

**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

ACIDENTES DE *FUKUSHIMA* E *CHERNOBYL*: tipos de acidente, consequências radiológicas e medidas de segurança implantadas após as suas ocorrências



PRIMEIRO-TENENTE FLAVIO GIRO DE OLIVEIRA FILHO

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE FLAVIO GIRO DE OLIVEIRA FILHO

ACIDENTES DE *FUKUSHIMA* E *CHERNOBYL*: tipos de acidente, consequências radiológicas e medidas de segurança implantadas após as suas ocorrências

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

Orientador:

Prof. NELSON LUIZ DIAS FERREIRA, PhD

CIAA
Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE FLAVIO GIRO DE OLIVEIRA FILHO

ACIDENTES DE *FUKUSHIMA* E *CHERNOBYL*: tipos de acidente, consequências radiológicas e medidas de segurança implantadas após as suas ocorrências

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:

Prof. Nelson Luiz Dias Ferreira, PhD – DDNM _____

CT Leonardo Oldani Felix, M.Sc. – CIAA _____

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

Dedico esse trabalho a família que aprouve a Deus me dar, utilizando esta para diariamente me consolar, moldar e ajudar; para um dia constituirmos a Sua família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente Àquele que me criou e se entregou por mim, fazendo o trabalho verdadeiramente penoso para que eu pudesse hoje ter esperança ao trabalhar, mesmo com todas as dificuldades, e por sua graça de nos conceder colher os seus frutos.

À minha esposa Larissa pelo amor, paciência, consolo, orientações e conversas em meio às nossas tentativas de conciliar tantas missões ao longo deste ano.

Aos meus filhos Benício e Vicente, que mesmo não sabendo já me inspiram diariamente ao acordar, me motivando neste e em outros trabalhos.

Aos meus pais, Flávio e Dóris, pela motivação inabalável e por sempre acreditarem em mim, assim como aos meus avós, Wilson, Adelina e Magdalena.

Ao professor Nelson Ferreira, agradeço pelas orientações precisas e valiosas, que foram de suma importância para a consecução deste trabalho, estendendo os agradecimentos aos demais instrutores do curso de Tecnologia Nuclear deste ano pelo compartilhamento de conhecimentos.

Aos amigos Guilherme Branco e Gustavo Novaes, agradeço a amizade sincera e parceria constante ao longo deste curso, estendendo aos demais companheiros do quarto do C-ApA-TN.

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram neste ano. Muito obrigado!

“Não a nós, Senhor, não a nós, mas
ao teu nome dá glória, por amor da
tua misericórdia e da tua fidelidade”

Sl 115:1

Resumo

A energia nuclear evoluiu muito desde a descoberta do nêutron na década de 1930, desenvolvendo a geração de energia elétrica, a produção de radioisótopos para utilização na medicina, a propulsão de embarcações e a produção de artefatos militares, entre outras aplicações. Contudo, acidentes nucleares como os de Chernobyl e Fukushima, os dois piores da história segundo a *International Nuclear and Radiological Event Scale* (INES), representaram um grande desafio para a sobrevivência da indústria nuclear. Este trabalho objetiva destacar as principais causas, as consequências radiológicas e as medidas implementadas com base nesses eventos, fomentando a evolução da segurança nuclear e fazendo com que a energia atômica figure atualmente como um dos meios de promoção do desenvolvimento sustentável. Primeiramente, as causas mais evidentes de ambos os acidentes são destacadas ao longo da narrativa cronológica dos fatos, apresentando detalhes dos projetos das plantas, de seus sistemas de segurança, circunstâncias associadas e ações dos operadores. Em seguida, uma comparação das consequências radiológicas resultantes dos dois acidentes é apresentada, especificando os radionuclídeos liberados, as áreas contaminadas, as doses recebidas pelas populações no entorno e os efeitos na saúde das pessoas. Adicionalmente, as principais medidas de segurança implementadas são enunciadas, principalmente aquelas envolvendo revisões na regulamentação, ações da Agência Internacional de Energia Atômica, áreas de estudo incorporadas e tecnologias desenvolvidas. Com vistas a aumentar a robustez dos sistemas e equipamentos e garantir a resiliência das usinas, foram realizadas revisões de análises de riscos e revalidações de sistemas de emergência a partir da análise das causas e das consequências radiológicas dos acidentes. Em especial, medidas aplicadas pelos Estados Unidos, União Europeia, França, Rússia, China, Japão e Brasil são discriminadas, buscando-se aprimorar a qualidade e a segurança no uso da energia atômica. O trabalho conclui que a energia nuclear apresenta maior segurança nos dias de hoje devido, principalmente, às diversas ações tomadas para impedir a ocorrência de novos acidentes, o que capacita a energia nuclear como uma ferramenta essencial para atender às demandas energéticas globais, ao passo que, ao substituir matrizes energéticas fósseis, auxilia no combate ao aquecimento global.

Palavras-chave: Acidente; *Chernobyl*; *Fukushima*; Consequências; Segurança.

Abstract

Nuclear power has evolved a lot since the discovery of the neutron in the 1930s, being used to generation of electrical energy, production of radioisotopes for use in medicine, propulsion of vessels and production of military artifacts, among other applications. However, nuclear accidents such as Chernobyl and Fukushima, the two worst in history according to the International Nuclear and Radiological Event Scale (INES), represented a major challenge to the survival of the nuclear industry. This paper aims to highlight the main causes, the radiological consequences and the measures implemented based on these events, promoting the evolution of nuclear safety, and making atomic energy currently one of the means of promoting sustainable development. Firstly, the most evident causes of both accidents are highlighted throughout the chronological narrative of the facts, presenting details of the projects of the plants, their safety systems, associated circumstances, and actions of the operators. Then, a comparison of the radiological consequences resulting from the two accidents is presented, specifying the radionuclides released, the contaminated areas, the doses received by the surrounding populations, and the effects on people's health. In addition, the main safety measures implemented are listed, especially those involving regulatory revisions, actions by the International Atomic Energy Agency, areas of study incorporated, and technologies developed. To increase the robustness of the systems and equipment and ensure the resilience of the plants, reviews of risk analyses and revalidations of emergency systems were carried out based on the analysis of the causes and radiological consequences of accidents. Measures applied by the United States, the European Union, France, Russia, China, Japan, and Brazil are discriminated against, seeking to improve the quality and safety in the use of atomic energy. The work concludes that nuclear energy is safer today due to the various actions taken to prevent the occurrence of new accidents, which makes nuclear energy an essential tool to meet global energy demands, while, by replacing fossil energy matrices, helps combat global warming.

Keywords: Accident; Chernobyl; Fukushima; Consequences; Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Contaminação por Césio-137 após o acidente nuclear de Chernobyl	27
Figura 2 - Estimativa da dispersão de Césio-137 após o acidente nuclear de Fukushima	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das liberações radioativas estimadas dos acidentes de Chernobyl e de Fukushima	29
--	----

LISTAS DE SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i> (corrente alternada)
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
AP1000	<i>Advanced Passive 1000 Reactor</i>
ARS	Síndrome de Irradiação Aguda
ANS	<i>Autorité de Sûreté Nucleaire</i>
BN-800	<i>Beloyarsk Nuclear 800MW Reactor</i>
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DC	<i>Direct Current</i> (corrente contínua)
ENSREG	<i>European Nuclear Safety Regulators Group</i>
EPR	<i>European ou Evolutionary Pressurized Water Reactor</i>
EUA	Estados Unidos da América
Euratom	Comunidade Europeia de Energia Atômica
G7	Grupo dos sete países mais industrializados do mundo
INES	<i>International Nuclear and Radiological Event Scale</i>
LABGENE	Laboratório de Geração Nucleo-Elétrica
LWGR	<i>Light Water-Cooled Graphite Reactor</i>
NEA	<i>Nuclear Energy Agency</i>
NDC	<i>National Determined Contribution</i>
PCUS	Partido Comunista da União Soviética
PCV	<i>Primary Content Vessel</i>
PHWR	<i>Pressurized Heavy Water Reactor</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RAS	Relatório de Análise de Segurança
RB	<i>Reactor Building</i> (Prédio do Reator)
RBMK	<i>Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy</i>
RMB	Reator Multipropósito Brasileiro
SCPN	Submarino Convencionalmente armado com Propulsão Nuclear
SecNSNQ	Secretaria Naval de Segurança Nuclear e Qualidade
SI	Sistema Internacional de Unidades
SMR	<i>Small Modular Reactor</i>
SORT	<i>Strategic Offensive Reduction Treaty</i>

SPEEDI	<i>System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information</i>
SSN	Submarinos de ataque com propulsão nuclear norte-americanos
START	<i>Strategic Arms Reduction Treaty</i>
TEPCO	<i>Tokyo Electric Power Company</i>
UE	União Européia
UNFCCC	<i>United Nations Framework Conference for Climate Changes</i>
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
USNRC	<i>United States Nuclear Regulatory Commission</i>
VVER	<i>Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor</i>
WENRA	<i>Western Europe Nuclear Regulators Association</i>
ZPE	Zona de Planejamento de Emergência

LISTAS DE SÍMBOLOS

Bq	Becquerel ¹ (s^{-1})
Sv	Sievert ² ($J.Kg^{-1}$)
We	Watt referente à potência elétrica ³ ($J.s^{-1}$)
Wh	Watt-hora ⁴ (J)
Wt	Watt referente à potência térmica ⁵ ($J.s^{-1}$)

¹ becquerel: unidade de atividade no SI

² sievert: unidade de dose equivalente no SI

³ watt: unidade de potência (elétrica) no SI

⁴ watt-hora: energia correspondente à potência de 1 W aplicada durante uma hora, ou seja, 3600 J.

⁵ watt: unidade de potência (térmica) no SI

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Apresentação do Problema	16
1.2 Justificativa e Relevância	16
1.3 Objetivos	18
2 O ACIDENTE NUCLEAR DE <i>CHERNOBYL</i>	18
2.1. Contextualização	18
2.2. O Acidente	19
3 O ACIDENTE NUCLEAR DE <i>FUKUSHIMA</i>	22
3.1 Contextualização	22
3.2 O Acidente	23
4 COMPARAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE <i>CHERNOBYL</i> E DE <i>FUKUSHIMA</i> <i>DAIICHI</i>	25
5 MEDIDAS DE SEGURANÇA NUCLEAR IMPLEMENTADAS APÓS OS ACIDENTES DE <i>CHERNOBYL</i> E <i>FUKUSHIMA DAIICHI</i>	33
5.1 Segurança Nuclear Após <i>Chernobyl</i>	33
5.2 Segurança Nuclear Após <i>Fukushima</i>	35
5.2.1 Falhas em <i>Fukushima</i> e Conclusões Subsequentes	35
5.2.2 Reações Imediatas Após <i>Fukushima</i>	36
5.2.3 Aprimoramento da Segurança Nuclear Americana	38
5.2.4 Aprimoramento da Segurança Nuclear Europeia	39
5.2.5 Aprimoramento da Segurança Nuclear Oriental	39
5.2.6 Aprimoramento da Segurança Nuclear Brasileira	40
6 CONCLUSÃO	41
6.1 Considerações Finais	44
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	45
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Baseado nos trabalhos de expoentes da física moderna, como Henri Becquerel, Marie e Pierre Curie, Ernest Rutherford e Niels Bohr, a existência do nêutron foi comprovada experimentalmente em 1932 por James Chadwick, garantindo-lhe o Prêmio Nobel de Física de 1935. Contudo, uma descoberta ainda mais surpreendente estava por vir: a descoberta da fissão nuclear, por Otto Hahn e Fritz Strassman, em 1938 [1].

Esse novo conhecimento, pode-se dizer, inaugurou um novo ramo da física, com diversas utilidades e despertando pesquisas ao redor do mundo. Em especial, destacam-se a construção da Pilha Nuclear de Chicago pelo cientista italiano Enrico Fermi [1] e o desenvolvimento de bombas nucleares pelo Projeto *Manhattan*. Esses exemplos ilustram dois típicos usos estratégicos da energia nuclear desde que foi desenvolvida: o uso energético, por meio de usinas nucleares difundidas por países desenvolvidos, a partir das décadas de 1950 e 1960; e o uso bélico, por meio do desenvolvimento de bombas com intenso poder de destruição, a partir da grande liberação de calor emanada de uma reação em cadeia de urânio ou plutônio altamente concentrados [1].

O uso bélico, em especial, foi um fator de primeira importância na história mundial do século XX por ser preponderante na estratégia dissuasória das duas principais potências daquele período: Estados Unidos da América (EUA) e União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS). O desenvolvimento de suas bombas, respectivamente em 1945 e 1949, fomentaram suas esferas de poder, buscando implementar suas ideologias políticas e econômicas ao redor do globo, definindo o que foi chamado de Guerra Fria, entre 1946 e 1991 [2]. Tal disputa ensejou diversos movimentos das duas potências, como as chamadas Guerras de Procuração, na Coreia (1950-1953), Vietnã (1955-1975) e Afeganistão (1979-1989) [2], além de intervenções na política interna de outros países, tais como Guatemala (1954), Cuba (1961) e Panamá (1989) [3]. Ademais, as pautas da política internacional começaram a ser ditadas por essa disputa, incentivando outros países a desenvolverem seu setor nuclear como um ativo estratégico para representarem seus interesses nos fóruns internacionais [2].

Devido aos perigos identificados pelo uso da energia nuclear de forma desordenada, diversas iniciativas começaram a surgir de forma a construir um arcabouço legal internacional regulatório para a matéria [4]. Em 1963, foi promulgado o Tratado de Proscrição Parcial de Testes Nucleares [4], permitindo apenas testes subterrâneos e, em 1957, foi criada a

Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), com o intuito de normatizar o uso pacífico dessa forma de energia [4].

Sob a perspectiva de proliferação nuclear ilimitada, os países detentores dessa tecnologia iniciaram negociações para a limitação do acesso a artefatos atômicos [5]. Em 1968, promovido pelos EUA, URSS e Reino Unido, era aberto a assinaturas o Tratado de Não-Proliferação Nuclear [5]. Em seu conteúdo, destacam-se o artigo III, que prevê a renúncia de estados não-nuclearmente armados de desenvolverem artefatos, e o artigo VI, que prevê um compromisso futuro de desarmamento nuclear abrangendo todos os países, o que ainda não foi alcançado. Outros acordos se seguiram, como os acordos *Strategic Arms Reduction Treaty*⁶ (START) e *Strategic Offensive Reduction Treaty* (SORT) [6] de limitação de artefatos nucleares entre EUA e URSS. Apesar do fim da Guerra Fria, a dinâmica mundial ainda é fortemente influenciada pelo perigo do uso bélico da energia atômica. Ainda hoje, a nova competição estratégica entre EUA e China e o temor pelo uso de um artefato nuclear tático pela Rússia no conflito com a Ucrânia inspiram cuidados maiores da comunidade internacional sobre o uso de bombas nucleares, unicamente utilizadas em *Hiroshima* e *Nagasaki* (1945), no Japão, ao fim da Segunda Guerra Mundial [6].

Por outro lado, o uso da energia nuclear para geração de energia sagrou-se como uma das soluções para as crescentes demandas energéticas [7]. Após o desenvolvimento do reator nuclear de pesquisa de Fermi, outros projetos foram desenvolvidos para gerar energia elétrica, como o reator de *Obninsk*, URSS, em 1954 [7]. Contudo, somente com as usinas nucleares de *Calder Hall* (1956), no Reino Unido, e de *Shippingport*, nos EUA (1957) [7], os reatores nucleares comerciais ganharam destaque, difundindo-se por outros países, suprimindo a demanda crescente de energia por ocasião da terceira e quarta revoluções industriais [7]. Outra iniciativa para a geração de energia foi o desenvolvimento de reatores nucleares para a propulsão, voltados principalmente para submarinos [8]. Principal incentivador das pesquisas nesta área, o Almirante Hyman Rickover teve participação destacada no desenvolvimento do SSN *Nautillus* [8], primeiro submarino de ataque com propulsão nuclear. Outros projetos foram desenvolvidos, como o soviético K-3 *Leninsky Komsomol* e o inglês *Dreadnought* [9], porém até hoje tal tecnologia permanece restrita a poucos países.

Diversos projetos de usinas foram desenvolvidos a partir dos primeiros projetos de reatores, sendo os principais os *Pressurized Water Reactor* (PWR), os *Pressurized Heavy*

⁶ START e SORT: Tratados entre EUA e Rússia criados em 1991 (START I), 1993 (START II) e 2002 (SORT) para a redução de artefatos nucleares.

Water Reactor (PHWR), os *Boiling Water Reactor* (BWR) e os *Light Water-Cooled Graphite Reactor* (LWGR) ou *Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy* (RBMK) [10]. A partir de diferentes formas de combustíveis, moderadores, refrigerantes e enriquecimentos, as diversas tecnologias desenvolvidas evoluíram dos primeiros protótipos da Primeira Geração até os atuais projetos avançados da Geração III+, buscando-se incrementar segurança, aproveitamento e conservação ambiental [11]. Além disso, novas tecnologias da chamada IV Geração estão em desenvolvimento, como os reatores de sal fundido [11]. Um exemplo de técnica inovadora na geração de energia nuclear são os *Small Modular Reactor* (SMR), consistindo em unidades de baixa potência, facilmente transportáveis e mais seguros [11].

1.1 Apresentação do Problema

Para se alcançar o corrente nível tecnológico, traduzidos em um alto nível de segurança e confiabilidade, somente comparados aos níveis de excelência da indústria aeroespacial, a energia nuclear foi submetida a situações altamente adversas, o que motivou os responsáveis pela segurança e qualidade nucleares a esforçarem-se para manterem a viabilidade desta indústria [12]. Em 28 de março de 1979, o reator número dois da usina nuclear de *Three Mile Island*, nos EUA, sofreu um derretimento parcial do núcleo com a liberação de gases radioativos para o ambiente da contenção [12]. Em 26 de abril de 1986, o reator número quatro da usina nuclear de *Chernobyl* na Ucrânia, ex-URSS, explodiu, provocando o maior acidente nuclear da história [12]. Em 11 de março de 2011, um terremoto sucedido por um maremoto ocasionou um acidente nuclear em *Fukushima*, no Japão, alarmando mais uma vez a comunidade internacional quanto aos perigos ocasionados por desastres nucleares [12].

As liberações radioativas, com preeminência para o acidente de *Chernobyl*, causaram sérios danos à saúde de diversas populações e ao meio ambiente, que ainda podem perdurar por algumas décadas, mesmo com os intensos trabalhos de descontaminação realizados [12]. Em especial, os riscos de casos de câncer provocados pela exposição à radiação levantaram o questionamento sobre a viabilidade do uso benéfico da energia nuclear para a humanidade [12].

1.2 Justificativa e Relevância

A partir da análise das causas e das consequências radiológicas desses eventos, com destaque para os ocorridos em *Chernobyl* e *Fukushima*, a área nuclear (indústria e órgãos

reguladores) implementou medidas de segurança, de regulamentação e de qualidade ao nível da excelência, fazendo com que, atualmente, a energia nuclear seja mais segura que nos momentos anteriores a estes acidentes. Isso se torna cada vez mais relevante no contexto atual, em virtude da intensificação do aquecimento global e da crescente demanda energética mundial.

Desde a promulgação do Acordo de Paris, em 2015, por ocasião da 21ª Conferência das Partes da *United Nations Framework Conference for Climate Changes* (UNFCCC)⁷, diversos países têm divulgado suas *National Determined Contribution* (NDC)⁸ [13] para tentar alcançar o objetivo acordado de limitar o aquecimento global comparado com os níveis pré-industriais, em 1,5°C. Segundo dados recentes, para alcançar esse objetivo até 2050, a demanda global por combustíveis fósseis teria que diminuir para apenas um quarto da atual até 2030, além de ser necessário um investimento de 4,5 trilhões de dólares anuais em transição energética [14]. Adicionalmente, dados recentes também mostram que os níveis de cobertura de gelo na Antártida no inverno de 2023 diminuíram em 1 milhão de quilômetros quadrados comparados ao recorde anterior, alarmando especialistas quanto ao perigo de aumento do nível do mar e à submersão de regiões costeiras [15].

A energia nuclear, nesse âmbito, é considerada a fonte de energia com maior disponibilidade quando comparada com outras fontes e apresenta a maior geração de energia por quilograma de combustível [16]. Quanto à segurança, dentre todas as fontes de energia, a indústria nuclear é considerada uma das mais seguras, apresentando índices de mortes por geração de energia somente maiores que os níveis da energia solar, considerando-se as vítimas dos acidentes de *Chernobyl* e *Fukushima* [16]. Em relação à geração de gás carbônico, a energia nuclear gera apenas 12 gramas de CO₂ por kWh, comparado apenas aos índices da energia eólica [17], apresentando também um dos menores índices de uso de terra por geração de energia [16].

Paralelamente, a demanda energética global tem crescido a altas taxas. Ao fim de 2022, a população mundial alcançou a marca de 8 bilhões de habitantes [18]. Soma-se a esse fato a previsão de crescimento econômico de 100% a 130% até 2050, segundo algumas perspectivas [19]. Além disso, segundo previsões recentes, a demanda energética global poderá crescer até 50% da atual [20], exigindo mais das atuais fontes e de políticas públicas de infraestrutura atuais [20]. Em relação ao objetivo de alcançar a neutralidade energética até

⁷ UNFCCC, ou Convenção-Quadro de Mudanças Climáticas das Nações Unidas, é o foro da ONU em que são discutidas medidas para o enfrentamento das mudanças climáticas.

⁸ NDC, ou Contribuições Nacionalmente Determinadas, são metas estabelecidas por cada parte signatária do Acordo de Paris de 2015 para mitigar as mudanças climáticas.

2050, a capacidade de geração de energias renováveis terá que aumentar em três vezes para conciliar o aumento da demanda energética e os objetivos de conservação climática [16].

Nesse contexto, a energia nuclear tem proeminência, como uma das fontes de energia com potencial mais evidente, tanto em relação à alta geração de energia quanto à baixa produção de gases poluentes, prevendo-se atualmente o dobro de centrais nucleares geradoras de energia em 2050 para atingir os objetivos climáticos internacionais [16].

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de abordar e analisar os aspectos factuais dos acidentes de *Chernobyl* e de *Fukushima Daiichi*, considerando os tipos de reatores envolvidos, a cronologia dos fatos, as causas dos acidentes e a comparação entre as consequências radiológicas resultantes de cada acidente. Ademais, pretende-se tratar das contribuições de reflexões posteriores a esses acidentes para a segurança nuclear, assim como as lições aprendidas a partir desses eventos, que fazem com que a energia nuclear seja uma das fontes energéticas mais promissoras para enfrentar os desafios energéticos atuais.

2 O ACIDENTE NUCLEAR DE *CHERNOBYL*

2.1 Contextualização

A Unidade 4 da usina Nuclear de *Chernobyl* foi inaugurada em dezembro de 1983 [21]. Nessa época, a União Soviética operava dois tipos de reatores: os *Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor* (VVER), que são uma espécie de reator de água pressurizada, e os RBMK, que são reatores de água fervente moderados a grafite. A usina de *Chernobyl* consistia em reatores do segundo tipo [21]. Os RBMK tinham sido desenvolvidos na década anterior, sendo o primeiro operacionalizado em 1973, em São Petersburgo [21]. Em 1986, 14 plantas RBMK estavam operacionais, representando uma opção promissora de reatores devido a diversos fatores, como larga experiência soviética em moderação a grafite, uso muito eficiente do combustível e menor propensão de acidente por perda de refrigerante devido às várias tubulações pressurizadas no circuito primário, ao invés de apenas uma [22].

A Unidade 4 da planta era considerada de segunda geração, incorporando melhorias em relação aos reatores RBMK iniciais, com respeito aos sistemas de resfriamento em emergência do núcleo e tanques de supressão de vapor. A usina ainda continha um sistema de remoção de hidrogênio para retirar o gás em caso de concentração superior a valores pré-

determinados [22]. Os reatores continham 211 barras de controle, sendo divididas funcionalmente em controles manuais, automáticos, de redução de potência e de desligamento em emergência [22]. As barras eram constituídas de carbeto de boro, um material altamente absorvedor de nêutrons, revestidas de uma liga de alumínio [22]. Um aspecto importante analisado é que os reatores tinham reconhecidamente problemas de controle a baixas potências [22]. A solução encontrada à época foi investir em automatização da planta, aumentar o enriquecimento do combustível e diminuir a densidade do grafite moderador para diminuir o coeficiente de vazão [22]. Com exceção das barras automáticas, todas as demais continham uma espécie de seções de deslocamento de água, para aumentar o efeito de controle [22]. Essas seções eram envoltas em uma liga de alumínio e preenchidas com grafite, o que inseria uma reatividade positiva pontual, sendo a escala dessa reatividade positiva dependente da quantidade de barras inseridas ao mesmo tempo [22].

2.2 O Acidente

Em 25 de abril de 1986, às 01:00, foi iniciada a redução da potência do reator para o início dos procedimentos de testes que antecederiam a parada para manutenção da Unidade 4 [22]. O teste realizado pretendia demonstrar que a inércia da turbina principal poderia alimentar importantes equipamentos do reator durante a ocorrência de uma perda de energia até que os geradores diesel entrassem em operação [22]. Esse teste já havia sido tentado outras duas vezes, mas sem sucesso [22]. Dentre os equipamentos verificados, quatro dentre oito bombas de resfriamento de emergência seriam ligadas a uma das turbinas principais, que seria desacoplada do sistema de alimentação, fazendo que parte do sistema de resfriamento fosse alimentado pela energia gerada pela inércia da turbina desacoplada [22]. Às 13:05, a potência da usina estava reduzida à metade, em 1600MWt, e às 14:00, o sistema de resfriamento de emergência do núcleo foi desconectado para evitar atuação durante o teste [22]. Nesse momento, o teste foi postergado devido a uma demanda energética inadvertida da central de *Kiev*, Ucrânia, deixando a planta em níveis reduzidos de potência por nove horas e sem o sistema de resfriamento de emergência [22].

A redução de potência foi continuada às 23:10 para os testes pretendidos, que previam uma potência entre 700 e 1000 MWt [22]. Mesmo com o desligamento do sistema automático de barras de controle, aparentemente o sistema redundante não foi desligado, levando a uma redução de potência para 30MWt, apesar do esforço dos operadores [22]. Posteriormente, os operadores conseguiram estabilizar a potência em 200 MWt às 01:00 de 26

de abril [22]. Devido à baixa potência por tempo prolongado, altas taxas de Xenônio, que introduz reatividade negativa⁹ [23], envenenavam¹⁰ [24] o núcleo e dificultavam o aumento da potência ao nível previsto, fazendo com que os operadores tivessem que aumentar a potência manualmente [22]. Para reduzir os níveis de Xenônio, usinas costumam aumentar o tempo demandado para aumentar a potência de reatores, o que não foi atendido pelos operadores de *Chernobyl* [22].

Apesar da redução das margens de desligamento¹¹ [25], previstas de 16 para 8 barras de controle, e mesmo com os níveis de potência reduzidos além do exigido pelo procedimento padrão, os testes prosseguiram [22]. Às 01:19, para evitar instabilidades, os operadores também bloquearam o sistema de desligamento automático referente à pressão e ao nível do refrigerante nos separadores de vapor [22]. Em seguida, um aumento da vazão de água nos separadores de vapor fez com que a reatividade diminuísse, devido à redução de geração de vapor, levando a uma retirada de todas as barras de controle automáticas ainda restantes [22]. Somado a isso, os operadores retiraram todas as barras de controle manuais [22]. Às 01:22, a decisão de iniciar o teste foi tomada, bloqueando-se os alarmes referentes à parada das turbinas para evitar um desligamento automático do reator no decorrer do teste. Após 30 segundos, o programa de avaliação de reatividade assinalou a necessidade imediata de desligamento do reator, o que foi ignorado para prosseguimento dos testes. Às 01:23:04, as válvulas da turbina número 8 foram fechadas e o teste com as quatro bombas foi iniciado. Devido ao acionamento de todas as bombas à baixa potência, o refrigerante do núcleo encontrava-se perto da saturação, com baixo coeficiente de vazão no núcleo devido ao alto fluxo [22]. Com a diminuição da vazão devido à redução de carga das bombas testadas, que eram alimentadas somente pela inércia da turbina desacoplada, a temperatura começou a aumentar, fazendo com que o reator respondesse com um aumento de potência vertiginoso [22].

Às 01:23:40, o chefe do turno ordenou o desligamento do reator pelo botão AZ-5, o mais urgente nível de emergência [22]. Isso levou à inserção de todas as barras de controle, que apresentaram falha segundo observação dos operadores [22]. Análises posteriores indicaram que o movimento de inserção das pontas das barras introduziu reatividade positiva

⁹ Reatividade: variação fracional da população de nêutrons entre duas gerações sucessivas, influenciando a potência e a temperatura do reator. Elementos que aumentam a população neutrônica inserem reatividade positiva, enquanto aqueles que diminuem, inserem reatividade negativa [23]

¹⁰ Envenenamento do núcleo: abundância de substância que, devido a sua alta seção de choque de absorção de nêutrons, reduz a reatividade do núcleo de um reator [24]

¹¹ Margem de Desligamento: função que garante reatividade negativa necessária para desligar um reator [25].

no reator, produzindo uma considerável quantidade de energia no núcleo às 01:23:43, fazendo com que o combustível derretesse, se expandisse, rompesse o revestimento e se misturasse com o refrigerante e o vapor [22]. Isso gerou uma imensa pressão, que rompeu o teto do reator, de aproximadamente 1000 toneladas, causando a primeira explosão [22]. Uma segunda explosão foi ouvida de 2 a 3 segundos depois, como consequência da exposição do núcleo, destruindo grande parte do reator e ejetando grafite e combustível pelo teto do edifício, iniciando por volta de 30 incêndios [22]. Apesar de haver discussões sobre a causa da segunda explosão, o mais aceito atualmente é que o hidrogênio emanado do sobreaquecimento do revestimento do combustível, feito de uma liga de Zircônio, a tenha causado [22].

As ações imediatas envolveram o primeiro combate pelos bombeiros das cidades ucranianas de *Pripyat* e de *Chernobyl*, às 02:54, controlando o fogo por volta de 05:00 de 26 de abril [22]. Os operadores injetaram água no restante do núcleo destruído com as bombas auxiliares de alimentação, assim como com água dos tanques de armazenamento por meio do recém religado sistema de resfriamento de emergência do núcleo [22]. Na semana subsequente, 5.000 toneladas de compostos de boro, areia e argila foram depositados sobre o reator danificado para garantir sua subcriticalidade¹² e mitigar a exposição radioativa [22].

Segundo autoridades soviéticas, um dos fatores que levou os operadores a ignorar procedimentos de segurança foi o excesso de confiança devido ao excelente desempenho registrado até então [22]. Além disso, algumas conclusões sobre restrições operacionais foram emanadas, como o descumprimento da proibição de operação do reator abaixo de 700 MWt, devido à instabilidade de operação e do coeficiente de reatividade¹³ [26] positivo dominante nesse estado, levando a um coeficiente geral de reatividade positiva [22]. Nessas condições, pequenas mudanças gerariam grandes variações no volume de vapor e na reatividade [22]. Ademais, minimamente 30 barras de controle deveriam ser mantidas inseridas no núcleo, o que garantiria a configuração de uma reatividade negativa inicial durante o desligamento de emergência [22]. Os operadores também não perceberam que, apesar de estar com coeficiente de vazão¹⁴ [27] baixo, o refrigerante estava perto da saturação [22]. Quando o fluxo de

¹²Criticalidade: estado ou condição de um aglomerado contendo material fissil, no qual se possa desenvolver um processo autossustentado de fissão nuclear. A subcriticalidade seria o estado anterior, em que a reação em cadeia não ocorre e o elemento está estável. Já a supercriticalidade ocorre quando a taxa de produção de nêutrons de fissão excede todas as perdas de nêutrons, e a população geral de nêutrons aumenta.

¹³Coefficiente de Reatividade: A variação da reatividade expressa em relação à variação de um determinado parâmetro, como temperatura, pressão, potência etc. [26].

¹⁴ Coeficiente de Vazio: mede a mudança na reatividade devido a mudanças na fração de vazão (bolhas de vapor) no núcleo, diminuindo a densidade do moderador. Este coeficiente deve ser negativo para garantir a segurança de reatores [27].

refrigerante diminuiu e o volume de vapor aumentou no início do teste, o aumento do coeficiente de vazio aumentou o coeficiente de reatividade, assim como a potência [22].

Além de não possuir uma contenção robusta como as usinas ocidentais, o que poderia ter contido substancialmente as emissões radioativas, como ocorrido em *Three Mile Island* (1979), outro erro de projeto influenciou bastante a ocorrência do acidente. O fato de o reator possuir um coeficiente de vazio positivo quando o aumento de bolhas de vapor é acompanhado de um aumento de reatividade teve papel crucial no desenrolar do acidente. Mesmo com outros fatores contribuindo para a reatividade, o coeficiente de vazio é predominante em um reator RBMK [22]. Embora reatores novos desse tipo tenham coeficiente de vazio negativo, a configuração à época do reator 4 de Chernobyl garantiu o coeficiente adverso [22].

Em geral, apesar dos erros circunstanciais e de projeto, as falhas mais evidentes continuam sendo as relativas aos fatores humanos: operadores, formuladores do teste e autoridades envolvidas. Citam-se algumas falhas, como falta de clareza quanto à gestão do controle e integração da operação no decorrer do teste, falta de revisão adequada dos procedimentos do teste e a imperícia na condução da diminuição de potência, fazendo-a cair a 30 MWt e não alcançar novamente o nível estipulado [22]. De forma mais específica, o fator que mais se destaca é o aparente senso de urgência dos operadores em concluir o teste, que poderia ser postergado em até um ano, causado por pressões de autoridades políticas externas [22].

3 O ACIDENTE NUCLEAR DE *FUKUSHIMA*

3.1 Contextualização

O programa nuclear japonês ganhou notório impulso na década de 1970, devido à crise do petróleo de 1973 [28]. O Japão, nesse período, era profundamente dependente de petróleo e buscava diversificar sua matriz energética [28]. De apenas 3% da produção de energia em 1973, a energia nuclear passou a representar 29% em 2010, com um total de 54 usinas, sendo a maior porcentagem da geração energética nipônica [28]. Trinta dessas usinas eram do tipo BWR, havendo mais três em construção [28].

Duas empresas trabalhavam com a tecnologia BWR, sendo uma delas a TEPCO, que iniciou a construção do primeiro reator da Central Nuclear de *Fukushima* em 1967, como um contrato de usina pronta (*turn key*) com a empresa americana *General Electric* [28]. As cinco outras plantas construídas a partir de então foram feitas em parceria com as empresas *Toshiba*

e *Hitachi*, com potências entre 780 MWt e 1.100 MWt [28]. A cidade de *Fukushima* fica na costa leste do Japão, exposta aos efeitos de movimentação das placas tectônicas do Pacífico e Norte Americana, origem dos dois piores terremotos da história: o do Chile (1960) e o do Alaska (1964) [28].

A análise de risco sísmico do local da usina, para fins regulatórios, com 50 anos por ocasião do acidente, baseava sua gestão de risco sísmico em eventos que tiveram impacto regional, datados entre 1611 e 1938, com magnitudes entre 6,5 e 7,6 na escala *Richter* [28]¹⁵. Já a avaliação referente a maremotos tinha como base o regime de marés do Porto de *Onahama*, no Japão, prevendo-se uma elevação de 3,122 metros acima desse nível. Com isso, foi construído uma proteção de 5,5 metros, submetida a reavaliações entre 2002 e 2009 [28].

As plantas de *Fukushima* apresentavam contenções do tipo *Mark I* e *II* [29], com duas barreiras bem definidas para produtos de fissão: o *Primary Content Vessel* (PCV) e o Prédio do Reator (RB) [28]. O PCV ainda se subdividia em duas parte: o local do vaso do reator e em uma câmara de supressão para possíveis emergências [28]. As duas barreiras apresentavam mecanismos para condensar o vapor em caso de vazamento antes que este pudesse gerar uma alta pressão na contenção, além de terem sua atmosfera interna saturada de nitrogênio para controlar qualquer geração acidental de hidrogênio [28]. Recombinadores de hidrogênio forneciam ainda segurança adicional ao PCV. Contudo, verificou-se que os recombinaidores não foram instalados no RB e todo o sistema era dependente de energia por corrente alternada (AC) [28].

Os diesel geradores de emergência da central nuclear também eram um fator de destaque [28]. Cada planta possuía dois equipamentos desse tipo, sendo que a Unidade 6 possuía 3 diesel geradores [28]. Por questões de projeto relacionadas ao risco de furacões, tendo sido projetados por uma empresa estadunidense, os geradores encontravam-se no subsolo das unidades ou no mezanino do prédio das turbinas, oferecendo pouca resistência por ocasião de inundações [28]. Ademais, as baterias projetadas para prover energia por corrente contínua (DC) seguiam um modelo antigo, oferecendo apenas 8 horas por ocasião de uma perda total de energia [28, 30].

3.2 O Acidente

¹⁵Escala Richter: escala de magnitude local arbitrária, de base 10, utilizada para quantificar a magnitude de um sismo.

Em 11 de março de 2011, um terremoto de magnitude 9,0 na escala *Richter* assolou o leste do Japão, às 14:46, causando um rastro de devastação, com 15.000 mortos, 6.000 feridos e 2.500 desaparecidos [30]. Na usina de *Fukushima*, o terremoto causou o desligamento automático dos reatores, além de ter acionado todos os diesel geradores devido aos sérios danos causados à central de energia externa da usina [30]. Após isso, os sistemas de resfriamento de emergência foram acionados para retirar o calor de decaimento, que já estava causando aumento de temperatura e pressão [30].

Como consequência do terremoto, duas grandes lavas de ondas gigantes foram formadas. O alerta de maremoto foi emitido pelas autoridades japonesas às 14:50, atingindo a central nuclear de *Fukushima* às 15:27, porém com altura limitada [28]. A segunda onda, com altura de aproximadamente 14 metros, atingiu as centrais às 15:36, superando em muito a altura prevista para este tipo de evento na base de projeto [28]. Grande parte da central foi inundada e muitos equipamentos foram danificados, incluindo as bombas e motores dos diesel geradores de emergência resfriados a água, resultando na parada do sistema que resfriava o calor de decaimento dos reatores [28]. Somente o diesel gerador da Unidade 6 permaneceu operacional, pois era resfriado a ar [28]. A inundação também atingiu as baterias nas Unidades 1, 2 e 4, causando perda gradual da energia DC ainda presente, impedindo que os operadores captassem qualquer informação instrumental [28]. Pautando-se na Lei de Emergência Nuclear japonesa, o superintendente local do centro de resposta a emergências, acionado por ocasião do terremoto, disparou diversas ações de agências externas e do governo [28].

Por ocasião do acidente, as Unidades de 1 a 3 estavam operacionais, enquanto as Unidades de 4 a 6 estavam desligadas para períodos de manutenção. [28] Às 16:45, os operadores conseguiram efetuar leituras do nível de água na Unidade 1, constatando perda devido ao calor de decaimento [28]. Ao final do dia 11 de março, diversas ordens de evacuação foram emanadas, primeiramente pelas autoridades municipais e estaduais, para um raio de 2 km, e posteriormente, de 3 km, pelo Primeiro-Ministro [28]. Por iniciativa dos operadores da usina, cabos e geradores portáteis foram unificados para possibilitar as leituras dos dados dos reatores 1 e 2 [28]. As leituras indicavam diminuição de água de resfriamento, aumento da pressão e os dosímetros de alguns operadores começaram a indicar excesso de radiação nas proximidades do RB [28].

No dia seguinte, iniciativas foram tomadas para alimentar o reator com água do sistema de incêndio e, ao mesmo tempo, liberar parte do conteúdo do RB das Unidades 1 e 2 devido ao aumento substancial da pressão [28]. Doses e pressões mais elevadas foram

registradas e fizeram com que a evacuação fosse expandida para 10 km [28]. Apesar das dificuldades, o suprimento de água e a diminuição da pressão foram efetivados, assim como a energia elétrica externa foi restabelecida por meio de um transformador remanescente da Unidade 2 [28].

Antes que todos os recursos pudessem ser utilizados plenamente, às 15:36 do dia 12 de março, houve uma explosão no RB do reator 1, possivelmente causada pelo acúmulo do hidrogênio que escapou da primeira contenção, o PCV, originado da reação do revestimento das varetas combustíveis com o vapor de água superaquecido [28]. A explosão ocasionou sérios danos aos mecanismos de emergência instalados, além de ter resultado em doses mais altas, motivando a evacuação dos próprios operários das salas de controle principais das Unidades de 1 a 4, com exceção dos três mais experientes, assim como provocou o aumento da zona de evacuação para 20 km [28]. Outras explosões semelhantes ocorreram na parte externa superior da Unidade 3, no dia 14 de março, e na Unidade 4, no dia 15 de março [28]. Somente em maio de 2011, as condições de controle foram restabelecidas na central [28].

De forma geral, as explosões tiveram, aparentemente, a mesma causa: por meio de algum vazamento não identificado, ignições de hidrogênio ocorreram no RB por ocasião das liberações controladas para diminuir a pressão [30]. Acredita-se que não houve explosão na Unidade 2 devido a vazamentos de hidrogênio pelas paredes danificadas do RB [31]. Em especial, na Unidade 4, que estava em manutenção, assume-se que um fluxo de gás da Unidade 3 foi transportado por uma chaminé comum com a Unidade 4, levando hidrogênio suficiente para causar uma explosão [30].

4 COMPARAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE *CHERNOBYL* E DE *FUKUSHIMA DAIICHI*

Comparando-se os dois eventos supracitados nos tópicos anteriores, em quase todos os aspectos radiológicos, o acidente de *Chernobyl* supera o de *Fukushima* [32]. Enquanto no acidente de 2011 as emissões chegaram a 530 PBq, o acidente na Ucrânia registrou liberações na ordem de 5.300 PBq [32]. Isso pode ser explicado pelas próprias causas dos acidentes: enquanto as explosões nas usinas japonesas foram de natureza química, por ocasião do alívio de pressão nos prédios dos reatores, sem danificar as barreiras primárias, as liberações de *Chernobyl* foram descontroladas e contínuas, com exposição do núcleo [32]. Contudo, ambos os acidentes foram classificados na INES como nível 7, segundo a AIEA [32].

Em ambos os acidentes a maior parte das liberações foi constituída de elementos voláteis, como gases nobres, céσιο e iodo [32]. Sobre este mérito, nota-se que *Fukushima* liberou uma quantidade maior de gases nobres, assim como apresentou maior razão de atividade entre Césio-134 / Césio-137, devido ao baixo enriquecimento do combustível dos reatores soviéticos RBMK, em cerca de 2% [32]. As liberações de radionuclídeos não-voláteis em *Fukushima* foram relativamente baixas, de forma geral [32]. Em *Chernobyl*, como parte do próprio inventário foi liberado, actínídeos e radionuclídeos semivoláteis foram liberados, além de elementos refratários¹⁶ [33]. Esses elementos não foram liberados em *Fukushima*, principalmente devido às temperaturas inferiores a 2.700 K, temperatura necessária para volatilizar esses elementos, diferente do que ocorreu em *Chernobyl* [32].

Em relação às áreas atingidas, a Zona de Planejamento de Emergência (ZPE)¹⁷ [24] de *Chernobyl* abrangeu inicialmente 30 km de raio (aproximadamente 2826 km²) no entorno, sendo evacuadas cerca de 116.000 pessoas, com a evacuação iniciada 3 a 11 dias após o início do acidente [32]. Contudo, essa área aumentou para 4.300 km² em 1996, devido aos altos níveis de radiação detectados nas demais áreas [32]. Como a usina está no centro da Europa do Leste, suas consequências radiológicas foram sentidas até mesmo fora da ZPE, como na Rússia, Suécia, Noruega, Alemanha, Áustria, Grécia e, principalmente, Belarus, como ilustrado na Figura 1, que apresenta a contaminação por Césio-137 pela Europa, em consequência da dispersão da pluma radioativa de *Chernobyl* [32].

¹⁶Elementos refratários: elementos caracterizados por elevada resistência ao calor e ao desgaste, com alto ponto de fusão e propriedades mecânicas estáveis, mesmo em altas temperaturas. Exemplos de elementos refratários são o plutônio, o estrôncio, o nióbio, o molibdênio e o tungstênio [33].

¹⁷ZPE: zona que abrange áreas para as quais é recomendado planejamento de ações imediatas e efetivas a serem implantadas para proteger o público em caso de acidente nuclear ou radiológico, podendo haver determinações de evacuações, dentre outras medidas [24].

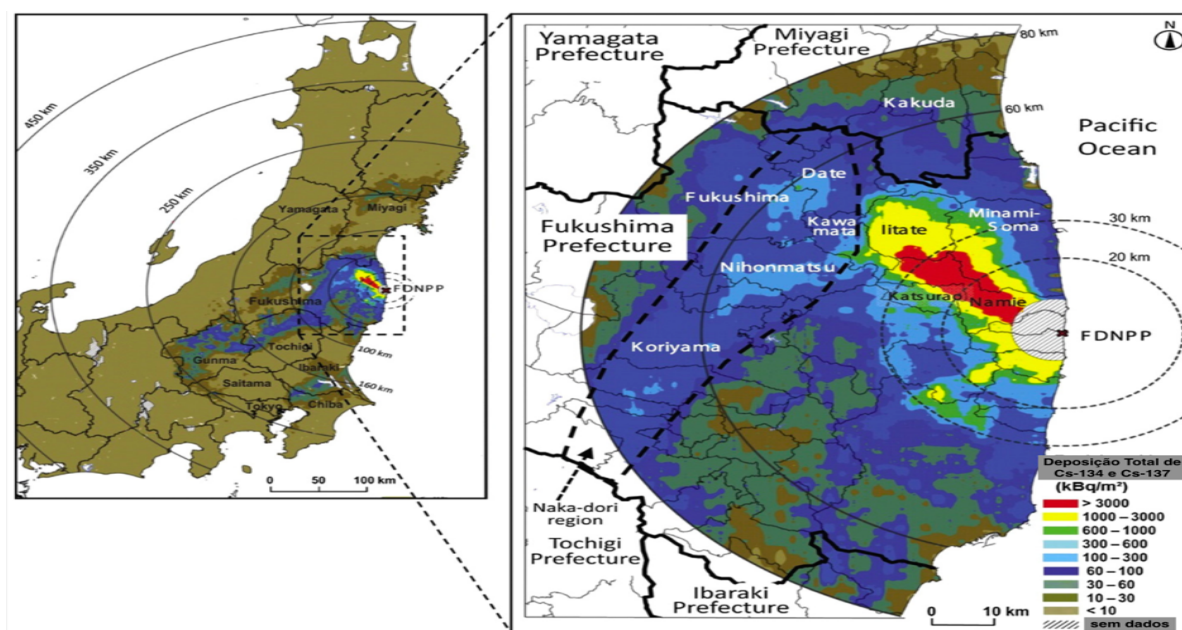
Figura 1 - Contaminação por Cs-137 após o acidente nuclear de *Chernobyl*.



Fonte: Referência [32].

Por outro lado, 80% das liberações atmosféricas de *Fukushima* foram direcionadas ao Oceano Pacífico, causando consequências radiológicas irrelevantes fora do Japão. Sua ZPE abrangeu cerca de 600 km², sendo a parte ao noroeste da central a mais afetada, como demonstrado pela simulação da deposição de Césio-134 e Césio-137, em consequência da dispersão da pluma radioativa de *Fukushima*, apresentada na Figura 2 [32].

Figura 2 - Estimativa da deposição de Cs-134 e Cs-137 após o acidente nuclear de *Fukushima*.



Fonte: referência [32].

Ao contrário do que ocorreu na usina soviética, as autoridades japonesas distribuíram iodo estável para a população local e iniciaram a evacuação ao fim do próprio dia do acidente, chegando a abranger uma área com 30 km de raio em sua máxima extensão e estabelecendo a evacuação de menores de 40 anos de outras áreas nos dias subsequentes [32]. A critério de comparação, em *Chernobyl*, a área que abrangia determinado nível de contaminação de referência era de 29.400 km², enquanto em Fukushima, para o mesmo nível de contaminação, essa área correspondia a 1.700 km² [32].

Ambos os acidentes causaram contaminação atmosférica, hidrológica, na biosfera e no solo de todo o hemisfério norte [32]. Porém, a maior diferença em relação à contaminação causada pelos acidentes reside na presença de elementos refratários, como o Plutônio-239 ou o Estrôncio-90 semivolátil [32]. Como parte do inventário de *Chernobyl* foi liberada, diversos elementos dessas espécies foram encontrados no ar e em outros meios, enquanto em *Fukushima* praticamente não foram encontrados [32]. A própria dinâmica dos acidentes explica a questão: enquanto em *Fukushima* a maioria das emissões ocorreu na forma de gases, em *Chernobyl* os destroços do combustível foram ejetados por ocasião da explosão [32].

Outra questão destacada relativa ao acidente ucraniano foi a presença de radionuclídeos de meia-vida curta, o que levou, nos momentos subsequentes, a uma deposição e consequente contaminação com atividades elevadas, causando efeitos adversos, tais como a

chamada “Floresta Vermelha”, devido a coloração vermelha das árvores danificadas ou mortas por efeito da radiação, além de mutações em plantas locais [32]. Em *Fukushima*, as emissões foram iniciadas somente no dia seguinte ao início do acidente, levando os radionuclídeos de meia-vida curta a decaírem nesse ínterim.

Uma comparação entre as liberações de radionuclídeos resultantes dos dois acidentes é apresentada na Tabela 1 [32]:

Tabela 1 - Comparação das liberações radioativas estimadas para os acidentes de *Chernobyl* e de *Fukushima*.

RADIONUCLÍDEOS	MEIA-VIDA	ATIVIDADE EM <i>CHERNOBYL</i> (PBq)	ATIVIDADE EM <i>FUKUSHIMA</i> (PBq)
GASES NOBRES			
Kr-85	10,75 anos	33	44
Xe-133	5,25 dias	6.500	14.000
ELEMENTOS VOLÁTEIS			
H-3	12,3 anos	1,4	0
Te-129m	33,6 dias	240	15
Te-132	3,20 dias	1150	180
I-129	15,7E6 anos	4x10 [^] (-5)	5,5x10 [^] (-5)
I-131	8,03 dias	1760	150
I-133	20,8 horas	910	146
Cs-134	2,07 anos	47	11,8
Cs-136	13 dias	36	2,6
Cs-137	30,1 dias	85	12
ELEMENTOS COM VOLATILIDADE MÉDIA			
Sr-89	50,5 dias	115	0,2
Sr-90	28,9 anos	10	0,02
Ru-103	39,2 anos	168	0
Ru-106	372 dias	73	0
Ba-140	128 dias	240	0
ELEMENTOS REFRATÁRIO			
Zr-95	64 dias	84	0
Mo-99	66 horas	72	0
Sb-125	2,76 anos	0,23	0
Ce-141	32,5 dias	84	0
Ce-144	285 dias	50	0
Eu-154	8,6 anos	0,13	0
Np-239	2,36 dias	400	0
Pu-238	87,7 anos	0,015	5x10 [^] (-6)
Pu-239	24.000 anos	0,013	0
Pu-240	6.560 anos	0,018	0
Pu-239 + Pu-240		0,031	2,4x10 [^] (-6)
Pu-241	14,3 anos	2,6	2,6x10 [^] (-4)
Pu-242	3,76E5 anos	4x10 [^] (-5)	0
Am-241	433 anos	0,0024	0
Cm-242	163 dias	0,4	0
Cm-244	18,1 anos	0,0027	0
TOTAL (Excluindo Gases Nobres)		5300	530

Fonte: referência [32] (adaptada).

Em relação às doses¹⁸ [34] resultantes, as diferenças são igualmente significativas. No acidente japonês, a média de dose comprometida na tireoide por inalação foi cerca de 4,2 mSv e 3,5 mSv para crianças e adultos, com um máximo de 23 mSv e 33 mSv, respectivamente [32]. Já na cidade ucraniana, os parâmetros médios do mesmo tipo de contaminação dentre os evacuados acusam um índice de 490 mSv, chegando ao máximo de 50 Sv [32]. Outra diferença sensível recai sobre a forma de contaminação: a ingestão em *Chernobyl* foi a forma de incorporação de radionuclídeos mais importante, principalmente por meio de leite contaminado, enquanto em Fukushima a contaminação por esse meio foi ínfima [32]. Apenas para efeito de comparação, os limites de dose efetivas anuais (exposição normal) segundo as normas brasileiras são de 20 mSv para Indivíduos Ocupacionalmente Expostos e de 1 mSv para indivíduos do público [34].

Em relação às doenças, o número de casos de câncer na tireoide foi significativamente maior em *Chernobyl* [32]. Relatórios mostram que a incidência desse tipo de câncer entre aqueles que tinham menos de 18 anos por ocasião do acidente aumentou em 6.848 casos, podendo ser esse número ainda maior [32]. Para *Fukushima*, apesar do tempo passado após o acidente não permitir estabelecer uma conexão com o número de casos de câncer ocorridos, estudos em 2014 sugeriram 18 casos de câncer infantil ocasionados pelas liberações [32]. Geralmente, um período de latência de 3 a 4 anos é admitido para iniciar tal avaliação [32]. Entre os profissionais que participaram da descontaminação de *Chernobyl*, maiores riscos de leucemia, tumores, defeitos genéticos e catarata foram confirmados [32]. Apesar de modelos apontarem um aumento entre 130 e 180 mortes por câncer no mundo devido à Fukushima, é difícil mensurar essa previsão devido à grande quantidade de variáveis envolvidas [32]. Também houve dificuldade em estabelecer o grupo de controle, assim como determinar a população afetada e aferir medições abrangentes de radiação devido ao caos instaurado após o terremoto e o maremoto [32].

Contudo, provavelmente a diferença mais destacada entre os dois eventos refere-se aos efeitos determinísticos agudos resultantes do acidente de *Chernobyl*, levando 134 operários a sofrer a Síndrome da Irradiação Aguda (ARS), sendo que de 28 a 31 deles morreram devido à explosão ou à ARS e outros 19 morreram nos anos subsequentes [32]. Enquanto as doses efetivas nos trabalhadores de *Chernobyl* somente no primeiro dia chegaram a 16 Sv, dois trabalhadores de *Fukushima* sofreram uma dose efetiva máxima de 2 a

¹⁸ Dose: neste trabalho, pode corresponder tanto à dose efetiva quanto à dose comprometida num órgão, conforme definidas na Norma CNEN-NN-3.01 [34]. A unidade de medida é o joule por quilograma (J/kg), denominada sievert(Sv).

3 Sv [32]. Não houve casos de ARS no acidente japonês e a estimativa de casos de câncer entre 20.000 trabalhadores é de 2 a 12 casos [32]. Além disso, avaliações da Organização Mundial da Saúde revelaram que os níveis de radiação na região de *Fukushima* foram bem menores que os necessários para a ocorrência de efeitos determinísticos na saúde da população [32]. Para efeito de comparação, a dose (gama) letal média em um caso de ARS fica entre 4 e 4,5 Sv. Isso significa que em cada 100 pessoas irradiadas com essa dose, a metade morreria [35].

No âmbito da segurança relacionada à alimentação após os acidentes, a ingestão de alimentos contaminados também deve ser considerada [32]. A exemplo da inalação, a ingestão de comida contaminada é um fator importante de contaminação interna, em especial em órgãos específicos, com doses comprometidas significativas devido ao risco de deposição de Iodo-131 na tireoide [32]. Normalmente, a contaminação por radionuclídeos depositados na superfície das folhas de plantas é o caminho mais comum de ingestão, em comparação com a absorção por meio das raízes, que pode ser potencializada por chuvas [32]. Contudo, a ingestão de carne e de leite derivado de gado alimentado com pasto contaminado pode transferir radionuclídeos para o corpo humano, principalmente o Iodo-131 e o Césio-137 [32]. Nesse contexto, os efeitos em *Fukushima* foram mitigados, uma vez que o acidente ocorreu antes da colheita, enquanto em *Chernobyl* a colheita já havia se iniciado, aumentando a contaminação da população [32]. Mesmo em áreas remotas, concentrações de Iodo-131 no leite após a data de 26 de abril de 1986 registraram níveis de 10.000 Bq por litro, com perspectivas de terem sido ainda maiores [32]. Outro fator era a divisão agrária soviética na região, formada por pequenos agricultores e criações para consumo familiar, fazendo com que a mitigação da contaminação fosse consideravelmente difícil [32].

Esse conjunto de fatores fez com que o consumo de leite fosse o principal meio de contaminação resultante do acidente soviético [32]. Adicionalmente, as medições não foram feitas em tempo oportuno, fazendo com que a análise tivesse que ser feita considerando o produto de decaimento Iodo-129 [32]. Até mesmo anos depois do acidente, o leite foi responsável por 50% da ingestão de Césio-137 [32]. Na região russa de *Bryansk*, a média de contaminação por ingestão alcançou 1.500 Bq no primeiro ano após o acidente de *Chernobyl*, enquanto a ingestão dos mesmos alimentos no entorno do acidente japonês registrou entre 0,6 e 2,5 Bq [32]. A acumulação de Césio-137 em cogumelos selvagens pode ser destacada no acidente ucraniano, chegando a concentrações de 100.000 Bq por quilograma [32]. Em relação à *Fukushima*, a baixa contaminação também é devida às medidas adotadas pelas

autoridades japonesas para retirar os alimentos contaminados do mercado, estabelecendo limites mais restritivos que os da agência europeia [32].

Em *Fukushima*, uma análise criteriosa foi feita entre 33.000 moradores. Dentre 1.494 crianças testadas no inverno de 2011, 54 crianças registraram níveis de radiatividade de 1.400 Bq no corpo, passando a zero no ano seguinte dentre 1.383 crianças testadas [32]. Apenas dois moradores tiveram níveis mais elevados que 12.240 Bq, nível de contaminação comumente observado em *Chernobyl*, devido ao consumo de cogumelos, carne ou peixes contaminados [32].

Ambos os acidentes, de *Chernobyl* e *Fukushima*, ocorreram em reatores civis, causando liberações significativas de radionuclídeos, voláteis em sua maioria, que contribuíram para a perda de confiança generalizada na energia nuclear, com sérias implicações políticas [36]. Mikhail Gorbachev, secretário-geral do Partido Comunista da União Soviética (PCUS) à época, relacionou até mesmo o fim da URSS com o acidente de *Chernobyl* [36]. Adicionalmente, devido ao temor por novos acidentes, a Áustria e a Alemanha abandonaram seus programas nucleares [32]. Após *Fukushima*, a Alemanha e a Bélgica anunciaram que abandonariam o uso da energia nuclear em suas matrizes energéticas, fazendo com que o país mais industrializado da Europa regressasse ao uso intensivo de fontes energéticas fósseis, potencialmente causadoras de impactos ambientais significativos [32].

Contrariando o senso comum, os impactos à saúde foram muito além dos efeitos radiológicos [32]. Nas regiões afetadas pelo acidente soviético, a expectativa de vida baixou vertiginosamente, mas não devido à radioatividade [32]. As causas de morte nessa região se assemelham muito às daquelas de toda a ex-União Soviética, como doenças cardiovasculares, ferimentos e intoxicações, relacionados a fatores como dieta deficiente, estilo de vida, consumo de álcool e tabaco [32]. Outras análises sugerem que ansiedade, depressão e estresse oferecem maiores perigos nessas regiões que o causado pela radiação, assim como consequências psicológicas representaram efeitos mais significativos à saúde pública [32].

No Japão, efeitos semelhantes puderam ser observados [32]. Apesar do aparente sucesso em proteger a população de efeitos radiológicos generalizados, o governo japonês não conseguiu evitar os efeitos psicológicos resultantes. [32] Uma das causas é que cerca de três quartos dos evacuados ainda permanecem separados de parte de sua parentela devido ao temor dos efeitos radiológicos [32]. Os efeitos pós-traumáticos difundiram-se não somente entre os evacuados ou contaminados, mas também na população em geral, levando a uma sensível perda de confiança no próprio governo japonês [32].

5 MEDIDAS DE SEGURANÇA NUCLEAR IMPLEMENTADAS APÓS OS ACIDENTES DE *CHERNOBYL* E *FUKUSHIMA DAIICHI*

5.1 Segurança Nuclear Após *Chernobyl*

Logo após o acidente de *Chernobyl*, foram publicados relatórios e estudos com vistas a evidenciar as causas do acidente, as ações tomadas pelo governo soviético e as lições aprendidas [37]. Nos relatórios e estudos apresentados nos anos seguintes, tornou-se evidente a contribuição dos efeitos de erros humanos para o acidente de *Chernobyl*, principalmente em relação a fatores organizacionais, aspectos políticos, treinamento inadequado, forma de gerenciamento não propícia e fraca implementação de uma cultura de segurança [37]. Este último fator, a cultura de segurança, foi introduzida na indústria nuclear principalmente devido ao acidente de *Chernobyl* [37].

Em particular, o Dr. Valeri Legasov, encarregado da comissão de avaliação pós-acidente de *Chernobyl*, destacou como a importância da engenharia de fatores humanos e da interação homem-máquina são duas grandes lições do acidente [37]. Ele também comparou *Chernobyl* ao acidente químico de *Bhopal*¹⁹, ocorrido na Índia, em 1984 [37]. Em ambos, apesar dos projetos considerarem a segurança, os sistemas de proteção foram desativados, o que fez com que os acidentes se tornassem irreversíveis [37]. Um estudo da United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC), realizado no ano anterior a *Chernobyl*, sugeriu que 65% das falhas em sistemas de plantas nucleares comerciais envolveriam algum erro humano [37].

Ao mesmo tempo, fatores humanos e organizacionais são aspectos complexos que haviam sido pouco estudados até então [37]. Exigir uma regulação mais rígida e com maior automação seriam soluções simplistas diante das causas reais do problema [37]. A solução foi uma abordagem institucionalizada, com implementação de políticas e compartilhamento de conhecimentos [37].

Ao nível do Brasil, pode ser citada a inclusão em Relatório de Análise de Segurança (RAS) de instalações nucleares, conforme recomendação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), de capítulo específico tratando de Engenharia de Fatores Humanos, assim como uma maior atenção à análise e gerenciamento de acidentes severos [37, 38].

¹⁹ Acidente de *Bhopal*, Índia: Grave acidente químico provocado por vazamento de isocianato de metila, em 1984, que afetou mais de 500 mil pessoas.

O termo cultura de segurança foi definido pela AIEA como um conjunto de características e atitudes em relação a organizações e indivíduos que determinam que, diante de problemas prioritários, as questões de segurança da planta nuclear receberão atenção proporcional à sua importância [37]. Esse conceito foi posteriormente também incorporado por outras indústrias, como a química e a aeroespacial [37].

Concluiu-se que as condições necessárias, porém não suficientes, para a criação e a manutenção da cultura de segurança seriam o correto entendimento sobre os fatores relacionados aos sistemas que influenciam o desempenho humano, a determinação da extensão das interações da cultura organizacional com a cultura nacional, o incentivo a questionamentos e a abertura suficiente para sugestões quanto a melhorias e o desenvolvimento de ambiente regulatório aplicado adequadamente à indústria [37]. Para que esses elementos, por si só, sejam suficientes, seria necessário complementar com a cooperação e coordenação entre fabricantes, operadores, agências ou órgãos reguladores e organizações internacionais [37].

Esse último aspecto foi reforçado por um Memorando de Entendimento, assinado em 1995 entre a Ucrânia e os países do G7²⁰ [37]. Nesse documento, é reconhecida a responsabilidade última do país em cujo território reside a planta sobre questões de segurança nuclear, porém cabe à comunidade internacional assegurar que um programa abrangente de segurança nuclear esteja sendo corretamente aplicado [37]. Isso é justificado pelo prejuízo coletivo que acidentes nucleares podem causar para todo o planeta, independente de seu envolvimento no evento [37]. De fato, a experiência mostra que quando a aplicação e a fiscalização de medidas de segurança são delegadas apenas às autoridades políticas locais, interesses quanto a custos, lucros e popularidade podem prevalecer sobre aplicações corretas e efetivas dessas medidas [37].

Dentre os principais estudos sobre o tema, destacam-se os relatórios da USNRC [39, 40] e da *Nuclear Energy Agency* (NEA) [38]. Os esforços para a multilateralização da segurança nuclear culminaram na Convenção de Segurança Nuclear da AIEA, assinada em 1994 e em vigor desde 1996 [39]. Apesar de não estabelecer um caráter vinculante, a convenção ajudou a estabelecer um quadro normativo para a instituição de defesas eficientes contra efeitos radiológicos de maneira específica em cada país [39].

²⁰Grupo dos Sete ou G7: Agrupamento das sete nações mais industrializadas do mundo (EUA, Alemanha, Japão, Reino Unido, França, Canadá e Itália) que trata de temas políticos e securitários, tendo tratado sobre temas econômicos até 2009.

5.2 Segurança Nuclear Após *Fukushima*

5.2.1 Falhas em *Fukushima* e Conclusões Subsequentes

Diversas ações foram tomadas inicialmente pelas autoridades japonesas para fortalecer a segurança nuclear do país [40]. Em particular, a Autoridade Nuclear Japonesa implementou novos padrões regulatórios para plantas civis em 2013, abrangendo acidentes da base de projeto, a proteção contra terremotos e maremotos e novos requisitos para acidentes severos, todos eles baseados no princípio de defesa em profundidade [40].

Novas avaliações sismológicas e de previsão de maremotos foram efetuadas baseando-se em conhecimentos atualizados, assim como muros de contenção de tsunamis foram reconstruídos ou reforçados caso houvesse necessidade [40]. Portas com vedação para água foram instaladas nos prédios de reatores, assim como foram implementadas contramedidas para evitar inundações internas [40]. Equipamentos de alimentação elétrica móveis foram disponibilizados em áreas diversificadas, a fim de compensarem perdas externas de energia e falhas de equipamentos, e dispositivos de injeção de água em condições de emergência foram projetados para acidentes além da base de projeto [40]. Para o melhor gerenciamento de gases combustíveis em reatores, foram instalados sistemas auxiliares de recombinadores de hidrogênio e borrifadores para evitar danos devidos ao sobreaquecimento e à pressão exacerbada na contenção, assim como foram adotadas medidas para garantir o correto monitoramento desses parâmetros [40].

Após *Fukushima*, a preparação para lidar com diversos perigos, não somente eventos naturais como terremotos e maremotos, mas também desastres aéreos e ataques terroristas, passaram a ser considerados de forma mais enfática. [40] Nem todas as situações hipotéticas podem ser imaginadas, mas alguns cenários têm maior possibilidade de ocorrência, a ponto de poder-se implementar medidas de prevenção suficientes [40].

Em *Fukushima*, em especial, a principal causa para o acidente foi a preparação insuficiente para maremotos. Isso comprovou, em certo grau, a importância do princípio de Defesa em Profundidade, já que a única barreira unicamente dedicada a proteger a central nuclear de maremotos foi parcialmente ineficiente [40]. Caso outras barreiras fossem implementadas, levando em consideração tal fenômeno natural, possivelmente o acidente nuclear teria sido evitado [40]. Diversas áreas importantes à segurança não tinham proteção contra inundações e equipamentos de alimentação elétrica de emergência, como os diesel geradores, que estavam localizados abaixo do nível do mar, uma vez que essa localização seria a mais adequada em casos de terremotos para evitar danos aos equipamentos [40]. As

redundâncias contra eventual perda de energia externa também eram frágeis devido ao excesso de confiança no serviço elétrico local, não levando em consideração a demora para o reestabelecimento que outro evento poderia causar, como um terremoto [40].

Outro fator importante posteriormente analisado foi a gestão de emergências, principalmente devido a diversas mortes ocasionadas pelo planejamento e operação inadequados do plano de evacuação [40]. O compartilhamento ineficiente de informações entre a TEPCO, o governo central, as forças de defesa nacional e os governos locais é admitido como causador de 19 mortes devido à evacuação de hospitais da região sem a sincronização adequada [40]. Criado a partir de avaliações anteriores, um centro de gestão de emergência que poderia ter auxiliado no gerenciamento do evento não pôde gerir a resposta a *Fukushima* devido à perda de energia na região [40]. A administração também foi falha em coletar os dados de radiação necessários para calcular a possível dispersão atmosférica e a deposição de material radioativo [40]. A utilização do sistema de predição de doses ambientais, chamado de SPEEDI, seria usado para auxiliar o processo de tomada de decisão referente ao planejamento da evacuação de *Fukushima* [40]. Os dados de radiação coletados não puderam ser transferidos para o sistema devido à perda de energia externa [40].

Em geral, assume-se que a necessidade de incrementar a resiliência de usinas nucleares em todo o mundo foi uma das lições mais relevantes de *Fukushima* [40]. A definição de resiliência envolve a absorção de mudanças com a manutenção de funcionalidades, representado em sistemas pela rapidez de recuperação de um estado degradado para sua correta operação após uma possível crise [40]. Enquanto projetos de segurança nuclear convencionais focam em acidentes de base de projeto, a resiliência prioriza as consequências de acidentes além da base de projeto, demandando novas reformulações na segurança nuclear [40]. Quatro características são enumeradas como essenciais para o aprimoramento da resiliência em sistemas nucleares: capacidade de defesa, como o nível de mudança absorvível pelo sistema; flexibilidade, como a habilidade de reestruturar-se em resposta a mudanças externas; margem de segurança, como a proximidade de situações limítrofes de perigo; e tolerância, como o comportamento do sistema nas situações de limite [40].

5.2.2 Reações Imediatas Após *Fukushima*

Logo após o acidente de 2011, todas as nações que detinham plantas nucleares tomaram ações imediatas ou promulgaram declarações sobre ajustes em suas políticas de

desenvolvimento nuclear [41]. Outros países, como os EUA e a França, emitiram declarações em apoio aos seus programas nucleares [41]. Pode-se também identificar outras tendências quanto à atitude em relação ao desenvolvimento nuclear de diversos países após *Fukushima* [41]. Enquanto países como EUA, Canadá, China, Rússia, Índia e países da Europa ocidental priorizaram a promoção da segurança nuclear e desaceleraram o desenvolvimento de suas indústrias nucleares, países do Oriente Médio, norte da África, sul da Ásia e América do Sul continuaram o ritmo de desenvolvimento original [41]. Nações como Espanha, Portugal e Japão indicaram a manutenção do status original das plantas à época; já Alemanha, Suíça e Bélgica reduziram a utilização da energia nuclear gradualmente, chegando até mesmo a parar de utilizar a matriz, como no caso alemão e suíço [41]. Nesse último grupo de países, a opinião pública foi crucial para o desmantelamento de suas centrais, além dos efeitos adversos advindos da crise financeira mundial de 2008 [41].

No âmbito internacional, a AIEA desenvolveu o Plano de Ação da AIEA sobre Segurança Nuclear, que foi endossado pelo Conselho de Governadores da AIEA e aprovado pela Conferência Geral da AIEA realizada em setembro de 2011 [42]. Este plano definiu um programa de ação para fortalecer a estrutura global de segurança nuclear, levando em conta as lições do acidente na usina nuclear de *Fukushima* [42]. Essa iniciativa levou a publicação de “lições aprendidas” sobre o acidente japonês, tornando-se um dos documentos mais frequentes entre os países que usufruem da matriz [42]. Isso foi possível após extensiva pesquisa interna e a partir da colaboração de outros países, da AIEA e do próprio governo nipônico, ao aceitar inspeções e visitas técnicas de outros países [42].

A AIEA também iniciou em 2011 um extensivo trabalho de revisão da série “Normas de Segurança” [42], que contém padrões de segurança internacionalmente adotados. Foram priorizadas questões relativas à estrutura regulatória, preparação e resposta a emergências e questões de engenharia, como a seleção e a avaliação dos locais [42]. Em relação à normativa referente aos locais de construção de plantas, foram revistos o risco de perda de energia de usinas; a avaliação de riscos naturais extremos, incluindo seus impactos combinados; a gestão de acidentes graves, o risco do desligamento do sistema de remoção de calor, a prevenção e mitigação do acúmulo de gases explosivos, o comportamento do combustível nuclear e a gestão do armazenamento seguro do combustível nuclear irradiado [42]. Novas considerações foram feitas em relação à análise probabilística, com requisitos de projeto exigindo a avaliação de eventos naturais com frequência acima de 1 em 10.000 anos,

em relação a anterior, que exigia avaliações de eventos acima da frequência de 1 em 1.000 anos [43].

Foram consideradas como recursos para essas revisões as conclusões emanadas das reuniões periódicas de especialistas da AIEA, de Conferências das Partes da Convenção de Segurança Nucleares das agências nucleares nacionais [30]. Outras iniciativas compreendem as missões da AIEA em apoio ao Japão, contando com o envio de especialistas de todo o planeta; a Conferência Ministerial sobre Segurança Nuclear realizada em *Fukushima* em 2012 e a Declaração de Viena sobre Segurança Nuclear adotada em 2015, resumindo diversas conclusões e medidas de segurança para o futuro da energia atômica [30].

Outra ação muito frequente foi a formulação e aplicação de testes de qualificação de plantas e operadores chamado de testes de estresse (*stress tests*), formulados para simular em diversas plantas nucleares as mesmas situações ocorridas no Japão que causaram a perda de energia externa e utilização dos sistemas de emergência [41]. Essas ações uniram subsídios para reformulações nos planos de segurança de plantas nucleares ao redor do globo, seguindo as diretrizes emanadas da AIEA [41].

5.2.3 Aprimoramento da Segurança Nuclear Americana

Nos Estados Unidos, uma força-tarefa foi nomeada pela USNRC em abril de 2011 para avaliar o acidente, emitindo um relatório em julho do mesmo ano, além de publicar um documento com as lições aprendidas de *Fukushima* [39, 40]. Em 2012, a agência americana promulgou três ordens que determinaram a obtenção de equipamentos adicionais de emergência para apoio de todos os reatores de uma usina após possíveis desastres nucleares, a melhoria em equipamentos de monitoração de níveis de água em piscinas de armazenamento de combustíveis usados e o aprimoramento de sistemas de alívio de pressão em contenções para prevenir acidentes [44]. Todos os reatores comerciais norte-americanos cumpriram os requisitos adicionais dos sistemas de emergência e adquiriram os equipamentos portáteis para manutenção da energia [44]. Ademais, dois centros de resposta a emergências nucleares foram criados [44]. Em 2013, novos requisitos foram adicionados aos sistemas de alívio de pressão considerando níveis de radiação e temperatura de um reator avariado, assim como novos procedimentos para operadores nessas situações [44]. Novas exigências também foram feitas referente à resiliência contra inundações e terremotos, sendo preenchidas por todas as centrais nucleares [44].

5.2.4 Aprimoramento da Segurança Nuclear Europeia

No âmbito regional europeu, ainda em março de 2011, o Conselho Europeu emitiu uma resolução determinando que a segurança de todas as plantas nucleares da União Europeia (UE) deveria ser revista, com base em testes de estresse assessorados pela *European Nuclear Safety Regulators Group* (ENSREG), pela comissão da Euratom e pela *Western Europe Nuclear Regulators Association* (WENRA) [39]. A agência europeia WENRA, em particular, ressaltou a necessidade da independência plena dos níveis de defesa em profundidade, de forma que a falha em um nível não ocasione a falha em outro nível [39]. De forma semelhante, a independência almejada deve ser comprovada por análises determinísticas e probabilísticas de segurança, além de cálculos de engenharia [39]. Além disso, maior prioridade deveria ser dada a automação, a sistemas auxiliares de fornecimento de energia e de resfriamento do reator, sem comprometer a independência supracitada [39]. No total, foram testadas 143 centrais nucleares na UE, iniciando em junho de 2011, cujos resultados foram revelados pela comissão da Comunidade Europeia de Energia Atômica (Euratom) em outubro de 2012, seguido pela aprovação de uma resolução no Parlamento Europeu sobre a avaliação de riscos e de segurança nuclear em março de 2013 [39]. Em 2014, a Diretiva 87 da Euratom complementou o arcabouço legal existente determinando um sistema de revisão entre pares em toda UE, incluindo a revisão por órgãos internacionais a cada dez anos [39].

Em especial, a República Francesa, maior detentora de usinas nucleares na Europa, determinou o fechamento de usinas que não se conformassem com os novos requisitos, ao passo que anunciou investimentos da ordem de 1 bilhão de euros na área nuclear [41]. Todas as suas 56 usinas e 2 reatores em construção foram reavaliadas pela agência francesa *Autorité de Sûreté Nucleaire* (ANS) e submetidas ao teste de estresse [43]. De igual forma, a ANS exigiu um plano emergencial adicional de grupos de resposta rápida para apoiarem as centrais em até 24 horas com energia por até 3 dias para equipamentos pesados, utilizando meios como helicópteros e podendo operar mesmo em condições ambientais severas [43].

5.2.5 Aprimoramento da Segurança Nuclear Oriental

Na Rússia, outra potência nuclear proeminente, destaca-se a priorização do aumento da resiliência das plantas [42]. Testes de estresse em reatores VVER-440 e VVER-1000 resultaram em modificações importantes em novos projetos e aquisição de geradores a

diesel resfriados a ar para fornecimento de energia em emergência [42]. Em especial, novos reatores VVER-1200 da geração III+ russos foram projetados com novos sistemas de segurança ativos e passivos, com o incremento da resistência da contenção, instalação de recombinadores catalíticos de hidrogênio e sistemas de aspersão para resfriamento e redução de pressão e sistema de contenção de combustível derretido em casos mais extremos [42].

A República Popular da China, responsável pela construção de mais da metade da capacidade instalada desde 2011 [41], suspendeu a aprovação de novos projetos e efetuou a reavaliação daqueles já aprovados [41]. Igualmente, o governo endureceu a regulamentação sobre segurança nuclear e reformulou o planejamento nacional de desenvolvimento nuclear de médio e longo prazo, assim como conduziu uma ampla inspeção das instalações nucleares operativas em 2011, ao passo que assegurava o apoio governamental à indústria nuclear [41]. No Japão, apesar de todas as medidas adotadas, 46 das 50 unidades nucleares existentes em 2011 foram fechadas temporariamente e, até 2019, somente 9 haviam voltado a operar [45].

5.2.6 Aprimoramento da Segurança Nuclear Brasileira

No Brasil, foi elaborado um Plano de Resposta à *Fukushima*, elaborado pela empresa Eletronuclear, implementado a partir do final de 2011 e revisado em agosto de 2012 já com os resultados das reavaliações de resistência das usinas de Angra 1 e 2 elaborados segundo as especificações europeias [49]. Esses resultados foram analisados pela CNEN e pelo Fórum Ibero-americano de Organismos Reguladores Nucleares [49].

No Plano, com duração prevista de 5 anos, foram elencadas 56 iniciativas, focadas principalmente em três pilares: proteção contra eventos de risco, com o objetivo de evitar falhas múltiplas nos sistemas de segurança; capacidade de resfriamento, buscando garantir o resfriamento em condições além da base de projeto; e limitação de consequências, com o intuito de limitar consequências radiológicas em acidentes severos [50, 51]. Entre 2011 e 2016 foram investidos 150 milhões de dólares para a implementação do Plano [49].

Foram considerados tanto eventos externos, já analisados no RAS, quanto eventos internos, como inundações internas e incêndio [47]. Em especial, a avaliação de riscos externos sofreu atualizações de metodologia, passando a utilizar abordagem probabilística para a verificação de margens de segurança [47]. Os testes de estresse das usinas apresentaram alto nível de segurança frente a desastres externos naturais, como terremotos, deslizamentos de encostas, inundações por chuvas, maremotos e tornados. Em relação a

terremotos, avaliou-se que as usinas têm capacidade para suportar eventos de intensidade bem superiores àqueles já ocorridos no país [49], como, por exemplo, o tremor ocorrido em São Vicente - SP em 2008 [50]. Sobre deslizamentos de encostas, evento relativamente frequente na região de Angra dos Reis, concluiu-se que as instalações não seriam atingidas [48]. Já em relação a inundações da central brasileira, assegurou-se que as barreiras à inundação seriam adequadas mesmo considerando chuvas de intensidade muito superior às máximas já verificadas. Ainda assim, o Plano recomendou a ampliação do sistema de drenagem [48]. Equipamentos de segurança móveis adicionais, como bombas, compressores e geradores a diesel foram adquiridos para garantir o resfriamento dos reatores [48]. Um novo reservatório de água para emergências foi projetado e foram estabelecidas novas alternativas de movimentação de pessoal e equipamentos do Plano de Emergências, com a instalação de trilhas para deslocamento em terra e a ampliação de atracadouros para evacuação pelo mar [49]. Em particular, a proteção contra maremotos foi reforçada devido a recomendações do Plano [52].

6 COMENTÁRIOS GERAIS

Atualmente, a indústria nuclear retornou a um ritmo ascendente de crescimento depois de anos de adaptações em matéria de segurança nuclear e de descrédito por parte da opinião pública. Com o efeito adverso do acidente de *Fukushima*, 65 reatores foram desativados ou não tiveram sua vida útil prorrogada [45]. Contudo, novos investimentos têm ocorrido, com destaque para a construção de novas usinas na China, na Coreia do Sul, na Rússia, em Belarus e nos Emirados Árabes Unidos. Em especial, os dois últimos países citados inauguraram suas primeiras centrais nucleares em 2020 [45]. Turquia e Bangladesh também estão incrementando seus investimentos em energia nuclear, com a construção de suas primeiras plantas. Essa melhoria no cenário da indústria nuclear mundial é respaldada pelas otimizações implementadas relativas à segurança. Novos modelos de reatores, como os EPR²¹ europeus, os AP1000²² americanos e os BN-800²³ e VVER-1200 russos incorporaram lições de segurança valiosas aprendidas após a análise de acidentes anteriores [45, 47, 53]. Como já mencionado neste trabalho, a energia nuclear tem um dos menores índices de morte

²¹ EPR: reator do tipo PWR de terceira geração com maior eficiência e segurança.

²² AP1000: reator do tipo PWR com inovações em sistemas passivos de segurança.

²³ BN-800: reator de nêutrons rápidos resfriado a sódio de 800MW lançado na região russa de Beloyarsk.

por geração elétrica dentre as matrizes energéticas, adotando elevados padrões de regulamentação e de controle da qualidade [16].

Diante dos desafios futuros relacionados à maior demanda energética e necessidade de transição para energias consideradas limpas, a energia nuclear figura com destaque entre as mais promissoras fontes de energia, não somente pela alta geração elétrica por elemento combustível, mas também pelas baixas emissões radioativas observadas/esperadas. Dessa forma, acredita-se que a comunidade internacional possui uma oportunidade única de promover a expansão da participação nuclear na matriz energética mundial, a fim de resolver os dois desafios citados. Soma-se a isso, os avanços tecnológicos e o aperfeiçoamento da segurança nuclear implementados após os acidentes supracitados, que buscam garantir os maiores níveis possíveis de segurança para os trabalhadores, as populações e o meio ambiente.

No Brasil, em particular, a implementação de medidas de segurança após os acidentes abordados no presente trabalho, com destaque para as lições aprendidas do acidente de *Fukushima*, proporciona uma maior confiança na fonte energética nuclear, principalmente em meio aos esforços para o prosseguimento da construção da usina Angra 3, do Laboratório de Geração Nucleo-Elétrica (LABGENE), do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) e do desenvolvimento do Submarino Convencionalmente armado com Propulsão Nuclear (SCPN) brasileiro. Em relação aos três primeiros reatores, as novas regulamentações e requisitos regulatórios ganham proeminência por serem plantas em terra, diferentemente do SCPN, que passará por um processo de licenciamento distinto, promovido pela Secretaria Naval de Segurança Nuclear e Qualidade (SecNSNQ). Adaptações quanto à aquisição de baterias e diesel geradores de emergência, recombinaidores de hidrogênio, reavaliação de locais de instalação, estudos relacionados à engenharia de fatores humanos, aumento da robustez dos sistemas de emergência e da resiliência da planta diante de acidentes além da base de projeto podem ter grande utilidade para esses projetos brasileiros, ainda que gerem um possível e necessário aumento de despesas.

Em relação ao SCPN, algumas considerações adicionais podem ser feitas. Como o submarino detém diesel geradores de energia e baterias com redundância, os riscos envolvendo a perda de energia elétrica devem ser avaliados de forma distinta aos estudos referentes às plantas em terra, que consideram a perda de energia externa, assemelhando-se a elas somente quando o submarino estiver atracado. Em relação a explosões na contenção provocadas pela produção de hidrogênio proveniente do sobreaquecimento do revestimento dos elementos combustíveis, os estudos sobre os riscos também devem ser adaptados, já que o

revestimento dos elementos combustíveis do SCPN, tal qual do LABGENE, será composto por ligas de aço inoxidável, que apresentam menores taxas de oxidação por água no curto prazo em comparação com as ligas à base de zircônio comumente utilizadas em reatores PWR [54]. Além disso, a avaliação de locais da instalação não se aplica aos submarinos nucleares.

Em relação ao SCPN, a maior contribuição imediata dos ensinamentos provenientes dos acidentes estudados aparenta ser relacionada às demais lições citadas. A engenharia de fatores humanos pode ser consideravelmente útil para uma plataforma com restrição de espaço, pouca exposição à luz solar, submetido à hierarquia militar e com altos riscos envolvidos, elevando potencialmente o estresse dos operadores. A robustez dos sistemas de emergência e a resiliência diante de acidentes não postulados também são orientações aplicáveis para submarinos, porém com avaliações de risco adaptadas aos perigos relacionados a uma plataforma móvel em todas as dimensões, alterando potências em pequenos intervalos de tempo e submetido a possíveis ataques inimigos.

A maior contribuição a longo prazo, decorrente das lições aprendidas, pode ser verificada na crescente disseminação de conhecimento, no aumento da confiança na matriz nuclear e no fomento à indústria nuclear brasileira. A divulgação dos aprimoramentos de segurança nuclear possibilita o aumento da confiança da sociedade de forma geral, reduzindo o temor de investidores. Esse processo auxilia a difusão de conhecimento sobre a área nuclear, alvo de preconceito da opinião pública devido aos acidentes e às bombas atômicas, fazendo com que o público atente às oportunidades representadas pela energia atômica. A divulgação das medidas de segurança associada à difusão de conhecimentos tem o potencial de gerar um ciclo virtuoso de investimentos em novas usinas, aplicações militares e relacionadas a novos usos, como a dessalinização de água e a geração de hidrogênio. Isso fomentaria a indústria nuclear brasileira e reduziria os custos com a produção em escalas maiores, assim como incentivaria a produção nacional a buscar padrões de excelência e a promover pesquisas avançadas sobre o tema. Esse ciclo pode contribuir a longo prazo para a redução de custos envolvendo o licenciamento, comissionamento, operação, manutenção e descomissionamento do SCPN, processos que atualmente sofrem aumento de gastos ou até mesmo o cerceamento de acesso a equipamentos e testes no exterior devido ao uso militar da energia nuclear.

7 CONCLUSÃO

7.1 Considerações Finais

Quanto às causas dos acidentes, algumas conclusões podem ser apresentadas. O acidente de *Chernobyl* foi fortemente influenciado por falhas de projeto, como a presença de material moderador nas barras de controle, ausência de uma contenção convencional e supermoderação sob certas circunstâncias. Porém, ainda sim, alguns fatores humanos foram determinantes, como ingerência política, inexperiência de operadores e desrespeito aos regulamentos. Já em *Fukushima*, falhas de projeto quanto à avaliação de riscos naturais extremos, a falta de resiliência diante de acidentes além da base de projeto, principalmente referente à perda de energia externa, foram as principais causas. Ademais, algumas falhas de coordenação entre órgãos públicos foram fatores que agravaram as condições do acidente.

Em relação às consequências radiológicas, o impacto do acidente de *Chernobyl* é maior quando comparado com o acidente de *Fukushima*. Isso se verifica na liberação de radionuclídeos uma ordem de grandeza maior, na área contaminada e evacuada mais extensa e na maior magnitude das doses e das doenças causadas pela exposição à radiação.

As particularidades quanto à dispersão atmosférica e à contaminação corroboram que, enquanto em *Fukushima* a maior parte da contaminação foi diluída no Oceano Pacífico, em *Chernobyl* grande parte da dispersão se depositou em plantações e pasto bovino. Outra grande diferença fica evidente quanto aos efeitos radiológicos determinísticos: nenhum caso de SAR foi verificado em *Fukushima*, enquanto 134 casos são associados a *Chernobyl*. Contudo, as medidas emergenciais japonesas foram mais eficazes. A distribuição de iodo estável para a população, as ordens de evacuação decididas após as primeiras liberações e o recolhimento de alimentos contaminados dos mercados contribuíram para evitar que a radiação acometesse mais pessoas. As autoridades soviéticas, por outro lado, tomaram medidas de evacuação dias após o acidente, falharam em suas medidas profiláticas e foram ineficazes ao impedir a ingestão de alimentos contaminados, principalmente de leite. Semelhanças são encontradas, porém, no forte descrédito subsequente da opinião pública, nos impactos políticos e nos efeitos negativos psicológicos às populações vizinhas.

A indústria nuclear internacional soube reagir nas duas ocasiões aos desafios surgidos após os dois acidentes. Após *Chernobyl*, a cultura de segurança e a engenharia de fatores humanos passaram a ser mais utilizadas, assim como questões de projeto associados às

falhas no reator RBMK foram corrigidas. Após *Fukushima*, de forma semelhante, a segurança nuclear foi reforçada por novas regulamentações, reavaliações de riscos quanto aos desastres naturais e ações mitigatórias para lidar com acidentes além da base de projeto. Equipamentos como diesel geradores de emergência, recombinadores de hidrogênio e tanques de resfriamento tiveram seus papéis alçados aos níveis mais altos de importância, assim como algumas áreas de estudo ganharam um destaque maior, como a análise probabilística de segurança. As medidas tomadas por cada país para evitar novos acidentes demonstram a coerência e seriedade do setor nuclear mundial, com alto comprometimento com a segurança das pessoas e do meio ambiente.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos subsequentes, vislumbra-se a necessidade de estudos adicionais sobre os efeitos radiológicos do acidente de *Fukushima* a longo prazo, que poderão ser mais bem avaliados nos próximos anos, semelhante às pesquisas realizadas em relação ao acidente de *Chernobyl*. Outra possibilidade de aprofundamento reside na comparação entre as disposições finais dos rejeitos radioativos dos dois acidentes nucleares, semelhante à comparação feita entre os efeitos radiológicos no presente trabalho. Comparações entre medidas de segurança implementadas pós-*Fukushima* também podem ser incrementadas, à medida em que diversos países adotam novas medidas e novas tecnologias, desenvolvidas para evitar os problemas ocorridos na central japonesa. Por fim, conforme as novas especificidades técnicas do RMB e do SCPN forem decididas e tornadas públicas, a realização de novos estudos podem aprofundar a análise quanto às medidas de segurança pós-*Fukushima* que podem ser úteis para esses projetos.

REFERÊNCIAS

- [1] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **História da Energia Nuclear**. Disponível em: <<http://antigo.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/historia-da-energia-nuclear.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2023.
- [2] RODRIGUES, P. E. **Guerras de Procuração - InfoEscola**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/historia/guerra-por-procuracao-proxy-war/amp/>>. Acesso em: 21 set. 2023.

- [3] MARIN, P. Estados Unidos realizou quase 400 intervenções militares em todo o mundo. **Revista Ópera**. Disponível em: <<https://revistaopera.com.br/2022/08/19/estados-unidos-realizou-quase-400-intervencoes-militares-em-todo-o-mundo/#>>. Acesso em: 22 set. 2023.
- [4] UNITED NATIONS. *Partial Test Ban Treaty - United Nations Treaties*. Disponível em: <<https://treaties.un.org/pages/showDetails.aspx?objid=08000002801313d9>>. Acesso em: 22 set. 2023.
- [5] BRASIL, Decreto No 2.864, de 7 de dezembro de 1998. Promulga o Tratado de Não-Proliferação Nuclear. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2864.htm>. Acesso em 22 set. 2023.
- [6] START III/SORT. *Britannica*. Disponível em: <<https://www.britannica.com/event/Strategic-Arms-Reduction-Talks/START-III-SORT>>. Acesso em: 22 set. 2023.
- [7] LARA, R. Quase uma bomba, mas diferente: como usinas nucleares funcionam? **UOL Notícias**, 25 fev. 2022. Disponível em: <<https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2020/06/25/nem-so-eletrico-nem-so-combustao-como-veiculos-hibridos-funcionam.amp.htm>>. Acesso em: 25 set. 2023.
- [8] RODRIGUES, E. Conheça a história do USS Nautilus: o primeiro submarino nuclear do mundo – 21 de janeiro de 1954. **Revista Relações Exteriores**, 25 jul. 2022. Disponível em: <<https://relacoesexteriores.com.br/uss-nautilus-primeiro-submarino-nuclear/>>. Acesso em: 25 set. 2023.
- [9] Submarino Nuclear. **Wikipédia**. Disponível em: <https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Submarino_nuclear>. Acesso em: 25 set. 2023.
- [10] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power Reactors*. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>>. Acesso em: 25 set. 2023.
- [11] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Generation IV Nuclear Reactors*. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>>. Acesso em: 25 set. 2023.
- [12] BARBOSA, V. Os maiores desastres nucleares que abalaram o mundo. **Globo Educação**. Disponível em: <<https://umsoplaneta.globo.com/google/amp/energia/noticia/2022/03/04/os-maiores-desastres-nucleares-que-abalaram-o-mundo.ghtml>>. Acesso em: 26 set. 2023.
- [13] THOMAS J. A. O que é o Acordo de Paris e as NDCs? **Um Só Planeta**. Disponível em: <<https://umsoplaneta.globo.com/clima/noticia/2021/04/04/o-que-e-o-acordo-de-paris-e-as-ndcs.ghtml>>. Acesso em: 26 set. 2023.

- [14] *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The path to limiting global warming to 1.5 °C has narrowed, but clean energy growth is keeping it open.* Disponível em: <<https://www.iea.org/news/the-path-to-limiting-global-warming-to-1-5-c-has-narrowed-but-clean-energy-growth-is-keeping-it-open#>>. Acesso em: 26 set. 2023.
- [15] READFEARN, G. *Antarctic Sea ice shrinks to lowest annual maximum level on record, data shows.* **The Guardian**, 26 set. 2023. Disponível em: <<https://amp.theguardian.com/world/2023/sep/26/antarctic-sea-ice-shrinks-to-lowest-annual-maximum-level-on-record-data-shows>>. Acesso em: 27 set. 2023.
- [16] INSTITUTO Kapok: 27a Mesa Inovadora - Hidrogênio Verde: Futuro Renovável. Instituto Kapok, 17 nov. 2022. 1 vídeo (113 min). Disponível em: <<https://www.youtube.com/live/umOwQy8HQ0M?si=N9zYLTMQzDfcvJJY>>. Acesso em: 23 out. 2023.
- [17] *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. How can nuclear combat climate change?* Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-can-nuclear-combat-climate-change.aspx>>. Acesso em: 23 out. 2023
- [18] KIMURA, M. BARBOSA, D. GOMES, G. Somos 8 bilhões de pessoas e não vamos parar por aí. **G1**. Disponível em: <<https://especiais.g1.globo.com/mundo/2022/8-bilhoes-de-pessoas/#:~:text=Em%202022%2C%20a%20popula%C3%A7%C3%A3o%20mundial,15%20de%20o%20vembro%20de%202022>>. Acesso em: 27 set. 2023.
- [19] *PRICEWATERHOUSECOOPERS. The World in 2050 The long view: how will the global economic order change by 2050?* Disponível em: <<https://www.pwc.com/gx/en/research-insights/economy/the-world-in-2050.html>>. Acesso em: 28 set. 2023.
- [20] MORROW S. *World energy demand will increase 50% by 2050: EIA.* **AnadoluAgency**, 07 out. 2021. Disponível em: <<https://www.aa.com.tr/en/energy/oil/world-energy-demand-will-increase-50-by-2050-eia/33749?amp=1>>. Acesso em: 28 set. 2023.
- [21] *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Chernobyl Accident 1986.* Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx>>. Acesso em 02 out. 2023.
- [22] *US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Report on the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Station.* Washington DC, 1987. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1250/index.html>>. Acesso em: 05 out. 2023.
- [23] PINTO, L. N. **Experimentos de Efeitos de Reatividade no Reator Nuclear-IPEN/MB-01.** 2012. 136 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/006/52006989.pdf>. Acesso em: 05 out. 2023.

- [24] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Documents/Glossario-do-setor-nuclear-e-radiologico-brasileiro.pdf>>. Acesso em: 09 out. 2023.
- [25] SOARES, A. S. **Análise do Aumento de Pressão do Sistema de Refrigeração do Reator durante Eventos ATWS através de Simulador de Escopo Total**. 2022. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.nuclear.ufrj.br/images/Tese-Alexandre_Soares.pdf>. Acesso em: 09 out. 2023.
- [26] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Reação de Fissão Nuclear em Cadeia**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5324034/mod_resource/content/1/reacaoemcadeia.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023
- [27] FREIRE, F. S. **Determinação da Barra de Controle Mais Reativa Usando o Método dos Pseudo-Harmônicos**. 2005. 53 p. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.nuclear.ufrj.br/images/documentos/Dissertacao/2005/TeseFernando.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2023.
- [28] *INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. The Fukushima Daiichi Accident - Technical Volume 1 - Description and Context of the Accident*. Viena, 2015. Disponível em: <<https://www.iaea.org/publications/10962/the-fukushima-daiichi-accident>>. Acesso em: 10 out. 2023.
- [29] INSTITUTO HUMANITAS UNISINOS. **Em Fukushima todos são culpados**. Disponível em: <<https://www.ihu.unisinos.br/categorias/173-noticias-2011/42538-em-fukushima-todos-sao-culpados>>. Acesso em: 09 dez. 2023.
- [30] *INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. The Fukushima Daiichi Accident - Report by the Director General*. Viena, 2015. Disponível em: <<https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1710-reportbythedg-web.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2023.
- [31] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY HOLDINGS. **Fuel Removal from Unit 2 Spent Pool**. Disponível em: <<https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/progress/removal/unit2/index-e.html#:~:text=Hydrogen%20explosions%20occurred%20in%20Units,fuel%20pool%20of%20Unit%202.>>>. Acesso em: 16 out. 2023.
- [32] STEINHAUSER, G. BRANDL, A. JOHNSON, T. E. *Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts*. **Science of the Total Environment**, v. 471, p. 800-817, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971301173X>>. Acesso em: 11 out. 2023.

- [33] *NUCLEAR POWER. Refractory Metals and Alloys*. Disponível em: <<https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/metals-what-are-metals/alloys-composition-properties-of-metal-alloys/refractory-metals-and-alloys/>>. Acesso em: 11 out. 2023.
- [34] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Norma CNEN NN 3.01 - Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. 2014. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2023.
- [35] Tauhata L.; Salati, I.; Di Prinzio, Renato; Di Prinzio, Antonieta R. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. Instituto de Radioproteção e Dosimetria / Comissão Nacional de Energia Nuclear. 9a Revisão, novembro de 2013.
- [36] LOURO, M. E a União Soviética a radiação levou? **Observador**, 26 abr. 2016. Disponível em: <<https://observador.pt/especiais/uniao-sovietica-radiacao-levou/>>. Acesso em 11 out. 2023.
- [37] MESHKATI N. *Lessons of Chernobyl and Beyond: Creation of the Safety Culture in Nuclear Power Plants*. University of Southern California, Los Angeles, CA, 1998. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=c326ef648c1b84e184009a927954b36fe39641a6>>. Acesso em 12 set. 2023.
- [38] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Norma CNEN NE 1.04 - Licenciamento de Instalações Nucleares**. 2002. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm104.pdf>>. Acesso em 12 out. 2023.
- [39] *US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition (NUREG-0800, Formerly issued as NUREG-75/087)*. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr0800/index.html>>. Acesso em 13 out. 2023
- [40] *US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Backgrounder on NRC Response to Lessons Learned from Fukushima*. Washington DC, 2018. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/japan-events.html>>. Acesso em: 13 out. 2023.
- [41] *US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Enhancing Reactor Safety in the 21st Century*. Washington DC, 2011. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/docs/ML1220/ML12205A385.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2023.
- [42] *NUCLEAR ENERGY AGENCY. The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt*. Paris, 2013. Disponível em: <https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14866/the-fukushima-daiichi-nuclear-power-plant-accident-oecd/nea-nuclear-safety-response-and-lessons-learnt?details=true>. Acesso em: 13 out. 2023.

- [43] DEHOUSSE F. *The Nuclear Safety Framework in the European Union after Fukushima*. Disponível em: <<http://aei.pitt.edu/63581/1/73.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2023.
- [44] FURUTA, K. KANNO, T. *How the Fukushima Daiichi Accident Changed (or not) the Nuclear Safety Fundamentals?* In: AHN F. J. *Resilience: A New Paradigm of Nuclear Safety*. Berkeley, CA: University of California, 2015, p. 35-46. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar_url?url=https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/27820/1/1002185.pdf&hl=pt-BR&sa=X&ei=fYs0ZYOqO43YyATSnqqQAw&scisig=AFWwaeaG3YNTnpzRizj54m903k8G&oi=scholar>. Acesso em: 16 out. 2023.
- [45] MING, Z. et al. *Nuclear Energy in the Post-Fukushima Era: Research on the Developments of the Chinese and Worldwide Nuclear Power Industries*. Beijing, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115015488>>. Acesso em: 16 out. 2023.
- [46] ROSATOM. **Segurança depois de Fukushima**. Disponível em: <<https://rosatomnewsletter.com/pt/2021/04/29/safety-in-post-fukushima-era/>>. Acesso em: 16 out. 2023.
- [47] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Ensuring the Safety of Nuclear Installations Lessons-Learned from the Fukushima Daiichi Accident*. Disponível em: <<https://www.iaea.org/bulletin/ensuring-the-safety-of-nuclear-installations-lessons-learned-from-the-fukushima-daiichi-accident>>. Acesso em: 16 out. 2023.
- [48] DONOVAN, J. PAILLERE H. *Nuclear Power 10 Years After Fukushima: The Long Road Back*. International Atomic Energy Agency, 2021. Disponível em: <<https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-power-10-years-after-fukushima-the-long-road-back>>. Acesso em: 16 out. 2023.
- [49] ELETRONUCLEAR. **Informação sobre a Situação do Plano de Resposta à Fukushima da Eletronuclear**. 2014. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/Arquivos/170/170.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2023.
- [50] SOARES, L. *Brazilian Operator's Response to Fukushima Daiichi Accident. Siting of New Nuclear Power Plants and Irradiated Fuel Facilities*. Buenos Aires: Eletronuclear, 2013. 25 slides, color. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/079/45079174.pdf>. Acesso em: 11 out. 2023.
- [51] FRANCISCO, J. M. D (org.). **Segurança Nuclear**. Rio de Janeiro :Eletronuclear, 2012. 36 slides, color. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=4658>. Acesso em: 16 out. 2023.
- [52] CARNEIRO P. C. C. *Lessons-Learned Processes and Implementing Change. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. In: BRAZIL-U.S. WORKSHOP ON STRENGTHENING THE CULTURE OF NUCLEAR SAFETY AND SECURITY:

SUMMARY OF A WORKSHOP, 2015. Proceedings... Washington, DC: The National Academ. p. 53-64. Disponível em:
<<https://nap.nationalacademies.org/read/21761/chapter/8>>. Acesso em: 17 out. 2023.

- [53] INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **A geração núcleo-elétrica antes e após Fukushima.** Disponível em:
<https://intranet.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=40&campo=10827>. Acesso em: 17 out. 2023.
- [54] AVELAR, A. M. **Estudo da cinética de geração de hidrogênio por ocorrência de metal-água em ligas de revestimento de combustível aplicado em reatores nucleares.** 2023. 191 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em:
<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-07072023-073200/en.php>>. Acesso em: 17 out. 2023.