



Segurança e proteção de um reator nuclear: uma breve revisão de seus parâmetros e características

Mariana Mota Gomes*
Faculdade do Gama (FGA-UnB)

O presente artigo trata de uma breve revisão das principais características e parâmetros de segurança e proteção de um reator nuclear. Para esse intuito, desenvolve-se preliminarmente o contexto dos princípios gerais do tema, para que assim se aborde de maneira específica o conceito de defesa em profundidade e múltiplas barreiras, com ênfase às barreiras físicas do reator. Em seguida, aborda-se a descrições e implicações de conhecidos acidentes nucleares a fim de relacioná-los aos parâmetros descritos inicialmente.

Palavras-Chave: Segurança e Proteção do Reator. Defesa em profundidade. Múltiplas Barreiras. Barreiras Físicas.

I. INTRODUÇÃO

Os combustíveis nucleares constituem fontes de energia de grande potencial para a geração de eletricidade [1] [2]. Para isso, têm-se os reatores nucleares como os dispositivos responsáveis pela obtenção dessa energia, impulsionada pela fissão nuclear [3]. Assim, eles são compostos por aparatos tecnológicos complexos, cuidadosamente planejados e operados. Contudo, esses reatores passaram a ser associados a acidentes catastróficos, fato que culminou e ainda se demonstra presente na desconfiança da sociedade e, por conseguinte, na ausência de incentivos a novas construções de reatores pelo mundo após acidentes como o ocorrido em Chernobyl [2] [3].

Apesar do temor instaurado no imaginário coletivo por acidentes nucleares, a Agência Internacional de Energia (AIE) previa, em 2018, que a proporção de energia nuclear na matriz elétrica mundial chegaria a 17% em 2050 [2]. Nesse sentido, é perceptível que o desenvolvimento tecnológico de reatores nucleares é crescente e, junto a ele, há a preocupação com segurança, aprimoramento de métodos para análises de risco e implementação de técnicas para a salvaguarda de reatores nucleares [3] [4].

Em virtude disso, um elevado nível de segurança foi implementado em reatores modernos, por meio de técnicas que alcançaram um alto grau de sofisticação e se baseiam na aplicação de princípios como redundância, defesa em profundidade, falha de segurança, dentre outros [3] [5]. Dessa maneira, a segurança e a proteção de reatores nucleares são imprescindíveis para garantir o avanço científico e tecnológico no uso da energia nuclear, a fim de assegurar a proteção das pessoas envolvidas em um

projeto de reator, da sociedade em geral, do meio ambiente e das propriedades envolvidas dos efeitos nocivos da radiação ionizante [6] [7] [1].

Outrossim, neste contexto, a proteção aliada ao conceito de segurança física, além dos atributos radiológicos, também se refere a prevenção, detecção e resposta a atos criminosos ou intencionais não autorizados envolvendo e/ou direcionados a materiais nucleares, instalações ou atividades associadas, com o objetivo de reduzir a vulnerabilidade das instâncias dos reatores [6] [1].

Conquanto, todas as especificidades dos reatores nucleares e da periculosidade dos materiais envolvidos não deve ser associada às perspectivas difundidas pelo temor mencionado, uma vez que a energia nuclear é considerada uma das fontes mais seguras de energia [7] [8]. Segundo o Instituto Paul Scherrer [9], a energia nuclear é responsável por menos de 1% dos acidentes por unidade de eletricidade gerada, como pode ser visto na Figura 1.

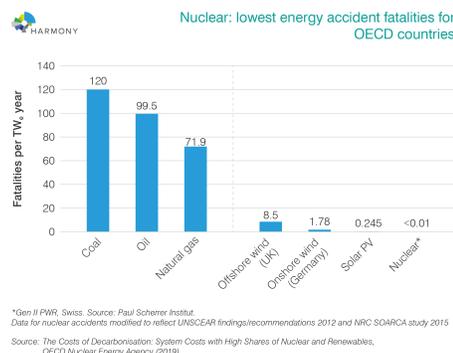


Figura 1. Mortes por acidentes relacionados com a fonte de energia por unidade de eletricidade[8][9]

* mota.mariana@aluno.umb.br

À vista disso, o presente artigo apresenta um panorama geral dos parâmetros e características que compõem e norteiam a segurança e a proteção de um reator nuclear. Por meio de uma breve revisão bibliográfica, delineiam-se tópicos primordiais para compreender essa segurança. Diante da complexidade intrínseca do tema e das análises de engenharia envolvidas, aborda-se os seguintes aspectos iniciais: contextualização e princípios gerais, partindo para os principais conceitos que asseguram a segurança e a proteção do reator, defesa em profundidade e barreiras físicas e, por fim, a descrição das causas e repercussão de acidentes de grande notoriedade e impacto no estabelecimento da cultura de segurança nuclear.

Para tanto, pretende-se evidenciar os pretextos que caracterizam os reatores nucleares e seus componentes como seguros e protegidos, destacando que os desastres ocorridos na história são produto direto da falibilidade humana e da falta de consolidação de protocolos, correspondentes a época de cada acidente, para o prosseguimento em caso de falhas e emergências.

II. PRINCÍPIOS GERAIS

Definir segurança envolve associar fatores técnicos e psicológicos, os quais além de nortear parâmetros relativos ao projeto, seu design, construção e operação, devem fornecer dados e medidas concernentes a chances de maus funcionamentos, probabilidade de falhas e riscos associados, dentre outros [1]. Sendo assim, nos reatores nucleares, cultura e filosofia da segurança são conceitos que se delineiam a fim de garantir continuamente a soberania e a integridade da energia nuclear e instituições envolvidas, bem como a preservação da saúde e do bem-estar de todos os indivíduos envolvidos a essa tecnologia.

Nessa perspectiva, a segurança e a proteção de um reator nuclear devem ser asseguradas por uma série de fatores e princípios determinados pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), sendo exercidos, orientados, supervisionados e controlados pelo Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), no âmbito brasileiro. A CNEN é a responsável por certificar que as plantas sejam operadas com segurança pelo licenciado e que o projeto seja aprovado [8]. Desse modo, esta seção apresenta alguns dos princípios imprescindíveis para a garantia da integridade dos componentes de um reator nuclear, assim como de todos os envolvidos direta e indiretamente nos processos da transformação da energia nuclear e suas consequentes aplicações.

Tratando-se dos reatores, é sabido que prevenir a liberação de produtos radioativos da fissão e isótopos de combustível é o objetivo final das características de segurança [1], então para que esse propósito seja contemplado, uma série de aspectos deve ser cumprida e respeitada, dentre as quais, cita-se que os componentes dos reatores devem ser projetados e construídos para minimizar a chance de falha, o equipamento de resfriamento

do núcleo de emergência deve ser instalado para reduzir o perigo em caso de acidente e o licenciamento precisa ser administrado pela Comissão Reguladora Nuclear (NRC), com o amparo de demais instituições, tendo como ferramenta indispensável a análise probabilística de risco de segurança (APRS) [1].

Além disso, os projetos de reatores devem evitar a criticidade acidental por meio de medidas como: processamento químico de urânio enriquecido ou plutônio, armazenamento de combustível em conjuntos de recipientes e carregamento inicial de conjuntos de combustível no momento da partida de um reator [1]. Na análise e previsão de acidentes, associada a APRS, há incluído um parâmetro essencial para sustentar medidas preventivas e mitigadoras: o risco. Ele pode ser definido como o produto entre frequência e consequências. Para reatores, a frequência se refere ao número de vezes por ano de operação de um reator que se espera que o incidente ocorra e as consequências incluem o número de ferimentos ou fatalidades, sejam imediatas ou latentes, bem como danos materiais [1].

Em síntese, o reator nuclear possui três funções básicas de segurança [8]:

- Controlar a reatividade;
- Resfriar o combustível; e
- Conter as substâncias radioativas.

Diante disso, no exercício dessas funções, as principais características dos reatores são inerentes, i.e. possuem coeficiente de temperatura negativo, o que significa que à medida que a temperatura aumenta, a eficiência da reação diminui, sendo intrínseco ao controle dos níveis de potência, e coeficiente de vazão negativo, indicando que se algum vapor se formou na água de resfriamento, há uma diminuição do efeito moderador, de modo que menos nêutrons são capazes de causar fissão e a reação abandona automaticamente [8] [1].

Seguindo essa característica e sendo complementada por outros parâmetros, a garantia da segurança supramencionada é feita pelos seguintes tipos de sistemas [1] [3]:

1. Inerente: Baseado em princípios físicos intrínsecos. Isso implica que nenhuma interferência humana, nenhum sinal de ativação e nenhum fornecimento de energia externa são necessários para permanecer em uma condição segura. E.g. feedback de reatividade negativa;
2. Passivo: Não requer iniciação ativa ou potência, entram em operação no caso de um acidente, e.g. circulação natural e refrigeração alimentada por gravidade;
3. Projetado/Ativo: Requerem acionamento ativo ou fornecimento de energia, e.g. sistema de refrigeração de emergência, sistemas digitais de proteção de reatores e geradores de emergência a diesel.

À face do exposto, é perceptível que os desdobramentos dos conceitos, características e parâmetros mencionados possuem complexidade intrínseca, ao passo que constituem um conjunto de medidas, sistemas e resoluções que são continuamente modificadas e complementadas a fim de proporcionar tais segurança e proteção. Esses princípios, por sua vez, são sustentados e norteados pelos conceitos e filosofias de defesa de profundidade e múltiplas camadas, cuja ênfase, diante dos fins desenvolvidos, refere-se diretamente às barreiras físicas, como examinado a seguir.

III. DEFESA EM PROFUNDIDADE

Segundo o *Nuclear Safety and Security Glossary* [7], o conceito de defesa em profundidade se refere à implementação hierárquica de múltiplas camadas de equipamentos e procedimentos, os quais visam impedir a escalada de ocorrências operacionais previstas e manter a eficácia das barreiras físicas colocadas entre uma fonte de radiação ou material radioativo e trabalhadores, membros do público ou do meio ambiente, em estados operacionais e, para algumas barreiras, em condições de acidente [7]. A estratégia característica a essa prática dá prioridade à prevenção de acidentes e, caso não possam ser evitados, foca-se na atenuação de suas consequências [4] [10].

Para esse conceito, o Grupo Internacional de Segurança Nuclear (GISN, em inglês INSAG) definiu cinco níveis [10] [7]:

1. Refere-se ao mau funcionamento: Prevenção de operação anormal e falhas.
2. Controle de operação anormal e detecção de falhas;
3. Controle de acidentes dentro da base do projeto (*design basis*).
4. Controle de condições severas da planta do reator, abrangendo a prevenção da progressão de acidentes e a mitigação das consequências de acidentes graves.
5. Mitigação dos efeitos radiológicos de liberações consideráveis de material radioativo.

Por vezes, a literatura (incluindo resoluções normativas) traz consigo esses níveis agrupados em três camadas de segurança: hardware, software e controle de gerenciamento [7].

IV. BARREIRAS FÍSICAS

A principal fonte de risco em um reator nuclear é a grande quantidade de materiais radioativos que são acumulados no núcleo durante a operação [3]. Por isso, o problema central e norteador de segurança e proteção em

um reator é seguir a filosofia de segurança e a defesa em profundidade, para assim assegurar que os produtos da fissão permaneçam sempre segura e metodicamente confinados [11]. Para tanto, outro conceito fundamental é aplicado e associado aos projetos dos reatores nucleares: as múltiplas barreiras. Elas representam uma sequência de obstáculos, físicos ou não, que devem bloquear a passagem de radiação proveniente do combustível para a população vizinha [11] [3].

No que concerne às barreiras físicas, algumas delas são inerentes ao processo: a matriz do combustível do reator, o revestimento do combustível, o vaso do reator e os outros componentes do sistema primário [3]. Já outras são construídas como barreiras adicionais exclusivamente por razões de segurança, ainda assim indispensáveis, a exemplo disso tem-se o sistema de contenção, ele consiste em uma dupla contenção na forma de uma carcaça de aço rodeada por um edifício de concreto, atuando como barreiras entre o sistema primário e o meio ambiente [3].

Dessa maneira, as barreiras físicas podem ser divididas da seguinte maneira [10] [11] [12]:

1. Matriz e revestimento do combustível

Sabe-se que o material físsil e fissionável está localizado dentro de elementos combustíveis sólidos - como urânio enriquecido e o óxido de urânio [11]. Esses elementos combustíveis são as popularmente conhecidas como as varetas de combustível, observadas na Figura 2. Elas são fechadas e têm objetivo de impedir que dos materiais contidos nela saiam para o ambiente externo e a fuga dos gases dos produtos de fissão. Assim, para confinar os fragmentos de fissão emitidos perto da superfície do combustível, o combustível é cercado por uma camada de revestimento. Em alguns reatores, este revestimento é ligado diretamente ao combustível, como no HTGR, onde cada partícula de combustível é revestida com camadas de carbono pirolítico e carboneto de silício [11]. Em outros reatores, como no PWR, o revestimento consiste em tubos metálicos nos quais as pastilhas de combustível são inseridas, usa-se amplamente uma liga de zircônio, denominada *zircalloy*.

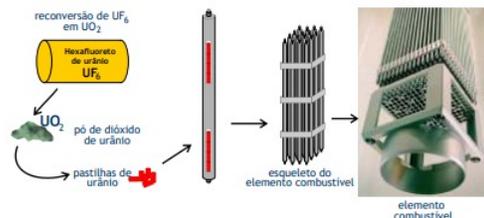


Figura 2. Processo para a compactação e obtenção dos elementos combustíveis [13]

2. Vaso de pressão e limite do sistema de refrigeração do reator

O núcleo do reator está localizado dentro de um vaso de pressão que, por sua vez, está localizado dentro de um edifício de contenção. O circuito primário é um circuito fechado feito de aço grosso, e o vaso de pressão do reator faz parte deste circuito. Nesse vaso, o refrigerante primário se move em um ou mais circuitos fechados [11]. A integridade do circuito primário também é protegida pelos níveis 1 - 3 de defesa em profundidade [12].

3. Contenção

Como citado no primeiro parágrafo, o vaso de pressão do reator e o gerador de vapor são instalados em uma carcaça de aço. Ela é responsável por conter os gases e vapores possíveis liberados durante a operação do reator [13]. A denominada contenção pode possuir formas de cilindro e esfera, por exemplo, como ocorre em Angra 1 e Angra 2, respectivamente [13].

4. Edifício do reator

Projetado para prevenir ou mitigar a liberação descontrolada de material radioativo para o meio ambiente em estados operacionais e condições de acidente (protegendo contra impactos externos, terremotos, por exemplo). Portanto, é considerado a quarta e última barreira na estratégia de defesa em profundidade, desempenhando um papel crucial nos “Acidentes de Base de Projeto” [12]. A integridade do edifício de contenção também é protegida pelos níveis 1 - 4 de defesa em profundidade [12]. Esse envoltório é feito de concreto e reveste a contenção. Em Angra 1, ele possui 1 metro de espessura [13].

Assim, relacionando os níveis de defesa em profundidade com as barreiras físicas, obtém-se um panorama amplo do sistema de segurança, definido por [12] na Figura 3:

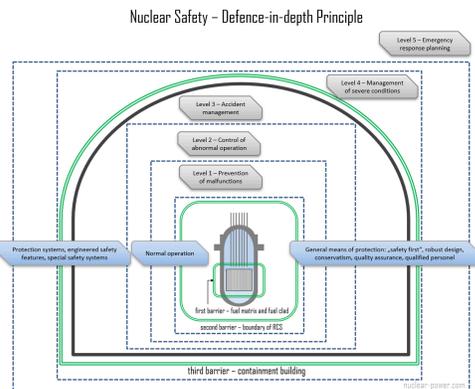


Figura 3. Níveis de defesa em profundidade e barreiras físicas [12]

V. DESCRIÇÃO E IMPLICAÇÕES DE ALGUNS ACIDENTES

A. Three Mile Island

O acidente na unidade 2 do reator de Three Mile Island (TMI) ocorreu em 28 de março de 1979, próximo à cidade de Harrisburg, Pensilvânia. Uma pequena quantidade de radioatividade foi liberada, causando grande alarme em toda a região. Essencialmente, um mau funcionamento no sistema de circulação de resfriamento do reator aliado a erros de operação resultou no superaquecimento e derretimento parcial do reator [1].

Em suma, suas causas foram uma combinação de falhas, as quais são enumeradas por [1] da seguinte maneira:

- Deficiência do projeto: Controle inadequado da água e instrumentação insuficiente;
- Falha de equipamento: Válvula de pressurização emperrada;
- Erro do operador: Particularmente no desligamento do sistema de emergência de refrigeração do núcleo e das bombas.

O acidente de TMI levou a uma série de esforços regulatórios para fortalecer a segurança em reatores. A Comissão de Regulamentação Nuclear implementou várias novas regulamentações de segurança para resolver as deficiências descobertas durante a investigação, com inúmeras ações corretivas [1], como requisitos para manutenção regular e inspeções de segurança, treinamento de operadores e supervisores, etc. A mais significativa das implicações foi a formação pela indústria do Instituto de Operações Nucleares, responsável por rever todos os aspectos do desempenho das usinas nucleares dos Estados Unidos e fornecer recomendações para melhorias.

B. Chernobyl

Considerado um dos mais notáveis e catastróficos acidentes da era contemporânea, ocorreu em 26 de abril de 1986, na unidade 4 de um reator localizado em Chernobyl, próximo a Kiev, na antiga Ucrânia Soviética. A destruição do reator ocorreu devido a uma explosão com quantidades exorbitantes de vapor e fogo que matou inicialmente 2 pessoas, mais 29 por envenenamento por radiação no prazo de três meses, e teve consequências significativas para a saúde e o meio ambiente [8] [1]. De acordo com [1], a quantidade de exposição à radiação para os trabalhadores e o público não é conhecida com precisão, mas as doses excederam a queda dos testes de armas anteriores. Contudo, segundo [14], estima-se que a explosão liberou cerca de 13 EBq (360 MCi) de atividade.

As causas relativas a esse acidente compõem um conjunto que dimensiona a magnitude dele devido às falhas

humanas e operacionais, e a negligência ao se lidar com uma situação de emergência. Cita-se principalmente que: a tecnologia do reator era antiga (RBMK - reator canalizado de alta potência) e não preparada para emergências (sistema de refrigeração defeituoso) e a resposta das autoridades responsáveis foi lenta e mais focada com a imagem veiculada na mídia do que o controle de danos. Em termos técnicos pode-se mencionar, segundo [15]:

- O tipo de reator possuía um grande coeficiente vazio positivo, o que significa que o aumento de vazios e bolhas de vapor está diretamente relacionado ao aumento da reatividade do núcleo, fazendo com que a saída de calor do reator atingisse níveis perigosamente altos. Dessa forma, o reator era muito instável em níveis baixos de potência e vulnerável a aumentos perigosos nos níveis de produção de energia - o que faz referência ao experimento que promoveu o acidente, em que a potência do reator foi descontroladamente alterada ao se tentar reduzi-la de 3200 MWt para aproximadamente 700 MWt.
- Houve uma falha no projeto das varetas de controle, elas são responsáveis pelo controle do fator de multiplicação (k) e, por conseguinte, pela absorção de nêutrons. No reator, foram encontradas hastes de grafite com cerca de 1,3 metros a menos do que o determinado pelas normas vigentes. Assim, a parte superior delas, que atua para absorver os nêutrons e retardar a reação nuclear, foi preenchida com carboneto de boro. Quando as hastes foram inseridas, a parte de grafite deslocou parte do líquido refrigerante, levando assim a um aumento na taxa de fissão. Isto, por sua vez, resultou em um perigoso aumento na potência de saída. Além disso, após o ocorrido, investigações determinaram que, no momento do acidente, o número de varetas no reator era equivalente a 8, sendo que de acordo com as normas internacionais, era necessário um mínimo de 15 hastes desse tipo em todos os momentos.

Em face desse acontecimento, uma estrutura, denominada sarcófago, foi construída ao redor do reator danificado com o intuito de evitar a liberação futura de radioatividade, contudo há evidências de deteriorações a essa barreira, como infiltração de água da chuva [1].

Com esse caso, inúmeras implicações foram geradas e alguns fatores técnicos foram rigidamente determinados da seguinte maneira [1]:

- Os reatores do tipo RBMK são inerentemente inseguros e sua tecnologia deve ser descontinuada gradualmente;
- A filosofia e a prática de segurança dos reatores precisam ser revisadas com maior atenção aos fatores humanos e aos sistemas de segurança;
- A cooperação internacional e o intercâmbio de informações devem ser fortalecidos e enfatizados;

- Inegavelmente, os acidentes com reatores têm importância global;
- Os efeitos do acidente de Chernobyl devem ser continuamente monitorados;
- Com o acidente, formou-se um conjunto de projetos de pesquisa entre os Estados Unidos e a Federação Russa, com o objetivo de enfatizar bancos de dados, códigos de computador e o desenvolvimento de um plano para aprimorar a segurança nuclear russa.

C. Fukushima Daiichi

Em comparação a Chernobyl, a tecnologia encontrada nos reatores de Fukushima Daiichi era mais segura, possuindo contenção secundária, recipiente de contenção de aço e revestimento de concreto. Contudo, sua estrutura e integridade foram gravemente afetadas em 11 de março de 2011, devido ao Grande Terremoto do Japão Oriental: um evento sísmico que registrou 9.0 na Escala de Magnitude de Momento (MMS) [1]. Agravando esse fato, após aproximadamente uma hora, um tsunami de aproximadamente 13 metros de altura inundou o local da planta do reator. A partir disso, com os efeitos acarretados, este é considerado o segundo pior acidente nuclear da história.

Ainda que o desligamento automático das unidades 1, 2 e 3, que operavam à potência nominal, tenha sido executado após o terremoto, enquanto as unidades 4, 5 e 6 estavam em falta de energia, o terremoto danificou o sistema de energia elétrica próximo, fato que resultou na perda de energia fora do local, mas geradores a diesel começaram a fornecer energia a equipamentos como sistemas de remoção de calor de decaimento para esses três reatores de água fervente (BWRs) [1]. Todavia, essa interrupção da eletricidade causou falhas nos sistemas de resfriamento em cada um deles nos primeiros dias do desastre.

Assim, o aumento do calor residual em cada núcleo do reator levou ao superaquecimento e fusão parcial das barras de combustível, resultando em liberações intermitentes de radiação, e explosões devido ao acúmulo de hidrogênio pressurizado nos edifícios de contenção externos ao redor dos Reatores 1 e 3 [16] [8] [1]. Cerca de dois meses depois, o material fundido caiu no fundo dos vasos de contenção dos Reatores 1 e 2, fazendo grandes furos no fundo de cada vaso e expondo parcialmente o material do núcleo [8]. De tal maneira, uma zona de exclusão aérea estabelecida pelo governo foi feita ao redor da fábrica, e áreas terrestres num raio de 20 quilômetros foram evacuadas [8].

As taxas de dosagem de 12 mSv/h (1,2 rem/h) foram medidas a 1 km das unidades durante as liberações [1]. Ademais, de modo geral, as descargas de material radioativo de Fukushima foram cerca de uma ordem de magnitude menor do que as de Chernobyl [1] [8]. Entretanto, em 2013, o Comitê Científico das Nações Unidas sobre o Efeito das Radiações Atômicas concluiu que a exposição à

radiação após o acidente nuclear em Fukushima não causou quaisquer efeitos imediatos à saúde dos envolvidos, sendo considerado improvável atribuir efeitos futuros à saúde dos trabalhadores e da sociedade envolvida [17]. Não obstante, a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou a potencial elevação dos casos de certos tipos de câncer atribuídas a esse acidente.

Algumas implicações desse desastre na instância de segurança e proteção foram:

- A lição primordial aprendida é que os licenciados de plantas nucleares e seus reguladores devem buscar e agir ativamente em relação a novas informações sobre os possíveis riscos que possam afetar a segurança das usinas nucleares [18].
- Segundo Greg Rzentkowski, diretor da Divisão de Segurança das Instalações Nucleares da AIEA no período de divulgação do boletim *A Decade of Progress after Fukushima-Daiichi*, esse caso influenciou diretamente alterações no pensamento de segurança nuclear, fato que se manifestou em uma mudança distinta da prevenção de acidentes com base em projetos para a prevenção de acidentes graves e, diante um acidente, a eliminação prática de suas consequências [19].
- Os riscos naturais, especialmente os extremos, devem ser rigidamente analisados e considerados durante a formulação e estabelecimento de protocolos de projeto e de segurança, uma vez que eles podem causar sérios problemas dentro e fora das instâncias do reator [1] [19].
- Enfatizou-se a necessidade de assegurar a geração e armazenamento e reservas de energia elétrica. Para isso, em resposta ao acidente na Fukushima e na Ordem NRC EA-12-049, a indústria de energia nuclear dos EUA desenvolveu o *FLEX*, um sistema responsável por fornecer energia de reserva adicional e equipamento para lidar com um evento externo além do projeto [1].
- Considera-se que a resposta rápida e decisiva das autoridades e profissionais envolvidos foi essencial

para que não houvesse nenhuma morte diretamente relacionada ao acidente no reator. Dessa forma, a estruturação coerente e a execução de todos protocolos relativos à evacuação são imprescindíveis para atenuar os efeitos de um acidente tal qual o descrito.

VI. CONSIDERAÇÕES E PERSPECTIVAS FINAIS

Em face da revisão de literatura, é notável que os reatores nucleares possuem sistemas de segurança e proteção que devem ser continuamente aprimorados e incorporados em discussões de caráter científico em nível mundial, respeitando as soberanias e planos de desenvolvimento nacional dos países envolvidos no intercâmbio de conhecimentos nessas áreas. Além disso, é fundamental reconhecer a imprescindibilidade dos parâmetros e características de segurança e proteção de reatores, tendo em vista suas completudes e particularidade em âmbitos técnicos, institucionais/organizacionais, sociais, ambientais, de processos e de projeto.

Os acidentes descritos e analisados possuem causas diretamente relacionadas à falibilidade humana e operacional e suas implicações evidenciam a necessidade de reforço às metodologias relacionadas aos procedimentos de segurança para além dos mencionados, abrangendo as nuances estabelecidas pela AIEA bem como instituições e comissões nacionais.

Por fim, sabe-se que a energia nuclear é segura e que nenhuma fonte de energia (e respectivas tecnologias de geração) está isenta de riscos, acidentes e fatalidades, contudo há evidências de que a fonte do presente artigo é mais segura em relação às outras. Tal fato, por sua vez, pode ser explicado e sustentado pelo robusto sistema e camadas de proteção e segurança que permite a operação de reatores e o uso dos combustíveis nucleares, propiciando grandes quantidades de energias e potências, aplicações sofisticadas e, portanto, assegurando e elevando a qualidade de vida da sociedade. Nesse sentido, a divulgação científica relacionada a segurança de reatores deve ser presente e acessível para desmistificar a energia nuclear e interiorizar os princípios e cultura de segurança no público em geral.

[1] R. Murray and K. Holbert, *Nuclear energy: An introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes*, Vol. 1 (Elsevier, 2019).

[2] Z. Gu, *Annals of Nuclear Energy* **120**, 682 (2018).

[3] H. van Dam, *Reports on Progress in Physics* **55**, 2025 (1992).

[4] D. Kim and J. Kang, *Bulletin of the Atomic Scientists* **68**, 86 (2012).

[5] B. Pershagen and M. Bowen, *Light water reactor safety* (Elsevier, 2013).

[6] S. Máté, *International Journal of Nuclear Security* **3**, 12 (2017).

[7] *IAEA Nuclear Safety and Security Glossary*, Non-serial Publications (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 2022).

[8] W. N. Association, "Safety of nuclear power reactors," <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx> (2022).

[9] P.-S. Institut, "Data for nuclear accidents modified to

- reflect unscar findings/recommendations and nrc soarca study.”
- [10] *Defence in Depth in Nuclear Safety*, INSAG Series No. 10 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 1996).
- [11] J. R. Lamarsh, A. J. Baratta, *et al.*, *Introduction to nuclear engineering*, Vol. 3 (Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2001).
- [12] N. Power, “Multiple barriers to radionuclide release,” <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/nuclear-safety/multiple-barriers-to-radionuclide-release/> (2023).
- [13] Cardoso, Eliezer de Moura and et al, “Apostila educativa energia nuclear,” (2012).
- [14] N. E. Agency, “Chernobyl: Assessment of radiological and health impacts (2002),” (2002).
- [15] Z. W. Seh, “Causes of the chernobyl accident,” (2015).
- [16] G. Steinhauser, A. Brandl, and T. E. Johnson, *Science of the total environment* **470**, 800 (2014).
- [17] F. N. A. SAYS, *Health Physics* **105** (2013).
- [18] N. R. Council *et al.*, *Lessons learned from the Fukushima nuclear accident for improving safety of US nuclear plants* (2014).
- [19] G. Rzentkowski, “Ensuring the safety of nuclear installations: Lessons learned from the fukushima daiichi accident,”.
- [20] A. N. Healey, *Security Journal* **29**, 23 (2016).
- [21] J. L. Rempe, in *Encyclopedia of Nuclear Energy*, edited by E. Greenspan (Elsevier, Oxford, 2021) pp. 1–5.
- [22] N. OECD, “The fukushima daiichi nuclear power plant accident,” (2013).
- [23] P. Burgherr and S. Hirschberg, *Human and Ecological Risk Assessment* **14**, 947 (2008).