vívidos dos perigos intrínsecos associados à energia nuclear e da necessidade contínua de aprimorar as medidas de prevenção e mitigação de acidentes.

E, por fim, no que tange aos riscos associados a acidentes em reatores tipo PWR, com uma ênfase especial nos efeitos da exposição à radiação. Foi observado que a exposição à radiação ionizante em tais acidentes pode desencadear danos imediatos e a longo prazo, incluindo câncer, síndrome aguda de radiação e outros efeitos prejudiciais. Além disso, a liberação de radionuclídeos no meio ambiente pode impactar a biodiversidade e o ecossistema, levando a mutações genéticas e consequências ecológicas.

5 CONCLUSÃO

A partir da elaboração dos resultados, conclui-se que a energia nuclear é uma fonte de suprimento de eletricidade de importância indiscutível em várias partes do mundo, capaz de gerar quantidades excepcionais de energia através da fissão nuclear. No entanto, a análise abrangente realizada neste estudo deixou claro que a energia nuclear apresenta desafios e riscos de considerável importância.

“Existem três riscos associados ao uso de energia nuclear: físicos, econômicos e estratégicos. Como riscos físicos, consideram-se aqueles que resultam da produção e uso de grandes quantidades de radioatividade, o que é inerente ao uso de energia nuclear. Eles incluem a produção de combustível nuclear (urânio enriquecido), seu uso nos reatores nucleares, onde podem ocorrer acidentes que liberem radioatividade no meio ambiente (como ocorreu em *Chernobyl*), e na armazenagem dos resíduos altamente radioativos. Como riscos econômicos, tem-se a questão dos custos da energia nuclear, e como riscos estratégicos, estão a questão da possibilidade de usar produtos usados no ciclo nuclear (urânio enriquecido) ou produtos formados pelo funcionamento dos reatores nucleares (plutônio), para produzir armas nucleares” [49].

Em síntese, a análise das especificidades dos reatores tipo PWR e seu impacto nas consequências radiológicas de um possível vazamento ressalta a importância crítica de elementos como a refrigeração sob pressão, o uso da água como agente refrigerante e moderador, e a geometria do núcleo do reator na disseminação de substâncias radioativas. Essas características fundamentais não apenas definem o funcionamento dos reatores tipo PWR, mas também determinam o potencial impacto na segurança e saúde humanas, bem como no meio ambiente.

Em concordância com essas perspectivas, Hirsch [50] afirma que o combustível descartado, altamente radioativo, geralmente é armazenado com resfriamento contínuo. Se o resfriamento falhar, poderia haver um grande vazamento de radioatividade, bem mais grave do que o do acidente em *Chernobyl*, em 1986. Portanto, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos, juntamente com a estrita adesão aos regulamentos de segurança, são essenciais para garantir que a energia nuclear continue a ser uma fonte de energia viável e segura no futuro.

Os resultados apresentados ao longo deste trabalho destacam a urgente necessidade de uma abordagem responsável e vigilante em relação à energia nuclear. Os trágicos eventos em *Three Mile Island*, *Chernobyl* e *Fukushima* demonstraram os riscos significativos que podem estar associados à geração de energia nuclear e à operação de reatores nucleares. É imperativo que a indústria nuclear e os formuladores de políticas aprendam com esses erros do passado para evitar a repetição de tais desastres no futuro.

No contexto dos perigos associados a acidentes severos em reatores tipo PWR, com foco especial na exposição à radiação, tornou-se evidente que tais eventos têm o potencial de

resultar em consequências sérias, tanto para a saúde humana quanto para o ambiente. A exposição a radiações ionizantes em tais cenários pode desencadear uma série de problemas, que variam desde o desenvolvimento de câncer até outras condições de saúde relacionadas à radiação. Além disso, a liberação de radionuclídeos na natureza pode exercer impactos significativos na biodiversidade e no equilíbrio do ecossistema. Corrobora-se com a afirmação de Aquino [51] que os radionuclídeos artificiais gerados pelo homem têm contribuído negativamente para aumentar o grau de exposição à radiação em nosso planeta. Essas conclusões destacam a importância crítica de medidas de segurança rigorosas e da conformidade estrita com regulamentos e protocolos de prevenção em instalações nucleares.

5.1 Considerações Finais

Neste estudo, buscou-se uma abordagem abrangente para compreender a importância da energia nuclear, especificamente focando nos reatores PWR. A avaliação dos riscos para a saúde humana e o meio ambiente resultantes de acidentes em reatores do tipo PWR constitui um dos pilares deste estudo. Isto incluiu uma análise detalhada dos efeitos da exposição à radiação, levando em consideração os potenciais impactos de longo prazo. O conhecimento adquirido nesse processo destaca a necessidade de medidas rigorosas de segurança e protocolos de prevenção em instalações nucleares, visando mitigar esses riscos.

A investigação apresentada aqui representa um passo em direção à conscientização sobre a energia nuclear e seus impactos. Embora a ocorrência de acidentes nucleares severo seja extremamente baixa, suas consequências são gravíssimas, portanto todo avanço de segurança no que tange a pesquisa e regulamentação são justificáveis. À medida que a humanidade busca soluções energéticas, a energia nuclear permanece como uma alternativa significativa. No entanto, a busca contínua por abordagens responsáveis, seguras e sustentáveis é essencial.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

De forma que o trabalho não se torne apenas teórico e expositivo, sugere-se a aplicação dos conceitos da seguinte maneira: A escolha de um reator de potência conhecido, Angra 1, 2, reator LABGENE (Laboratório de Geração Núcleo-Elétrica) ou arbitrar valores para o inventário radioativo e termo fonte. Utilizar dados meteorológicos da área onde fica situado o reator.

A partir de uma hipótese numa falha qualquer de operação ou equipamento, analisar o comportamento de um reator tipo PWR, até a consolidação do acidente severo. E posteriormente com os dados, calcular a dose efetiva, quantificar e analisar os danos da radiação causados pelo acidente.

REFERÊNCIAS

- [1] Acidente Nuclear; disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Acidente_nuclear> acesso em 08 de outubro de 2023.
- [2] SCLIAR, C. et al. **Percepção de risco dos trabalhadores das usinas nucleares de Angra dos Reis, Rj: estudo piloto de uma realidade em saúde**, Rio de Janeiro; disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/1999/PDF/CG06AC.PDF>> acesso em 10 de outubro de 2023.
- [3] CAMPOS, M. **Energia Nuclear**; disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/energia-nuclear.htm>> acesso em 12 de outubro de 2023.
- [4] FERREIRA, N.L.D. **Avaliação das consequências radiológicas de acidentes em reatores de pesquisa**; disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/10317/04785.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> acesso em 01 de outubro de 2023.
- [5] CUNHA, A. **Física aplicada**. Recife: Rede e-TEC Brasil, 2016.
- [6] SIMABUKULO, L. et al. **Energia, industrialização e modernidade – história social**; disponível em: <<https://eletromemoria.fflch.usp.br/sites/eletromemoria.fflch.usp.br/files/03.pdf>> acesso em: 5 de agosto de 2023.
- [7] ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Guia de Referência para a Cobertura Jornalística**. Brasília.p.6. Setembro. 2016.
- [8] Energia Nuclear; disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/Energia-Nuclear.aspx>> acesso em 03 de setembro de 2023.
- [9] LIESENFELD, T. **Energia nuclear só serve para guerra?**; disponível em: <<https://www.ufsm.br/midias/arco/energia-nuclear-so-serve-para-a-guerra>> acesso em 10 de outubro de 2023.
- [10] FISSÃO E FUSÃO NUCLEAR: O QUE SÃO, DIFERENÇAS E APLICAÇÕES; disponível em: <<https://aprovatotal.com.br/fissao-e-fusao-nuclear-o-que-sao-diferencas-e-aplicacoes/>>. acesso em 21 de outubro de 2023.
- [11] MASILI, G. et al. **Usina Nuclear**; disponível em: <<https://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/nuclear/nuclear.htm>> acesso em 24 de outubro de 2023.
- [12] SIQUEIRA, D. **Análise Energética e Exergética de uma Usina Nuclear com Reator PWR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto de engenharia mecânica. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2016.p.33.

- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Nuclear power Reactors in the World**. Vienna, p. 86. 2015.
- [14] GOLDBERG, S. et al. **Nuclear Reactors: Generation to Generation**; disponível em: <<https://www.amacad.org/sites/default/files/academy/pdfs/nuclearReactors.pdf>> acesso em 20 de agosto de 2023. p4.
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Efficient water management in water cooled reactors**. Austria, p.131. 2012.
- [16] File: PWR nuclear power plant diagram; disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:PWR_nuclear_power_plant_diagram.svg> acesso em 20 de agosto de 2023.
- [17] NOVAES, S.A. **Como funciona uma usina nuclear?**; disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/como-funciona-uma-usina-nuclear.htm#:~:text=As%20%C3%BAnicas%20usinas%20nucleares%20brasileiras,l%C3%ADquido%20de%20arrefecimento%20quanto%20moderador>> acesso em 11 de outubro de 2023.
- [18] Usina Nuclear; disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20041/Moacir/usina_arquivos/usinanuclear.html> acesso em 12 de outubro de 2023.
- [19] TERREMOTO, L. **Fundamentos de Tecnologia Nuclear Reatores**. São Paulo: IPEN. 2004.p.110.
- [20] CROSSLAN I. **Nuclear fuel cycle science an engineering**. 37° edição. California: wohead. 2012. p.216.
- [21] PEREIRA, L. **Desenvolvimento de processos de reciclagem de cavacos de zircaloy via refusão em forno elétrico a arco e metalurgia**. Dissertação (Doutorado em Ciências). Instituto de pesquisas energéticas e nucleares – IPEN São Paulo. 2014.p.2.
- [22] ROSSI, A. **Tudo o que você precisa saber sobre as usinas nucleares de Angra 1 e 2**; disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-48683942>> acesso em 10 de outubro de 2023.
- [23] VINHAS, L. **Segurança Nuclear**; disponível em: <https://www.senado.leg.br/comissoes/cma/ap/AP20110323_Laercio_Vinhas.pdf> acesso em 04 de outubro de 2023.
- [24] LIRA, J.C.L.; disponível em:< <https://www.infoescola.com/radioatividade/escala-internacional-de-acidentes-nucleares/>> acesso em: 26 de agosto de 2023.
- [25] TONG, L. S. et al. **Thermal analysis of pressurized water reactors**. 3° ed. Illinois-USA: American Nuclear Society,1996. p.685.

- [26] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Segurança na operação de usinas nucleoeletrica**; disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm126.pdf>> acesso em 5 de setembro de 2023.
- [27] Pior acidente dos EUA completa 40 anos; disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=40&campo=11923> acesso em 02 de outubro de 2023.
- [28] UNITE STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Backgrounder on the Three Mile Island Accident**; disponível em: <<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>>. acesso em: 26 de agosto de 2023.
- [29] Acidente nuclear de Chernobyl; disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Acidente_nuclear_de_Chernobil> acesso em 08 de outubro de 2023.
- [30] AGUIAR, A. **Avaliação o impacto de um acidente severo na usina de Angra os Reis com liberação os radionuclídeos para a atmosfera**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Nuclear). Instituto Alberto Luiz Coimbra e Pós- Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.p.24.
- [31] Acidente Nuclear de Fukushima I; disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Acidente_nuclear_de_Fukushima_I> acesso em 04 de outubro de 2023.
- [32] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Radiação efeitos e fontes**. São Paulo. 2016.
- [33] Radiação; disponível em: <https://www.fiocruz.br/biosseguranca/Bis/lab_virtual/radiacao.html> acesso em 10 de outubro de 2023.
- [34] INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Radiação ionizante: quanto tempo ela pode ficar no corpo humano?** São Paulo. 2021.
- [35] MAZZILLI, B. et al. **Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental**. São Paulo: IPEN, 2004.p.19.
- [36] MARTINS, R. **Avaliação da toxicidade de águas de chuva a organismos aquáticos**. Dissertação(Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear). IPEN. São Paulo.2009.p.21.
- [37] SILVA, F. **Avaliação da mobilidade do ¹³⁷Cs em perfis de solos da região do pantanal**. Dissertação (Mestrado em Radioproteção e Dosimetria). Instituto de radioproteção e dosimetria. Comissão Nacional de Energia Nuclear na área de Radioecologia. Rio e Janeiro.2013.p.9.
- [38] CAMOZZATO, T. **Medicina nuclear na prática**. Florianópolis: IFSC,2020.

- [39] CARVALHO, R. et al. **Aplicações da energia nuclear na saúde**. São Paulo: SBPC, 2017.
- [40] MANUAL DA QUIMICA; disponível em: <<https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/meia-vida-dos-elementos-radioativos.htm>> acesso em 20 de setembro de 2023.
- [41] INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Radiação ionizante: quanto tempo ela pode ficar no corpo humano?** São Paulo. 2021.
- [42] UCHOA, E. **Césio 137 : Revisão Integrativa do biomonitoramento genético de pessoas expostas à radiação ionizante no acidente radiológico de Goiânia, no período de 1988 a 2021**. Dissertação (Mestrado em Genética). Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC Goiás. 2021.p.34.
- [43] Quais são os efeitos biológicos da radiação ionizante?; disponível em: <<https://safetyrad.com/2018/05/06/quais-sao-os-efeitos-biologicos-da-radiacao-ionizante/>> acesso em 09 de outubro de 2023.
- [44] SILVA, A. et al. **Os impactos da radiação no corpo humano**; disponível em: <<https://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/jice/9jice/paper/view/9361/4106>> acesso em 20 de setembro de 2023.
- [45] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **efeitos biológicos da radiação**; disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073469.pdf> acesso em 20 de setembro de 2023.
- [46] TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 10º edição. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014.p. 131-140.
- [47] OLIVEIRA, M. **Metodologia Científica: um manual para a realização de pesquisas em administração**. Catalão: UFG, 2011.p 21.
- [48] JÚNIOR, E.L.O. **Pesquisa científica na graduação: um estudo das vertentes temáticas e metodológicas dos trabalhos de conclusão de curso**; disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20939/3/Pesquisacientificagraduacao.pdf>> acesso em 28 de setembro de 2023.
- [49] GOLDEMBERG, J. **Os riscos da energia nuclear**. Revista comciência. n.104, pp.0-0. 2008.
- [50] HIRSCH, H. **Perigos dos reatores nucleares. Riscos na operação da tecnologia nuclear no século XXI**; disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ea/a/cDqZmLPGB5FVxXqSnGGtdTk/?lang=pt>> acesso em 28 de setembro de 2023.
- [51] AQUINO, K. et al. **Radioatividade e Meio ambiente: os Átomos instáveis da natureza**. Sociedade brasileira de química. São Paulo. vol 8. pp.144.2012.