



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES E HUMANIDADES
GRADUAÇÃO EM LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

REATORES NUCLEARES E O ACIDENTE DE CHERNOBYL

EMERSON MENDES MOREIRA

GOIÂNIA – GOIÁS

2025

EMERSON MENDES MOREIRA

REATORES NUCLEARES E O ACIDENTE DE CHERNOBYL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Licenciatura Plena
em Física da Pontifícia Universidade
Católica de Goiás, como requisito parcial
para a obtenção do grau de Licenciado em
Física.

Orientador: Prof. Dr. Clóves Gonçalves
Rodrigues

GOIÂNIA – GOIÁS

2025

EMERSON MENDES MOREIRA

REATORES NUCLEARES E O ACIDENTE DE CHERNOBYL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Formação de Professores e Humanidades
da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como
parte dos requisitos para a obtenção do título de
Licenciatura Plena em Física.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Clóves Gonçalves Rodrigues
Orientador

Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Prof. Me. Clebes André da Silva
Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Prof. Dr. Anderson Costa da Silva
Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Goiânia - GO

2025

Dedico este trabalho a todas as pessoas que não desistiram, que não se deram por vencidas. As pessoas que contrariaram as estatísticas e venceram as perspectivas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me concedido essa oportunidade. Não me imaginava retomando meus estudos tão cedo, muito menos conseguir me formar.

A minha mãe que sempre insistiu para meu retorno a uma universidade. Sem suas cobranças, com toda certeza, eu não teria chegado aqui.

A PUC e seus colaboradores que me ajudaram nessa caminhada.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo apresentar uma análise abrangente sobre os reatores nucleares, abordando desde os fundamentos da estrutura atômica e os princípios da fissão nuclear até os avanços tecnológicos mais recentes na área. Inicialmente, são explorados os componentes e tipos de reatores, com destaque para os modelos PWR, BWR, GCR, AGR, HTGCR, HWR e FBR, evidenciando suas características operacionais, aplicações e implicações energéticas.

Palavras-chave: energia nuclear, reatores nucleares.

SUMÁRIO

Introdução.....	9
Capítulo1 – Reatores nucleares.....	11
Capítulo 2 – O acidente de Chernobyl	23
Capítulo 3 – Reatores modernos, protótipos e reatores de fusão	47
Conclusão.....	64
Bibliografia.....	66

Introdução

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise abrangente sobre os reatores nucleares, abordando desde os fundamentos da estrutura atômica e os princípios da fissão nuclear até os diferentes tipos de reatores existentes, suas aplicações e os avanços tecnológicos mais recentes. A investigação inclui uma revisão detalhada dos principais modelos de reatores nucleares, como os tipos PWR, BWR, GCR, AGR, HTGCR, HWR e FBR, destacando suas características operacionais, vantagens e limitações.

Além disso, o estudo dedica atenção especial ao acidente de Chernobyl, ocorrido em 1986, considerado o mais grave da história da energia nuclear. A análise desse evento permite compreender os riscos associados à operação de reatores, os impactos ambientais e humanos decorrentes da liberação de material radioativo, bem como as consequências políticas e científicas que influenciaram o desenvolvimento da tecnologia nuclear nas décadas seguintes.

O trabalho também explora os reatores modernos de terceira e quarta geração, os pequenos reatores modulares e os projetos de fusão nuclear, que representam o futuro da energia nuclear.

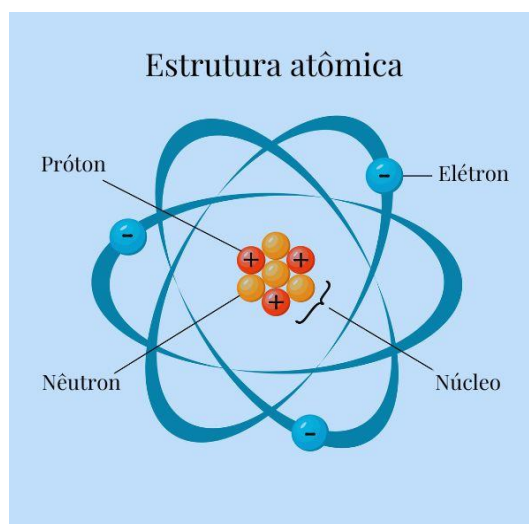
Capítulo 1

Reatores Nucleares

1.1 Introdução

Para entendermos como funciona um reator nuclear, primeiro deve-se compreender como funciona a matéria, ou seja, os átomos e suas propriedades. O átomo é a partícula fundamental que compõe a matéria. Sua estrutura pode ser dividida em duas partes, um núcleo positivo, formado por prótons e nêutrons. O próton tem carga positiva e o nêutron não possui carga, e a eletrosfera é a região periférica onde ficam os elétrons, que possuem carga negativa (NOVAIS, 2025).

Figura 1.1: Modelo atômico de Rutherford, 1911.



Fonte: <https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/quimica/o-que-e-atomo.htm>

Todo átomo é identificado pelo seu número atômico, que é a quantidade de prótons que o seu núcleo possui. O número atômico é representado pela letra "Z". A massa dos elétrons é indiferente quando se trata de massa atômica, pois ela é aproximadamente 1836 vezes menor que a massa dos prótons e nêutrons, os quais são as partículas que determinam a massa atômica. A massa atômica é representada pela letra "A". Todo átomo é neutro, isto é, para toda carga positiva há sempre uma carga negativa, ou seja, o número de prótons é sempre igual o número de elétrons. (NOVAIS, 2025).

1.2 O que é um reator nuclear?

O reator nuclear é o responsável pela produção e pelo controle da liberação de energia proveniente da divisão (fissão) de determinados átomos (CW Forsberg e col., 2003).

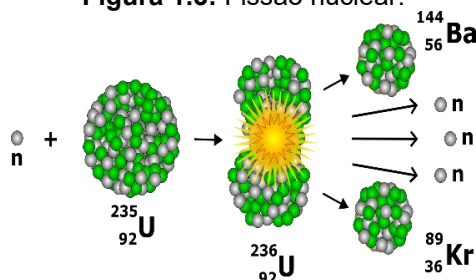
Figura 1.2: Sala do reator de uma das unidades RBMK.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_Nuclear_de_Leningrado

A fissão nuclear é o processo no qual o núcleo de um átomo se divide em dois ou mais núcleos menores com possível emissão de partículas e liberação de energia. Essas partículas podem incluir nêutrons, partículas alfas (núcleos de hélio), partículas beta (elétrons) e raios gama (fótons) (FISSÃO..., 2018). A Fissão ocorre quando o núcleo é bombardeado com nêutrons. Nesse processo é comumente usado o Urânio-235 por se tratar de um átomo com o núcleo pesado e consequentemente mais instável.

Figura 1.3: Fissão nuclear.

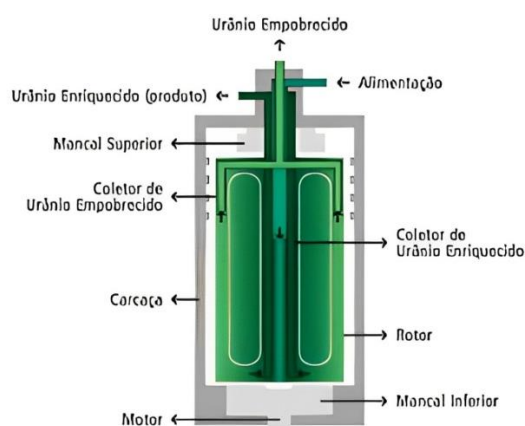


Fonte: <https://www.professordequimica.com.br/imagens/conteudo/fissao-nuclear.png>

Nesse processo é comumente usado o Urânio-235 por se tratar de um átomo com o núcleo pesado. Sua concentração é de aproximadamente 0,7% do urânio natural. Essa separação é feita em ultracentrífugas.

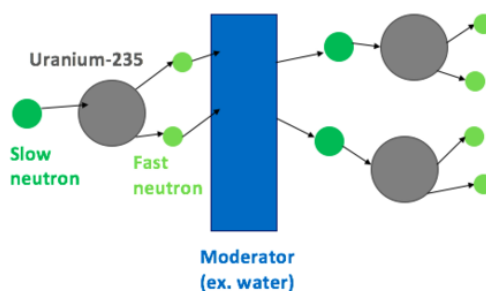
Figura 1.4: Urânio natural.

Fonte: <https://i0.wp.com/energiainteligenteufff.com.br/wp-content/uploads/2025/06/image-19.png?w=321&ssl=1>

Figura 1.5: centrífuga rotativa.

Fonte: https://i0.wp.com/energiainteligenteufff.com.br/wp-content/uploads/2025/07/imagem_2025-07-01_233455948.jpg?resize=1024%2C821&ssl=1

Um componente essencial nos reatores nucleares são os moderadores. O moderador possui a função de reduzir a velocidade dos nêutrons, transformando-os nos chamados “nêutrons térmicos”. Dessa forma, fica mais fácil produzir novas fissões. Materiais comumente usados como moderadores são: água leve (H_2O), água pesada (D_2O), grafite e berílio (Nêutron moderator, 2024).

Figura 1.6: moderador de nêutrons.

Fonte: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Neutron_moderator

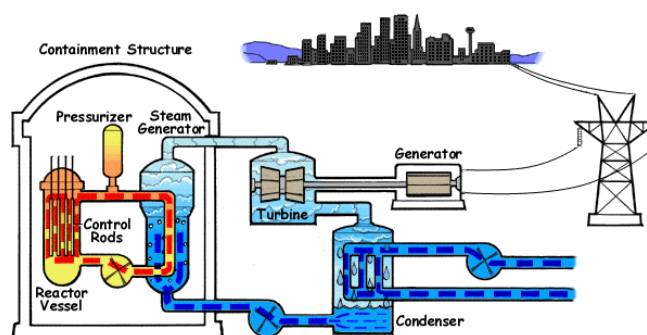
Em um reator nuclear é necessário também um “refrigerante”. O refrigerante é um fluido responsável por remover o calor gerado pela fissão no núcleo do reator e transportá-lo para fora do núcleo, geralmente para um gerador de vapor ou diretamente para uma turbina. Os requisitos do refrigerante nuclear são: a) fraca absorção de nêutrons, com o objetivo de reduzir a energia térmica, mas não reduzir a potência do reator; b) resistente a altas doses de radiação; c) alto calor específico; d) baixa pressão de trabalho em altas temperaturas (REF. NUCLEAR EM..., 2021). Os mais usados são: água leve (H_2O), água pesada (D_2O), dióxido de carbono (CO_2) e hélio, e sais fundidos.

1.3 Tipos de reatores

1.3.1 Reator de água pressurizada (PWR)

O Reator de Água Pressurizada é usualmente chamado de PWR, que provém da sigla em inglês para *Pressurized Water Reactor*. O PWR é um reator térmico nos quais são mais eficientes os nêutrons térmicos. É o tipo de reator nuclear mais utilizado do mundo (LOPES, 2011). Reatores tipo PWR foram desenvolvidos principalmente por França, Alemanha, Japão e Estados Unidos.

Figura 1.7: Reator de água pressurizada (PWR).



Fonte: <https://pt.energia-nuclear.net/usinas-nucleares/reator-nuclear/tipos/reator-de-agua-fervente>

Figura 1.8: Área onde estão as turbinas e o gerador de Angra 2.

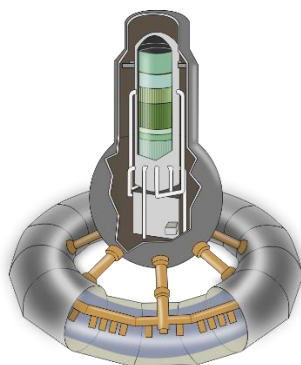


Fonte: <https://www.gazetadopovo.com.br/energia/angra-2-como-funciona-maior-usina-nuclear-pais/>.

1.3.2 Reator de Água Fervente (BWR)

O reator do tipo água fervente BWR (Boiling Water Reactor) é uma das principais tecnologias empregadas na geração de energia elétrica por meio de reações nucleares. Ele é amplamente utilizado comercialmente, ao lado do reator de água pressurizada (PWR), com o qual divide protagonismo na geração termoeletrônica nuclear (LAMARSH; BARATTA, 2001).

Figura 1.9: Modelo de reator de água fervente (BWR).



Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuclear_BWR_Boiling_Water_Reactor_Mark_1.svg

1.3.3 Reator de grafite a gás urânio natural (GCR)

O reator natural de urânio-gás-grafite utiliza como combustível urânio natural na forma metálica. O combustível é introduzido em tubos feitos de uma liga de

magnésio chamada magnox. O moderador de nêutrons usado é o grafite. O refrigerador térmico é a gás, especificamente dióxido de carbono (CO_2). Sua sigla em português significa Reator Refrigerado a Gás que em inglês é GCR (Gas-Cooled Reactor).

Figura 1.10: Reator GCR Vista externa da usina nuclear de Saint-Laurent, na França.

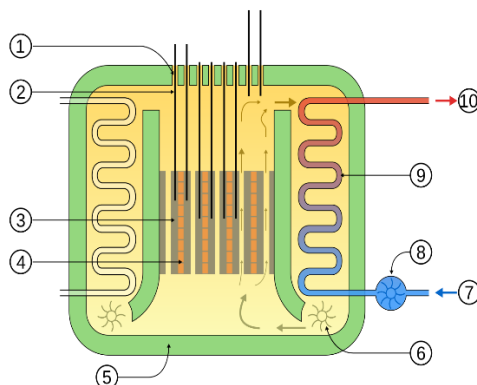


Fonte: <https://pt.energia-nuclear.net/acidentes-nucleares/acidente-nuclear-saint-laurent-des-eaux-franca>

1.3.4 Reator de gás avançado (AGR)

O Reator de Gás Avançado (AGR, Advanced Gas-cooled Reactor) representa uma versão aprimorada dos reatores de grafite moderado e gás refrigerado (GCR), tendo seu desenvolvimento concentrado principalmente no Reino Unido. Este reator utiliza como combustível dióxido de urânio enriquecido levemente, com teor de U-235 entre 2,5% e 3,5%, o que possibilita uma utilização mais eficaz do combustível em comparação com aqueles que empregam urânio natural (PLANAS, 2021). O grafite funciona como moderador, desacelerando os nêutrons rápidos, enquanto o dióxido de carbono (CO_2), atuando como refrigerante em alta pressão, retira o calor gerado pela fissão e o transfere para geradores de vapor externos ao núcleo (LAMARSH; BARATTA, 2001).

Figura 1.11: Esquema simplificado do Reator de Gás Avançado (AGR): 1. Tubos de carga; 2. Hastes de controle; 3. Moderador de grafite; 4. Feixe de combustível; 5. Tanque de pressão de concreto/escudo de radiação; 6. Circulador de gás; 7. Água; 8. Circulador de água; 9. Trocador de calor; 10. Vapor.



Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AGR_reactor_schematic.svg

1.3.5 Reator refrigerado a gás de temperatura elevada (HTGCR)

O reator nuclear refrigerado a gás de temperatura elevada (HTGCR, High-Temperature Gas-Cooled Reactor) é uma nova evolução dos reatores nucleares refrigerados a gás. As diferenças em relação ao reator de gás nuclear avançado (AGR) são principalmente três: 1) o hélio é substituído por dióxido de carbono como refrigerante, 2) combustível cerâmico é usado em vez de combustível metálico, e 3) as temperaturas do gás com o qual trabalha são muito mais altas.

Figura 1.12: Usina de Shidaowan com Reator HTGCR de Quarta Geração.



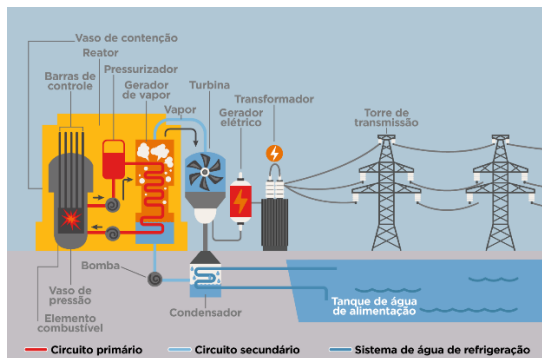
Fonte: <https://noticiabrasil.net.br/20231206/china-anuncia-inicio-de-operacao-do-1-reator-nuclear-de-4-geracao-do-mundo-fotos-31874264.html>

1.3.6 Reator de Água Pesada (HWR)

Os reatores nucleares que utilizam água pesada como moderador, conhecidos como HWR (Heavy Water Reactor), operam com urânio natural como combustível, dispensando o processo de enriquecimento normalmente exigido em

outras tecnologias, como os reatores do tipo PWR, o que reduz custos operacionais (INTERNATIONAL ATOMIC..., 2001).

Figura 1.13: Esquema de um reator nuclear HWR, com destaque para os circuitos primário, secundário e sistema de refrigeração.



Fonte: <https://cbie.com.br/energia-nuclear/>

1.3.7 Reator Reprodutor Rápido (FBR)

A principal característica dos reatores rápidos (FBR) (Fast Breeder Reactor) é que eles não utilizam moderador de nêutrons e, portanto, a maioria das fissões nucleares é produzida por nêutrons rápidos. O núcleo deste tipo de reator nuclear consiste numa zona físsil, rodeada por uma zona fértil na qual o urânio natural é transformado em plutônio. O ciclo do urânio 233-tório também pode ser usado. O refrigerante é o sódio líquido, e o vapor é produzido em trocadores de calor (PLANAS, 2021).

Figura 1.14: Vista interna de uma usina nuclear do tipo FBR, destacando o gerador principal (em laranja) e o complexo sistema de tubulações que conduzem vapor das turbinas, essenciais para a conversão de energia térmica em elétrica.



Fonte: <https://u-238.com.ar/reactor-ruso-bn-800-premiado-la-mejor-central-nuclear-2016/>

1.4 Outras formas de classificação de reatores

Os reatores nucleares podem ser classificados de acordo com diferentes critérios. Um dos critérios é a finalidade para a qual serão utilizados. Neste sentido distinguimos as seguintes finalidades: 1) Civil: geração de eletricidade, medicina nuclear, usos industriais etc; 2) Militar: criação de armas militares ou como sistema de propulsão para veículos de guerra (submarinos, navios, etc.); 3) Pesquisa: Reatores de pesquisa nuclear são utilizados para desenvolver tecnologias de energia nuclear em diversas áreas, tanto civis quanto militares (PLANAS, 2021).

1.5 Para que servem os reatores nucleares?

Os reatores nucleares são utilizados, principalmente, para a geração de energia elétrica. Neles, o calor produzido pela fissão nuclear é usado para aquecer água e gerar vapor, que aciona turbinas acopladas a geradores elétricos. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2023).

Capítulo 2

O acidente de Chernobyl

2.1 Introdução

A Usina Nuclear de Chernobyl estava localizada nas proximidades da cidade de Pripyat, cerca de 130 km ao norte de Kiev, na Ucrânia, e aproximadamente 20 km ao sul da fronteira com a Bielorrússia (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2023).

Figura 2.1: Localização do complexo nuclear de Chernobyl.



Fonte: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_28276/the-site-of-the-chnobyl-nuclear-power-complex-modified-from-ia91

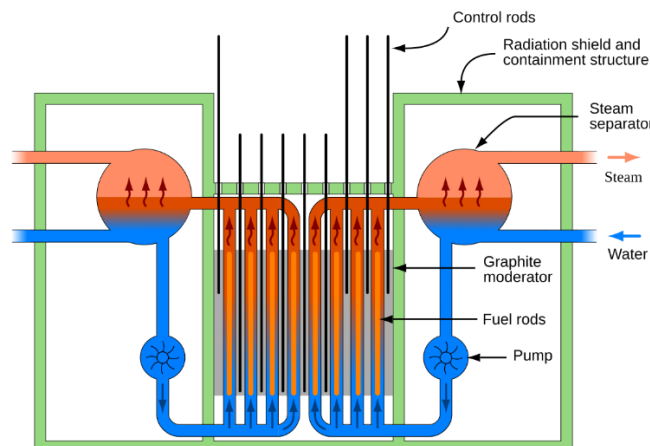
As unidades 1 e 2 foram construídas entre 1970 e 1977, enquanto as unidades 3 e 4 foram finalizadas em 1983. A área onde se localizava a usina de Chernobyl era coberta por florestas típicas da Bielorrússia e apresentava baixa densidade populacional. Pripjat, cidade planejada para abrigar os trabalhadores da usina, ficava a cerca de 3 km do reator e possuía aproximadamente 49 mil habitantes. Já a cidade de Chernobyl, mais antiga, situava-se a aproximadamente 15 km ao sudeste do complexo, com uma população de 12.500 habitantes.

2.2 Características do reator de Chernobyl (RBMK)

O RBMK-1000 é um reator soviético do tipo tubo de pressão, moderado por grafite e projetado para operar com dióxido de urânio levemente enriquecido, contendo cerca de 2% de U-235.

O combustível, contido em tubos de zircônio dispostos verticalmente, é atravessado pelo fluxo da água de resfriamento. Um sistema especial permite a substituição dos feixes de combustível com o reator ainda em funcionamento (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2023).

Figura 2.2: Esquema básico de um reator RBMK.



Fonte: https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:RBMK_reactor_schematic.svg

O reator de Chernobyl possuía um núcleo de grafite que funcionava como moderador, desacelerando os nêutrons para tornar a fissão mais eficiente. Uma mistura de nitrogênio e hélio circulava entre os blocos de grafite para evitar a oxidação e melhorar a transferência de calor para os canais de combustível. A potência do reator era controlada por 211 barras de controle e quatro bombas principais de circulação de refrigerante, garantindo segurança e estabilidade no funcionamento. O reator produzia 3.200 MWt ou 1.000 MWe, com versões maiores capazes de gerar até 1.500 MWe, e incluía diversos sistemas de segurança, como resfriamento de emergência e exigência mínima de inserção de barras de controle (OECD NEA, 2002).

O combustível é composto por pastilhas de óxido de urânio com baixo enriquecimento, que são colocadas dentro de tubos de zircaloy com 3,65 m de comprimento, formando as barras de combustível (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

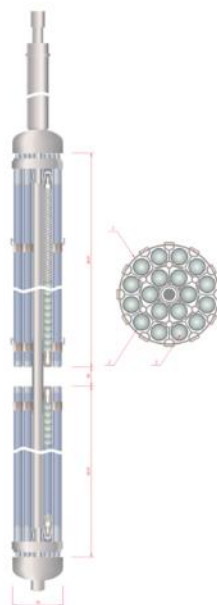
Figura 2.3: Pastilhas de dióxido de urânio usadas em reator nuclear.



Fonte: <https://www.naval.com.br/blog/wp-content/uploads/2018/04/pastillas-de-uranio-1024x627.jpg>

Quando os canais de combustível são isolados, os conjuntos de combustível podem ser levantados para dentro e para fora do reator, permitindo o reabastecimento de combustível enquanto o reator estiver em operação. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

Figura 2.4: Suporte de barra de combustível do reator RBMK.



Fonte: https://www.wikiwand.com/en/articles/RBMK#/media/File:Rbm_k_fuel_rods_holder.png

Os blocos de grafite envolvem os tubos e atuam como moderadores, reduzindo a velocidade dos nêutrons liberados na fissão para garantir a continuidade da reação em cadeia (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

Figura 2.5: Bloco de grafite de Chernobyl de dentro do reator RBMK com versão fragmentada.



Fonte: <https://www.printables.com/model/67295-chernobyl-graphite-block-set-rbm-k-reactor?lang=it>

Como refrigerante, dois circuitos de refrigeração com quatro bombas cada circulam água pelos tubos de pressão para retirar o calor da fissão. Há ainda um sistema de resfriamento de emergência que entra em ação se haver falha em algum dos circuitos. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

O RBMK apresenta coeficiente de vazio positivo, ou seja, quando há formação de vapor no núcleo (reduzindo a presença de água, que absorve nêutrons) a reatividade do reator aumenta.

Em contraste, reatores com coeficiente de vazio negativo, comuns no ocidente como o PWR e o BWR, diminuem sua reatividade em situações similares, tornando o projeto mais seguro.

No RBMK, a água não moderava, apenas absorvia nêutrons, então sua ausência deixava mais nêutrons disponíveis, aumentando a reação nuclear e contribuindo para o descontrole do reator. (ENERGY EDUCATION, 2022).

O reator não possui um sistema de contenção considerado seguro pelos padrões ocidentais. O núcleo fica em uma cavidade revestida de concreto armado, que funciona como proteção contra radiação. Ele repousa sobre uma pesada placa de aço, com uma cobertura superior de cerca de 1.000 toneladas. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

2.3 A sequência do acidente

2.3.1 Preparação do teste

Em 25 de abril de 1986, estava programado o desligamento da Unidade 4 para manutenção de rotina. Aproveitando essa parada, decidiu-se realizar um teste para verificar se, no caso de falha no fornecimento de energia da usina, a energia gerada pela turbina em processo de desaceleração seria suficiente para manter em funcionamento os sistemas de emergência e as bombas responsáveis pelo resfriamento do núcleo, até que os geradores a diesel de reserva fossem ativados. (OECD NEA, 2002).

O plano do teste incluía desligar o sistema de resfriamento de emergência do núcleo, responsável por injetar água em situações críticas para manter o reator resfriado.

Figura 2.6: Sala de controle dos reatores de Chernobyl.



Fonte: https://vermelho.org.br/wp-content/uploads/2019/10/sala_controle_tchernobyl93655.jpg

2.3.2 Operação e primeiros erros

Durante o processo de desligamento, o reator foi mantido em cerca de 50% da potência, já que o operador da rede elétrica recusou uma nova redução devido à demanda de energia. Aproximadamente uma hora depois, o ECCS foi efetivamente desligado, enquanto o reator seguia nessa condição. Apenas por volta das 23 horas do dia 25 de abril houve autorização do controlador da rede para prosseguir com a diminuição da potência. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

O desligamento do ECCS, mesmo que temporário, deixou o reator vulnerável a qualquer instabilidade, já que a redundância de segurança foi desativada de forma deliberada. (OECD NEA, 2002).

Para a realização do teste, o reator deveria ter sido estabilizado em torno de 1.000 MWt antes do desligamento. No entanto, devido a um erro de operação, a

potência caiu para cerca de 30 MWt, ponto em que o coeficiente de vazio positivo passou a predominar. Na tentativa de recuperar a potência para a faixa de 700 a 1.000 MWt, os operadores desligaram os sistemas automáticos de regulação e retiraram manualmente todas as barras de controle. Apenas por volta da 1 hora do dia 26 de abril o reator foi estabilizado em aproximadamente 200 MWt. (OECD NEA, 2002).

A operação manual em uma condição de baixa potência acentuou a instabilidade do RBMK, pois o comportamento do xenônio-135 e o coeficiente de vazio positivo amplificaram os riscos de perda de controle da reatividade. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

2.3.3 Condições críticas do reator

Segundo as normas operacionais, era necessário manter ao menos 30 barras de controle para garantir a segurança do reator. Porém, durante o teste, foram utilizadas somente entre 6 e 8 barras. A maioria havia sido removida para compensar o envenenamento por xenônio, que absorvia nêutrons e reduzia a potência.

O Xe-135 é um produto de fissão com alta capacidade de absorver nêutrons térmicos, tornando-se um "veneno de reator". Ele se acumula quando a potência do reator está baixa, reduzindo a reatividade e dificultando a manutenção da potência desejada. Isso implicava que, em caso de súbito aumento de energia, seriam necessários cerca de 20 segundos para reintroduzir as barras e desligar o reator. Mesmo assim, optou-se por seguir com o experimento. (OECD NEA, 2002).

A combinação de baixo número de barras de controle e alta concentração de xenônio configurava uma condição de risco extremo, ignorada pela equipe de operação devido à pressão de superiores para concluir o teste. (CHERNOBYL GALLERY, 2025).

2.3.4 Execução do teste

Quando as bombas de circulação principais foram desligadas para iniciar o experimento, o fluxo reduzido de refrigerante resultou imediatamente em um

aumento na potência. Isso foi reconhecido como perigoso e o desligamento do reator foi iniciado manualmente. (BASE, 2025).

A redução no fluxo de água intensificou o efeito do coeficiente de vazio positivo, criando uma situação em que qualquer tentativa de controle era atrasada em relação ao crescimento da potência. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

O SCRAM (Safety Control Rod Axe Man), botão de desligamento rápido de um reator nuclear, foi acionado com o pressionamento do botão de emergência EPS-5 (AZ-5), que inseriu todas as barras de controle no núcleo. Após o acionamento do EPS-5, as hastes de controle começaram a se inserir lentamente, mas devido às pontas serem feitas de grafite aumentou a reatividade na parte inferior do núcleo. Isso gerou um pico súbito de energia, causando superaquecimento, ruptura de barras de combustível e bloqueio das hastes, levando a uma explosão em poucos segundos. (CHERNOBYL GALLERY, 2025).

2.3.5 Explosão e consequências imediatas

Pelo menos duas explosões destruíram os escudos de segurança e o telhado do prédio do reator e lançaram o estoque do reator na área circundante. O grafite no núcleo do reator pegou fogo, resultando na liberação de material radioativo na atmosfera. (BASE, 2025).

A análise posterior identificou que a primeira explosão teve origem físico-mecânica (ruptura de tubos e liberação de vapor), enquanto a segunda envolveu reações químicas associadas ao hidrogênio e ao incêndio do grafite. (OECD NEA, 2002).

2.4 A explosão e o que ocorreu fisicamente

2.4.1 Dinâmica inicial da explosão

Um dos problemas mais graves estava relacionado ao design das barras de controle, responsáveis por reduzir a reação nuclear. No reator RBMK, cada barra possuía uma extremidade inferior de grafite, que era cerca de 1,3 metros mais curta do que o ideal, deixando um espaço preenchido por água logo abaixo.

A seção superior, de fato responsável por absorver nêutrons e interromper a reação, era composta de carboneto de boro. Com essa configuração, ao serem

inseridas a partir da posição totalmente elevada, as pontas de grafite deslocavam inicialmente a água (que atuava como absorvedora de nêutrons) diminuindo temporariamente essa absorção. Como consequência, nos primeiros instantes após a ativação das barras, a potência do reator aumentava em vez de diminuir, comportamento inesperado e desconhecido pelos operadores. (CHERNOBYL GALLERY, 2025).

Após o acionamento do botão AZ-5, todos os absorvedores de regulação manual e todos os absorvedores de emergência começaram a se mover para dentro do núcleo. Antes do acionamento do botão AZ-5, o comprimento total de todos os elementos absorvedores presentes no núcleo era de aproximadamente entre 6 e 8 hastes de inserção total.

Ao mover todos esses absorvedores para baixo, as colunas de água sob os deslocadores de grafite foram deslocadas para fora do núcleo. Isso causou a entrada da reatividade positiva na parte inferior do núcleo. (Sternberg, 1992).

Às 01h 23min 43s, os sistemas de proteção de emergência foram acionados quando a potência ultrapassou os 530 MWt, continuando a crescer. A ruptura dos elementos combustíveis intensificou a geração de vapor, o que, associado ao elevado coeficiente de vazio positivo do reator, aumentou ainda mais a potência.

A falha de apenas três ou quatro conjuntos de combustível já teria sido suficiente para comprometer totalmente a integridade do núcleo. A pressão crescente resultante da ruptura de diversos canais de combustível deslocou a placa de suporte do reator, com aproximadamente 1.000 toneladas, o que bloqueou o movimento completo das hastes de controle, que estavam apenas parcialmente inseridas. Com a ruptura das tubulações dos canais, houve despressurização do sistema de resfriamento, ocasionando grande liberação de vapor.

Registros operacionais indicam que, às 01h 24min, fortes vibrações foram detectadas e as hastes de controle pararam antes de atingirem a posição final, devido ao desligamento automático do sistema de acionamento.

Quando o SCRAM foi acionado, a potência do reator subiu rapidamente para aproximadamente 30 mil MWt, valor dez vezes superior à sua capacidade normal, embora algumas estimativas apontassem que o pico real tenha sido dez vezes maior. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

2.4.2 Primeira explosão (vapor)

Após os eventos iniciais, acredita-se que tenha ocorrido uma explosão de vapor semelhante à ruptura de uma caldeira sob pressão excessiva. O vapor proveniente dos canais danificados teria alcançado a estrutura interna do reator, resultando na ruptura da tampa superior, uma placa metálica de aproximadamente 2.000 toneladas que sustentava todo o conjunto do núcleo.

Esse foi o primeiro impacto percebido por muitos. A explosão também comprometeu outros canais de combustível, levando à completa vaporização do refrigerante remanescente e à sua liberação para fora do núcleo. A perda total de água agravou a instabilidade do sistema, favorecendo a sequência de eventos que culminariam na segunda explosão. (CHERNOBYL GALLERY, 2025; IAEA, 1992).

2.4.3 Segunda explosão (química/nuclear secundária)

Poucos segundos após a primeira explosão de vapor, ocorreu uma segunda explosão, ainda mais intensa, que teve origem no próprio núcleo do reator (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022). Esse evento resultou na dispersão do combustível, do grafite moderador e de outros materiais estruturais, expondo o núcleo diretamente à atmosfera (CHERNOBYL GALLERY, 2025; WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

A intensidade da explosão e a subsequente combustão do grafite contribuíram significativamente para a propagação de material radioativo e para a contaminação das áreas vizinhas (CHERNOBYL GALLERY, 2025).

Relatos indicam que, durante essas explosões, pelo menos dois trabalhadores perderam a vida, um no local e outro posteriormente no hospital (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

A causa provável dessa segunda explosão está associada ao acúmulo de hidrogênio, formado pela reação do vapor com o zircônio presente nos elementos combustíveis, embora a instabilidade do núcleo tenha amplificado a liberação de energia (CHERNOBYL GALLERY, 2025).

2.4.4 Incêndio do grafite

O incêndio no moderador de grafite representou um desafio particular, já que havia pouca experiência, tanto nacional quanto internacional, em lidar com esse tipo

de situação. Temia-se que os esforços para o extinguir pudessem intensificar a dispersão de radionuclídeos, seja pela geração de vapor, seja até mesmo pela possibilidade de desencadear uma nova excursão de criticidade no combustível nuclear. (OECD NEA, 2002).

A radiação emitida pelo reator danificado era composta principalmente por produtos de fissão, entre os quais se destacavam o iodo-131, o cézio-134 e o cézio-137. Embora o iodo-131 possua uma meia-vida curta, de aproximadamente oito dias conforme relatado pela UNSCEAR, ele é facilmente absorvido pelo organismo por meio da respiração e tende a se acumular na glândula tireoide. (LALLANILLA, 2023).

Outros elementos radioativos como o xenônio-133 e o telúrio-132, também foram liberados no acidente, mas seus efeitos cessaram rapidamente devido à meia-vida relativamente breve (5 dias e 78 horas, respectivamente). O maior problema foi o cézio-137, cuja meia-vida leva mais de 30 anos. A precipitação do pó de cézio-137 na atmosfera tornou a região de Chernobyl inabitável por um tempo que varia entre 3.000 e 20.000 anos. (BRASIL ESCOLA, 2025).

2.5 Impactos Imediatos

2.5.1 Dispersão Radioativa e Contaminação Ambiental

A explosão gerou uma coluna de fumaça misturada a produtos de fissão radioativa e fragmentos do núcleo e da própria estrutura, que atingiu aproximadamente 1 km de altura. Enquanto os detritos mais pesados se acumularam próximos ao reator, as partículas mais leves (entre elas produtos de fissão e quase todos os gases nobres) foram levadas pelo vento predominante em direção ao noroeste da usina. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

Dados da ONU explicam que, essa nuvem radioativa se espalhou por grande parte do que foi a União Soviética, hoje territórios da Belarus, Ucrânia e Rússia, deixando cerca de 8,4 milhões de pessoas expostas. (NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL, 2023).

O desastre de Chernobyl resultou na liberação de aproximadamente 100 MCi (megaCuries), equivalentes a $4,1 \times 10^{18}$ becquerels, sendo cerca de 2,5 MCi provenientes do Césio-137, considerado o mais grave acidente radioativo da história. O becquerel é a unidade que expressa a taxa de desintegração nuclear, isto

permanecendo sujeitos a riscos de efeitos tardios, como câncer e outras doenças, sendo sua saúde monitorada de forma contínua. (UNSCEAR, 2008).

2.5.3 Medidas Emergenciais

A evacuação dos 43.000 moradores de Pripjat levou 3 horas e meia. Os moradores de Pripjat foram solicitados a levar consigo apenas o necessário para dois ou três dias: comida, uma muda de roupa e documentos de identificação. (CHERNOBYL GALLERY, 2025).

Em 28 de abril, começou uma grande operação de contenção do acidente, que consistiu no lançamento de diferentes materiais para combater o incêndio e reduzir a liberação de radiação.

As primeiras ações incluíram a deposição de compostos absorvedores de nêutrons e materiais para controle do fogo na cratera formada pela explosão do reator. Ao todo, cerca de 5.000 toneladas de materiais foram despejadas, incluindo aproximadamente 40 toneladas de carboneto de boro, 2.400 toneladas de chumbo, 1.800 toneladas de areia e argila e 800 toneladas de dolomita, por meio de cerca de 1.800 voos de helicóptero sobre o local do acidente. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022).

Figura 2.8: Helicóptero lançando areia, chumbo, argila e boro absorvedor de nêutrons.



Fonte: yaplakal.com

Foi feita uma cobertura de concreto "sarcófago" sobre o quarto reator. Ela foi construída para proteger o ambiente da radiação por pelo menos 30 anos. Foram

utilizadas 300.000 toneladas de concreto e 6.000 toneladas de estruturas metálicas. (CHERNOBYL GALLERY, 2025). A construção contou com a participação de 400 trabalhadores, mas a preocupação com possíveis novos vazamentos levou à necessidade de uma nova proteção, iniciada em 2002. Essa nova estrutura possui 110 metros de altura, 257 metros de largura e terá um custo total de 768 milhões de euros, financiados por um consórcio composto por 43 países doadores. (BEZERRA, 2025). O novo sarcófago de Chernobyl, conhecido como New Safe Confinement (NSC), foi construído a 300 metros de distância do local do acidente para minimizar a exposição dos trabalhadores à radiação. Após a conclusão da sua montagem, essa estrutura gigantesca foi então deslizada sobre trilhos para sua posição final, em 29 de novembro de 2016, encobrindo o antigo sarcófago e o reator danificado (BORYS, 2017).

Figura 2.9: Novo sarcófago de Chernobyl vai proteger o reator por mais 100 anos.



Fonte: <https://www.todamateria.com.br/acidente-de-chernobyl/>

Figura 2.10: Prédio abandonado em Pripyat.



Fonte: <https://brasilescola.uol.com.br/historia/chernobyl-acidente-nuclear.htm>

Figura 2.11: Floresta morta no local de Chernobyl, com uma placa amarela simbolizando a radioatividade no centro.



Fonte: <https://www.photocrowd.com/search/photos/chernobyl/>

2.6: Impactos ambientais e humanos a longo prazo

2.6.1 Impactos na saúde humana

O acidente de Chernobyl resultou em mortes imediatas, com riscos de mortalidade a longo prazo. Estima-se que aproximadamente 4.000 pessoas possam morrer em decorrência da exposição à radiação, incluindo cerca de 50 socorristas vítimas da síndrome aguda da radiação, nove crianças com câncer de tireoide e cerca de 3.940 mortes previstas por câncer e leucemia entre socorristas, evacuados e moradores das áreas mais contaminadas, totalizando cerca de 600.000 indivíduos expostos. (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2005).

Nas últimas décadas, estudos têm mostrado forte relação entre a exposição ao iodo radioativo liberado em Chernobyl e o desenvolvimento tardio de câncer de tireoide, principalmente em crianças e adolescentes que consumiram leite contaminado na Bielorrússia, Ucrânia e regiões da Rússia. Até 2005, mais de 6.000 casos foram identificados nesse grupo, sendo provável que muitos estejam ligados à ingestão de radioiodo. A tendência de aumento deve persistir por anos, embora sua magnitude futura seja difícil de prever. UNSCEAR (2008).

Figura 2.12: 'liquidadores' retiram escombros nos arredores da central de Chernobyl.



Fonte: https://brasil.elpais.com/brasil/2019/06/08/internacional/1560020430_159280.html

2.6.2 Contaminação por radionuclídeos

O acidente de Chernobyl resultou na contaminação de aproximadamente 125.000 km² de terras na Bielorrússia, Ucrânia e Rússia, com níveis de cézio-137 superiores a 37 kBq/m² e de estrôncio-90 superiores a 10 kBq/m². Essas áreas afetadas incluíam terras agrícolas, florestas e corpos d'água. Os radionuclídeos, como o cézio-137 e o estrôncio-90, foram absorvidos por plantas e animais, entrando na cadeia alimentar humana. Embora a migração desses elementos no solo seja geralmente lenta, fatores como tipo de solo, pH, precipitação e práticas agrícolas influenciam sua mobilidade e disponibilidade para as plantas. A zona de exclusão de 30 km ao redor da usina nuclear passou por melhorias significativas, em parte devido a processos naturais e em parte devido a medidas de descontaminação implementadas (OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, 2025). Nesse contexto, é importante lembrar que a radioatividade é medida em becquerel (Bq), unidade que corresponde a uma desintegração por segundo (NRC, 2025).

2.6.3 Impactos sociais

Mais de 350.000 pessoas foram realocadas das áreas mais gravemente contaminadas, 116.000 delas imediatamente após o acidente.

Segundo o relatório do Fórum sobre Saúde, o maior impacto do acidente de Chernobyl na área da saúde está relacionado ao aspecto psicológico. Populações das regiões afetadas apresentam percepções negativas sobre sua saúde e qualidade de vida, acompanhadas por uma preocupação excessiva quanto aos

efeitos da radiação e pela crença de que terão uma vida mais curta (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2005).

2.7 Consequências Políticas e Científicas

A Convenção sobre Assistência em Caso de Acidente Nuclear ou Emergência Radiológica, criada em 1986 após Chernobyl, definiu diretrizes de cooperação internacional para que os Estados prestem auxílio mútuo em situações de acidentes nucleares ou emergências radiológicas, incluindo a notificação à AIEA sobre especialistas, equipamentos e materiais disponíveis para resposta rápida (IAEA, 2025).

O desastre de Chernobyl contribuiu para a desaceleração do crescimento da energia nuclear, criando preocupações públicas exageradas que impactaram a expansão da indústria. Como consequência, as emissões globais de carbono seriam cerca de 6% menores se a energia nuclear tivesse continuado a se desenvolver no ritmo anterior ao acidente. Relatórios indicam que mais de 400 reatores entraram em operação nas três décadas anteriores a Chernobyl, enquanto menos de 200 foram construídos nos 30 anos seguintes, levando os países a dependerem mais de fontes fósseis como carvão e gás. (THE GUARDIAN, 2024).

2.8 Chernobyl na cultura e na ciência

2.8.1 Impactos políticos, sociais e científicos imediatos

O acidente de Chernobyl quebrou a percepção pública de extrema segurança da energia nuclear, transformando-a em uma "força terrível que é a energia nuclear fora de controle" (OLIVEIRA, 1986, p. 100).

A detecção de radioatividade em países europeus, como Suécia e Finlândia (OLIVEIRA, 1986, p. 7-9), e a evacuação em massa de 48.000 pessoas de Chernobyl e localidades próximas (OLIVEIRA, 1986, p. 96) revelaram a magnitude do perigo e geraram medo sobre as consequências carcinogênicas e teratogênicas a longo prazo (OLIVEIRA, 1986, p. 81).

O líder soviético da época, Mikhail Gorbatchev, também abordou o impacto geopolítico, criticando o uso do acidente por nações ocidentais para "colocar

obstáculos adicionais no caminho do desenvolvimento e intensificação do diálogo Leste-Oeste" e para "justificar a corrida as armas nucleares" (OLIVEIRA, 1986, p. 107-108).

Cientificamente, o evento expôs falhas de projeto, como a ausência do envoltório de contenção nos reatores RBMK, o que implicou que "grande parte do material radioativo fosse liberado para o exterior" em caso de perda das barreiras primárias (OLIVEIRA, 1986, p. 48-49). Também destacou a natureza única e complexa de acidentes que "não se reproduzem", dificultando seu gerenciamento pelos "gerentes" que se veem "diante de uma situação inédita" (OLIVEIRA, 1986, p. 6).

Houve uma mobilização massiva e cooperação científica e médica internacional para tratar as mais de 300 vítimas diretas, que incluiu a centralização do atendimento em Moscou, a convocação de 3 centenas de profissionais (OLIVEIRA, 1986, p. 71, 74) e a participação de uma equipe da Universidade da Califórnia coordenada pelo Dr. Robert Gale para transplantes de medula óssea (OLIVEIRA, 1986, p. 75-76).

2.8.2 Pesquisas científicas e educação radiológica

O acidente de Chernobyl estimulou uma vasta gama de estudos científicos e iniciativas educacionais. O Fórum de Chernobyl, estabelecido em 2003 pela AIEA com outras agências da ONU e países afetados, buscou criar "declarações consensuais e autorizadas" sobre as consequências ambientais e de saúde (UN CHERNOBYL FORUM EXPERT GROUP "ENVIRONMENT" (EGE), 2005, p. 113-115). Isso visou refinar avaliações científicas, identificar lacunas de pesquisa e sugerir trabalhos futuros, resultando em um consenso no sistema das Nações Unidas (UN CHERNOBYL FORUM EXPERT GROUP "ENVIRONMENT" (EGE), 2005, p. 113-114, 171).

2.8.3 Chernobyl na cultura popular global

O acidente de Chernobyl tem uma presença marcante na cultura popular global, amplamente popularizada pela minissérie "Chernobyl" da HBO (2019). (DATTA; NANDI, 2017, p. 58, 62, 65-66).

O desastre também é retratado em obras como o livro "Vozes de Chernobyl" de Svetlana Alexievich, que inspirou filmes e séries, e em produções cinematográficas pioneiras como "O Sino de Chernobyl" (1987), exibido mundialmente (VDOVYCHENKO, 2020, p. 121, 122-123).

Músicas, como o vídeo "Marooned" do Pink Floyd, e videogames, como STALKER e Call of Duty, também levam Pripyat e a usina ao conhecimento global, atraindo inclusive turistas (VDOVYCHENKO, 2020, p. 113, 125-127).

Figura 2.13: Livro 'vozes de Chernobyl'.



Fonte: <https://conhecertudoemais.blogspot.com/2020/04/especial-vozes-de-tchernobil-svetlana.html>

Capítulo 3

Reatores Modernos, Protótipos e Reatores de Fusão

3.1 Reatores de 3ª Geração e de 3ª+

Os reatores de terceira geração (Geração III) são uma evolução dos reatores de segunda geração (Geração II). Seu principal diferencial são os sistemas de segurança passiva, que não exigem controle ativo ou energia elétrica em caso de acidente, utilizando fenômenos naturais como gravidade para manter a segurança (ALI, 2022; GOLDBERG; ROSNER, 2011) e oferecendo um “período de graça” de até 72 horas sem intervenção ativa (ALI, 2022). Eles também possuem uma vida útil mais longa, de aproximadamente 60 anos (ALI, 2022; GOLDBERG; ROSNER, 2011).

Já os reatores de terceira geração avançada (Geração III+) são um desenvolvimento evolutivo dos Geração III, oferecendo melhorias ainda mais significativas na segurança (GOLDBERG; ROSNER, 2011). Eles aprimoram os sistemas de segurança passiva (GOLDBERG; ROSNER, 2011) e frequentemente incluem *core catchers* (dispositivo de segurança), para conter e resfriar material fundido em caso de colapso do núcleo (ALI, 2022).

Os reatores AP1000 da Westinghouse, o European Pressurized Reactor (EPR) e o VVER-1200 da Rússia são exemplos de reatores de terceira geração avançada (Geração III+). Mais especificamente, o AP1000 é um projeto Gen III+ baseado no AP600, mas com uma potência de saída aumentada. Já o European Pressurized Reactor (EPR) é um projeto Gen III+ que é um descendente evolutivo dos reatores Framatome N4 e Siemens Power Generation Division KONVOI. O VVER-1200/392M (do tipo AES-2006) é um exemplo de projeto de reator Gen III+. (GOLDBERG; ROSNER, 2011).

Figura 3.1: Reator chinês de terceira geração.



Fonte: <https://clickpetroleoegas.com.br/primeiro-reator-nuclear-de-3a-geracao-da-china-tem-capacidade-impressionante-e-pode-abastecer-milhoes-de-residencias/>

3.2 Pequenos Reatores Modulares (SMRs)

Os Pequenos Reatores Modulares são reatores nucleares avançados projetados para construção em série, que surgem como uma alternativa promissora para atender à demanda por eletricidade de baixo carbono, superando desafios como a segurança e o alto custo das usinas nucleares convencionais (RODRIGUES, 2023). O termo “SMR” é uma acrossemia do inglês “small modular reactors” que traduzido literalmente para o português é “reatores modulares pequenos”. (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2025).

Figura 3.2: Reator CAREM em construção, na Argentina.



Fonte: <https://www.argentina.gob.ar/cnea>

O modelo NuScale Power Module é um reator de água pressurizada integral (PWR) com 77 MWe por unidade. Foi o primeiro SMR a receber aprovação de design da Comissão Reguladora Nuclear dos EUA (NRC) em 2020. O projeto

Carbon-Free Power Project, no Laboratório Nacional de Idaho (INL), planeja a primeira unidade para 2029 (NUSCALE POWER CORPORATION, 2025).

Figura 3.3: Representação do NuScale Power Module



Fonte: <https://www.businesswire.com/news/home/20200829005009/pt>

Figura 3.4: Usina nuclear flutuante Akademik Lomonosov.



Fonte: <https://www.naval.com.br/blog/2018/04/30/russia-lanca-primeira-usina-nuclear-flutuante/>

3.3 Reatores de 4ª Geração

3.3.1 Contexto e objetivos

O Generation IV International Forum (GIF) é uma iniciativa internacional que busca desenvolver a próxima geração de tecnologia nuclear, com foco em superar as desvantagens e aprimorar as funcionalidades das usinas existentes.

O GIF foi concebido e iniciado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) no ano de 2000, com sua carta formal estabelecida em meados de 2001. O fórum é um coletivo internacional que reúne governos de 13 países que consideram a energia nuclear crucial e vital para o futuro.

Entre os membros fundadores originais do GIF estavam Argentina, Brasil, Canadá, França, Japão, Coreia do Sul, África do Sul, Reino Unido e Estados Unidos. Mais tarde, a Suíça, China, Rússia, Austrália e a União Europeia (por meio do programa de treinamento e pesquisa Euratom) juntaram-se ao grupo.

O principal objetivo do GIF é o compartilhamento de pesquisa e desenvolvimento, e não a construção direta dos reatores. Após aproximadamente dois anos de deliberação e revisão de cerca de cem conceitos, o fórum anunciou a seleção de seis tecnologias de reatores no final de 2002, que representam a forma futura da energia nuclear (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024).

Os sistemas de Quarta Geração foram selecionados por promoverem avanços críticos em sustentabilidade, economia, segurança, confiabilidade e resistência à proliferação (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024).

Os reatores de Quarta Geração são projetados para serem significativamente mais seguros do que as usinas nucleares atuais (CARVALHO, 2024). Uma meta central é que o projeto seja “intrinsecamente seguro”, ou seja, que acidentes graves não sejam possíveis (DUMÉ, 2022).

A Geração IV busca ser muito mais eficiente no uso de combustível do que as instalações atuais (DUMÉ, 2022). A maior eficiência é resultado da operação desses reatores em temperaturas muito mais elevadas, que podem variar de 510°C a 1000°C, em comparação com os reatores atuais que operam abaixo de 330°C (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024). Tais temperaturas elevadas permitem converter uma quantidade superior de calor em energia elétrica (REIS, 2025).

Os reatores são projetados para a destruição dos radio elementos de vida longa que são criados durante o funcionamento (DUMÉ, 2022). Os sistemas de Geração IV utilizam um ciclo de combustível fechado para maximizar a base de recursos e, ao mesmo tempo, minimizar os rejeitos de alto nível (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024). A maior eficiência na queima, possibilitada pelas altas temperaturas, permite um melhor aproveitamento do material nuclear e, conseqüentemente, a produção de uma quantidade menor de resíduos (REIS, 2025). Esses sistemas visam a reciclagem completa de actínídeos (GOLDBERG; ROSNER, 2025).

3.3.2. Reatores de Geração IV

As seis tecnologias selecionadas pelo Generation IV International Forum (GIF) representam o futuro da energia nuclear, com foco em avanços em segurança, sustentabilidade e eficiência (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024). Em geral, os sistemas Gen IV incluem a reciclagem completa de actínídeos e a capacidade de operar em temperaturas elevadas, o que permite a produção econômica de hidrogênio e o aproveitamento de calor para outros processos (GOLDBERG; ROSNER, 2025). A seguir são descritas com mais detalhes essas seis tecnologias.

1. Reator Rápido Refrigerado a Sódio (SFR)
2. Reator Rápido Refrigerado a Chumbo (LFR)
3. Reator de Alta Temperatura Refrigerado a Gás (HTGR) / Reator de Gás de Temperatura Muito Alta (VHTR)
4. Reator de Sal Fundido (MSR)
5. Reator Rápido Refrigerado a Gás (GFR)
6. Reator Supercrítico Refrigerado a Água (SCWR)

3.4 Reatores de Fusão Nuclear

A fusão nuclear é reconhecida como a fonte de energia do Universo (KAW; BANDYOPADHYAY, 2011), a qual é a fonte de energia das estrelas (MURARI, 2006). A humanidade tem tentado reproduzir esse processo na Terra de forma controlada, visando obter uma fonte de energia que seja limpa, poderosa e praticamente inesgotável (VARANDAS, 2011). O processo consiste na coalescência dos núcleos de dois átomos leves, como os isótopos do hidrogênio, para formar um núcleo maior e mais estável. A energia é libertada através da conversão de massa em energia (VARANDAS, 2011).

3.5 Avanços Recentes e Desafios da Fusão Controlada

A fusão nuclear controlada é um objetivo científico e tecnológico de longo prazo, sendo considerada por muitos uma fonte de energia potencialmente ilimitada e de baixo carbono (GENG, 2022). O caminho para a concretização dessa energia é delineado por projetos colaborativos internacionais, como o ITER (sigla em inglês para International Thermonuclear Experimental Reactor) e EAST (sigla em inglês para Experimental Advanced Superconducting Tokamak), descritos a seguir. (VRIES, 2022).

3.5.3 DESAFIOS FÍSICOS E TECNOLÓGICOS DA FUSÃO CONTROLADA

3.5.3.2 Estabilidade do Plasma e Confinamento

O plasma deve ser confinado a temperaturas acima de 100 milhões de graus Celsius (IAEA, 2023; GENG, 2022) e o confinamento do plasma nunca é perfeito, pois, a turbulência pode transportar calor e partículas para a borda do reator, o que constitui uma perda de energia (IAEA, 2023).

O Sistema de Controle de Plasma (PCS) deve gerenciar instabilidades específicas. O PCS também deve integrar esquemas de prevenção e mitigação de disrupções, que são interrupções súbitas da descarga do plasma, visto que o plasma transporta uma grande energia magnética e térmica (VRIES, 2022).

O controle de *Burning Plasmas* no ITER é mais complexo, pois o plasma é dominado pelo aquecimento de partículas alfa geradas pela fusão, tornando o poder de aquecimento auxiliar menos eficaz como atuador em comparação com *tokamaks* atuais (VRIES, 2022).

3.5.3.3 Perdas por Radiação e Gestão de Calor

A presença de impurezas e a gestão do calor excessivo são desafios significativos (IAEA, 2023). Impurezas que penetram no núcleo quente do plasma levam à perda de potência de fusão devido ao arrefecimento radiativo e à diluição do combustível. O hélio, produto da reação D-T, também deve ser removido (GENG, 2022).

O calor e as impurezas são desviados e removidos pelo divertor, um componente que está sujeito a altíssimas cargas de calor. O ITER exige que o divertor suporte cargas de calor da ordem de 20 MW/m² (MOTOJIMA, 2014).

3.5.3.4 Resistência dos Materiais

Encontrar materiais adequados para resistir ao ambiente hostil do reator de fusão é um desafio fundamental (IAEA, 2023). A reação D-T libera nêutrons de alta energia (14,03 MeV) que bombardeiam a primeira parede do reator. Esse bombardeio causa danos por irradiação, deslocando átomos e levando ao inchaço (*swelling*) e à perda das propriedades mecânicas do material (IAEA, 2023; GENG, 2022).

Capítulo 4

Conclusão

O estudo realizado permitiu compreender a evolução e a complexidade da tecnologia nuclear, desde os princípios fundamentais da estrutura atômica até os sistemas mais avançados de geração de energia. Inicialmente, foi abordado o funcionamento dos reatores nucleares, destacando seus componentes essenciais, como moderadores, refrigerantes e sistemas de controle, além das diferentes tipologias existentes, cada uma com características específicas de segurança, eficiência e aplicação. A análise do acidente de Chernobyl evidenciou a importância crítica da segurança operacional e do rigor nos procedimentos. O desastre demonstrou como falhas de projeto, combinadas com erros humanos e decisões inadequadas, podem resultar em consequências ambientais, sociais e econômicas devastadoras, cujos impactos se estendem por décadas.

Bibliografia

ALI, Owais. How Does a Gen III Nuclear Plant Differ From a Gen II?. AZoCleantech, [S.l.], 10 jun. 2022. Disponível em: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1561>.

AMERICAN ACADEMY OF ARTS AND SCIENCES. Nuclear reactors: generation to generation. Disponível em: <https://www.amacad.org/publication/nuclear-reactors-generation-generation/section/5>.

BBC BRASIL. Acidente de Chernobyl completa 33 anos e ainda gera polêmica. BBC News Brasil, 26 abr. 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-48477868>.

BEZERRA, Juliana. Acidente de Chernobyl: resumo e consequências. Toda Matéria. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/acidente-de-chernobyl/>.

BORYS, Christian. A vast new tomb for the most dangerous waste in the world. British Broadcasting Corporation, [S.l.], 3 jan. 2017. Disponível em: <https://www.bbc.com/future/article/20170103-a-vast-new-tomb-for-the-most-dangerous-waste-in-the-world>.

BRAZ JÚNIOR, José Paulo. Introdução à Engenharia Nuclear. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CARVALHO, Fabio Lucas. Energia nuclear: Como funciona o reator nuclear de 4ª geração que promete mover navios em todo mundo — 7 anos sem reabastecimento e velocidade recorde. In: CPG Click Petróleo e Gás, [S.l.], 3 set. 2024. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/energia-nuclear-como-funciona-o-reator-nuclear-de-4a-geracao-que-promete-mover-navios-em-todo-mundo-7-anos-sem-reabastecimento-e-velocidade-recorde/>

CBIE – Centro Brasileiro de Infraestrutura. Energia Nuclear. [Imagem]. Rio de Janeiro: CBIE, 2025. Disponível em: <https://cbie.com.br/energia-nuclear/>.

CHERNOBYL GALLERY. Radiation levels. Disponível em: <https://www.chernobylgallery.com/chernobyl-disaster/radiation-levels/>.

Chodos, Alan. “dezembro de 1938: descoberta da fissão nuclear”. Disponível em: <https://www.aps.org/apsnews/2007/12/december-1938-discovery-nuclear-fission>

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Aplicações da energia nuclear. 2021. Disponível em: <http://www.cnem.gov.br>.

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. CAREM SMR – Argentinian Nuclear Power Plant. Presidencia de la Nación, Argentina. Disponível em: <https://www.argentina.gob.ar/argentinian-nuclear-power-plant>.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. SMRs no Brasil: CNEN discute desafios e soluções para a regulação de reatores modulares. Comissão Nacional de Energia Nuclear, [S.l.], 23 maio 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/assuntos/noticias/smrs-no-brasil-cnen-discute-desafios-e-solucoes-para-a-regulacao-de-reatores-modulares>.

CRS. ITER—An International Nuclear Fusion Research and Development Facility. Washington, D.C.: Congressional Research Service, 2025.

CW Forsberg, PF Peterson e PS Pickard, Reator avançado de alta temperatura resfriado a sal fundido para produção de hidrogênio e eletricidade, Tecnologia Nuclear, Sociedade Nuclear Americana (maio de 2003).

DATTA, Deepayan; NANDI, Arindam. “What Is the Cost of Lies?” Historiography of a Disaster and the Collapse of the Soviet Metanarrative in Craig Mazin and Johan Renck’s HBO Miniseries Chernobyl. University of Bucharest Review, v. VII/2017, n. 1 (new series), p. 58-66, 2017.

DECLARAÇÃO 1948. O acidente nuclear de Chernobyl. Disponível em: <https://declaracao1948.com.br/2021/05/24/chernobyl/>.

DOE Explains... Nuclear Fission. U.S. Department of Energy. Disponível em: <https://www.energy.gov/science/doe-explainsnuclear-fission>

DUMÉ, Isabelle. Nuclear: what is a 4th generation reactor? In: Polytechnique Insights. [S.l.], 31 mar. 2022. Disponível em: <https://www.polytechnique-insights.com/en/braincamps/energy/the-latest-technological-advances-in-nuclear-energy/nuclear-what-is-a-4th-generation-reactor/>

ELETRONUCLEAR. Reatores PWR. Rio de Janeiro: Eletronuclear, 2022. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br>.

ENERGY EDUCATION. Neutron moderator. Disponível em: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Neutron_moderator

FERRARI, L. A. et al. Must Nuclear Energy be Increased on Brazilian Energy Mix in a Post-COVID-19 World? Brazilian Journal of Radiation Sciences, [S.l.], v. 10, n. 3A, p. 1-20, 2022.

FIGUEIREDO, Carolina; CANDAL, Ludmila. Há 2 décadas, Chernobyl era desativada anos após pior acidente nuclear do mundo. CNN Brasil, São Paulo, 15 dez. 2020. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/ha-2-decadas-chernobyl-era-desativada-anos-apos-pior-acidente-nuclear-do-mundo/>.

GENG, S. An Overview of the ITER Project. Journal of Physics: Conference Series, v. 2386, n. 1, p. 012012, 2022.

GOLDBERG, Stephen M.; ROSNER, Robert. Nuclear Reactors: Generation to Generation. In: American Academy of Arts and Sciences. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.amacad.org/publication/nuclear-reactors-generation-generation/section/6>

GOLDBERG, Stephen M.; ROSNER, Robert. The History of Reactor Generations. In: GOLDBERG, S.; ROSNER, R. Nuclear Reactors: Generation to Generation. Cambridge: American Academy of Arts and Sciences, 2011. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/slr/cel/0090.pdf>.

GRAY, Richard. Os trágicos números de Chernobyl acobertados pelos soviéticos que agora vêm à tona. Terra – Vida e Estilo – Saúde, 10 ago. 2019. Disponível em: <https://www.terra.com.br/vida-e-estilo/saude/os-tragicos-numeros-de-chernobyl-acobertados-pelos-sovieticos-que-agora-vem-a-tona,bd86960836cddb1644301c14524b22adnp7d5ijn.html>.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Física 4: óptica e física moderna. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HELERBROCK, Rafael. Acidente de Chernobyl: causas, como ocorreu e consequências. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/historia/chernobyl-acidente-nuclear.htm>.

IAEA – International Atomic Energy Agency. Applications of Research Reactors. Vienna: IAEA, 2022. Disponível em: <https://www.iaea.org>.

IAEA – International Atomic Energy Agency. Nuclear Desalination. 2020. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-desalination>.

IAEA. IAEA World Fusion Outlook 2023: Fusion Energy: Present and Future. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Advanced pressurized water reactor design. Vienna: IAEA, 2013. (IAEA-TECDOC-1691). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications>.

INB. O que é o enriquecimento de urânio? Como ele é feito na INB? Perguntas Frequentes. Disponível em: <https://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/o-que-e-o-enriquecimento-como-ele-e-feito?Origem=1087>

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Heavy Water Reactors: Status and Projected Development. Vienna: IAEA, 2001. (IAEA-TECDOC-1234). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications>.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Convention on Assistance in the Case of a Nuclear Accident or Radiological Emergency. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/convention-assistance-case-nuclear-accident-or-radiological-emergency>.

KAW, P. K.; BANDYOPADHYAY, I. The case for fusion. In: Fusion book. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1-46.

LALLANILLA, Marc. Chernobyl: o pior desastre nuclear do mundo. Live Science, 18 abr. 2023. Disponível em: <https://www.livescience.com/planet-earth/nuclear-energy/chernobyl-the-worlds-worst-nuclear-disaster>.

LAMARSH, John R.; BARATTA, Anthony J. Introduction to Nuclear Engineering. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

LAWSON, J. D. The effect of multi-fluid physics and 1D profiles on the Lawson criterion. Fusion Engineering and Design, [S.l.], v. 86, p. 1774-1780, 2011.

LAWSON, J. D. Some Criteria for a Useful Thermonuclear Reactor. Atomic Energy Research Establishment, Culham Report No: A.E.R.E. GP/R – 1807, 1955.

LOPES, José Luiz. Energia nuclear: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MEADE, Dale. 50 years of magnetic fusion research... [S.l.: s.n.], [s.d.].

MOTOJIMA, O. The ITER Project Construction Status. In: IAEA FUSION ENERGY CONFERENCE, 25., 2014, Saint Petersburg. Proceedings... Saint Petersburg, Russia, 2014.

MURARI, Andrea. Focus on: JET. Association EURATOM-ENEA sulla Fusione, [S.l.], 2006.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Fission Surface Power Systems. 2021. Disponível em: <https://www.nasa.gov/nuclear>.

Neutron moderator. Energy Education. Disponível em: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Neutron_moderator

NOTICIABRASIL.NET.BR. China anuncia início de operação do 1º reator nuclear de 4ª geração do mundo. Disponível em: <https://noticiabrasil.net.br/20231206/china-anuncia-inicio-de-operacao-do-1-reator-nuclear-de-4-geracao-do-mundo-fotos-31874264.html>.

NOVAIS, Stéfano Araújo. "O que é átomo?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/quimica/o-que-e-atomo.htm>

NUSCALE POWER CORPORATION. NuScale Power's small modular reactor (SMR) achieves standard design approval from U.S. Nuclear Regulatory Commission for 77 MWe. Press Release, 29 maio 2025. Disponível em: <https://www.nuscalepower.com/press-releases/2025/nuscale-powers-small-modular-reactor-smr-achieves-standard-design-approval-from-us-nuclear-regulatory-commission-for-77-mwe>.

OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY. Chernobyl: Chapter VI. Agricultural and environmental impacts. Disponível em: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_28351/chernobyl-chapter-vi-agricultural-and-environmental-impacts.

OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY. Nuclear Technology and Economic Aspects of Heavy Water Reactors. Paris: OECD/NEA, 2000. Disponível em: <https://www.oecd-neo.org>.

OLIVEIRA, Alexandre Rodrigues de. Relatório preliminar sobre o acidente de Chernobyl. [S. l.]: Núcleos Divisão de Higiene e Medicina do Trabalho, Área de Saúde Setor de Medicina das Radiações, 1986.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). Chernobyl: the true scale of the accident. 5 set. 2005. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/05-09-2005-chernobyl-the-true-scale-of-the-accident>.

Planas, O. Reator nuclear: o que é, para que serve e componentes. Energia-Nuclear.net. Disponível em: <https://pt.energia-nuclear.net/usinas-nucleares/reator-nuclear/refrigerante>.

Planas, O. Tipos de reatores nucleares – características e uso. Energia-Nuclear.net. Disponível em: <https://pt.energia-nuclear.net/usinas-nucleares/reator-nuclear/tipos>

RADIOACTIVITY.EU.COM. Chernobyl Caesium-137. Disponível em: https://radioactivity.eu.com/articles/nuclearenergy/chernobyl_caesium.

REDAÇÃO CPG. Primeiro reator nuclear de 3ª geração da China tem capacidade impressionante e pode abastecer milhões de residências. CPG Click Petróleo e Gas, [S.l.], 2 jan. 2025. Disponível em: <https://www.clickpetroleoegas.com.br/primeiro-reator-nuclear-de-3a-geracao-da-china-tem-capacidade-impressionante-e-pode-abastecer-milhoes-de-residencias/>.

REDACÃO National Geographic Brasil. Chernobyl 37 anos depois: sobrevivente conta o que aconteceu após desastre nuclear. National Geographic Brasil, 26 abr. 2023. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/historia/2023/04/chernobyl-37-anos-depois-sobrevivente-counta-o-que-aconteceu-apos-desastre-nuclear>.

REIS, Lohanna. Como o Novo Reator Nuclear de 4ª Geração Chinês Deixa o Resto do Mundo para Trás na Corrida da Energia Nuclear. In: Atlas Report, [S.l.], 30 abr. 2025. Disponível em: <https://atlasreport.com.br/como-o-novo-reator-nuclear-de-4a-geracao-chines-deixa-o-resto-do-mundo-para-tras-na-corrida-da-energia-nuclear/>

RODRIGUES, Niágara; RAEDER, Francisco. Pequenos reatores modulares (SMRs): desafios em segurança, gestão de resíduos e aceitação pública. Ensaio Energético, [S.l.], 17 abr. 2023. Disponível em: <https://ensaioenergetico.com.br/pequenos-reatores-modulares-smrs-desafios-em-seguranca-gestao-de-residuos-e-aceitacao-publica/>.

STERIS AST. Radiation Units Defined. Disponível em: <https://www.steris-ast.com/resources/techtips/radiation-units-defined>.

THE GUARDIAN. Nuclear power: Chornobyl fears slowed global low-carbon transition, thinktank says. 2 dez. 2024. Disponível em:

<https://www.theguardian.com/business/2024/dec/02/nuclear-power-chornobyl-carbon-emissions-thinktank-tony-blair-institute>.

UN CHERNOBYL FORUM EXPERT GROUP “ENVIRONMENT” (EGE). Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. [S. l.]: [s.n.], 2005.

UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. Becquerel (Bq). Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/becquerel-bq.html>.

UNSCEAR – COMITÊ CIENTÍFICO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE OS EFEITOS DA RADIAÇÃO ATÔMICA. Efeitos da radiação ionizante: efeitos à saúde devido à radiação do acidente de Chernobyl. Relatório da Assembleia Geral da ONU, Anexo D, 2008. Disponível em: <https://www.unscear.org/unscear/en/areas-of-work/chernobyl.html>.

VDOVYCHENKO, Nataliia. Chernobyl: Arte, Globalização e o Legado Nuclear. DiggIt Magazine, [S.l.], 6 jan. 2020. Disponível em: https://www.diggitimagazine.com/articles/chernobyl-medium-global-art?utm_source=chatgpt.com

VIEIRA, Nathan. O que é Zona de Exclusão de Chernobyl? Canaltech, 09 mar. 2024. Disponível em: <https://canaltech.com.br/meio-ambiente/o-que-e-zona-de-exclusao-de-chernobyl/>.

VRIES, P. de. Introduction to the ITER project (and its scenario development and plasma control). ITER Organization, 2022.

WAN, Y. X. et al. Progress of the EAST Project in China. Nuclear Fusion, v. 45, n. 2, p. 88-97, 2004.

WIKIMEDIA COMMONS. Boiling water reactor. 2023. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boiling_water_reactor.svg.

WIKIMEDIA COMMONS. Schemata of breeder reactor. [Imagem]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Schemata_of_breeder_reactor.

WIKIPEDIA. Advanced gas-cooled reactor. Disponível em: https://sv.wikipedia.org/wiki/Advanced_gas-cooled_reactor.

WIKIPEDIA. Reator RBMK. Fotografia: Sala do reator de uma das unidades RBMK. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Reator_RBMK.

WIKIPÉDIA. UNGG reactor [online]. Wikipédia, última atualização [s.d.]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/UNGG_reactor

WILTGEN, Filipe. ENERGIA ELETRONUCLEAR: FUSÃO NUCLEAR & FISSÃO NUCLEAR. Revista Ciências Exatas, Taubaté/SP, v. 30, n. 1, 2024.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Generation IV Nuclear Reactors. [S.I.]: World Nuclear Association, 30 abr. 2024. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors>

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Heavy Water Reactors. 2023. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/heavy-water-reactors.aspx>.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power Reactors. 2023. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org>.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Small Nuclear Power Reactors. World Nuclear Association, [S.I.], 17 jun. 2025. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>.

ZHOU, C. Comparison between EAST and ITER tokamak. Proceedings of the 3rd International Conference on Computing Innovation and Applied Physics, 2024.