



## UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE SEGURANÇA COMO METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E GERENCIAMENTO DE RISCOS INERENTES A USINAS NUCLEOELÉTRICAS

Use of Probabilistic Safety Assessment as methodology for the evaluation and management of risks inherent in nuclear power plants

JÔNATAS FRANCO CAMPOS DA MATA<sup>1</sup>, AMIR ZACARIAS MESQUITA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade, Brasil

<sup>2</sup>Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, Brasil

---

### KEY WORDS

*Probabilistic  
Safety Assessment  
Nuclear Risks  
Nuclear Power Plant  
Probability of occurrence  
Magnitude of  
consequences  
Severe Accidents*

### ABSTRACT

*The 21st century brought remarkable technological advances in relation to sources of electricity generation called sustainable. However, clean energy sources have disadvantages, such as high implantation costs and low power generated, when compared to the nucleoelectric matrix. Regarding safety, the nucleoelectric technology works with modern and efficient methodologies, in which the Probabilistic Safety Assessment (PSA) stands out. This paper presents the main steps to perform PSA, in addition to showing the best practices found in countries such as the United States, France, Canada and the United Kingdom compared to Brazil.*

---

### PALAVRAS-CHAVE

*Análise  
Probabilística de Segurança  
Riscos Nucleares  
Usina Nuclear  
Probabilidade de ocorrência  
Magnitude de consequências  
Acidentes Severos*

### RESUMO

*O século XXI trouxe notáveis avanços tecnológicos com relação a fontes de geração de energia elétrica denominadas de sustentáveis. Entretanto, as fontes limpas de energia apresentam desvantagens, como alto custo de implantação e baixa potência gerada, quando comparadas à matriz nucleoeletrica. Em relação à segurança, a tecnologia nucleoeletrica trabalha com metodologias modernas e eficientes, onde se destaca a Avaliação Probabilística de Segurança (APS). O presente trabalho apresenta as principais etapas para a realização da APS, além de evidenciar as melhores práticas, encontradas em países como os Estados Unidos, França, Canadá e Reino Unido em comparação com o Brasil.*

Recibido: 15/09/2017

Aceptado: 27/11/2017

## Introdução

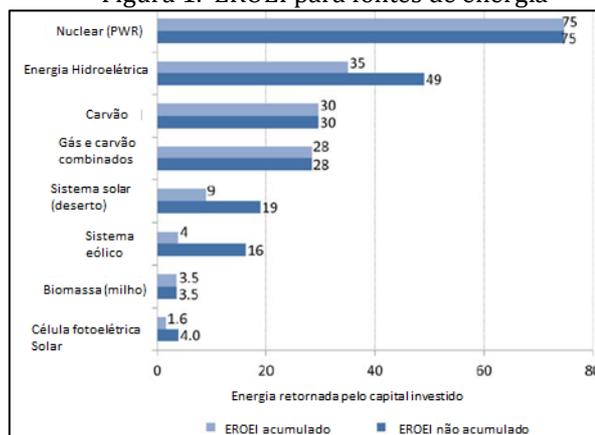
Ao longo do tempo, observa-se a utilização continuada e extensiva do processo de combustão de fontes não renováveis, para a geração de energia elétrica. Destacam-se, neste interim, os seguintes insumos: carvão mineral; petróleo; e gás natural. Apesar dos avanços evidentes na tecnologia, conforto e qualidade de vida da humanidade, existem evidências científicas demonstrando a degradação ambiental causada pela utilização maciça destes combustíveis fósseis, tais como: a) efeito estufa, caracterizado pelo aumento da temperatura média da atmosfera terrestre; b) poluição do solo, do ar e da água; c) redução, em ritmo crescente, das reservas dessas matérias-primas; e d) problemas respiratórios para pessoas no entorno das indústrias e suas instalações. Para minimizar a escalada destes efeitos nocivos, há um esforço crescente na inversão de investimentos em fontes limpas de energia, tais como: energia solar; energia eólica; e energia hidrelétrica. A energia nuclear é também considerada uma matriz não poluente e segura, pois não gera gases do efeito estufa, como o gás carbônico, além de haver um cuidadoso processo de estocagem e monitoramento de seus rejeitos radioativos em depósitos que ocupam áreas diminutas. Os riscos de segurança em reatores nucleares, por sua vez, são cuidadosamente estudados através de metodologias específicas (BROOK *et al.*, 2014).

Em relação ao retorno do capital investido em empreendimentos destinados à geração de energia elétrica por diferentes fontes, uma análise comparativa pode ser feita através do parâmetro Energia Retornada pela Energia Investida (EROEI). Esta variável mede a quantidade de energia produzida em comparação com a energia gasta no processo.

A Figura 1 exibe uma visão geral para diversas fontes de energia. Para alguns tipos de energia, há valores distintos do EROEI para situações em que a energia não é armazenada, e nos casos em que a mesma é armazenada para utilização posterior. Tal armazenamento considera, por exemplo, as barragens que atendem usinas hidrelétricas (IAEA, 2016a). Pode-se verificar que a energia nuclear apresenta um ótimo EROEI (75). Este desempenho é devido à alta capacidade de estabilidade do sistema, além da multiplicação energética proporcionada por esta matriz. Ou seja, por meio de uma pequena massa de urânio enriquecido, é possível a obtenção de imensas quantidades de energia térmica em forma de vapor, impulsionando as turbinas geradoras de energia elétrica. É importante ressaltar que não há incremento do EROEI devido a armazenamento de energia, pois o decaimento de urânio ocorre a uma taxa constante. A segunda fonte com maior retorno financeiro é a energia

hidrelétrica, cujo EROEI equivale a 35, considerando a geração de energia elétrica em tempo real, e 49 para a energia acumulada na barragem. Neste tipo de matriz, a acumulação de energia potencial hidráulica permite grande estabilidade de geração, com diminutos incidentes de falhas no fornecimento. As demais fontes de energia limpa, como a solar e a eólica, apresentam EROEI bastante inferiores às duas primeiras fontes citadas. Tais alternativas continuarão a demandar contínuos investimentos no aprimoramento da tecnologia de geração e acumulação de energia, para aumento da estabilidade dos respectivos sistemas.

Figura 1. EROEI para fontes de energia



Fonte: informação adaptada de Brook et al., 2014.

## Análise Probabilística de Segurança e sua importância na garantia de segurança das usinas nucleares

A Análise Probabilística de Segurança (APS) é uma metodologia utilizada para estudar e gerenciar os riscos relacionados a acidentes severos, ou seja, eventos indesejados que podem acarretar danos severos ao núcleo do reator. Tais eventos são provenientes de condições adversas causadas por falhas em equipamentos, erros humanos, eventos externos (por exemplo, terremotos e incêndios) e outros fatores que não são previstos nas Bases do Projeto (BPs).

Por sua vez, BPs são informações a respeito de parâmetros de operação, procedimentos e limites de segurança considerados no projeto do reator nuclear. Neste caso, são estudados os acidentes postulados, isto é, acidentes de menor severidade e que não afetam o núcleo do reator. As técnicas relativas a BPs são denominadas de determinísticas, sendo centradas em aspectos, tais como: procedimentos técnicos e gerenciais; cálculos e dados de engenharia; conceitos de defesa em profundidade. Desta forma, não levam em conta as probabilidades de ocorrência destes eventos,

considerando-se consequências únicas para cada simulação realizada.

Portanto, a APS se traduz em uma abordagem mais completa e robusta para o estudo dos possíveis acidentes e suas consequências do que as metodologias convencionais, pois considera tanto as técnicas determinísticas dirigidas para os acidentes postulados, quanto as técnicas probabilísticas de avaliação dos riscos relacionados aos acidentes severos. Desta forma, a APS fornece os requisitos necessários para o amplo gerenciamento de riscos em uma usina nuclear (IAEA, 2016b).

Em março de 2011, houve um acidente em quatro reatores nucleares da central nuclear Fukushima Daichi I, no Japão, devido à ocorrência de um terremoto seguido de tsunami. Este evento trouxe consigo a redução do nível de confiança, por parte da opinião pública, sobre a segurança de usinas nucleares frente a ocorrências de acidentes de grande severidade. Notou-se, a partir de então, um retrocesso da retomada da indústria nucleoeletrica em diversos países (MESQUITA, 2013). Portanto, há necessidade de esforços contínuos em metodologias como a APS, para aumentar a confiabilidade das medidas preventivas de segurança frente a riscos de novos acidentes severos.

**Níveis de APS**

A APS é dividida em três níveis sequenciais: APS nível 1, nível 2 e nível 3.

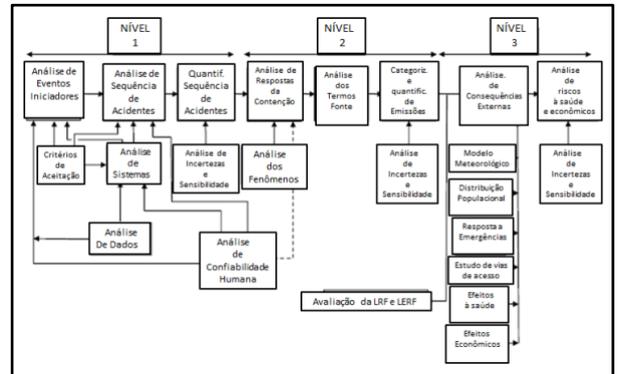
A APS Nível 1 estuda as sequências de eventos que podem levar a danos ao núcleo do reator, identificando as fortalezas e fraquezas dos diversos sistemas, além de definir as ações preventivas e corretivas (IAEA, 2010a).

Segundo a IAEA (2010b), os estudos de APS Nível 2 realizam a análise da progressão cronológica das sequências dos danos ao núcleo do reator, permitindo a identificação das diversas relações entre os eventos com probabilidade de ocorrência nas instalações. Fornecem, assim, dados complementares sobre as frequências e consequências dos danos, incluindo as liberações de material radioativo para o meio ambiente.

Os estudos de APS Nível 3 fornecem uma avaliação probabilística de consequências da liberação dos radionuclídeos em locais externos ao reator. As entradas para a APS Nível 3 são derivadas de várias fontes. Podem ser citadas, a seguir, as principais entradas: quantidades de radiação que podem ser liberadas, em acidentes severos, fornecidas pela APS Nível 2; frequências de liberação dos radionuclídeos, passíveis ou não de mitigação antes de atingirem pessoas; formas de liberação e locais; dados meteorológicos; dados da população; informações econômicas. As saídas típicas de uma APS Nível 3 podem incluir: doses coletivas de radiação; efeitos sobre a saúde das

pessoas; impactos econômicos; efeitos sobre a agropecuária local (CALDWELL, 2012). A Figura 2 exibe uma visão global dos níveis da APS e suas inter-relações.

Figura 2. Níveis de APS



Fonte: informação adaptada de EPRI, 2011.

**Comparativo sobre a utilização da APS em países selecionados**

O autor deste artigo investigou, em sua dissertação de mestrado, o grau de utilização da APS em alguns países, comparativamente ao Brasil. A Tabela 1 exibe resultados comparativos desta pesquisa (MATA, 2016).

Tabela 1. Utilização comparativa da APS

Aspectos	Brasil	Estados Unidos	Reino Unido	França	Canadá
Normas / diretrizes básicas	X	X	X	X	X
Avaliação ambiental de riscos		X			
Avaliação vulnerabilidades	X	X	X	X	X
Avaliação desempenho	X	X	X	X	X
Inspeções e revisões periódicas	X	X	X	X	X
Padronização	X	X	X	X	X

Fonte(s): Informação adaptada de Mata, 2016.

## Conclusões

Verifica-se que todos os países estudados, inclusive o Brasil, possuem diretrizes e procedimentos para a utilização da APS na avaliação de riscos em reatores nucleares. Entretanto, somente os Estados Unidos desenvolveram normas específicas para estudos de riscos ambientais, por meio da APS. No caso do Brasil, considerou-se as resoluções recentes colocando, como requisito obrigatório, o estudo de APS para a usina nuclear Angra 3, em fase de construção (CNEN, 2010).

Com relação à utilização prática da APS (avaliações individuais de reatores, estudo de vulnerabilidades, medição da performance, inspeções e padronização), não há evidências recentes para as usinas nucleares brasileiras. Os demais países têm apresentado grande evolução nestes quesitos (MATA, 2016).

Ressalta-se que a aplicação efetiva da APS nos processos de licenciamento de reatores nucleares, para os países selecionados na pesquisa (Estados Unidos, Reino Unido, França e Canadá), contribui para aperfeiçoar a cultura de segurança. Tal constatação apoia-se no fato de que a APS exige um maior rigor, por parte de toda a equipe, em questões de segurança, em condições normais, em situações de acidentes postulados (Bases de Projeto) e em situações de acidentes severos. A cultura de segurança e a utilização de metodologias mais avançadas para a garantia da segurança das usinas nucleares traz, à opinião pública, a necessária tranquilidade para que a indústria nuclear possa prosperar, no sentido de fornecer grandes quantidades de energia elétrica com

retorno financeiro competitivo e baixos níveis de agressão ao meio ambiente (MATA, 2016).

Verifica-se que, nestes países, a opinião pública têm conferido uma boa aceitação da tecnologia nucleoeletrica, mesmo após decorridos apenas 6 anos desde o acidente nuclear de Fukushima. As questões de garantia da segurança são fundamentais neste quesito, pois permitem a todas as instituições e empresas envolvidas a aplicação das melhores práticas tecnológicas e comportamentais no sentido de consolidação e melhoria dos sistemas. Portanto, a APS tende a manter um alto nível de evolução nestes países.

No Brasil, as novas diretrizes para a utilização da APS são muito recentes, demandando alguns anos de utilização da APS para que ocorra o aperfeiçoamento desta metodologia, e os consequentes ganhos na cultura de segurança (MATA, 2016). Espera-se que a construção da usina nuclear Angra 3, em andamento, seja concluída com o devido suporte e arcabouço de APSs robustas, de forma a garantir que a operação de seu reator nuclear e demais instalações seja conduzida com procedimentos otimizados em relação à gestão de riscos, tanto de acidentes postulados quanto de acidentes severos.

## Agradecimentos

As seguintes instituições apoiaram este trabalho: Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## Referências

- Brook, B. W.; Alonso, A.; Meneley, D. A.; Misak, J.; Bles, T.; Van Erp, J. B. (2014). Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. In: Elsevier (ed.), *ScienceDirect. Sustainable Materials and Technologies 1-2* (pp. 8-16).
- Caldwell, A. (2012). *Addressing Off-site Consequence Criteria Using Level 3 Probabilistic Safety Assessment. A Review of Methods, Criteria, and Practices*. Master of Science Thesis. Department of Nuclear Power Safety. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. (2010). *Portaria Nº 77. Concede a Licença de Construção para a Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto - CNAEA 3 e estabelece suas condicionantes*. Publicação no Diário Oficial da União (DOU) em 31 de maio de 2010. Brasília: CNEN.
- EPRI - Electric Power Research Institute. (2011). *Basics of Nuclear Power Plant Probabilistic Risk Assessment*. In: Fire PRA Workshop 2011. San Diego: EPRI.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. (2016a). *Nuclear Power and Sustainable Development*. Austria: IAEA.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. (2016b). *IAEA Safety Glossary: Terminology used in Nuclear Safety and Radiation Protection*. Final Revision. Austria: IAEA.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. (2010a). *Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants*. Specific Safety Guide. Safety Standards Series No. SSG-3. Austria: IAEA.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. (2010b). *Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants*. Specific Safety Guide. Safety Standards Series No. SSG-4. Austria: IAEA.
- Mata, J. F. C. (2016). *O Papel das Metodologias de Análise Probabilística de Segurança no Processo de Licenciamento de Reatores Nucleares*. Dissertação de Mestrado. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear / Comissão Nacional de Energia Nuclear - CDTN / CNEN. Belo Horizonte, Brasil.
- Mesquita, A. Z. (2013). *Current Research in Nuclear Reactor Technology in Brazil and Worldwide*. 1 ed. Vol. 1. Croatia: InTech.