

# ANÁLISE DE AÇÕES DE SEGURANÇA EM REATORES NUCLEARES DO TIPO RBMK

*Data de submissão: 28/04/2023*

*Data de aceite: 02/06/2023*

### **Cláudio Daniel Molinari**

Universidade São Francisco  
Bragança Paulista - SP

### **Gabriel Ítalo Rodrigues Mendes**

Universidade São Francisco  
Bragança Paulista - SP

### **Monica Tais Siqueira D'Amelio Felipe**

Universidade São Francisco  
Bragança Paulista - SP  
<https://lattes.cnpq.br/0347184334616712>

**RESUMO:** O presente artigo tem por finalidade ressaltar a importância do estudo de medidas de segurança para reatores nucleares, a partir de um estudo de caso, tendo como foco a prevenção de catástrofes com vazamento de material radioativo, que remete a acidentes históricos, como o de Chernobyl. O impacto deste tipo de material seja em solo, água ou pelo ar é alto e de grande escala, provocando problemas de mutação na flora, fauna e, também, nos seres humanos, o que muitas vezes a alta exposição ocasiona a morte do indivíduo. Para uma execução sem complicações, o controle da reação de fissão nuclear no elemento urânio precisa

ser controlada evitando que o descontrole leve a um superaquecimento do reator e, conseqüentemente, a explosão. Este trabalho mostrou o funcionamento e os motivos do acidente do reator nuclear de Chernobyl e comparou com os utilizados atualmente.

**PALAVRAS-CHAVES:** Reator nuclear; Chernobyl; Segurança nuclear.

## ANALYSIS OF SAFETY ACTIONS IN RBMK NUCLEAR REACTORS

**ABSTRACT:** The purpose of this article is to emphasize the importance of studying safety measures for nuclear reactors, based on a case study, focusing on the prevention of catastrophes with leakage of radioactive material, which refers to historical accidents, such as that of Chernobyl. The impact of this type of material, whether on soil, water or through the air, is high and large-scale, causing problems of mutation in flora, fauna and also in humans, which often causes the death of the individual due to high exposure. For an uncomplicated execution, the control of the nuclear fission reaction in the uranium element needs to be controlled, preventing the lack of control from leading to overheating of the reactor and,

consequently, the explosion. This work showed the operation and reasons for the accident of the nuclear reactor at Chernobyl and compared it with those currently used.

**KEYWORDS:** Nuclear reactor; Chernobyl; nuclear safety.

## 1 | INTRODUÇÃO

A energia proveniente da queima de derivados do petróleo, como a gasolina, diesel entre outros, causa grandes problemas ao meio ambiente, além de não renovável. Houve então investimento no desenvolvimento de alternativas energéticas, como as energias hidrelétricas, eólicas, geotérmicas, solares e energia nuclear. Os países europeus, principalmente, a parte ocidental, por se tratar de uma região desfavorável para as hidrelétricas e geotérmicas, têm investido na energia nuclear, pois é isenta na geração de GEE. A radiação proveniente deste processo apresenta outros benefícios, como a utilização em aparelhos médicos como o raio x, ultrassom, ressonância magnética, tomografia computadorizada, além da produção de isótopos que auxiliam no tratamento do câncer (radiofármacos). Ademais as estruturas de uma usina nuclear podem ser instaladas facilmente em áreas menores e evitando devastação do meio ambiente (EDWARDS et al., 2016).

Dentre os problemas deste processo de geração de energia, há a produção de resíduos radioativos, chegando a acumular em um ano 30 toneladas (urânio infértil, mas ativo), além do risco de acidentes. Um exemplo é o que aconteceu no reator nuclear de Chernobyl na Ucrânia, que teve uma explosão devido a uma falha no sistema de resfriamento causando um superaquecimento, o que provocou sua explosão. Esta liberou material radioativo para a atmosfera atingindo cidades da região e até sendo encontrado vestígios em alguns países vizinhos.

Neste âmbito, este artigo fez uma revisão sobre as condições de operação do reator nuclear de Chernobyl que provocou o acidente, e comparou com as novas condições de operação dos reatores atuais e os métodos de segurança.

## 2 | METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu inicialmente em um estudo teórico sobre reatores nucleares, o qual teve por base artigos publicados por Institutos Educacionais, como o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), empresas e especialista em usina nucleares, e aqueles disponíveis em plataformas digitais como o Google Acadêmico e o Research Gate. Todas as pesquisas realizadas utilizaram palavras-chaves reatores, cinética, balanço de massa e energia, Chernobyl e segurança nuclear. O estudo foi dividido em quatro etapas: estudo teórico sobre reatores nucleares do tipo RBMK-1000 (reator canalizado de alta potência), a tragédia de Chernobyl, estudo da cinética de reação

nuclear e o estudo da segurança em reatores nucleares para que se pudesse contribuir cientificamente sobre o tema.

## **3 | RESULTADO E DISCUSSÃO**

### **3.1 A Usina Nuclear**

A usina nuclear é a instalação onde será aplicada toda a reação, ou seja, ela é composta do elemento combustível, barras de controle, pressurizador, vaso de pressão, condensador, bombas elétricas, gerador de vapor e um envoltório de concreto para abrigar o reator. O reator nuclear é o equipamento em que ocorre a reação de fissão nuclear em cadeia. Existem reatores nucleares com diversas finalidades e funções, como reatores de água leve; reator de água pressurizada (PWR) que consiste em utilizar a água na forma de resfriamento e também de moderador; reator de água fervente (BWR) que funciona exatamente como o PWR, porém, com apenas um circuito que a água está em menor pressão; reator de água moderado por grafite (LWGR) que possui mesmo funcionamento das demais, porém, seu processo de resfriamento é através da água com moderador feito a grafite (PERROTA, 1999). Já os reatores do modelo RBMK consistem em utilizar canais pressurizados e refrigerados à água com canais individuais de combustível passando pelos blocos de grafites presentes no processo, ele utilizava uma combinação de grafite como moderador, água como refrigerante e urânio enriquecido como combustível, sua principal função era a produção de plutônio e como subproduto a eletricidade. essa combinação é exclusiva para esse modelo de reator (CHERNOUSENKO, 1991). A tecnologia utilizada no RBMK tinha sua vantagem de permitir a manutenção do reator sem que precisasse desligá-lo.

### **3.2 A Usina Nuclear de Chernobyl**

A usina nuclear de Vladimir Ivich Lenin/V.I.Lenin foi construída estrategicamente a 183 Km de Kiev e 20 Km de Chernobyl, mais precisamente na cidade de Pripyat, para abastecer energeticamente os polos industriais e grandes centros e, conseqüentemente, a pequena civilização de 20 mil habitantes formada pelos trabalhadores da usina, além de parte de Kiev ao qual era comercializada pela empresa Comecon. Ficou conhecida como Usina nuclear de Chernobyl por ser a cidade mais próxima da usina. Funcionava com quatro reatores RBMK, sendo que cada reator tinha a capacidade produtiva de 1000 megawatts (MW), totalizando em conjunto cerca de 4000 MW, uma contribuição +/- 10% para o país.

O modelo RBMK foi escolhido por ter sido desenvolvido por um soviético e por possuir um moderador de grafite (material que abaixa a velocidade do nêutron aumentando assim a probabilidade de colisão com outros núcleos) que, além de ser ótimo na função, possui um

baixo valor agregado. Com seu uso, os soviéticos descobriram que com o enriquecimento do urânio na produção de energia elétrica o subproduto gerado é o plutônio que pode ser utilizado na criação de bombas nucleares. Acrescido a todas essas características, esse tipo de reator tem a vantagem de não precisar ser desligado para que se troque o combustível. Esta alta aplicabilidade permitiu que até 28 usinas com mesma formatação produtiva fossem usadas no território em 1986 até 2000.

Para um reator nuclear, o estudo da cinética é muito importante, uma vez que é uma reação muito exotérmica. O conhecimento da cinética permite que se controle a velocidade com que a reação ocorrerá de modo a ser estável durante o processo de emissão e absorção de nêutrons. Emissão é o choque do nêutron com outro núcleo, que então emite outro nêutron e que torna esse processo em cadeia, diferentemente da absorção que é a retirada desses nêutrons pelas barras de controle e líquido refrigerante.

Segundo Fonseca (2009), a reação nuclear pode ser caracterizada pela sua criticidade, possuindo três classificações: crítica, subcrítica e supercrítica, isso tudo está relacionado diretamente com a produção de nêutrons. A reação crítica acontece quando se atinge o equilíbrio de nêutrons, onde a criticalidade do reator existe em qualquer faixa de operação, porém a intensidade do fluxo neutrônico determina sua potência; a reação subcrítica sucede quando a produção de nêutrons é inferior à sua absorção juntamente com as fugas, e neste caso a reação nuclear não permanece sustentável ao longo do tempo; já a reação supercrítica ocorre quando a produção de nêutrons é superior a absorção e fugas, ocasionando o aumento da potência do reator, e neste caso, os dispositivos intrínsecos de controle deverão entrar em atuação no instante apropriado.

Para Galvão (2017), é vital conhecer a reatividade dentro do reator para que se evite situações emergenciais, pois mesmo sabendo a criticidade em que seu reator opera, isso não garante que essa se manterá assim, pois as interferências internas e externas do reator podem alterá-la. Por isso os sensores devem estar calibrados e devidamente aferido para que se tenha o controle: de quanto do urânio já foi fissionado, temperatura do líquido refrigerante e concentração de boro nele, o quanto as barras de controle estão retirando de nêutrons, quais produtos estão sendo formados e principalmente o xenônio e temperatura do combustível. A reação em cadeia é o caminho crítico deste tipo de produção térmica, pois em poucos minutos algo que parecia rotineiro se torna uma situação emergencial. Entretanto, a liberação desordenada de fissão nucleofílica urânica de calor é controlada crucialmente pela inserção de barras de controle e a concentração de boro na água que faz a refrigeração do reator.

Barras de controles são as principais medidas de segurança de qualquer reator, elas são compostas de materiais que possuem a capacidade de absorver nêutrons para diminuir a fissão nuclear ou cessá-la, dependendo de quantas barras forem inseridas. Os principais elementos químicos constituintes dessa liga metálica são: Prata (Ag), Índio (In), Cádmio (Cd), Zircônio (Zr), Cerâmicas e um adsorvente que pode ser utilizado na forma de ácido,

normalmente o Boro (GALVÃO, 2017).

O controle químico é feito de forma volumétrica substituindo parte do circuito refrigerante composto de boro por água desmineralizada, essa ação é tomada fazendo com que a interação de reatividade seja quase nula, no período em que o urânio está sendo consumido e sintetizando subprodutos radioativos sejam eles internamente ou externamente. Alguns desses subprodutos são: Plutônio (Pu), Netúnio (Nt), Americício (Am), Cúrio (Cm), que por serem formados a partir do urânio eles são descritos como elementos transurânicos. Para não se contaminarem dentro do núcleo do reator, eles são retirados por meio de dispositivos que compõem o próprio sistema de segurança. Os revestimentos das barras de controle e das pastilhas que leva as varetas radioativas possuem cerâmicas e liga à base de zircônio denominada zircaloy que retiram eles separadamente (GALVÃO, 2017; SCHULTZET et al., 2014).

Para Schultz et al. (2014), elementos de núcleo leve são aqueles que sua massa atômica ( $A$ ) varia numa faixa de 80 a 160 e durante a linha produtiva do reator formam-se diversos elementos de núcleos leves. A maioria dos produtos de fissão leve geram atrito ao se colidirem nos nêutrons de fissão e, portanto, isso deve ser considerado e balanceado na reação evitando maiores problemas térmicos.

Juntamente com o urânio, outro componente importante para o funcionamento de reatores nucleares são os nêutrons. Por definição, são pequenas partículas isentas de carga elétrica e que possuem massa. Devido a essas características peculiares a interação em matéria é nucleofílica, podendo ser de dois tipos: espalhamento elástico e inelástico ou absorção. Espalhamento é uma espécie de efeito elástico, no qual somente a energia cinética é transferida entre os núcleos, não tendo nenhuma modificação estrutural, diferente do inelástico que, além de transferir energia cinética a uma modificação estrutural momentânea, devido à força do choque, arranca um nêutron liberando radiação gama no retorno da sua camada de estabilidade (REZENDE, 2009).

A absorção possui dois processos: o de captura radioativa e o preferencial. No primeiro, é o caminho em que se deseja diminuir, pois é onde o núcleo excitado pelo nêutron gera um salto energético liberando fóton é transurânico. O segundo, é o caminho da fissão nuclear onde ao se chocar com um nêutron há a divisão para núcleos menores e cada novo núcleo libera um neutro dando início ao processo de reação em cadeia. Por se tratar de um processo forçado em pressão e temperatura controlados há uma grande quantidade de energia em forma de calor liberada que futuramente é convertida em energia elétrica.

Dentro da análise da cinética há muitos parâmetros, um imprescindível se refere à vida útil do nêutron imediata, a definição para este termo se refere que quando dentro de um reator o tempo médio é calculado entre a emissão de nêutrons pela fissão nuclear do urânio até a sua absorção final no reator. Em um reator térmico esse tempo é somado ao tempo médio de desaceleração de nêutron, que é o tempo para transformação em energia térmica, e ao tempo médio de difusão, que é o tempo para difusão da energia térmica até o

ponto de absorção. Em todos os reatores térmicos, o tempo de difusão é muito maior que o tempo de desaceleração, em torno de 10 segundos, o que torna o tempo de vida imediata dos nêutrons bem próximo ao próprio tempo de difusão (BENNET E THOMSON, 1989).

A reação exotérmica liberada pela fissão é dividida em dois tipos diferentes de nêutrons: rápidos e atrasados. Os rápidos são os que dão início à reação em cadeia que ao se chocarem com os núcleos pesados lhe subdividem e os sistemas de segurança são retirados ao final. Os nêutrons atrasados são emitidos a partir do decaimento dos subprodutos urânicos e por terem menor velocidade a taxa de colisão e reação é maior não podendo ser desconsiderado na equação (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976).

Diferentemente do método acima descrito, o método da cinética pontual é amplamente utilizado nas simulações de modelagem de fluxo neutrônico que considera que independentemente da localização espacial, a variação ocorre somente na amplitude. Fundamentado nessa teoria, o modelo matemático são as equações diferenciais como a apresentada acima, e quanto mais preciso e assertivo forem os cálculos, melhor se tem uma previsão da potência que seu reator desempenha e quanto tempo dependerá. Este controle é de suma importância, pois se conhecido os parâmetros, é possível fazer intervenções na produção energética antecedendo riscos, o que contribui para mais bem medidas de segurança (VOESE ET AL, 2018).

### 3.3 A Tragédia de Chernobyl

A usina de Chernobyl era composta por quatro reatores do modelo RBMK-1000. No dia 26 de abril de 1986, o quarto reator precisava passar por uma troca de combustível e manutenção anual por um pedido do comitê estatal. Com isso, testes foram feitos para descobrir uma forma de manter as bombas elétricas funcionando caso houvesse uma falha na energia até que o gerador fosse ligado. As bombas tinham o objetivo de levar água fria para o núcleo do reator e assim impedir um eventual aquecimento e possível explosão. O reator operava em uma potência de 3.200 MW (Megawatts), porém, para realização dos testes ele precisava estar na margem de segurança, que era de 700 MW a 1.000MW. Por ordem do engenheiro chefe que era responsável pelo processo, foi pedido que o reator chegasse a uma potência de 200MW (ESTEVES, 2013).

Os operadores iniciaram os testes e assim o sistema de turbina foi desligado e a bomba de água de resfriamento desativada. À medida que a água que passa pelo núcleo do reator diminui, a reatividade aumenta, a troca de calor aumenta e a água restante no reator se torna vapor. O excesso de vapor cria um coeficiente de vazio positivo que ocasiona no aumento ainda maior da reatividade e da potência do reator (CHERNOBYL, 2019). Durante a operação ocorre a produção de Xenônio (absorvedor de nêutrons) que em altas temperaturas não é prejudicial por possuir nêutrons suficientes para ele se estabilizar, porém, como o reator estava operando em baixa potência, a temperatura acabou ficando mais baixa e assim não tinha nêutrons suficientes para estabilização, gerando um acúmulo

do elemento que resultou num envenenamento do reator (CHERNOUSENKO, 1991).

A potência do reator despencou e obrigou os trabalhadores a aumentarem, porém, o reator estava instável com seu funcionamento em baixa potência, informação desconhecida pelos operadores. Visto que a situação estava crítica, o engenheiro responsável ordenou que fosse apertado o botão emergencial AZ-5 que baixaria todas as hastes de controle e pararia o reator. Entretanto, como o calor no interior do reator estava intenso, as barras de combustíveis foram derretidas e impediram que as hastes de controle descessem, com isso elas foram soltas e como eram compostas de boro que servia para absorver os nêutrons liberados e suas pontas eram feitas de grafite, o resultado foi em uma aceleração na reação em vez da diminuição. (CHERNOUSENKO, 1991) e (INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC, 2003-2005).

A potência do reator disparou e com isso ocorreu um aumento na pressão e fez com que ocorresse uma reação de elementos combustíveis com o vapor, gerando o hidrogênio. O teto do reator possuía já alguns danos causados, com isso, permitiu a entrada de oxigênio que ao se misturar com o hidrogênio e grafite se tornou explosiva. O hidrogênio acumulado gerou várias outras explosões, mas de forma incendiária, isso fez com que ocorresse a liberação de combustível, grafite e gases radioativos para atmosfera. Esses gases liberados vazaram por cerca de 10 dias (CHERNOUSENKO, 1991).

O negligenciamento e a violação de várias medidas de segurança pelos operadores e supervisores preconizadas para que se evite o risco de um superaquecimento ou explosão, durante um teste para saber a efetividade das bombas de resfriamento caso a queda de energia acontecesse, desencadeou uma tragédia com danos diretos e colaterais inimagináveis, o que ficou conhecido como a cidade fantasma após a explosão do reator nº4 de Chernobyl em 1986, deixando inabitável a região (HAWKES; LEIGH; MCKIE ET AL., 1986).

A primeira e principal preocupação após o acidente foi tentar conter a radiação lançada na atmosfera e impedir que ela se espalhasse. Segundo Hawkes (1986), a equipe meteorológica registrou que as nuvens presentes no local tiveram um aumento de radiação e estavam indo em direção à parte oeste e leste da Europa. Uma usina nuclear instalada a 1600 km da Suécia continha cerca de 700 colaboradores que registraram um acúmulo de radiação em suas roupas um dia após o acidente, então, iniciou uma busca de informações para saber a real situação. França e Estados Unidos, sabendo da tragédia, utilizaram satélites de alta resolução para identificar os danos causados.

### **3.4 Evolução da Segurança dos Reatores**

Desde que a usina foi desativada, diversas melhorias foram aplicadas nas unidades RBMK para eliminar as deficiências persistentes, as melhorias consistem na redução do coeficiente de vazio de reatividade; melhoria do sistema de proteção de emergência para se tornar mais eficaz; implantação de programas de cálculo para fornecer o número efetivo

de barras de controle restantes no núcleo e sendo exibido na sala de controle para os engenheiros responsáveis, o aumento do espaçamento da estrutura de grafite no núcleo e a melhoria mais importante foi a proibição de desligamento do sistema de segurança manualmente. Todas essas adaptações passaram a ser testadas e implementadas nas usinas de Ignalina e Leningrado, e aos poucos os modelos RBMK foram substituídos por MKER-1000, que seria o modelo anterior com as melhorias aplicadas (WORD NUCLEAR ORGANIZATION, 2022). No atual momento, os reatores possuem proteções mais reforçadas contra fenômenos naturais ou colisão de projéteis (PINGUELLI ROSA, 1980).

O reator mais utilizado tanto por praticidade no processo, quanto pela segurança é o reator PWR que atualmente conta com mais de 230 reatores nucleares no mundo. Sua principal característica que se diferencia dentre os outros modelos é o uso de água sob alta pressão no circuito primário para evitar que ferva. O núcleo do reator contém barras de combustível nuclear. Uma reação nuclear ocorre dentro do reator, produzindo muito calor e por razões de segurança, o PWR não pode exceder uma certa temperatura para evitar o derretimento. Portanto, as barras de combustível devem ser resfriadas, seu resfriamento é realizado pela circulação de água através de um conjunto de bombas. A troca de calor entre os circuitos primário e secundário deve ocorrer sem mistura de água, porque água no circuito primário é radioativa.

Existem alguns fatores que fazem com que o reator PWR seja melhor que o RBMK, desde sua estrutura e segurança, são eles:

- O PWR utiliza água como moderador e como meio de resfriamento também. Já o RBMK utiliza grafite como moderador e água como resfriamento, dificultando um pouco mais o processo e menos seguro;
- A inserção de hastes de controle em um reator RBMK leva cerca de 30 segundos, já no PWR o tempo é de 1 segundo;
- O fator do RBMK possuir o coeficiente de vazio positivo torna ele um reator instável em certas condições;
- PWR foi projeto com o intuito de agregar a sociedade, já o RBMK surgiu dos soviéticos com o intuito de produzir plutônio, porém, conseguiram também a geração de energia elétrica;
- Todos os reatores do modelo PWR possuem uma contenção de acordo com as normas estabelecidas pelo comitê nacional de energia nuclear (CNEN), ao redor do reator para conter a radiação liberada. Já nos modelos RBMK essa norma não era respeitada.
- Existe uma adesão no mundo de aproximadamente 64%;
- O PWR possui isolamento físico para cada fonte sendo elas: gerador de vapor primário, gerador de vapor secundário e refrigeração, assim a fissão nuclear é contida, evitando danos do elemento combustível;

- A potência da usina pode ser aumentada através do aumento da área dos geradores de vapor com o líquido refrigerante.
- Os reatores PWR se tornam uma opção mais viável e segura pelo fato de todos os problemas citados não funcionarem nesse sistema.

Diante do assunto abordado, fica evidente que as medidas de segurança são de extrema importância e devem ser seguidas rigidamente. Um dos pontos vistos em Chernobyl, foi as atitudes tomadas pelo engenheiro superior responsável pelo andamento da produção. O sistema de segurança foi desligado manualmente para que fosse possível a realização de testes com o reator em funcionamento. Este ato já era considerado perigoso, pois o reator ficava instável e foi o que aconteceu. Ocorreu o aquecimento no núcleo, não existia resfriamento uma vez que a segurança estava inativa e com isso, aconteceu a explosão e liberação da radiação para atmosfera. O exterior do reator foi um dos motivos que gerou discussão, pois não havia contenção robusta para segurar qualquer tipo de dano seja por fenômenos naturais ou causas por reações, o recomendado de acordo com a comitê de energia nuclear era uma estrutura de concreto com camadas de 3m de espessura, com isso, evitaria que causasse um dano e permitindo a saída dos resíduos para atmosfera.

O acidente mostrou que a modelagem de um sistema eficiente para operação energética em usina nuclear onde se opera precisa ter estabilidade e controle tanto do combustível quanto da cinética neutrônica, a qual é primordial na atuação de todas as medidas de segurança. A modelagem da cinética pontual ou gráfica ensina e indica as melhores interações entre combustível e modeladores, assim como reduzir a interação de nêutrons atrasados que, se desconsiderados, podem superaquecer o reator. A aplicabilidade teórica de modelos matemáticos permite uma melhor assertividade tanto nas melhorias quanto em montar e operar usinas nucleares independentemente do reator, pois a cinética não muda.

### 3.5 Segurança dos Reatores Nucleares

A segurança dos reatores nucleares é um dos pontos mais importantes e trabalhados durante sua construção. Toda possibilidade de acidente é analisada e gerada uma solução, tanto humana, quanto em sistemas automáticos. Quando se pensa em construir um reator nuclear, pontos importantes são considerados, como o local que será ocupado, pois é preciso prever possíveis danos ao meio ambiente e à região, fenômenos naturais como tempestades, terremotos e além de possíveis quedas de aviões. Essas são situações que alteram a estratégia feita através de cálculos das estruturas para realizar a construção.

Durante todo o processo de construção existe uma fiscalização forte para cada passo, sendo analisadas as estruturas, tecnologia e os componentes de segurança instalados em cada processo. Cada operador passa por um treinamento de pelo menos 2 ou 3 anos para estar preparado para evidentes problemas na operação do reator, sendo realizadas diversas simulações com possíveis riscos.

As barreiras feitas durante sua construção são chamadas de sistemas passivos de segurança, sendo elaboradas para que evite a exposição da radiação para atmosfera, mas caso ocorra alguma falha, existem sistemas que são criados para operar e fazer com que o processo do reator seja interrompido. Durante um período de 41 anos ocorreram apenas três acidentes de grandes proporções envolvendo reatores nucleares, o primeiro foi em 28 março de 1979, Three-Mile Island que se localiza nos Estados Unidos; segundo foi em Chernobyl localizado na Ucrânia em fevereiro de 1986 e o terceiro em março de 2011 num reator nuclear em Fukushima no Japão.

Segundo a Associação Mundial de operações nucleares, desde os incidentes das décadas de 80 e 90 houve grande evolução na segurança operacional de usinas nucleares.

## 4 | CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi o estudo das ações de segurança de um reator nuclear do tipo RBMK, o mesmo que teve o incidente em Chernobyl.

Com a pesquisa teórica realizada, verificou-se que há a necessidade de suprir a demanda de energia elétrica e por isso várias fontes energéticas foram sendo utilizadas e aprimoradas para ter maior rendimento como: hidroelétricas, eólica, petróleo, geotérmica, nuclear etc. A produção a partir de usinas nucleares demandou regulamentações e cuidados maiores devido aos combustíveis por serem radioativos, que conseqüentemente são nocivos aos seres humanos e ao meio ambiente, principalmente após os vários incidentes, como o de Chernobyl.

O estudo mostrou que a principal problemática ocorre quando se tem a fissão do urânio, processo ao qual ocorre em cadeia liberando muita energia na forma de calor, mal controlada, seja na troca de calor ou na paralisação da reação entre os nêutrons e os núcleos, uma vez que há formação e interação entre os subprodutos ali presentes elevando a pressão. Se acumulado houver o contato com o oxigênio pode levar a explosões, como ocorreu a catástrofe na usina de Chernobyl.

Referente a este acidente, concluiu-se que é de extrema importância seguir protocolos de operação e acidentes, uma vez que essa catástrofe se deu pela má tomada de decisões do engenheiro responsável. Ademais, mostrou que os limites de segurança previstos pelos projetistas são importantes e verídicos.

Somente após o acidente, surgiu a preocupação sobre a segurança do reator. O reator modelo RBMK recebeu diversas melhorias internas e externas como melhoria do sistema de proteção de emergência para se tornar mais eficaz; implantação de programas de cálculo para fornecer o número efetivo de barras de controle restantes no núcleo e sendo exibido na sala de controle para os engenheiros responsáveis, aumento do espaçamento da estrutura de grafite no núcleo e a estrutura externa precisou ter uma parede de concreto com pelo menos 3m de espessura. Verificou-se também a importância do treinamento

dos operadores dos reatores, tanto na parte computacional quanto na operacional. Isso proporcionou confiabilidade na operação das usinas nucleares atuais. Surgiu então um novo modelo, o PWR, considerado o mais seguro e tecnológico.

A intensificação de melhoria nos modelos de reatores RBMK e o desenvolvimento de novos reatores como o PWR preconizavam exclusivamente primeiro a segurança, seguido de maior eficiência energética e através disso o estudo da cinética teórico teve maior desenvoltura e compreensão. A simulação antecipada do comportamento dos nêutrons a partir do bombardeamento em outros núcleos e como a reação em cadeia atua, sendo ela o caminho crítico, permitiu ampliar e inserir melhores moduladores de nêutrons como a água, passando a aumentar a quantidade de barras de controles que são varetas. Estas agora possuem composição de elementos capazes de absorver nêutrons e, conseqüentemente, parar a reação em cadeia. Todas essas medidas de segurança foram aprimoradas e inseridas a partir da compreensão de como o combustível urinífero reage em altas pressões gerando energia sem que haja qualquer descontrole.

Devido à alta aplicabilidade da energia nuclear tanto para montagem de equipamentos como raios X, ressonância, remédios de tratamentos de câncer comumente chamados de radiofármacos, geração de energia além do desenvolvimento nuclear, é uma das energias mais utilizadas no mundo.

Concluiu-se com este trabalho que os acidentes nucleares, mesmo afetando milhares de pessoas, permitiu a evolução da energia nuclear no mundo, e que esta evolução pode ser obtida pelo estudo e melhoria contínua. É importante aplicar os conhecimentos de lições aprendidas para que os erros não se repitam, e o estudo das medidas de segurança nos possibilita trabalhar sem que haja comprometimento de qualquer área.

## REFERÊNCIAS

CHERNOUSENKO, V. M. **Chernobyl: Insight from the Inside**. Springer-Verlag: Berlim, 1991

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

EDWARDS, J.; BINDRA, H.; SABHARWALL, P.; **Exergy Analysis of Thermal Energy Storage Options With Nuclear Power Plants**. *Annals of Nuclear Energy* 96, 104–111, 2016.

GALVÃO, H. P. (2017). **Modelagem Dinâmica do Circuito Primário e Secundário de Reatores PWR aplicando critérios de estabilidade**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HAWKES, N.; LEAN, G.; LEIGH, D.; McKIE, R.; PRINGLE, P.; WILSON, A. **The Worst Accident in the World – Chernobyl: the end of the nuclear dream**. Pan Books & William Heinemann, London, 1986.

HOLCOMB, W.B., **A history of ocean disposal of package low-level radioactive waste**, Nucl. Saf., 1982

INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC. **Chernobyls legacy: Health, environmental and socio-economic impacts and recommendations to the governments of Belarus, the Russian Federation**[http](http://www.iaea.org). Disponível em://www.iaea.org and Ukraine 2003-2005.

PERROTA, J.A. **Curso de Introdução à Engenharia dos Reatores**. 1999