

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

GABRIEL ROMANO MARQUEZ SOUZA

Abordagem Investigativa sobre o Acidente de Chernobyl

Uberlândia

2022

GABRIEL ROMANO MARQUEZ SOUZA

Abordagem Investigativa sobre o Acidente de Chernobyl

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

Uberlândia, MG

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S729 Souza, Gabriel Romano Marquez, 1997-
2022 Abordagem Investigativa sobre o Acidente de Chernobyl
[recurso eletrônico] / Gabriel Romano Marquez Souza. -
2022.

Orientador: Rubens Gedraite.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. I. Gedraite, Rubens, 1958-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Faculdade de Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4285 - secdireq@feq.ufu.br - www.feq.ufu.br



HOMOLOGAÇÃO Nº 72

GABRIEL ROMANO MARQUEZ SOUZA

Abordagem Investigativa sobre o Acidente de Chernobyl

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado nesta data, como um dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - *campus Santa Mônica* (MG) pela banca examinadora constituída por:

Prof. Dr. Rubens Gedraite
Orientador - FEQUI/UFU

Prof. Dr. Sérgio Mauro da Silva Neiro
FEQUI/UFU

Eng. MSc. Gustavo Henrique Nazareno Fernandes
Doutorando - FEMEC/UFU

Uberlândia, 20 de agosto de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/08/2022, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Mauro da Silva Neiro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/08/2022, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **GUSTAVO HENRIQUE NAZARENO FERNANDES, Usuário Externo**, em 20/08/2022, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3855154** e o código CRC **268D6F39**.

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo estímulo,
carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer todo o amor, carinho, cuidado e amizade que meus pais, irmãos e familiares demonstraram ao longo de toda a minha jornada de vida e de estudante. Silas, Ana Cristina, Miguel e Ana Letícia, guardo vocês todos os dias comigo, obrigado por me inspirarem, por suportarem e viverem os momentos difíceis e estarem sempre ao meu lado em qualquer circunstância.

Agradeço ao professor e amigo Rubens Gedraite por acreditar na possibilidade deste trabalho, pelas orientações e conselhos, pelo exemplo de ser humano e profissional que é, o qual estimo e respeito muito.

Agradeço aos amigos do curso de Engenharia Química, que se mantêm presentes mesmo distantes, pelas mensagens de apoio e incontáveis trocas que tivemos ao longo desses anos, sobretudo quando estávamos todos juntos na graduação. As histórias, risadas e momentos, que moldaram nossas vidas e relações uns com os outros e com o mundo, estarão sempre em minha memória.

A Universidade Federal de Uberlândia, a Faculdade de Engenharia Química (FEQUI-UFU) e todo o corpo docente do curso, bem como a ConsultEQ Empresa Júnior, o Diretório Acadêmico da Engenharia Química, a Associação Atlética Acadêmica Engenharia UFU, os servidores e técnicos, os companheiros de turma e demais colegas, resta o meu agradecimento por todos esses anos. Obrigado por tudo!

“You will observe with concern how long a
useful truth may be known and exist before it is
generally received and practiced on.”

Benjamin Franklin.

RESUMO

As usinas nucleares são responsáveis por cerca de 10% do suprimento de energia elétrica em todo o mundo e são alternativas viáveis para a substituição de fontes de combustíveis fósseis, uma vez que produzem quantidades muito baixas de gás carbônico. A comunidade científica tem pesquisado bastante ao longo dos últimos anos como aprimorar: técnicas de produção de energia nuclear, procedimentos de segurança e deposição de rejeitos nucleares. O atual conflito entre Rússia e Ucrânia ameaça a integridade das principais centrais nucleares ucranianas e coloca em risco a vida de milhares de pessoas e ecossistemas na Europa e na Ásia, tanto pela guerra armada quanto pelos perigos conhecidos da exposição à radioatividade. Assim, vê-se importante lembrar o principal acidente industrial da história, ocorrido na planta nuclear de Chernobyl. Discutiu-se, com base em documentos históricos, livros e publicações encontradas em bases de dados disponíveis para consulta virtual, as principais causas do desastre, desde as falhas de projeto dos reatores russos RBMK (*reaktor bolshoy moshchnosty kanalny*), deficiências na cultura de segurança da usina até a sequência de eventos que provocaram a explosão da Unidade 4 de Chernobyl. Avaliou-se também o estado da arte dos simuladores de treinamento utilizados em instalações de energia nuclear, cujo emprego contribuiu significativamente para o aperfeiçoamento das habilidades de trabalho dos operadores e para a predição de acidentes nucleares, como o perpetrado em 1986.

Palavras-chave: Chernobyl; Usinas nucleares; Acidentes nucleares; Procedimentos de segurança; Simuladores de treinamento.

ABSTRACT

Nuclear power plants are responsible for 10% of world's electric energy supply and are viable alternatives to replace sources of fossil fuels, once they emit very low quantities of carbon dioxide. Over the last few years, the scientific community have been researching how to improve: energy production techniques, safety procedures and nuclear waste deposition. The recent conflict between Russia and Ukraine threatens the integrity of the major ukrainian nuclear power plants and puts thousands of people and ecosystems in Europe and Asia at risk, not only because of the armed war itself but also because of the well known dangers of radioactive exposition. Therefore, it is substantial to remember the most important industrial accident in the history of mankind, which took place at Chernobyl Nuclear Power Plant. The main causes that led to the disaster like the major project flaws in russian RBMK (*reaktor bolshoy moshchnosty kanalny*) reactors, safety culture shortcomings in the factory and also the sequence of events that provoked the explosion of Chernobyl's Unit 4 were discussed based on historical documents, books and publications found in data bases available for virtual consulting. Also, the state-of-the-art of training simulators used in nuclear power plants was evaluated, once they are vital to improve operators work abilities and to predict nuclear accidents like the one perpetrated in 1986.

Keywords: Chernobyl; Nuclear power plants; Nuclear accidents; Safety procedures; Training simulators.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Justificativa.....	12
1.2	Objetivos.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Fissão Nuclear	14
2.2	Usinas Nucleares e Tipos de Reatores Nucleares.....	16
2.3	Segurança e Acidentes Nucleares	21
3	METODOLOGIA.....	30
4	O CASO DE CHERNOBYL.....	31
2.1	A Usina de Energia Nuclear de Chernobyl	31
2.2	Os Reatores RBMK-1000.....	32
4.3	O Acidente	35
5	O SIMULADOR DE TREINAMENTO	40
6	CONCLUSÃO.....	46
	REFERÊNCIAS.....	47

1 1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Passaram-se 36 anos desde que o Reator 4 da usina de energia nuclear de Chernobyl explodiu. Esse acidente permanece um marco na história da segurança industrial, da população ucraniana e europeia, bem como da dissolução da antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), devido às trágicas consequências sociais, ambientais, políticas e econômicas dessa catástrofe.

Os impactos desse desastre nuclear persistem até os dias de hoje e cientistas de todo o mundo continuam a publicar estudos sobre Chernobyl, em diversas áreas do conhecimento, sejam os efeitos da radiação ionizante em crianças europeias nascidas após o ano de 1986, ou até mesmo a situação das águas subterrâneas na região afetada pela explosão. Há também uma contínua produção de conteúdos audiovisuais, como filmes e séries, além de livros, artigos, vídeos em plataformas virtuais, que contribuem para a disseminação dos eventos ocorridos durante o período do acidente e mantêm o assunto bastante atual e relevante.

No presente momento, um conflito armado entre Rússia e Ucrânia está em curso. Enquanto a guerra for travada em solo ucraniano, ela representa perigo iminente para as 4 usinas nucleares em operação no território, que contam com 15 reatores refrigerados à água pressurizada de modelo russo *Water-Water Energy Reactor* (WVER), bem como para a própria planta de Chernobyl, onde estão 4 reatores refrigerados à água e com moderadores a base de grafite, de modelo russo RBMK, atualmente desativados.

De acordo com o apresentado na matéria no site da *National Geographic Brasil* (2019):

“Até 30% das 190 toneladas métricas de urânio de Chernobyl foram emitidas na atmosfera e a União Soviética acabou evacuando 335 mil pessoas, definindo uma ‘zona de exclusão’ com um raio aproximado de 30 km do reator. [...] O que resta do reator agora está encerrado em uma enorme estrutura de contenção de aço implantada no fim de 2016. As tentativas de contenção e monitoramento persistem e espera-se que as operações de descontaminação perdurem até pelo menos 2065.”

Atualmente, as centrais nucleares em operação na Ucrânia são responsáveis por 51,2% de toda a geração de energia do país (AIEA, 2022a). Portanto, garantir o funcionamento e a segurança das instalações é primordial, tanto para evitar novos acidentes, como para assegurar o abastecimento energético para o povo e os militares ucranianos.

A busca por fontes de energia limpa e renovável que substituam os modelos energéticos baseados em óleo e carvão continua a incentivar governos, empresas e pesquisadores a aprimorar o uso da energia nuclear, cuja participação mundial na produção de eletricidade, a partir de mais de 440 reatores nucleares, é estimada em 10% (WNA, 2022a). Assim, faz-se

importante o debate sobre as vantagens e desvantagens de todo o ciclo de combustíveis nucleares, desde a extração até a deposição desses resíduos, a fim de orientar as decisões e medidas a serem tomadas pelas lideranças globais.

1.2 Objetivos

O objetivo central do trabalho é avaliar as causas que provocaram a explosão do Reator 4 da usina nuclear de Chernobyl.

Como objetivo secundário, é avaliado como o emprego de um simulador de treinamento pode auxiliar para impedir um potencial acidente.

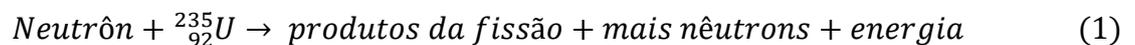
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fissão Nuclear

O funcionamento de uma usina como a de Chernobyl depende de um princípio descoberto em 1938, quando os cientistas alemães Otto Hahn, Lise Meitner e Fritz Strassman realizavam experimentos em que bombardeavam amostras de urânio com feixes de nêutrons, partículas sem carga capazes de penetrar o núcleo dos átomos.

Quando o átomo de urânio fosse atingido com uma partícula de nêutron, era esperado que novos elementos fossem formados: o nêutron poderia se juntar ao núcleo, formando um átomo mais pesado que o urânio, ou ele promoveria um desequilíbrio no núcleo, produzindo um átomo pouco mais leve que o urânio. (OPENMIND BBVA, 2020)

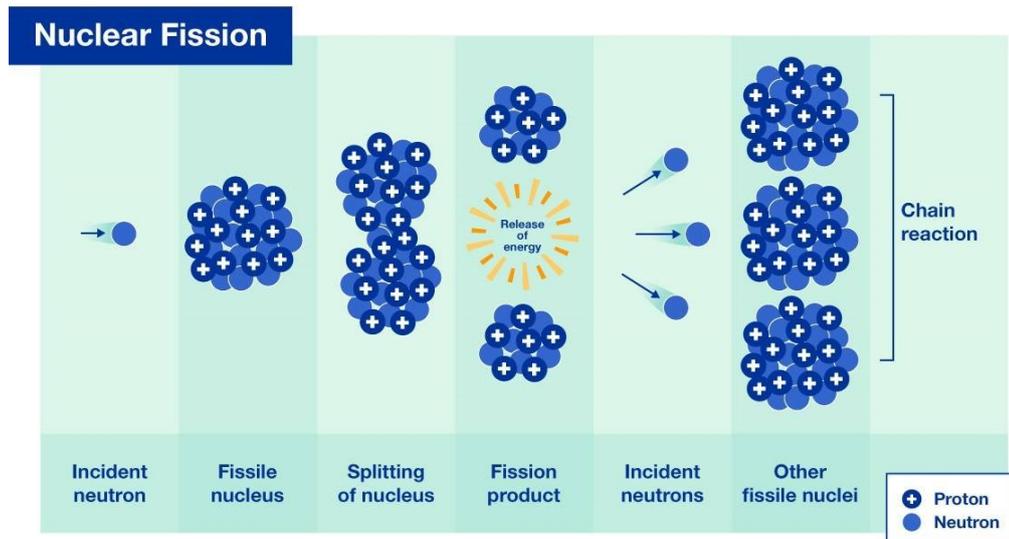
Após longas discussões e revisões experimentais, os cientistas ficaram surpresos com o resultado. Foi possível concluir que “um novo tipo de reação” havia sido criada: a reação nuclear. (MEITNER, 1962). A ideia de irradiar uma partícula nêutra em um núcleo grande e pesado o suficiente como o do átomo de urânio fez com que o núcleo se dividisse, de acordo com a Equação 1 (DUDERSTADT; HAMILTON, 1976).



Importante denotar que o minério de urânio extraído da natureza apresenta cerca de 99,3% do isótopo 238, cujo núcleo apresenta 3 nêutrons a mais que o isótopo 235, o único isótopo fissil encontrado naturalmente em quantidades relevantes – 0,7% do total. Dessa maneira, o isótopo U-235 se divide em elementos químicos mais leves, liberando energia em forma de calor e radiação – cerca de 200 MeV (milhões de elétrons-volt). (VEIGA, 2017). Além disso, novos nêutrons se desprendem do núcleo do urânio e podem provocar reações de fissão em cadeia, como mostrado na Figura 2.1.

Essas descobertas indicaram que, caso uma quantidade suficiente de urânio (denominada de “massa crítica” ou “tamanho crítico”) fosse reunida em condições adequadas, poderia-se formar uma reação em cadeia auto-sustentável de fissões nucleares. Então, a partir de 1940, em Colúmbia, nos Estados Unidos, o cientista italiano Enrico Fermi – refugiado da guerra – e sua equipe começaram a desenvolver o projeto do primeiro reator nuclear da história: o Chicago *Pile 1* (CP-1) (ALLARDICE; TRAPNELF, 1962)

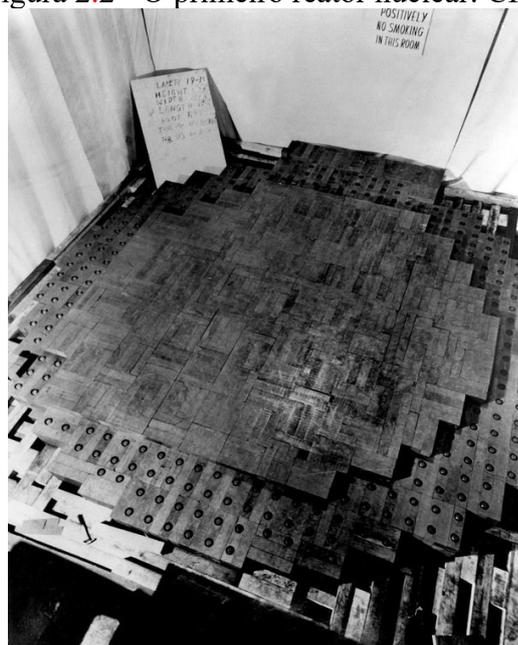
Figura 2.1 - Fissão nuclear e reação em cadeia



Fonte: Agência Internacional de Energia Atômica: "O que é a energia nuclear?" (2022).

Primeiramente, foi necessário encontrar um material moderador capaz de desacelerar os nêutrons em alta velocidade, a fim de controlar o processo de fissão em cadeia. O único material encontrado naquela época com capacidades moderadoras, que pudesse ser obtido em grande quantidade e nível de pureza desejado, foi o grafite. A ideia era empilhar urânio em uma matriz de grafite, de maneira a formar uma rede cúbica intercalada entre os dois materiais. Esse arranjo contribuía para que os nêutrons encontrassem o núcleo dos átomos de urânio mais facilmente. (ALLARDICE; TRAPNELF, 1962). Na Figura 2.2, é apresentado o formato do CP-1.

Figura 2.2 - O primeiro reator nuclear: CP-1



Fonte: "Chicago Pile 1: O 1º reator nuclear construído pelo homem". MegaCurioso. (2021)

O núcleo do reator foi revestido de tijolos de grafite e madeira, além de terem sido inseridas hastes de controle feitas de cádmio, elemento absorvedor de nêutrons, para interromper a reação de fissão quando necessário. Foi então que, no dia 2 de dezembro de 1942, em Chicago, as hastes de controle foram removidas e a primeira reação de fissão em cadeia auto-sustentável obteve êxito. (ALLARDICE; TRAPNELF, 1962). Esse acontecimento contribuiria para o início dos primeiros projetos de usinas termonucleares, uma vez que os cientistas identificaram que a energia produzida em uma reação nuclear era milhares de vezes maior que a energia proveniente de reações de combustão, comumente empregadas em centrais termoelétricas. Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (2021), uma pessoa consome, em média, 235.000 kWh de eletricidade durante a vida toda, o que equivale a uma quantidade de urânio do tamanho de um ovo de galinha ou 88 toneladas de carvão para produzir essa quantidade de energia.

2.2 Usinas Nucleares e Tipos de Reatores Nucleares

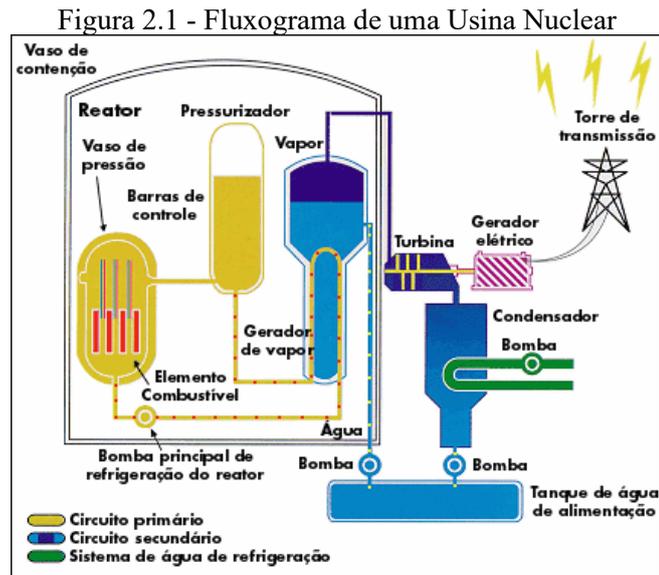
Nos Estados Unidos, em 1951, no Laboratório Nacional de Idaho, energia elétrica foi produzida pela primeira vez, a partir de um reator nuclear (NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL, 2021). A primeira usina nuclear de que se tem notícia foi construída na Rússia, na cidade de Obninsk. O projeto teve início em janeiro de 1951, e foi concluído em junho de 1954. A planta possuía uma capacidade de operação de 6 MW, o que seria suficiente para abastecer 20.000 casas modernas (SCIENCE BLOGS, 2009). As duas maiores potências do mundo disputavam o pioneirismo em pesquisa e desenvolvimento de centrais de energia nuclear.

Pode-se entender o funcionamento de uma usina nuclear, representada esquematicamente pela Figura 2.3, da seguinte forma:

“Bem semelhante a uma termelétrica convencional, o processo de uma usina nuclear envolve a geração de vapor d’água em alta pressão, que, ao expandir-se, aciona uma turbina, movimentando um gerador elétrico acoplado ao seu eixo. O vapor, que sai da turbina em baixa pressão, é resfriado, condensado, e novamente aquecido, reiniciando o ciclo térmico (VEIGA, 2017).”

O que difere uma termoelétrica de uma termonuclear é justamente a fonte de calor necessária para produção de vapor a altas pressões e altas temperaturas. Enquanto na primeira utiliza-se a queima de combustíveis fósseis e biomassa, a segunda aproveita a energia dos átomos proveniente da fissão nuclear. Geralmente, o vapor produzido em usinas à base de carvão, por exemplo, possui temperaturas e pressões maiores que o vapor produzido em centrais nucleares, o que reduz os requerimentos no projeto de turbinas para termoelétricas. (DUDERSTADT; HAMILTON, 1976).

O vapor que deixa a turbina pode ser reaproveitado pela planta por meio de processos de condensação e troca térmica. Nessa etapa, algumas usinas utilizam um sistema de água de refrigeração proveniente de rios, lagos, poços subterrâneos ou mares. As torres de resfriamento, que frequentemente são associadas à caracterização das usinas nucleares, podem ser utilizadas para reduzir o consumo de água da natureza, uma vez que utilizam correntes de ar no processo. (SAPUNARU et al., 2014).



O tipo de reator e o sistema de produção de vapor associado a ele são os fatores que mais diferenciam uma usina nuclear da outra. Atualmente, segundo o *Power Reactor Information System* (2022), há 438 reatores nucleares em operação no mundo todo, com uma capacidade total de rede instalada de 393.333 MWe (megawatt elétrico: unidade de potência elétrica). Há também 56 reatores em construção, com capacidade de rede instalada de 57.848 MWe. Na Tabela 2.1 é apresentada a distribuição dos reatores em operação por região do planeta. É possível observar que os países desenvolvidos do hemisfério norte possuem a maior quantidade de reatores e capacidade de produção de energia nuclear.

Tabela 2.1 - Reatores em operação no mundo

Região	Capacidade de produção de eletricidade (MW)	Número de reatores
África	1.854	2
América Latina	5.077	7
América do Norte	108.342	111
Ásia (leste)	111.139	116
Ásia (centro e sul)	13.728	31
Europa (central e leste)	54.104	73
Europa (oeste)	99.089	98
Total	393.333	438

Fonte: Power Reactor Information System (2022).

Os reatores modernos são constituídos por um núcleo, onde fica o material combustível, geralmente formado por urânio, plutônio ou tório em suas formas físseis, como dióxido de urânio (UO_2), por exemplo. Esses compostos são prensados em forma de pastilhas, que são colocadas em varetas de uma liga super resistente, como o zircaloy (liga de zircônio). Um conjunto de varetas aglutinadas forma um elemento combustível. No núcleo do reator são dispostos vários elementos combustíveis e é neles que a reação de fissão nuclear é induzida e mantida para produzir calor (DUDERSTADT; HAMILTON, 1976).

O reator possui canais por onde passam os fluidos de resfriamento, responsáveis por absorver o calor gerado pelo núcleo. O fluido pode ser tanto líquido, como a água e sódio, quanto gasoso, como gás hélio ou dióxido de carbono. Ainda, o reator pode conter um moderador, um material de massa atômica pequena que é inserido no reator para conter a velocidade dos nêutrons e promover um maior número de colisões entre nêutrons e átomos de combustível. São comumente utilizados como moderadores: água leve, água pesada, grafite e berílio (DUDERSTADT; HAMILTON, 1976).

Elementos estruturais do reator como grades espaçadoras, placas de suporte e tubos metálicos são utilizados para manter a geometria e a integridade do núcleo, mas também podem agir como moderadores, caso sejam compostos por grafite. Há elementos de segurança cruciais no projeto de reatores, como as hastes de controle, que servem para interromper a reação em cadeia. Essas hastes são usualmente compostas de cádmio, boro, gálio e háfnio, pois são excelentes absorvedores de nêutrons (DUDERSTADT; HAMILTON, 1976).

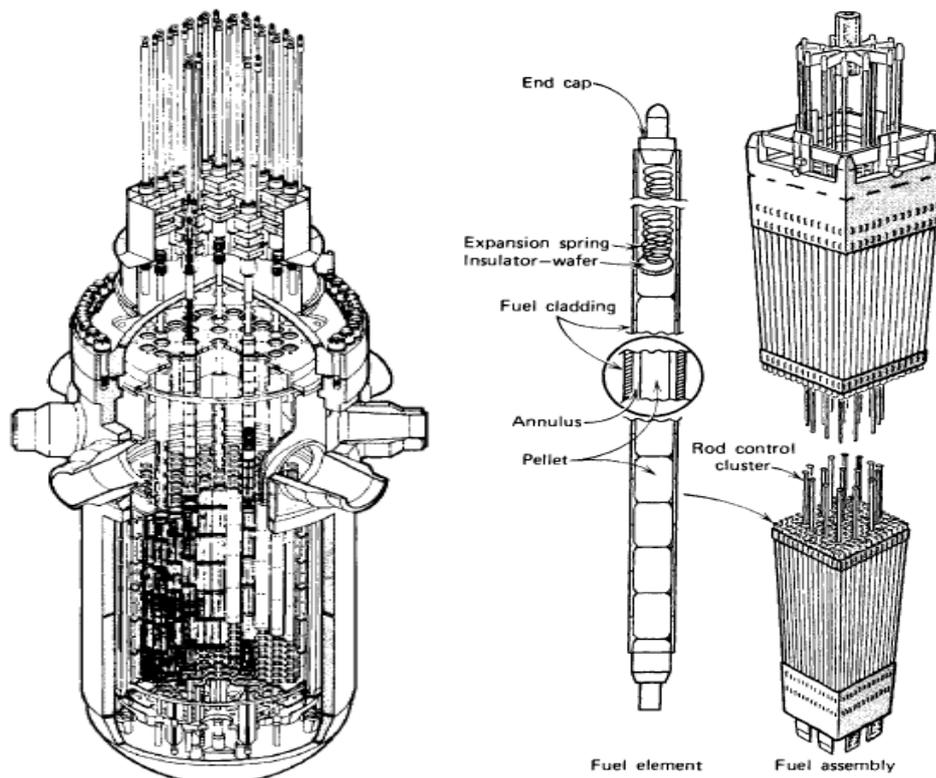
Em termos de segurança, o núcleo do reator é preservado em um vaso de pressão projetado para suportar altas pressões aplicadas sobre o fluido refrigerante. Além disso, os reatores são comumente revestidos por envoltórios espessos de concreto e aço, para criar barreiras contra a radiação emitida no núcleo. Os reatores são mantidos em grandes reservatórios de água, geralmente em mistura com algum composto, como a água borada – o boro, novamente, é ótimo absorvedor de nêutrons – a fim de conter uma possível reação descontrolada e também resfriar o reator em caso de alta geração de calor (VEIGA, 2017).

Basicamente, o fluido de resfriamento e o moderador são os constituintes que diferem os tipos de reatores nucleares existentes. Muitas vezes, o refrigerante pode funcionar como moderador da reação, como no caso de reatores de água pressurizada (PWR, *Pressurized Water Reactor*), em que a água desempenha ambas as funções (VEIGA, 2017). Nesse tipo de reator, há dois circuitos de água corrente: um primeiro circuito a alta pressão (155 bar, em média) que absorve o calor gerado sem que haja vaporização; e um segundo circuito, proveniente do sistema de suprimento de vapor do reator, que troca calor com o primeiro circuito para formar

o vapor que aciona a turbina e movimenta o gerador elétrico (DUDERSTADT; HAMILTON, 1976).

Segundo a AIEA, 95% dos reatores civis em operação utilizam água como fluido refrigerador. Na Figura 2.4 é apresentado um esquema de um reator PWR, bem como uma representação das pastilhas e varetas que compõem o elemento combustível.

Figura 2.4 - Reator PWR e elemento combustível



Fonte: Nuclear Reactor Analysis, p.93-94 (1976)

Os reatores PWR encaixam-se na categoria de reatores de água leve (LWR, *Light Water Reactor*) assim como os modelos russos equivalentes desses equipamentos e os reatores de água fervente (BWR, *Boiling Water Reactor*), nos quais a água é mantida a pressões suficientemente baixas para ser vaporizada logo no circuito primário dentro do reator e, posteriormente, acionar a turbina. Nesse tipo de reator, no entanto, a propagação da radioatividade é maior, atingindo a turbina e o condensador (VEIGA, 2017).

Os reatores de água pesada (HWR, *Heavy Water Reactor*) utilizam água enriquecida com deutério, um isótopo mais pesado de hidrogênio, como moderador. Dessa forma, esses equipamentos requerem menor enriquecimento de urânio do que os reatores à água comum, uma vez que a água pesada é um moderador muito mais eficiente que água leve, apesar de mais caro de ser produzido (AIEA, 2022b). Assim como o PWR, o reator HWR também utiliza um

segundo circuito de água leve, que absorve calor da corrente de água pesada aquecida pelo núcleo do reator para que ocorra a vaporização (DUDERSTADT; HAMILTON, 1976).

Um dos reatores de água pesada mais utilizados no mundo é o modelo canadense CANDU (*Canada Deuterium Uranium Reactor*). Nesses reatores, o urânio-238 – proveniente do urânio natural utilizado como combustível – absorve nêutrons rápidos para formar plutônio-239, que é um composto fissil. Esse processo de decaimento radioativo representa cerca de metade da energia gerada no reator. Os elementos combustíveis são alocados na horizontal, uma diferença notável com relação aos demais reatores, o que possibilita a troca desses materiais com o reator ainda em funcionamento (ENERGY EDUCATION, 2022).

Há também esforços de Japão, China, Estados Unidos e países europeus para desenvolvimento e testes de reatores que utilizam água em condição de fluido supercrítico, isto é, quando a pressão e temperatura do composto estão acima de seu ponto crítico e não há distinção clara entre as fases líquida e vapor. Acredita-se que a eficiência térmica das plantas de energia nuclear se torne 1,3 vezes maior com a aplicação dessa tecnologia (AIEA, 2022b)

Os quatro reatores russos RBMK usados em Chernobyl utilizavam água fervente como fluido refrigerante, mas contavam com o grafite para moderar a reação e desacelerar os nêutrons. O grafite também é comumente empregado como moderador nos reatores refrigerados à gás (GCR, *Gas Cooled Reactors*) no Reino Unido. O dióxido de carbono (CO₂) é o gás responsável pelas trocas térmicas nesses sistemas. O revestimento das varetas de combustível é feito de uma liga de magnésio chamada de MAGNOX, que atua como um agente anti-oxidante e reduz a reatividade com metais no núcleo do reator. Ainda, esses reatores usam urânio natural como combustível, o que requer uma etapa de tratamento do mineral bem mais simples (SKILL LYNC, 2021).

Desde a década de 70, há um interesse internacional crescente em desenvolver e experimentar reatores à gás de alta temperatura (HTGR, *High Temperature Gas Cooled Reactors*), que funcionam com gás hélio à alta pressão, urânio enriquecido como combustível e grafite como moderador (DUDERSTADT; HAMILTON, 1976). Esses reatores produzem grande quantidade de calor, que poderia ser destinado para outras aplicações associadas à planta nuclear, como produção de hidrogênio, dessalinização de água do mar e aquecimento urbano (AIEA, 2022c).

Os reatores que não possuem moderadores são chamados de reatores rápidos (FBR, *Fast Breeder Reactors*) e operam a altas temperaturas. São utilizados como fluidos refrigerantes: metais líquidos, como sódio, chumbo, liga de chumbo-bismuto; gases, como hélio e dióxido de carbono; e sal fundido (VEIGA, 2017). Esses materiais possuem capacidade baixa

de moderar a velocidade dos nêutrons e características altamente desejáveis de transferência térmica. A grande vantagem desse tipo de reator é que o urânio natural, não fissil, é transformado em plutônio-239 dentro do núcleo do reator, isto é, o reator gera mais material fissil do que consome. Além disso, há uma redução nos custos de tratamento do minério de urânio e o combustível gasto em reatores convencionais pode ser reutilizado em reatores rápidos (AIEA, 2022d).

Nas últimas décadas, instituições de pesquisa têm buscado aprimorar as tecnologias disponíveis em energia nuclear para tornar os reatores mais eficientes, econômicos e seguros, como o uso de aceleradores de partículas associados a reatores rápidos, por exemplo. Há estudos brasileiros importantes sobre o assunto, como o de Fernandes (2018), que avaliou o comportamento do reator de pesquisa belga, MYRRHA (*Multi-purpose hYbrid Research Reactor for Hightech Applications*), por meio de um programa de simulação termo-hidráulica aplicada ao núcleo do reator, em que foram testados sódio e chumbo-bismuto eutético como fluidos refrigerantes. Esse tipo de sistema permite a reutilização de combustíveis nucleares queimados ou gastos, ao invés de rejeitá-los em piscinas refrigeradas ou em camadas profundas do solo.

Além desses modelos, encontram-se também reatores pequenos modulares SMR (*Small Modular Reactors*), que se apresentam como uma alternativa flexível e portátil, podendo ser produzidos em fábricas e transportados por caminhões e navios para serem instalados posteriormente. Esses reatores possuem um sistema automático de desligamento em caso de superaquecimento do núcleo, são capazes de produzir até 300 MW de energia elétrica e alguns são projetados para operar por 20 anos sem precisar de reabastecimento. Especialistas consideram o investimento em reatores modulares mais econômico e seguro do que os demais reatores, porém os diferentes modelos SMR ainda estão em fase experimental (UNDECIDED WITH MATT FERRELL, 2021).

2.3 Segurança e Acidentes Nucleares

“Acidentes em usinas nucleares acontecem. Entre 1971 e 1986, em 14 países, houve 152 acidentes” (CHERNOUSENKO, 1991, p.7). Quando se trata de segurança em centrais nucleares, há três aspectos cruciais para a operação dessas plantas energéticas: a liberação de radioatividade, reações descontroladas com alta geração de calor e a disposição dos rejeitos radioativos (VEIGA, 2017).

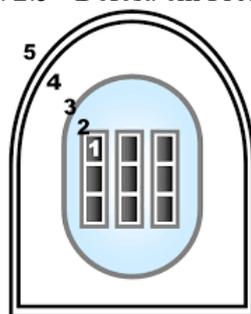
A radiação ionizante, isto é, aquela capaz de provocar o desprendimento de elétrons nos átomos para a formação de íons, emitida pelo núcleo do reator, pode causar danos à saúde humana a depender do nível de exposição a que o indivíduo é submetido. Em seres humanos,

esse tipo de radiação promove a formação de radicais livres, células cancerígenas, mutações gênicas, danos na pele, náusea, vômito, diarreia, comprometimento de funções medulares, esterilidade, insuficiência respiratória e morte (NOUAILHETAS, 2022).

A fim de garantir a segurança dos trabalhadores e da sociedade, as usinas adotam o conceito de “defesa em profundidade”. Projeto, construção, inspeção, operação e regulamentação são guiados por essa filosofia, que prega a criação, manutenção e atualização de múltiplas, independentes e redundantes camadas de proteção radiológica para que, em caso de falha humana ou mecânica, existam várias alternativas para contenção da radiação. Essa medida de segurança também se preocupa com ações emergenciais: como devem ser as comunicações, abrigo, evacuação e planos de ação em casos de acidentes. As companhias nucleares devem manter diálogo com os governos para que as tratativas sejam rápidas, coesas e eficientes (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2011).

As principais barreiras utilizadas são representadas pela Figura 2.5. A primeira barreira é representada pela pastilha de combustível (1) e pela vareta em que está contida (2), no elemento combustível dentro do núcleo do reator. O combustível é prensado e aquecido em altas temperaturas para adquirir forma, rigidez e resistência necessárias para operação. As varetas são feitas de ligas metálicas resistentes, inoxidáveis, como ligas de zircônio ou ligas de magnésio, a depender do tipo de reator (INB, 2022). O vaso do reator (3) contém o fluido refrigerante, essencial para controlar a temperatura da reação e para o transporte do calor que irá gerar eletricidade. Caso essas primeiras barreiras falhem na contenção da radiação, o prédio do reator ainda é revestido por um envoltório (4 e 5), denominado de “prédio de contenção primário” (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2011). Em Angra dos Reis, o envoltório utilizado é de concreto e possui 70 cm de espessura, além de abrigar uma proteção esférica de aço de 3 cm de espessura (VEIGA, 2017).

Figura 2.5 - Defesa em Profundidade



Fonte: Nuclear Engineering Division, Argonne National Laboratory, Estados Unidos.

A manutenção das condições de operação do reator depende também da capacidade de contenção da própria reação de fissão. O controle da reatividade é feito de diversas formas, dentre elas a circulação constante de fluido refrigerante pelo reator para que a temperatura seja mantida em níveis seguros e para evitar o derretimento do núcleo por superaquecimento. Em reatores do tipo LWR, a maior parte dos acidentes ocorrem quando há interrupção parcial ou total na corrente de refrigerante, como aconteceu no episódio de Three Mile Island, em 1979, na Pensilvânia, Estados Unidos da América (OTT; SPINRAD, 1985).

A usina nuclear de Middletown, na Pensilvânia, possuía duas Unidades de reatores em operação. A Unidade 1 começou a funcionar em 1974, enquanto a Unidade 2, três anos após o tempo previsto, iniciou operações em dezembro de 1978. O Reator TMI-2 já apresentava algumas falhas em que sofria desligamentos não previstos. Alguns operadores falsificavam dados de performance do reator para que a Comissão Regulatória Nuclear não intervisse no funcionamento da planta. Assim, criava-se um contexto propício para algum desastre (WEIRD HISTORY, 2022).

Em março de 1979, três meses após o Reator TMI-2 ter sido conectado pela primeira vez, uma falha na bomba que alimentava o gerador de vapor da Unidade 2 ocorreu. É possível que possa ter sido uma falha em alguma válvula que ficou presa em posição “fechada”, mas essa questão permanece um mistério. Logo depois, a turbina parou de funcionar e, sem o gerador de vapor para recircular a água na linha, a bomba de água de alimentação do reator também falhou. Assim, o núcleo do reator ficou sem fonte de resfriamento e começou a superaquecer, gerando mais calor e vaporizando a água restante, mas os indicadores na sala de controle confirmavam que o núcleo estava cheio de água. Então, os operadores decidiram interromper o fluxo de água, o que favoreceu o aumento da temperatura e o subsequente derretimento parcial do reator. Falhas mecânicas e condutas inadequadas dos operadores selaram o quadro do pior acidente nuclear comercial dos Estados Unidos (MELTDOWN, 2022).

Investigações posteriores mostraram que a usina contava com uma bomba secundária, caso a bomba principal de água de alimentação da Unidade 2 falhasse. Entretanto, durante um teste conduzido dias antes do acidente, um operador deixou a válvula da bomba fechada, o que impediu o seu funcionamento na situação de emergência (WEIRD HISTORY, 2022).

Na Figura 2.6 é apresentada a usina, que fica em uma ilha dentro do rio Susquehanna, responsável por garantir o suprimento de água de resfriamento da planta.

Figura 2.6 - Usina Nuclear Three Mile Island



Fonte: Office of Nuclear Energy, Estados Unidos (2022).

O Reator TMI-2 foi permanentemente desativado e só teve sua limpeza concluída em 1993. Ainda que 2 milhões de pessoas tenham sido expostas à níveis pequenos de radiação, as autoridades afirmam que não houve danos significativos para os trabalhadores nem para a população e que medições conduzidas meses após o ocorrido indicaram que o solo, as águas, o ar as plantas e os animais em volta da usina também permaneceram em boas condições (OFFICE OF NUCLEAR ENERGY, 2022).

Contudo, residentes da cidade reportaram terem visto peixes mortos nas águas do rio Susquehanna, alguns tiveram dores de garganta, vômito, gosto metálico na boca e uma criança foi identificada com queimaduras e bolhas por todo o corpo. Pequenos traços de iodo radioativo foram identificados em amostras de leite na região, bem como em locais onde houve deposição de águas residuais da usina (MELTDOWN, 2022).

A Comissão Regulatória Nuclear implementou mudanças significativas no treinamento, nas medidas de segurança, na operação e nos equipamentos das usinas nucleares, por meio da criação do Instituto de Operações de Energia Nuclear. O Reator TMI-1 da Unidade 1 continuou a operar até 2019, quando também sofreu processo de descomissionamento (OFFICE OF NUCLEAR ENERGY, 2022).

Reatores LWR contam com a água como refrigerante, mas também como moderador de nêutrons, uma vez que os átomos de hidrogênio também causam a desaceleração dessas partículas, o que favorece a reação de fissão. No entanto, quando o reator se aquece mais do que deveria por falta de refrigeração, as moléculas de água evaporam e podem formar bolhas. Isso também contribui para a segurança do reator, uma vez que a perda de densidade da água diminui sua capacidade moderadora de nêutrons e pode haver uma condição de auto inibição das reações. É preciso, ainda assim, garantir o regresso das condições normais de refrigeração,

pois as varetas de combustível continuarão a esquentar devido ao calor proveniente do decaimento de produtos da fissão nuclear (OTT; SPINRAD, 1985).

Em reatores rápidos FBR, caso haja uma falha no suprimento de refrigeração para o núcleo, a tecnologia das bombas utilizadas permite que elas continuem a bombear fluido refrigerante mesmo depois de algum problema, o que assegura um tempo de reação maior para os operadores corrigirem a situação. No entanto, se os operadores forem incapazes de solucionar a questão, os reatores rápidos tendem a ficar altamente instáveis, pois as reações ocorrem em temperaturas bastante altas e com o uso de nêutrons rápidos. O sódio, o fluido mais empregado nesses equipamentos, poderia evaporar muito rápido, o que diminuiria a capacidade moderadora e aumentaria a população de nêutrons rápidos. Isso poderia causar um derretimento do núcleo do reator. O sódio em contato com o ar presente na estrutura de contenção pode principiar um incêndio (OTT; SPINRAD, 1985).

Outras ferramentas capazes de controlar a reatividade são as hastes de controle, geralmente feitas de materiais absorvedores de nêutrons, metais de transição como cádmio e boro. Elas são inseridas e retiradas no reator manualmente ou, mais comumente, por sistemas de controle automatizados a fim de que a fissão diminua, aumente ou seja interrompida, a depender da demanda operacional. Elas possuem mecanismos de acionamento operados eletromagneticamente, de modo que a interrupção da corrente elétrica nas bobinas responsáveis pelo atracamento das hastes faz com que elas caiam sobre os elementos combustíveis do reator. O manejo correto das hastes de controle é crítico para a segurança de reatores nucleares (DUDERSTADT; HAMILTON, 1976).

Antes do acidente em Middletown, o reator BWR de baixa capacidade SL-1 (*Stationary Low-Power Reactor Number One*) foi desenvolvido, em 1957, para produzir energia que alimentaria um sistema de radares militares de monitoramento de ataques inimigos aos EUA. Era um reator de pequenas proporções, que armazenava 40 elementos combustíveis, capaz de gerar 3 MWt (megawatt térmico). Ele possuía 5 hastes de controle em forma de cruz, compostas de cádmio e revestidas de alumínio. Durante um procedimento de manutenção, a haste central foi movida manualmente 20 polegadas para fora do reator, mas o limite de segurança indicado para essa manobra era de 4,2 polegadas. Assim que a haste foi removida, a reatividade no reator subiu rapidamente, o que provocou a evaporação da água e a projeção da tampa do reator até o teto da instalação, como mostrado na Figura 2.7, culminando na morte de três operadores. Foi o primeiro acidente nuclear em solo americano (BERRIOS, 2017).

Figura 2.7 - Teste de remoção de haste de controle em reator nuclear



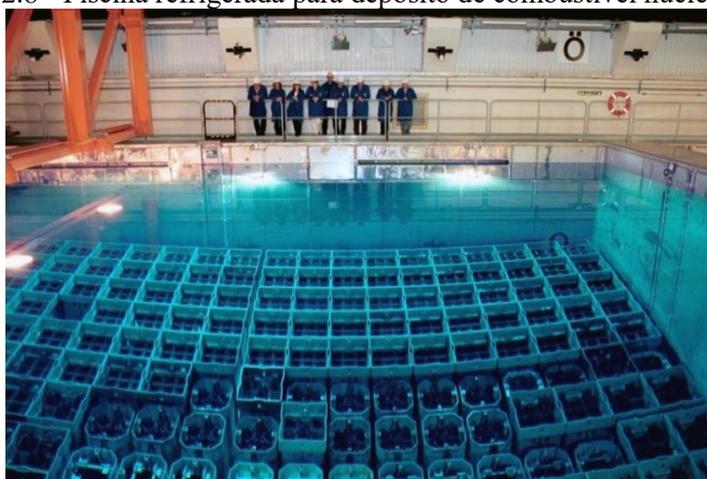
Fonte: Matt Reimann. Timeline.

A deposição de rejeitos nucleares talvez seja a questão mais delicada quando se trata do ciclo do combustível nuclear. Esses dejetos podem ser classificados em três categorias:

“[...] os de baixa atividade, que podem ser manipulados sem necessidade de blindagem; os de média, exigem blindagem para proteção dos operadores; e os de alta atividade, contidos no combustível usado, requerem, além de blindagem, o resfriamento por longos períodos, para remover o calor que geram continuamente (VEIGA, 2017).”

Nas usinas em Angra dos Reis, os rejeitos de baixa e média atividade passam por tratamento, que inclui compactação, incineração, evaporação, filtração e lavagem de gases. Depois, são armazenados em tambores de 200 litros e estocados em depósitos simples. Já os materiais de alta atividade, proveniente do combustível usado no núcleo dos reatores, são mantidos em piscinas refrigeradas, como a apresentada na Figura 2.8, e depois são encaminhadas para depósitos de longo prazo especiais: no Brasil, a expectativa é que um destes armazéns esteja pronto até 2026 (VEIGA, 2017).

Figura 2.8 - Piscina refrigerada para depósito de combustível nuclear usado



Fonte: World Nuclear Association (2022).

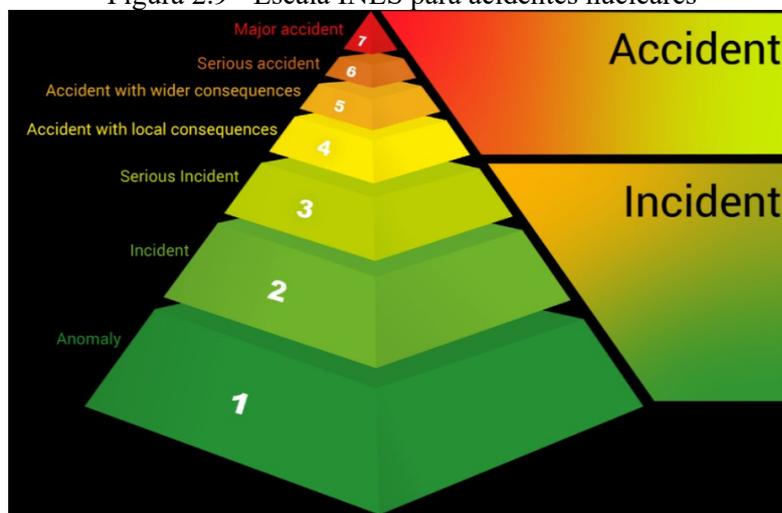
Há uma iniciativa internacional para que os materiais de alta atividade sejam depositos em rochas centenas de metros abaixo da superfície, aonde ficariam por anos. Também existem possibilidades de reciclar combustível nuclear. Estima-se que 97% do material poderia ser reaproveitado. A reciclagem tem focado em extrair plutônio e urânio, que podem ser misturados com combustível fresco na produção de pastilhas e varetas para o núcleo do reator. Alguns

países, como França, Alemanha e Japão, têm se empenhado no uso de plutônio reciclado para geração de eletricidade. Ainda assim, os subprodutos da fissão nuclear, cerca de 4% da mistura reativa, precisam ser destinados a repositórios e immobilizados em uma mistura com vidro, em um processo conhecido como vitrificação (WNA, 2022).

Um exemplo de acidente no manejo de lixo radioativo foi o caso de Goiânia, capital do Estado de Goiás, no Brasil, em 1987, quando um aparelho de radioterapia abandonado foi violado e, dias depois, vendido para um ferro-velho. Vários fragmentos de Césio-137 em pó foram espalhados no meio ambiente durante o transporte e manuseio indevido do equipamento. Centenas de pessoas tiveram contato direto e indireto com a substância, o que acarretou em 4 mortes registradas, além de casos de Síndrome Aguda da Radiação (SAR) e Síndrome Cutânea da Radiação em diversos pacientes. O maior acidente radiológico e nuclear do país gerou cerca de 3500 m³ de lixo radioativo, que foi acondicionado em containers de concreto para armazenamento em repositórios (BRASIL, 2020).

A Agência Internacional de Energia Atômica avalia a gravidade de acidentes nucleares segundo a *International Nuclear and Radiological Event Scale* (INES), isto é, uma escala internacional sobre eventos nucleares e radiológicos. Essa medida é aplicada para usinas nucleares e quaisquer instalações que lidem com o ciclo do combustível nuclear – como fábricas de conversão e enriquecimento, mineradoras, locais de deposição de rejeito nuclear – bem como reatores de teste, aceleradores de partículas e eventos que envolvam exposição médica e hospitalar excessiva à radiação. A escala, apresentada na Figura 2.9, é baseada nas consequências de determinado acontecimento, portanto é empregada de maneira retrospectiva e não é utilizada para determinar a iminência de um acidente. Ela compreende desde pequenas anomalias detectadas até acidentes de escalas globais (NEWS, 2022).

Figura 2.9 - Escala INES para acidentes nucleares



Fonte: Agência Internacional de Energia Atômica (2022).

O acidente nuclear de Fukushima, no Japão, na planta de Daiichi, em 11 de março de 2011, foi classificado como um acidente de 7º grau. Foi o maior acidente nuclear desde Chernobyl, provocado por grande instabilidade tectônica derivada do maior terremoto já registrado no território leste japonês. O tremor de 9.0 graus de magnitude na escala Richter gerou um tsunami na costa do país e várias ondas atingiram mais de 10 metros de altura e desabrigaram milhares de pessoas. As cinco centrais nucleares ao longo da costa leste foram afetadas em diferentes níveis e, exceto em Daiichi, todos os reatores foram desligados com segurança. Em Fukushima, somente três reatores do tipo BWR estavam em operação, enquanto os três demais estavam desligados para manutenção (AIEA, 2015).

Assim que tremores nas proximidades da planta de Daiichi foram detectados, os três reatores das Unidades 1, 2 e 3 foram desligados pelo sistemas de segurança automáticos da usina. Ainda era necessário utilizar os sistemas de refrigeração para conter o aquecimento dos reatores derivado do calor de decaimento dos elementos do combustível. No entanto, os terremotos provocaram danos substanciais na rede de suprimento elétrico externo da planta. Então, os sistemas elétricos de emergência, assim como geradores à diesel, foram ativados e os operadores continuaram normalmente o procedimento de refrigeração dos reatores. (AIEA, 2015).

Logo depois, as ondas do tsunami atingiram a instalação e comprometeram as redes elétricas internas da planta, que faziam funcionar o sistema de refrigeração dos reatores. Apesar de a planta ter uma autonomia de 8h em caso de um “blackout”, os operadores não tinham acesso à parâmetros fundamentais das unidades, como temperaturas, pressões e nível de água nos reatores. Assim, mesmo após diversas tentativas de resfriar os reatores (até mesmo com água do mar), as unidades 1-3 sofreram derretimento e os três vasos de contenção foram rompidos. Houve um vazamento de hidrogênio dos vasos dos reatores que provocou a explosão das unidades 1, 3 e 4, gerando danos em estruturas, equipamentos e trabalhadores. Radionucléídeos foram liberados na atmosfera, no solo e no oceano. Mais de 100.000 pessoas foram evacuadas em um raio de até 30 km do local do acidente. (AIEA, 2015). Na Figura 2.10 é mostrada uma das medidas de contenção de incêndio na usina.

Os países membros da AIEA monitoram e reportam acidentes envolvendo centrais nucleares e fontes de radiação na plataforma online NEWS (*Nuclear Events Web-based System*). Os eventos são classificados conforme a INES e são publicados em um repositório. Dos últimos 18 acidentes divulgados, apenas um atingiu nível 3, isto é, “incidente sério”. Houve uma exposição de alguns civis à uma fonte de radiação proveniente de um cromatógrafo que havia sido descartado na Polônia. O aparelho continha estrôncio-90, isótopo radioativo do

estrôncio e um dos subprodutos da fissão nuclear, cuja meia vida pode chegar a, aproximadamente, 30 anos (CHERNOUSENKO, 1991).

Figura 2.10 - Incêndio na Usina de Daiichi, Fukushima



Fonte: Jennifer Straka, Suffolk University (2015)

3 METODOLOGIA

A abordagem investigativa sobre o acidente de Chernobyl consistiu em uma avaliação e revisão de publicações disponíveis em repositórios institucionais de universidades e em diferentes bases de dados, como: Periódicos Capes, *ScienceDirect*, EBSCO *Discovery Service*, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO). Foram considerados livros, arquivos audiovisuais, artigos científicos, publicações em jornais e revistas, textos encontrados em órgãos governamentais como a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), a Associação Nuclear Mundial (WNA), a Agência de Energia Nuclear dos EUA (NEA), a Comissão Nuclear Regulatória dos EUA (NRC), a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), a Inspeção Estatal Nuclear Regulatória da Ucrânia (SNRIU) e a Comissão Europeia (CE).

4 O CASO DE CHERNOBYL

4.1 A Usina de Energia Nuclear de Chernobyl

O Conselho de Ministros da União Soviética definiu, em 29 de setembro de 1966, uma ordem para que fosse atingida, ao longo do território soviético, uma capacidade de produção de energia de, aproximadamente, 12 milhões kW, dos quais 8 milhões kW seriam produzidos em centrais de energia nuclear. A fim de alimentar 27 regiões da Ucrânia Soviética e de Rostov, o governo da URSS decidiu construir uma usina 130 km ao norte de Kiev e 20 km ao sul da fronteira com a Bielorrússia. A construção teve início em 15 de agosto de 1972 (UCRÂNIA, 2022).

Um lago artificial de 22 km² foi construído à sudeste da usina, nas proximidades do rio Pripyat, para prover água de resfriamento para os reatores. A cidade de Chernobyl fica à 15 km do complexo e abrigava 12.500 pessoas. Já a cidade de Pripyat fica somente à 3 km da instalação, e, na época do acidente, possuía cerca de 49.000 habitantes. Em um raio de 30 km ao redor da usina, estima-se que viviam entre 115.000 e 135.000 pessoas (WNA, 2022). A região é basicamente uma planície, com declives suaves em direção aos rios (SEGERSTAHL, 1991). Um mapa da região é exibido na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Localização de Chernobyl na Europa



Fonte: World Nuclear Association, "Chernobyl Accident 1986", 2022.

O parque industrial conta com aparelhagem externa, lagoa de resfriamento e construções de base. Há um zoneamento de todo o espaço da usina, que consiste em edifícios e instalações da área de acesso restrito, onde existe risco de exposição à radiação, e da região de livre acesso, onde não há contato previsto com radiação. Esse *layout* de Chernobyl obedece aos princípios sanitários e higiênicos estabelecidos para os projetos de centrais nucleares. Em 26 de setembro de 1977, a Unidade 1 da usina foi comissionada e conectada à rede de energia. Foi o primeiro reator nuclear comercial a entrar em operação em território ucraniano (UCRÂNIA, 2022). A Unidade 4, que explodiu durante o acidente, entrou em operação em dezembro de 1983. Outras duas unidades estavam em construção durante o período do acidente (SEGERSTAHL, 1991).

4.2 Os reatores RBMK-1000

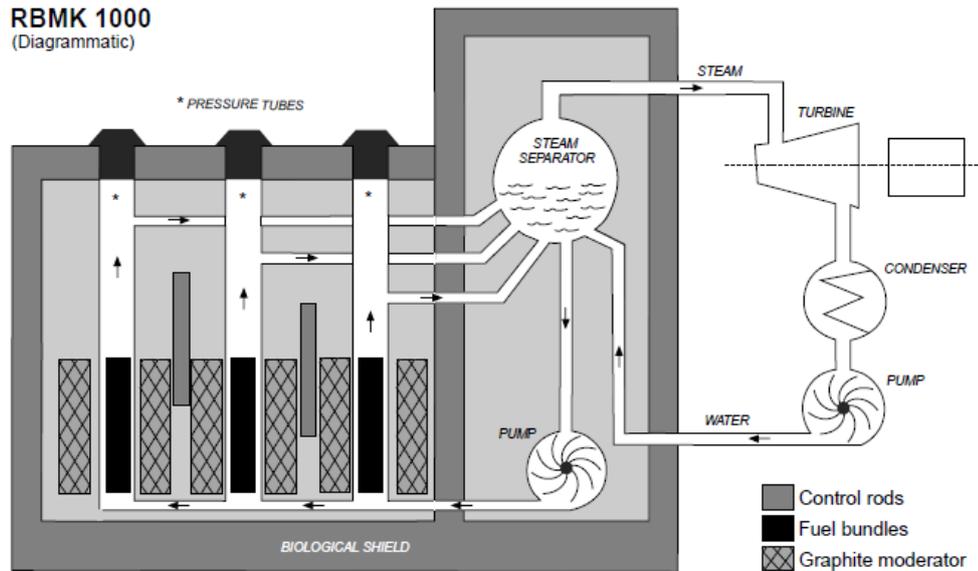
Os reatores russos RBMK (*reaktor bolshoy moshchnosty kanalny*, reator tubular de alta potência) eram modelos bem peculiares. Eles eram caracterizados como reatores de água fervente BWR, em que os elementos combustíveis eram separados em seus próprios tubos pressurizados de 7 m de comprimento, aproximadamente. Essa separação permitia que os operadores substituíssem os elementos combustíveis com o reator ainda em operação. Dióxido de urânio pouco enriquecido (2% de U-235) era enclausurado em varetas de zircaloy de 3,65 m de comprimento. Cada elemento combustível era composto por 18 varetas arranjas cilindricamente, e dois elementos combustíveis ocupavam cada um dos 44 tubos pressurizados. Os tubos eram individualmente refrigerados por água pressurizada a 6.9 MPa (WNA, 2022c).

O sistema de refrigeração era composto por 2 circuitos primários, cada um responsável por resfriar metade do reator. A água era injetada por debaixo dos tubos de pressão por quatro bombas em cada circuito – sendo uma delas usada apenas em caso de falha – com capacidade de 5500 até 12000 m³/h. Durante a ascensão da água pelo núcleo do reator, ela era parcialmente vaporizada e atingia temperaturas de 290°C. A mistura água e vapor era então separada em tambores para que o vapor prossiguisse até as turbinas. A água condensada nas turbinas formava uma corrente de alimentação que se juntava a uma corrente de recirculação advinda dos tambores para formar a corrente de entrada de água nos tubos do reator. A temperatura de entrada de água no reator era de 270 °C e a temperatura de saída era de 284°C (INSAG-7, 1992).

O núcleo do reator possui 7 m de comprimento e 11,8 m de diâmetro e fica armazenado em um gabinete. A parte inferior do gabinete contém uma placa pesada em que o reator é empilhado e a parte de cima possui uma placa de cobertura de 2.000 toneladas. Os tubos pressurizados são soldados a cada uma dessas placas. Há também uma matriz de “piscinas de bolhas” que servem para conter a pressão nesses espaços de confinamento do reator. Essas

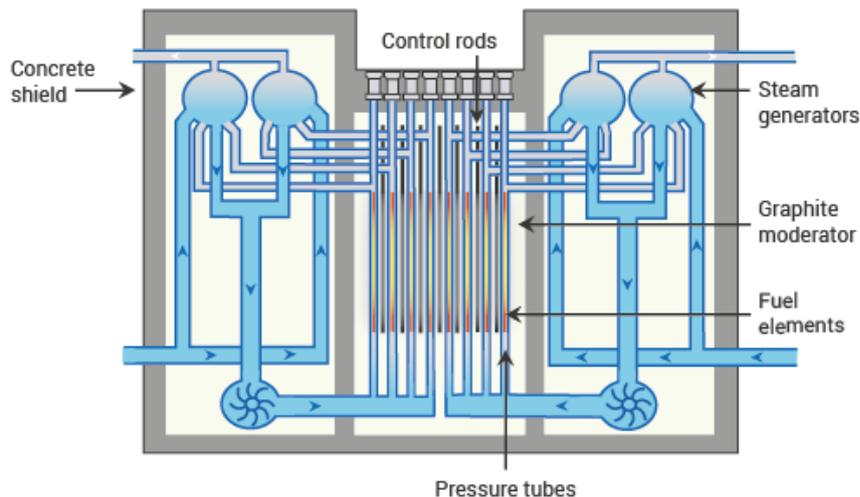
estruturas combinadas conseguem suportar um número mínimo de 2 rupturas nos tubos de pressão. Ainda, o reator não possuía um envoltório de concreto para conter maiores vazamentos de material. Caso muitos tubos se rompessem, as placas do gabinete podiam ser projetadas para fora do espaço de confinamento (INSAG-7, 1992). Duas representações do reator RBMK-1000 são apresentadas na Figura 4.2 e na Figura 4.3.

Figura 4.2 - Diagrama do Reator RBMK-1000



Fonte: Nuclear Energy Agency, Estados Unidos, 2002.

Figura 4.3 - Um reator de água leve moderado com grafite
A Light Water Graphite-moderated Reactor (LWGR/RBMK)



Fonte: World Nuclear Association, 2022.

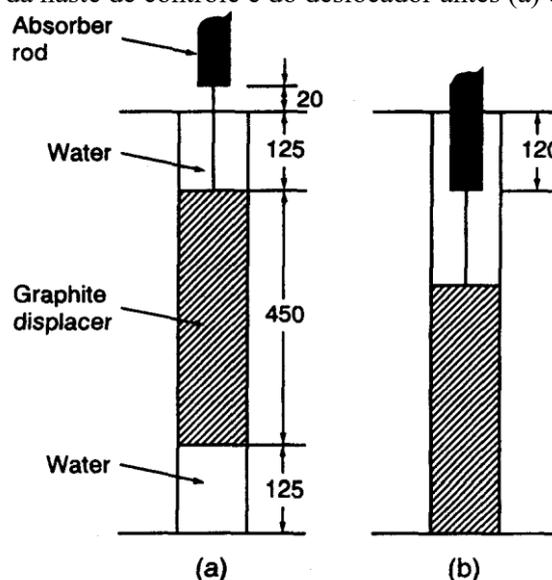
Outro aspecto de projeto do reator com grau de insegurança considerável é o design das hastes de controle. Feitas de carbeto de boro, elas são inseridas no reator por cima, exceto por 24 hastes curtas que operam de baixo pra cima, utilizadas para equilibrar a distribuição de

potência no reator (WNA, 2022c). Esse equilíbrio é determinante em reatores RBMK, uma vez que o núcleo do reator funciona quase que como vários reatores menores individuais, dada a distribuição dos elementos combustíveis em tubos pressurizados distintos. Em situações críticas, qualquer mudança mínima na reatividade pode provocar alterações significativas na distribuição de potência do reator e afetar o seu funcionamento (INSAG-7, 1992).

Cada haste de controle possui uma ponta de grafite denominada de “deslocador”, com exceção de 12 hastes que são utilizadas no controle automático. No período do acidente, o deslocador era conectado às hastes por meio de um “telescópio”. Havia 1,25 m de coluna d’água entre a haste e o deslocador e entre o deslocador e a região de combustível do núcleo do reator, como mostrado na Figura 4.4, em que a situação (b) representa as dimensões e posições de inserção adotadas nas correções dos reatores RBMK após o acidente de Chernobyl. O tempo de inserção das hastes de emergência era de 18 segundos, uma resposta lenta gerada pelos canais estreitos das hastes e pela coluna d’água, que amortecia a entrada das hastes (INSAG-7, 1992).

Dessa forma, quando as hastes de controle são movidas para dentro do reator, de cima para baixo, em uma ocasião em que é preciso diminuir a reatividade, há um aumento prévio na reatividade antes que ela comece a diminuir, uma vez que se forma uma coluna d’água embaixo do deslocador de grafite. Curiosamente, em fevereiro de 1984, uma carta do escritório do chefe de projeto de reatores chegou à usina de Chernobyl. Ela alertava sobre a reatividade positiva causada pelas hastes e recomendava algumas medidas e modificações nos reatores, que não foram cumpridas até o dia do acidente em 1986 (CHERNOUSENKO, 1991).

Figura 4.4 - Posições da haste de controle e do deslocador antes (a) e depois do acidente (b)



Fonte: INSAG-7: The Chernobyl Accident, International Nuclear Safety Advisory Group, 1992.

Os reatores BWR contêm uma certa quantidade de vapor em seus núcleos. As bolhas que se formam na evaporação da água são chamadas de “vazios”. A água em sua forma líquida é melhor como refrigerante e como absorvedora de nêutrons que o vapor, por isso uma mudança na proporção de bolhas de vapor é capaz de alterar a reatividade do núcleo. A razão entre a fração de vazios e a mudança na reatividade é denominada de coeficiente de vazio de reatividade, que pode ser positivo ou negativo, a depender do design dos reatores, das condições de operação, da composição do núcleo (nível de enriquecimento do combustível), do número de hastes de controle inseridas e de absorvedores instalados (INSAG-7, 1992).

Quando o coeficiente de vazio é negativo, um aumento na quantidade de vapor provoca uma diminuição na reatividade. Ocorre que em reatores BWR do Ocidente, a água é usada como fluido refrigerante e moderador. Assim, uma geração excessiva de vapor provoca uma diminuição na reatividade, pois a água evaporada não é tão eficiente na redução de velocidade dos nêutrons. Isso causa uma redução de potência no reator e é uma função básica de segurança desses equipamentos (WNA, 2022c).

Já no reator russo, o grafite é o moderador constante de nêutrons. Ele é distribuído em blocos ao redor dos tubos pressurizados e é refrigerado por uma mistura gasosa de nitrogênio e hélio, pois a transferência de calor da fissão para os blocos faz com que eles atinjam altas temperaturas. Assim, a produção excessiva de vapor diminui a refrigeração do núcleo, mas a reação em cadeia continua, já que o grafite permanece intacto. Essa condição, muito comum nos reatores de Chernobyl, é denominada de coeficiente de vazio positivo (WNA, 2022c).

O coeficiente de potência do reator RBMK é consideravelmente sensível às variações do coeficiente de vazio, que, por sua vez, depende da margem de reatividade operacional (ORM, *Operating Reactivity Margin*). A ORM é definida pela INSAG-7 (1992) como: “a reatividade extra que surgiria caso todas as hastes fossem removidas, expressa como um múltiplo da reatividade total controlada por uma única haste.” Portanto, a quantidade de hastes inseridas no reator é determinante para a garantia de segurança operacional, uma vez que interfere nas duas principais variáveis do reator RBMK: a reatividade e o coeficiente de vazio.

4.3 O Acidente

Além das deficiências dos modelos russos dos reatores, outro fator foi determinante para a explosão da Unidade 4 de Chernobyl, em 26 de abril de 1986. Os chefes de operação da planta decidiram realizar um teste de segurança, cuja premissa era verificar se, em uma situação de desligamento do reator, as turbinas em movimento desacelerado poderiam gerar energia suficiente para abastecer os sistemas de emergência do reator até que os geradores a diesel

começassem a operar, o que demorava cerca de um minuto para acontecer. Em uma situação real, caso a usina perdesse conexão com a energia externa (*off-site power*), os reatores seriam desligados imediatamente. Mas as turbinas continuariam a girar por algumas horas, sendo capazes de produzir energia elétrica. Então, para simular esse evento, a potência do Reator 4 seria reduzida e as condições de operação das turbinas e geradores seriam avaliadas (MIT OPENCOURSEWARE, 2020).

Esse mesmo teste foi realizado um ano antes do acidente, mas não obteve resultados conclusivos, pois a turbina havia perdido potência muito rapidamente, então uma nova configuração no regulador de voltagem seria testada (WNA, 2022c). O sistema emergencial de refrigeração do núcleo do reator (ECCS, *Emergency's Core Cooling System*), que provê água para resfriar o reator em uma emergência, foi desligado para que o teste fosse realizado. Apesar de não ter afetado consideravelmente os eventos que se seguiram, a exclusão desse sistema de emergência durante toda a execução do teste foi uma atitude negligente com relação aos procedimentos de segurança (NEA, 2020).

No dia 25 de abril de 1986, aproximadamente às 14h do horário local da Ucrânia, a potência do reator já havia sido reduzida da condição normal de operação de 3.200 MWt para 1.600 MWt, por meio da inserção de hastes de controle no reator. Os operadores aguardavam instruções para proceder com a diminuição para a potência final de 700 MWt, valor requerido para início do teste, quando funcionários da rede elétrica de Kiev ligaram para Chernobyl e disseram que não poderiam permitir uma redução maior da potência até depois da meia-noite daquele dia. Isso culminaria em um atraso de 10 horas para o começo do experimento, o que por si só já invalidaria o teste (CHERNOBYL, 2019).

Os líderes que permitiram a continuidade do teste, o diretor da central atômica, Víktor Briukhánov, o engenheiro-chefe, Nikolai Fomín, e o substituto do engenheiro-chefe, Anátoli Diátlov, decidiram deixar o reator operacional a 1.600 MWt até a hora estipulada. (ALEKSIÉVITCH, 2016). Alguns problemas surgiram por causa do adiamento do teste. O primeiro deles foi de ordem humana: uma troca de turno de funcionários da usina. Boa parte dos funcionários da noite não sabiam que um experimento de segurança seria realizado. Um dos funcionários que conduziram o teste, Leonid Toptunov, tinha apenas 4 meses de experiência e não havia sido treinado para uma situação como aquela. Ademais, houve dúvida por parte do staff noturno se deveriam realizar algumas tarefas que já estavam riscadas na lista do experimento. A falta de comunicação entre os turnos foi determinante para o prosseguimento das atividades da maneira mais segura e correta possível (CHERNOBYL, 2019).

Operar o reator a meia potência durante tanto tempo também causou um envenenamento de xenônio-135 no núcleo, um produto da decomposição do urânio. Em condições normais de operação, o xenônio-135 seria queimado e eliminado, mas por causa do atraso no teste, ele se acumulou no sistema e provocou redução na reatividade, uma vez que é um dos melhores absorvedores de nêutrons que existem, um gás nobre que interage muito pouco com outras substâncias (MIT OPENCOURSEWARE, 2020).

Então, por volta da meia-noite, quando os operadores iniciaram o procedimento de redução da potência para 700 MWt, houve uma queda de potência inesperada para números próximos de 500 MWt, conforme indicava o painel da sala de controle. Decidiu-se desativar o sistema de controle automático local (LAC, *Local automatic control*) e ativar o sistema de controle automático global (CHERNOBYL, 2019).

O LAC depende de detectores posicionados dentro do núcleo e opera em potências maiores que 10% da potência nominal. Quando fora desligado, os funcionários passaram a depender somente da instrumentação de fora do núcleo (incapaz de determinar o fluxo de nêutrons no núcleo) para tomar decisões que afetariam a potência total e sua distribuição espacial. Sendo assim, sem esses sistemas ativos, com o reator operando a baixa potência, os operadores contavam com experiência e intuição, além de terem que executar vários comandos em pouco tempo. Nessas circunstâncias, um operador poderia ser requisitado a executar até 1.000 manipulações por hora (INSAG-7, 1992). Na Figura 4.5 é apresentada uma foto da sala de controle da usina.

Figura 4.5 - Sala de Controle de Chernobyl



Fonte: IAEA, 2010.

Após a desativação do LAC, o reator então atingiu uma potência baixíssima de 30 MWt. Nessa condição, os isótopos de xenônio não são consumidos e o reator não está quente o suficiente para produzir o vapor necessário para que a reatividade atinja valores desejáveis. Um

fato importante deve ser mencionado: antes do acidente, nenhum documento ou manual de operação da usina apresentava os riscos de se operar o reator abaixo de 700 MW, nem mesmo impunham limites de potência que deveriam ser respeitados (CHERNOUSENKO, 1991)

Mesmo com a alarmante perda de potência do reator, os supervisores queriam prosseguir com o teste de segurança. A fim de recuperar a potência do reator, os operadores deveriam remover as hastes de controle em um período de 24 horas para evitar alterações bruscas na reatividade. Porém, o que ocorreu foi a remoção de 205 hastes em 30 minutos, sobrando apenas 6 hastes no reator. A quantidade mínima é de 15 hastes de controle, que foi violada durante esse procedimento. Apesar disso, os operadores só conseguiram aumentar a potência para 200 MWt, devido à grande quantidade de xenônio-135 no sistema. Somente a água e o xenônio é que impediam a reatividade de subir incontrolavelmente (CHERNOBYL, 2019).

Antes do início do teste, bombas de água de alimentação foram acionadas para aumentar o fluxo de água para o núcleo do reator, o que causou uma redução na reatividade, que foi compensada pela remoção de hastes de controle. As bombas foram operadas além da capacidade permitida, o que causou problema no nível dos tambores de vapor, já que mais calor era removido do núcleo e mais vapor era produzido. Dificuldades em controlar nível e pressão nos sistemas do reator fizeram com que os operadores desativassem os sistemas automáticos de controle dos tambores de vapor (WNA, 2022b).

Aproximadamente à 01h23min. da manhã, os supervisores decidiram iniciar o teste. Os sistemas da turbina foram desligados e as bombas de água de resfriamento foram desativadas. Com menos água para percorrer o núcleo do reator, a reatividade aumentou, a troca de calor também aumentou e a água remanescente no reator foi transformada em vapor. O excesso de vapor criou um coeficiente de vazão positivo, o que aumentou ainda mais a reatividade e a potência do reator. O xenônio-135 foi consumido completamente e sem hastes de controle suficientes no núcleo do reator para conter o avanço das reações em cadeia, somente uma opção restava para interromper a sequência catastrófica que havia se iniciado (CHERNOBYL, 2019).

Alexander Akimov, um dos operadores na sala de controle da Unidade 4, decide acionar o botão AZ-5 à 01h23min40seg. Esse comando faz com que todas as hastes de controle sejam inseridas simultaneamente no reator, a fim de interromper a fissão nuclear e desligá-lo. No entanto, as hastes com pontas de grafite provocaram um aumento ainda maior na reatividade, o que fez com que as moléculas de água se convertessem em vapor de maneira incontrolável. O vapor se expandiu, quebrou vários canais das barras de combustível e as hastes de controle ficaram presas no núcleo. O reator 4 atingiu mais de 33 mil MWt de potência e explodiu à 01h23min45seg. A tampa do reator foi atirada para cima, oxigênio entrou no reator e se

combinou com hidrogênio e grafite superaquecido, o que gerou uma segunda explosão. O núcleo do reator estava exposto e começou a liberar grandes quantidades de radionuclédeos na atmosfera (CHERNOBYL, 2019).

Mesmo que algumas fontes apontem um número pequeno de vítimas diretas do acidente, dentre operários da usina e bombeiros que trabalharam no local, há indícios de uma quantidade muito maior de pessoas afetadas pelo acidente, tanto a nível físico como psicológico. Estimase que a precipitação radioativa de Chernobyl tenha liberado 400 vezes mais radioatividade que a bomba de Hiroshima (STONE, 2006). Ainda, a partir do dia 29 de abril daquele ano, foram registrados altos níveis de radiação em toda a Europa. Foi assim que o Ocidente percebeu que algo havia acontecido em alguma instalação nuclear soviética (ALEKSIÉVITCH, 2016).

Milhares de trabalhadores estiveram envolvidos na contenção de danos do acidente, dentre eles os chamados “liquidadores”, responsáveis por conter o incêndio que durou 10 dias, construir o Sarcófago para envolver a Unidade 4 e enterrar os vestígios de radiação. A média de idade dos liquidadores era de 33 anos, alguns nem mesmo haviam terminado o ensino básico. O governo bielorusso aponta que, de 1990 a 2003, morreram cerca de 8500 liquidadores (ALEKSIÉVITCH, 2016). A Figura 4.6 exhibe o estrago estrutural provocado pela explosão.

Figura 2.6 - Usina de Chernobyl pós-acidente



Fonte: Leatherbarrow, 2016.

5 O SIMULADOR DE TREINAMENTO

As drásticas consequências sociais, políticas, ambientais e científicas de Chernobyl impõem um legado muito significativo para a segurança de usinas nucleares. É certo que haviam falhas de design nos reatores RBMK, posteriormente adequadas e corrigidas para que pudessem continuar a operar na Rússia, na Ucrânia e na Lituânia. Atualmente, somente a Rússia ainda emprega esse modelo de reator e conta com 8 unidades distribuídas em Leningrado, Kursk e Smolensk (WNA, 2022c). Também é correto que as ações e decisões de operadores, supervisores e gestores da usina foram determinantes para a sequência de eventos que resultaram no desastre nuclear apresentado.

O acidente é deflagrado em um teste de segurança, cujos procedimentos padrões são definidos, escritos e, em certa medida, seguidos pelos operadores. Porém, as orientações não previam algumas variações no decorrer do teste como, por exemplo, o tempo de espera de 10 horas entre a primeira e a segunda redução de potência, o acúmulo de xenônio-135 no sistema ou a queda de potência do reator para valores menores que 500 MWt. Dessa forma, a importância do uso de ambientes de simulação adequa-se ao contexto da segurança de usinas nucleares, uma vez que os simuladores possibilitam a avaliação de possíveis cenários dos processos em uma indústria e permitem explorar situações adversas, incidentes e acidentes dentro da realidade operacional de uma planta de energia nuclear.

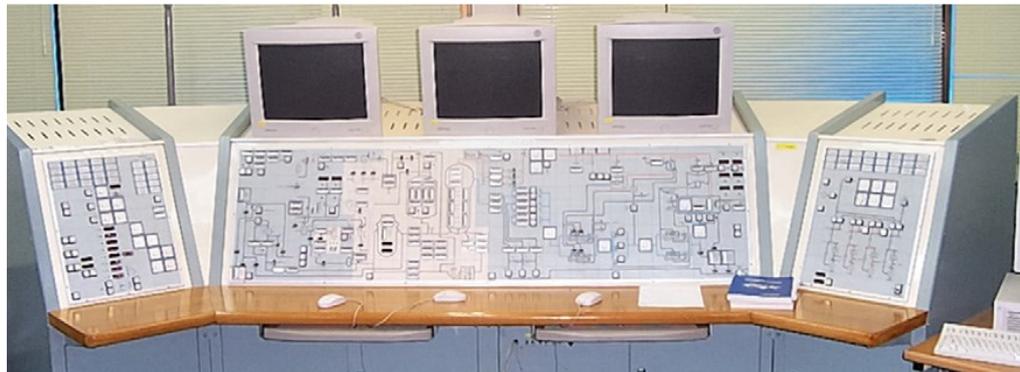
O treinamento de operadores de reatores geralmente contempla exames escritos, orais e em simulação. Há cursos de sistemas e componentes do reator, tecnologia nuclear, teoria de reatores e princípios de proteção radiológica. Nos testes, há procedimentos de mudanças de reatividade e alteração na remoção de calor do sistema, em que são avaliadas as capacidades de trabalhar em equipe, raciocínio e tempo de resposta dos trabalhadores. A simulação tem se mostrado eficaz nos treinamentos de controle e operações, instrumentação, análise de falhas de equipamentos, manutenção das instalações, monitoramento do núcleo e proteção contra radiação (CARVALHO, 2006).

Podem ser encontrados na indústria de energia nuclear, usualmente, três tipos de simuladores para treinamento de operações. Há o simulador de escopo completo (*full scope*), que utiliza uma mesa de controle física em escala reduzida, como a representada na Figura 5.1, construída para imitar as mesas de controle reais juntamente com um sistema computacional de simulação. A desvantagem desse modelo é que requer a construção da mesa de controle de testes, o que demanda custos adicionais à empresa. Existe também o simulador compacto, que

emprega um sistema computadorizado contendo diagramas, fluxogramas virtuais com os equipamentos, como reatores e geradores de vapor, mas sem representar com precisão uma mesa de controle. Nesse modelo, os operadores precisam navegar entre diferentes janelas e monitores para manusear os sistemas da planta virtual, como mostra a Figura 5.2 (JORGE, 2010).

Na última década, um terceiro modelo baseado no uso da tecnologia de realidade virtual (RV) tem sido utilizado para reproduzir mesas de controle virtuais com alto padrão de fidelidade com relação aos atuadores e instrumentos originais, além de contar com todas as funcionalidades de um simulador computadorizado de uma planta nuclear (JORGE, 2010).

Figura 3.1 - Mesa de controle em tamanho reduzido



Fonte: “Human-System Interface Based on Speech Recognition: Application to a Virtual Nuclear Power Plant Control Desk”, Carlos Alexandre F. Jorge, 2010.

Figura 4.2 - Simulador compacto do Laboratório de Interfaces Humano-Sistema da CNEN

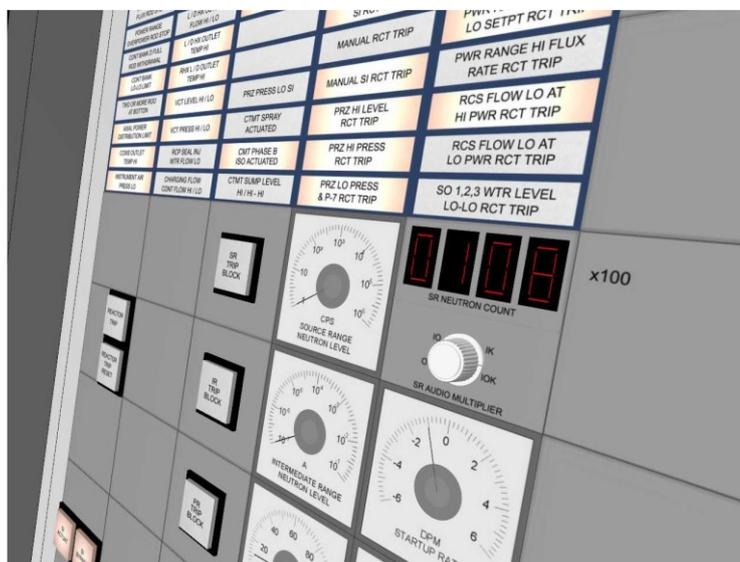


Fonte: “Human-System Interface Based on Speech Recognition: Application to a Virtual Nuclear Power Plant Control Desk”, Carlos Alexandre F. Jorge, 2010.

Desde os anos 2000, o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) realiza projetos de pesquisa e desenvolvimento para aplicação da realidade virtual no contexto das usinas nucleares. Os simuladores em RV também podem ser utilizados para estimar as doses recebidas pelos operadores enquanto os reatores estiverem em operação, a fim de avaliar as condições mais seguras de trabalho e garantir o menor tempo de exposição possível dos trabalhadores (AGHINA, 2009). Há estudos publicados sobre: jogos virtuais para treinamento em caso de necessidade de evacuação em emergências; mesas de controle controladas por reconhecimento de voz; bem como ambientes virtuais em que os operadores podem treinar procedimentos de realocação de rejeitos radioativos e conferir a taxa de radiação recebida nessas tarefas. As aplicações são diversas e continuam a ser exploradas em instituições nacionais e internacionais (SILVA; LEGEY; MÓL; 2015).

Aghina (2009) desenvolveu um simulador de uma mesa de controle de um reator nuclear do tipo PWR com uso de recursos de RV, a fim de auxiliar o treinamento remoto de operadores, uma vez que o programa desenvolvido poderia ser acessado de qualquer computador. A mesa de controle possui três interfaces: a primeira contém o controle das barras de segurança do reator, monitoração do fluxo neutrônico e painel de alarmes gerais; a segunda e principal, contém o controle químico volumétrico, a monitoração e controle do núcleo do reator, do pressurizador, do gerador de vapor e da turbina; a terceira possui a monitoração e controle da geração elétrica do reator, e mais um painel de alarmes. Na Figura 5.3 são apresentados alguns componentes do painel de controle, como anunciadores de alarmes, display numérico, mostradores analógicos e botões de atuação.

Figura 5.3 - Painel de controle de programa de simulação de uma mesa de controle de usina nuclear



Fonte: “Mesa de Controle Virtual para Treinamento de Operadores: Um Estudo de Caso para um Simulador de Usina Nuclear”, Aghina (2009).

Aghina (2009) reitera que “com este trabalho espera-se que o treinamento de operadores de centrais nucleares, usando simuladores *full scope*, possa ser facilitado, devido à mesa de controle virtual ter a mesma aparência do layout da mesa de controle original do reator”. Assim, não haveria custo com a construção de uma mesa de controle real reduzida.

Em outro estudo realizado na usina de Angra dos Reis, Carvalho et al. (2005) investigaram microincidentes em operações na sala de controle sob o ponto de vista da ergonomia e da segurança do trabalho. Avaliaram-se os procedimentos adotados em paradas e partidas da usina e concluiu-se que os profissionais nem sempre cumprem estritamente com o plano de tarefas imposto para cada situação, recorrendo muitas vezes ao conhecimento prático e às condições do ambiente de trabalho para tomarem decisões.

A flexibilização das normas e regras de operação, contudo, não pressupõe a ocorrência de acidentes, uma vez que foi demonstrado que as violações de procedimentos estão presentes rotineiramente no contexto da usina (CARVALHO et al., 2005).

A pesquisa também acompanhou um treinamento em simulador que consistia em lidar com o acidente postulado Ruptura de Tubo do Gerador de Vapor (SGTR, *Steam Generator Tube Rupture*). Os operadores deveriam iniciar o desligamento automático do reator por meio das hastes de controle e, em seguida, reduzir a pressão do circuito primário de refrigerante para 80 bar, a fim de isolar o gerador de vapor danificado, manter a refrigeração do núcleo do reator e evitar a saturação da água de resfriamento, pois isso poderia causar danos nos elementos combustíveis e gerar vazamentos para o circuito primário do sistema (CARVALHO et al., 2005).

Durante o teste, no momento em que a redução de pressão acontecia, identificou-se que o gráfico de pressão e temperatura (PxT) gerado apontava para uma possível saturação do fluido refrigerante caso a equipe reduzisse a pressão do sistema para 80 bar, uma incongruência notável entre o que o procedimento pedia para ser feito e o resultado obtido na prática do treinamento, o que provocou questionamentos dos operadores se deveriam ou não infringir as normas descritas. Esse teste demonstrou a importância do simulador de treinamento para antecipar eventos que poderiam acontecer em situações reais de acidente, bem como reforça a recorrência de desvios das orientações prescritas no ambiente de uma usina nuclear (CARVALHO et al., 2005).

Após o acidente de Three Mile Island, em 1979, as agências reguladoras tornaram as centrais nucleares mais dependentes de exames em simulador na qualificação, autorização e licenciamento de pessoal. Os primeiros simuladores datam dos anos 1970, portanto a tecnologia disponível em 1986, durante o período do acidente de Chernobyl, ainda era bastante limitada

quanto ao alcance e fidelidade dos modelos analógicos e físicos utilizados, já que o advento dos computadores pessoais só aconteceria na década seguinte (CARVALHO, 2006).

A usina nuclear de Chernobyl não contava com simuladores de escopo completo para os reatores RBMK. Na verdade, nenhuma das usinas ucranianas detinha esse aparato. Somente anos depois do acidente, em 1996, a Comissão Europeia, órgão independente da União Europeia, decidiu realizar um projeto de treinamento com os operadores da instalação ucraniana por meio de um simulador *full scope* do centro de treinamento de Smolensk, na Rússia, onde havia o único simulador disponível de reatores RBMK naquele momento (EUROPEAN COMMISSION, 2022).

Segundo a Comissão Europeia (2022), “essa intenção [de treinamento] corresponde bem às necessidades reais, uma vez que foi detectado que os operadores de Chernobyl não recebiam nenhum treinamento em simulador há vários anos”. A perda de pessoal da usina também foi considerada como uma questão de segurança prioritária para a Agência Internacional de Energia Atômica.

Primeiramente, os operadores da Unidade 3 de Chernobyl foram submetidos a treinamentos na própria usina com duração de 1 semana para cada um dos 7 operadores, em preparação para as sessões em simulador. Depois, passaram por 10 dias de treinamento de reciclagem no simulador de escopo completo de uma planta de reator RBMK do Centro de Treinamento de Smolensk. Nos primeiros dias, os operadores foram familiarizados com as diferenças entre o simulador e a planta real. Então, tiveram 2 horas de aulas teóricas e 4 horas de práticas no simulador durante um período de 7 dias de treinamento intensivo. O relatório apresentado pela Comissão Europeia ressalta a importância do treinamento para melhor entender os aspectos de ocorrências incomuns, além de praticar ações de recuperação apropriadas e considera os objetivos do projeto completamente cumpridos (EUROPEAN COMMISSION, 2022).

Nesse cenário, consideradas as vantagens do uso do simulador para reduzir riscos para equipamentos e trabalhadores, repetir procedimentos o quanto for necessário e prever como os reatores e seus componentes se comportam em situações críticas, é possível dizer que essa tecnologia poderia ser determinante para o teste de segurança realizado em Chernobyl.

Na verdade, o procedimento experimental poderia ser recriado em um simulador de escopo completo de um reator RBMK, a fim de verificar o comportamento da Unidade 4 frente à redução de potência por inserção de hastes de controle. Ainda assim, seria necessário verificar se a turbina produziria energia necessária para dar suporte aos sistemas de emergência do reator real. Por isso, propõe-se utilizar uma turbina em escala piloto que fosse anexada ao sistema do

simulador. Caso os operadores pudessem ter acesso a um simulador compacto, todos os equipamentos (reatores, geradores de vapor, circuitos primários e secundários, turbinas, geradores elétricos, bombas, válvulas) poderiam ser incluídos em uma interface virtual para realizar o passo-a-passo do experimento.

Algumas outras situações poderiam ser avaliadas via simuladores de reatores, como: os impactos da redução de potência no reator; monitoramento da reatividade por meio de manipulações em variáveis de processo; interrompimento do fluxo de fluido de refrigerante para o núcleo e seus efeitos; e as condições de coeficiente de vazão positivo do reator e suas consequências. Ainda, os ambientes em realidade virtual poderiam ser usados para apontar os índices de radioatividade máximos a que os operadores estariam expostos em suas atividades normais, bem como para treiná-los em situações de emergência e evacuação, a fim de diminuir danos causados aos humanos quando há ocorrência de acidentes.

6 CONCLUSÃO

Os eventos que se passaram na usina de Chernobyl resultaram de uma cultura de segurança industrial deficiente, principalmente no que se refere à condução de procedimentos de emergência, ao treinamento dos operadores, ao planejamento de testes de segurança, à gestão de conhecimento e troca de informações entre turnos de operação distintos e também no que concerne às falhas de projeto do reator russo de modelo RBMK, cujo design e composição das hastes de controle, moderadores de grafite e coeficiente de vazio de reatividade positivo foram determinantes para a explosão do Reator 4.

Evidenciou-se também que desvios de operação durante a execução de planos de tarefas em salas de controle de usinas nucleares são parte do dia-a-dia dos operadores. Portanto, é insatisfatório atribuir as causas do acidente de Chernobyl somente a “erros humanos”. Ao mesmo tempo, faz-se primordial debater os riscos e benefícios da produção de energia elétrica a partir da fissão nuclear, uma vez que existe um histórico relevante de acidentes como também há uma demanda crescente por fontes de energia limpas, sustentáveis e seguras.

Os simuladores de treinamento, ausentes na usina de Chernobyl, são ferramentas essenciais de formação dos profissionais da área de energia nuclear para situações recorrentes em centrais nucleares, assim como são instrumentos validados e certificados para a prática de ações e tomadas de decisão durante incidentes e acidentes nessas instalações. Concluiu-se, por meio de uma análise qualitativa das tecnologias de simulação, que o emprego de simuladores na planta ucraniana ajudaria a compreender o funcionamento do reator e demais sistemas sob condições críticas, o que evitaria o comprometimento dos equipamentos e prepararia os operadores para condições de emergência, como as ocorridas em abril de 1986.

Entende-se que, em face do conflito persistente na Ucrânia, seja interessante para próximos trabalhos a elucidação das condições de segurança nas usinas nucleares atualmente ativas em território ucraniano, apontando as inovações tecnológicas presentes nessas indústrias e os artifícios de segurança utilizados para prevenir acidentes.

Ainda, durante a execução desta abordagem investigativa, fez-se necessário estudar diversos aspectos da obtenção de energia nuclear. Assim, sugere-se para pesquisas posteriores uma revisão sobre o ciclo do combustível nuclear no Brasil (desde a extração de minério de urânio à deposição de rejeitos nucleares) e também um estudo sobre o estado da arte das usinas nucleares de Angra dos Reis.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. **Fast Reactors**. 2022d. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/fast-reactors>. Acesso em: 13 junho 2022.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. **Gas Cooled Reactors**. 2022c. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/gas-cooled-reactors>. Acesso em: 13 junho 2022.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. **Power Reactor Information System**. 2022a. Disponível em: <https://pris.iaea.org/pris/>. Acesso em: 11 maio 2022.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. **Nuclear Energy Compared**. 2021. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/infographics-nuclear-energy-compared>. Acesso em: 13 junho 2022.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. **The Fukushima Daiichi Accident: Report by the Director General**. 2015. Disponível em: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf>. Acesso em: 26 junho 2022.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. **Water Cooled Reactors**. 2022b. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/water-cooled-reactors>. Acesso em: 13 junho 2022.
- AGHINA, Mauricio Alves da Cunha e. **Mesa de Controle Virtual para Treinamento de Operadores: Um Estudo de Caso para um Simulador de Usina Nuclear**. 2009. 97 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2009.
- ALEKSIÉVITCH, Svetlana. **Vozes de Tchernóbil: a história oral do desastre nuclear**. Tradução: Sônia Branco. 1ª ed. Companhia das Letras. São Paulo. 2016.
- ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Defense in Depth**. Nuclear Engineering Division. Estados Unidos. Disponível em: <https://www.ne.anl.gov>. Acesso em: 24 junho 2022.
- ALLARDICE, Corbin, TRAPNELF, Edward R. The First Pile. **International Atomic Agency Bulletin**. Agência Internacional de Energia Atômica. v. 4, dez., 1962. Disponível em: <https://www.iaea.org/bulletin/4-0>. Acesso em: 6 junho 2022.
- BERRIOS, Daniel. **The SL-1 Nuclear Incident**. Stanford University. 7 fev. 2017. Disponível em: <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/berrios1/>. Acesso em: 25 junho 2022.
- BRASIL. Secretaria de Estado de Saúde. Governo do Estado de Goiás. **História do Césio-137 em Goiânia**. 2020. Disponível em: <https://www.saude.go.gov.br/cesio137goiania/historia>. Acesso em: 26 junho 2022.
- CARVALHO, P. V. R. et al. **Análise de Microincidentes na Operação de Usinas Nucleares: Estudo de Caso Sobre o Uso de Procedimentos em Organizações que Lidam com Tecnologias Perigosas**. Gestão & Produção, v. 12, n. 2, p. 219-237. Rio de Janeiro. 2005.

CHERNOBYL. Direção: Johan Renck. Roteiro: Craig Mazin. Estados Unidos: HBOMax. 2019. 1 minissérie (5h18min). 5 episódios, son., color.

CHERNOUSENKO, V. M. **Chernobyl: Insight from the Inside.** 1ª Ed Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 1991. DOI: <https://doi-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/10.1007/978-3-642-76453-0>. Acesso em: 5 maio 2022.

DUDERSTADT, James J., HAMILTON, Louis J. **Nuclear Reactor Analysis.** The University of Michigan. Department of Nuclear Engineering. Ann Arbor: 1976.

ENERGY EDUCATION. **CANDU reactor.** Energy Education. Disponível em: https://energyeducation.ca/wiki/index.php?title=CANDU_reactor&oldid=10505 Acesso em: 14 agosto 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **Simulator Training of the Chernobyl NPP operators at the Smolensk training centre.** Joint Research Centre. TACIS INSC PHARE IPA Nuclear Safety. 2022. Disponível em: <https://nuclear.jrc.ec.europa.eu/tipins/contracts/simulator-training-chernobyl-npp-operators-smolensk-training-centre>. Acesso em: 14 Agosto 2022.

FERNANDES, Gustavo Henrique Nazareno. **Aplicação do código RELAP5-3D para análise térmica do núcleo de um reator ADS.** 2018. 156 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

INSAG-7, **The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1, A report by the International Nuclear Safety Advisory Group.** International Atomic Energy Agency. Safety Series No. 75-INSAG-7, Viena, 1992. ISBN: 9201046928

JORGE, Carlos Alexandre F., et al. **Human-System Interface Based on Speech Recognition: Application to a Virtual Nuclear Power Plant Control Desk.** Progress in Nuclear Energy (New Series), vol. 52, no. 4, p. 379–386. Rio de Janeiro, 2010.

MEITNER, Lise. Right and Wrong Roads to the Discovery of Nuclear Energy. **International Atomic Agency Bulletin.** Agência Internacional de Energia Atômica. v. 4, dez., 1962. Disponível em: <https://www.iaea.org/bulletin/4-0>. Acesso em: 25 maio 2022.

MELTDOWN: Three Mile Island. Direção: Kief Davidson. Estados Unidos: Netflix. 2022. 1 minissérie (2h52min). 4 episódios, son., color.

MIT OPENCOURSEWARE. 1 Vídeo (54min23s). **26. Chernobyl – How It Happened.** Publicado pelo canal MIT OpenCourseWare, 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Ijst4g5KFN0&t=346s>. Acesso em: 14 julho 2022.

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. **Desastre de Chernobyl: o que aconteceu e os impactos a longo prazo.** Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/2019/06/o-que-aconteceu-desastre-chernobyl-uniao-sovietica-ucrania-energia-nuclear>. Acesso em: 16 maio 2022

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. **O controverso futuro da energia nuclear nos Estados Unidos**. 2021. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2021/05/o-controverso-futuro-da-energia-nuclear-nos-estados-unidos>. Acesso em: 7 junho 2022.

NEWS: Nuclear Events Web-based System. **The INES Scale**. Agência Internacional de Energia Atômica. 2022. Disponível em: <https://www-news.iaea.org/InesScale.aspx>. Acesso em: 26 junho 2022.

NOUAILHETAS, Yannick. **Radiações Ionizantes e a vida**. Colaboração de Carlos Eduardo Bonacossa de Almeida e Sonia Pestana. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Rio de Janeiro. Botafogo. [20--?].

OFFICE OF NUCLEAR ENERGY. **5 Facts to Know About Three Mile Island**. Governo dos Estados Unidos da América. Departamento de Energia. Estados Unidos. 2022. Disponível em: <https://www.energy.gov/ne/articles/5-facts-know-about-three-mile-island>. Acesso em: 25 junho 2022.

OPENMIND BBVA. 1 Vídeo (2min27s). **Lise Meitner and nuclear fission**. Publicado pelo canal OpenMind, 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6UvbididT-qM&t=75s>. Acesso em: 25 maio 2022.

OTT, Karl O., SPINRAD, Bernard I. **Nuclear Energy: A Sensible Alternative**. Estados Unidos. Nova Iorque. Springer: 1985. Disponível em: <https://link-springer-com.ez34.periodicos.capes.gov.br/content/pdf/10.1007/978-1-4684-4589-3.pdf>. Acesso em: 24 junho 2022.

SAPUNARU, R. A., et al. **As Influências das Torres Hiperbólicas nas Usinas Termoelétricas: Um Foco Termonuclear**. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas, UFSM. Ciência e Natura, Santa Maria, Ed. Especial UFVJM, v. 37, p. 30-34, 2014. Disponível em: <https://oaji.net/articles/2017/1602-1486466003.pdf>. Acesso em: 13 junho 2022.

SCIENCE BLOGS. Blogs de Ciência UNICAMP. **Primeira usina nuclear**. 2009. Disponível em: https://www.blogs.unicamp.br/massacritica/2009/07/07/primeira_usina_nuclear/. Acesso em: 7 junho 2022

SEGERSTAHL, Boris. **Chernobyl: A Policy Response Study**. Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA). Springer Series on Environmental Management. Springer-Verlag. Laxemburgo, Austria. 1991.

SILVA, Márcio Henrique da, LEGEY, Ana Paula, A. C. A., MÓL. **Virtual Reality at Nuclear Issues: A Review Study**. International Nuclear Atomic Conference (INAC). Instituto de Energia Nuclear. São Paulo, 2015.

SKILL LYNC. 1 Vídeo (4min50s). **Gas cooled Nuclear Reactors**. Publicado pelo canal Skill Lync, Departamento de Energia dos Estados Unidos, 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=UniaC81Sq54&t=64s>. Acesso em: 13 junho 2022.

UCRÂNIA. State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine. Chornobyl Nuclear Power Plant. **History of the ChNPP: Construction and Operation**. 2022. Disponível em:

<https://chnpp.gov.ua/en/about/history-of-the-chnpp/chnpp-construction>. Acesso em: 30 junho 2022.

UNDECIDED WITH MATT FERRELL. 1 Vídeo (13min06s). **Small Modular Reactors Explained – Nuclear Power’s Future?**. Publicado pelo canal Undecided with Matt Ferrell, 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=cbrT3m89Y3M>. Acesso em: 14 Agosto 2022.

VEIGA, José Eli da. **Energia nuclear: do anátema ao diálogo**. São Paulo: Editora Senac, 2017. Disponível em: <http://www.senaceditoradigital.com.br/capes/#epub/users/156145>. Acesso em: 12 maio 2022.

WEIRD HISTORY. 1 Vídeo (10min50s). **Everything That Went Wrong on 3-Mile Island**. Publicado pelo canal Weird History, 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=0AI9swb3OWs>. Acesso em: 25 junho 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Chernobyl Accident 1986**. 2022b. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx>. Acesso em: 30 junho 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Nuclear Power in the World Today**. 2022a. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>. Acesso em: 12 maio 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **RBMK Reactors – Appendix to Nuclear Power Reactors**. 2022c. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbmk-reactors.aspx>. Acesso em: 13 julho 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **What is nuclear waste and what do we do with it?**. Disponível em: <https://world-nuclear.org/nuclear-essentials/what-is-nuclear-waste-and-what-do-we-do-with-it.aspx>. Acesso em: 25 junho 2022.