

## **PROPOSTA DE MODELO DE ANÁLISE INICIAL DE RISCOS PARA UMA INSTALAÇÃO DE ENRIQUECIMENTO ISOTÓPICO DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO**

Arlindo Candido da Silva Neto<sup>1</sup>, Indústrias Nucleares do Brasil S/A (INB), Brasil  
Eduardo José de Barros Souto<sup>2</sup>, Indústrias Nucleares do Brasil S/A (INB), Brasil  
Josué Clementino de Medeiros<sup>3</sup>, Indústrias Nucleares do Brasil S/A (INB), Brasil

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma proposta de modelo de análise de riscos em instalações nucleares de enriquecimento isotópico de hexafluoreto de urânio (UF<sub>6</sub>). O critério para o delineamento deste modelo são as recomendações da NRC NUREG/CR – 1513 e revisão bibliográfica de outras normas e trabalhos relativos ao tema. O modelo proposto associa mecanismos de levantamento de dados, síntese de informações de cenários e avaliações, que possibilitam uma análise inicial simples e indutiva de perigos, situações e eventos que podem causar danos em uma determinada atividade, item, sistema ou instalação. A partir da identificação dos cenários de perigos potenciais, o modelo propõe um estudo quantitativo de frequência baseado nas falhas registradas e no histórico de manutenção. Tal abordagem torna particular a avaliação de frequência da instalação objeto do trabalho. Quanto à avaliação da severidade, o modelo proposto é subdividido em duas partes: quantitativo, vinculando o cenário ao inventário de substâncias perigosas envolvidas e qualitativo, avaliando em linhas gerais as consequências relativas ao conceito com órgãos reguladores, danos à saúde, danos ao meio ambiente, danos materiais e econômicos e danos à imagem do empreendimento. Com o principal objetivo de proporcionar uma análise particularizada da instalação a ser avaliada, o modelo considera as especificações técnicas e tecnologia aplicadas nos cenários identificados, assim sendo, o modelo deve ser capaz de mapear os riscos e suas saídas servem como balizador de priorização de ações de mitigação do perigo ou estratégias que possibilitem a redução de frequência de ocorrência. Ademais, recomenda a necessidade de estudos complementares conforme a categoria dos riscos avaliados.

### **1. INTRODUÇÃO**

O ciclo do combustível nuclear é o nome que se dá ao conjunto de processos industriais que transformam o minério urânio no combustível que gera energia em reatores nucleares. O processo se inicia na etapa de mineração e beneficiamento, extrai e tritura a rocha contendo urânio do solo. Posteriormente a rocha triturada é submetida a um processo químico que separa o urânio de outros materiais a ele associados na natureza, resultando no concentrado de urânio. Na segunda etapa, Conversão, o concentrado de urânio é dissolvido, purificado e convertido para o hexafluoreto de urânio (UF<sub>6</sub>) no estado gasoso. A etapa subsequente, Enriquecimento, é o aumento da concentração do isótopo U<sup>235</sup> de urânio até o teor suficiente para a geração de energia. O UF<sub>6</sub> enriquecido é reconvertido em pó de dióxido de urânio (UO<sub>2</sub>) e com este é são fabricadas as pastilhas que compõem o interior do combustível nuclear. Na geração de energia, a fissão dos átomos de urânio que estão contidos no combustível nuclear dentro do núcleo do

---

<sup>1</sup> Bacharel em Engenharia Elétrica e Técnico em Eletrônica – INB

<sup>2</sup> Bacharel em Engenharia Química - INB

<sup>3</sup> Bacharel em Química Industrial e Técnico em Química - INB

reator que gera calor, aquecendo a água, e transformando-a no vapor que faz movimentar as turbinas, gerando assim energia. [1]

Figura 1 - Ciclo do Combustível Nuclear



Fonte: INB [1]

A comunidade nuclear mundial reconhece doze países como detentores de instalações de enriquecimento de urânio com diferentes capacidades industriais de produção. São eles: China, Estados Unidos, França, Japão, Rússia, Alemanha, Inglaterra, Holanda, Brasil, Índia, Paquistão e Irã. [2]

O processo de enriquecimento é realizado para separar e aumentar a concentração de um dos isótopos do urânio, que sofre um processo de fissão nos núcleos dos reatores nucleares. Atualmente dois processos operam em larga escala industrial: a difusão gasosa e a ultracentrifugação. As empresas proprietárias de usinas de difusão gasosa, por razões técnicas e econômicas, já iniciaram a sua desativação, ao mesmo tempo em que implantam unidades industriais de ultracentrifugação. O processo utilizado no Brasil é o de ultracentrifugação, considerado o mais econômico entre os existentes que produz urânio enriquecido a até 5% em peso do isótopo 235 para a fabricação dos combustíveis que abastecem duas únicas usinas nucleares. [2]

A atividade de enriquecimento de urânio no Brasil é fiscalizada por quatro instituições: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e Agência Brasil – Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (ABACC).

A CNEN e do IBAMA, os quais definem em seus instrumentos normativos de licenciamento, cada qual em suas respectivas áreas de atuação, os ritos e requisitos quanto à segurança nuclear e ambiental, considerando os riscos envolvidos durante todas as fases do empreendimento.

A Norma CNEN NE 1.04, por meio da Posição Regulatória 1.04 / 001 de Junho de 2001, estabelece os requisitos para análise de segurança no que se refere à obtenção das

autorizações necessárias para o licenciamento das Instalações de Enriquecimento Isotópico de Urânio. [3]. De forma similar, a Instrução Normativa IBAMA nº 184, de 17 de julho de 2008, estabelece, em seu Projeto Básico Ambiental, a obrigatoriedade de uma análise de risco para obtenção/manutenção da licença de operação. [4]

Na etapa de projeto e construção a análise de risco concentra-se em avaliar as bases de projetos e possíveis acidentes postulados de ordem catastrófica elevando os limites aos acidentes já registrados em outras instalações nucleares. Dessa forma após a conclusão da construção e comissionamento da instalação, utilizar uma metodologia estruturada com referências normalizadas de análise de risco através da identificação dos potenciais desvios/perigos decorrentes da operação de uma instalação de enriquecimento, demonstrando, como a importância para a segurança estará sempre associada ao que ocorrerá na falha ou mau funcionamento de um determinado item da instalação.

Na vanguarda das novas tendências de gestão da qualidade, por tratar de instalações nucleares e do ciclo do combustível, as normas da CNEN sempre possuíram um enfoque muito evidente em Gestão de Risco, principalmente quanto aos riscos que possam impactar a segurança nuclear.

Neste contexto, as instalações do ciclo do combustível nuclear, devem cumprir os requisitos das normas CNEN aplicáveis, como a CNEN NN-1.16, que trata da Garantia da Qualidade para Segurança Nuclear, cuja especificidade requer a aplicação de uma gestão de risco estruturada em complementação à garantia da qualidade, a fim de assegurar a *segurança nuclear*. [5]

A íntima ligação entre a Gestão de Riscos e a Gestão da Qualidade é um importante aspecto, pois ambas são estruturadas de maneira formal e registram os resultados buscando sempre o aprimoramento contínuo dos processos, tratando os desvios com o rigor devido. A Gestão da Qualidade fornece ferramentas e mecanismos para gerenciar os riscos da empresa, garantindo que os riscos de defeitos, falhas de processos, mau atendimento, equívocos de gestão, entre outros elementos, impactem negativamente a segurança e os processos organizacionais. [5]

A junção da Gestão da Qualidade e a Gestão de Riscos tem sido amplamente reforçada na ISO 9001:2015, onde encontra-se a terminologia “Mentalidade de Risco” com o sentido de algo essencial para se conseguir um sistema eficaz de gestão da qualidade. Embora mentalidade de risco já existisse nas versões anteriores da ISO, ainda era uma ideia implícita no termo “Ação Preventiva”, que era uma ferramenta utilizada para eliminar não conformidades potenciais e prevenir recorrências.

## 2. DESCRIÇÃO

A Gestão de Riscos inclui a aplicação de métodos lógicos e sistemáticos para: comunicação e consulta ao longo de todo o processo; estabelecimento do contexto para identificar, analisar, avaliar e tratar o risco associado a qualquer atividade, processo, função ou produto; monitoramento e análise crítica de riscos; e reporte e registro dos resultados de forma apropriada [6].

O processo de avaliação de riscos é a parte da gestão de riscos que fornece um método estruturado para identificar como os objetivos podem ser afetados e analisar, em termos de consequências e suas probabilidades, antes de decidir se um tratamento adicional é requerido. Provendo, aos tomadores de decisão e às partes responsáveis, um entendimento aprimorado dos riscos que poderiam afetar o alcance dos objetivos operacionais do empreendimento [6].

O processo de avaliação de riscos tenta responder às seguintes questões fundamentais: o quê pode acontecer e por quê; quais as consequências; qual a probabilidade de sua ocorrência futura; que fatores mitigam a consequência do risco ou reduzem a probabilidade do risco; qual o nível tolerável, aceitável ou requer tratamento adicional [6].

Como parte integrante da avaliação, a Análise de Riscos em atividades industriais visa minimizar o potencial de ocorrência de acidentes, utilizando técnicas de prevenção e/ou de proteção [7]. Para instalações de ciclo de combustível nuclear, o objetivo principal é fornecer uma garantia razoável de que as operações não venham a causar danos aos trabalhadores ou afetar negativamente a saúde do público [8], propondo e utilizando métodos capazes de fornecer elementos concretos que fundamentem um processo decisório para a redução de riscos e perdas em uma instalação nuclear [9]. Os objetivos secundários incluem a identificação de controles que mitiguem ou previnam possíveis acidentes e a identificação de procedimentos apropriados de resposta a emergências.

Ao longo das diferentes fases de desenvolvimento de um projeto, nem todas as características são conhecidas. Isto implica na necessidade de aplicação de aproximações e de estabelecimento de hipóteses. À medida que a concepção dos sistemas avança e as informações vão se tornando mais precisas, as análises de segurança de funcionamento devem ser corrigidas, modificadas, aperfeiçoadas, ou seja, devem ser feitas periodicamente [10].

Evidentemente, os limites delineados podem ser revistos desde que feitos com pleno conhecimento de todas as implicações cabíveis, tais como carga de trabalho, tempo de análise, ponderação da distribuição de esforços pelas áreas mais importantes [10].

Analisar a segurança de funcionamento de um sistema é o mesmo que analisar a possibilidade da ocorrência de eventos com “consequências indesejáveis” tanto para os componentes do próprio sistema como para o ambiente onde o sistema encontra-se com interação. “Consequências indesejáveis” estão associadas à morte ou injúria ao operadores, ao público em geral circundante, às implicações físicas do sistema ou indiretamente impactados pelo funcionamento do sistema, bem como a impactos negativos inaceitáveis aos demais sistemas que compõe o meio ambiente em interação com o sistema industrial de estudo [10].

A ocorrência de eventos com consequências críticas ou catastróficas são precedidas de um evento iniciador que pode ser entendido como uma falha ou mau funcionamento de um item, uma falha no procedimento ou na ação humana, expondo o *perigo* potencial que é classificado com base nas consequências indesejadas, sem levar em consideração a sua real possibilidade de ocorrência.

O conceito de segurança de funcionamento de sistemas está intimamente ligado ao de garantia da qualidade, pois parte da premissa que um item que respeite as especificações técnicas de projeto e nele se apliquem critérios adicionais de confiabilidade, manutibilidade, disponibilidade e seguridade, tem maiores chances de não falhar ou de não funcionar de maneira inadequada, não provocando um evento iniciador que desencadearia consequências indesejáveis.

Garantir a segurança de funcionamento de sistema é garantir quão capaz o sistema é de cumprir sua missão de projeto com sucesso, sem falhas e consequências indesejáveis decorrentes. No entanto, ainda que todos os mecanismos de garantia de qualidade sejam aplicados para um item, a fim de evitar que este venha a falhar, esta noção de “segurança absoluta é utópica”. Para tal, considera-se o conceito de risco que associa a gravidade da consequência de perigo em potencial à probabilidade de ocorrência de um evento iniciador. Assim sendo em linhas gerais entende-se:

$$R = f(p, g)$$

Então definimos formalmente como risco global ( $R$ ) a avaliação conjugada das combinações do conjunto de cenários ( $f$ ) de perigos ( $g$ ) com suas respectivas probabilidades de ocorrência ( $p$ ).

Para a aplicabilidade de Risco em análise de Segurança de Funcionamento de Sistemas de maneira efetiva torna-se necessário quantificar o risco, estabelecendo uma relação funcional para a formação de  $R$ , com abordagens que possibilitem verificar a proporcionalidade da gravidade associada a cada probabilidade de ocorrência.

As metodologias para a elaboração de uma Análise de Risco usam dois tipos de abordagem. A indutiva identifica as possíveis sequências de acidentes, examinando os desvios das condições normais. Já a dedutiva, identifica combinações de falhas de equipamentos e erros humanos. Geralmente, as abordagens indutivas são úteis para identificar uma ampla gama de possíveis acidentes. As abordagens dedutivas, por outro lado, fornecem uma compreensão mais profunda do mecanismo pelo qual um determinado acidente pode ocorrer [11].

A adequação de um método de análise a um determinado empreendimento depende das características técnicas intrínsecas deste empreendimento, dos recursos disponíveis para a análise, tempo disponível para sua elaboração e da existência de dados técnicos necessários para sua execução [8].

A norma ABNT/NBR - ISO 31010 apresenta em detalhes uma gama de ferramentas e técnicas que podem ser utilizados para iniciar um processo de identificação de riscos [6]. No entanto, a aplicação de uma única ferramenta é incapaz de efetuar uma varredura eficaz nas instalações. Com isso torna-se necessário aplicar mais de uma ferramenta sequencialmente orientada para otimizar o processo de levantamento, tratamento e análise das informações.

O primeiro passo é a identificação dos perigos que, por sua vez, caracteriza consequências indesejáveis específicas, seguido pela identificação de materiais, juntamente com as características do sistema e processo que poderiam, em teoria, produzir essas consequências [8].

A abordagem envolve a seleção e a análise de um conjunto de cenários que abrangem as operações das instalações, desde aqueles com impactos pequenos esperados até aqueles com consequências potencialmente catastróficas [12].

A análise de tais cenários é suportada por Programa de Segurança de Funcionamento, que deve prever uma estrutura de organização, responsabilidades, procedimentos, atividades, capacidades e meios que concorrem à garantia de que o sistema satisfará aos objetivos de segurança relativos a um projeto particular [10].

A ampla gama de eventos possíveis de ocorrerem nas instalações do ciclo do combustível nuclear e a diversidade de técnicas para identificação dos riscos, avaliação de probabilidades de ocorrência e de consequências, tornam ainda mais complexa a busca pela melhor solução a ser aplicada [13].

Como menciona AMARAL(2016), a Análise de Riscos estuda de forma qualitativa todos os possíveis riscos existentes na instalação considerando a probabilidade de tais eventos acontecerem e as consequências provenientes dos mesmos em termos qualitativos. Já os riscos considerados com alta probabilidade de ocorrência ou que provoquem grandes danos às pessoas ou às estruturas, podem ser analisados de forma quantitativa, buscando-se determinar os seus efeitos causados [9].

Assim sendo, considerar o desenvolvimento de uma metodologia com ferramentas que se adeque à realidade de cada instalação. A metodologia de análise proposta para este trabalho se baseou no critério de seleção apresentado na NRC NUREG/CR - 1513. O método é estruturado para a escolha da técnica adequada de acordo com o objetivo desejado.

Uma vez aplicado, o critério de escolha da NRC NUREG/CR – 1513 aponta inicialmente a Análise Preliminar de Perigos (APP) como ferramenta adequada para sistemas que não tenham um histórico prévio de avaliação de risco. A APP é um método de análise simples e indutivo cujo objetivo é identificar os perigos, situações e eventos perigosos que podem causar danos em uma determinada atividade, instalação ou sistema.

A APP é uma ferramenta útil ao analisar os sistemas existentes para priorizar os perigos e riscos para análise adicional ou quando as circunstâncias impedem a utilização de uma técnica mais extensiva [6]. É também uma metodologia fundamentada na identificação dos perigos que podem ser causados através de eventos indesejáveis. A aplicabilidade desta metodologia abrange a fase de projeto, operação de um sistema e, também, revisão geral de segurança de um sistema já em operação [14].

Para a definição dos cenários de perigo considerou-se uma combinação de condições do local, indivíduos potencialmente afetados, projeto da instalação, inventários de materiais, configurações de equipamentos e procedimentos operacionais, modos de falha e vias de exposição intra-instalações e ambientais.

Aplicar a técnica da APP, requer equipe formada por grupo multidisciplinar de profissionais que conheçam a instalação, as informações técnicas inerentes ao processo e tenham quando possível, experiência operacional diversificada obtida em estudos e atividades realizados durante a vida da instalação, para que possam ser capazes de analisar minuciosamente as causas que podem promover a ocorrência de cada um dos eventos e seus respectivos efeitos.

No entanto, as limitações da APP podem levar a classificações subjetivas. Então associar a esta técnica, estudos quantitativos e estatísticos que possam auxiliar na assertividade da classificação da severidade da consequência e a faixa de frequência de ocorrência estimada para cada cenário de perigo é fundamental para que os critérios se tornem diretamente proporcionais aos eventos estudados.

Considerar a experiência operacional e o histórico de falhas nos itens da instalação que poderiam desencadear eventos com a possibilidade de ocorrência de consequências, conforme identificado em cada cenário constante nas APP, tornando plausível a associação da ocorrência de um evento iniciador à taxa de ocorrência de falhas em itens da instalação. Para tal, a divisão da frequência média em intervalos de classe aproxima a classificação da frequência, guardadas as devidas proporções, da realidade de cada item inserido em uma instalação. Os dados devem ser tratados de modo que a frequência seja expressada em hora/ano, a tabela 2 apresenta os intervalos de classe usados para aplicação.

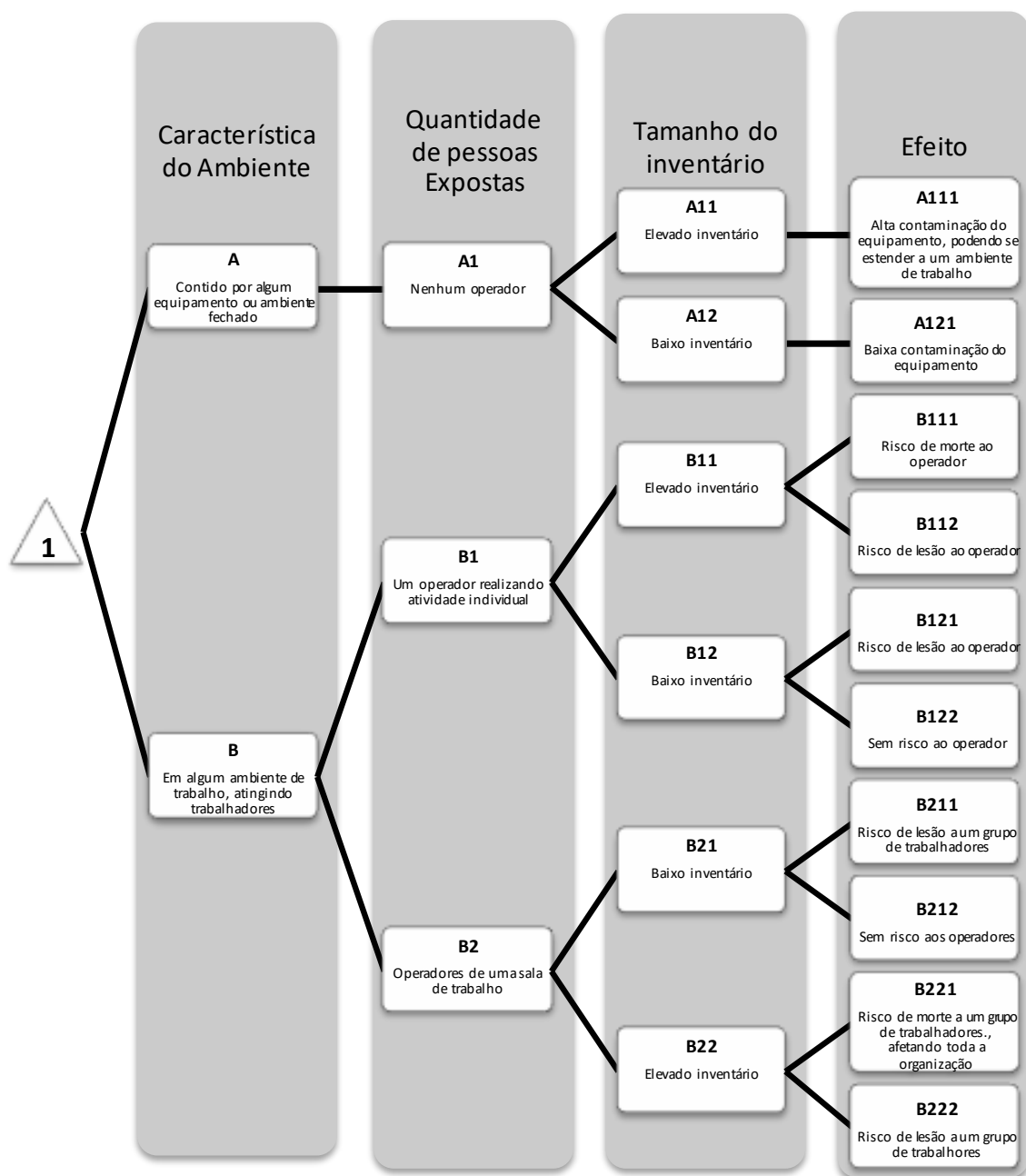
Tabela 1: Categorias de frequência de ocorrências dos cenários

Grau	Conceito	Histórico	Frequência [h/ano]
1 Extremamente Remota	Conceitualmente possível, porém improvável de ocorrer durante a vida útil da instalação.	Não há registro desse acidente.	$f < 10^{-4}$
2 Remota	Não se espera que ocorra durante a vida útil da instalação.	Há alguns registros desta ocorrência durante o tempo de operação da planta.	$10^{-4} \leq f < 10^{-2}$
3 Provável	Esperado ocorrer pelo menos 1 vez por ano.	Há um registro desta ocorrência por ano.	$10^{-2} \leq f \leq 10^{-1}$
4 Frequente	Ocorre várias vezes por ano.	Há mais de um registro desta ocorrência por ano.	$f > 10^{-1}$

Fonte: Adaptado [9]

Refinados os critérios de categorização da frequência, ainda é necessário buscar alternativa que aproxime a classificação da categoria de severidade para cada cenário acidental postulado conforme o efeito indesejado provocado. Para tal, associar a aplicação da ferramenta do Método de Árvore de Consequência (MACQ) se torna eficaz à medida que a adaptada para cenários que possuam liberação de substâncias perigosas. A adaptação da MACQ considera como principais aspectos: a natureza da substância liberada; o estado físico da substância; as características do ambiente em que ocorre o evento; a quantidade de pessoas possivelmente expostas; o tamanho do inventário envolvido e o efeito consequente final. A figura 2 atribui critérios quantitativos às características para balizar um resultado qualitativo.

Figura 2: Arvore de Consequencias



Fonte: Adaptado [10]

Uma tendência natural no caso das instalações contendo substâncias químicas perigosas, quanto maior o inventário envolvido no cenário acidental, mais grave tendem a ser as consequências. Ao fim deste levantamento de dados devem ser consideradas as possíveis consequências segundo a tabela 1.

Tabela 2: Categoria de severidade da consequência

Grau	Conceito de acordo com o órgão ambiental	Danos à saúde	Danos ao meio ambiente	Danos materiais e econômicos	Danos à imagem
1 Leve (Baixo)	Nenhum dano ou dano não mensurável.	Ferimentos leves, sem atendimento médico.	Sem impactos significativos. Geração de pequena quantidade de rejeito que pode ser reprocessado.	Sem parada da produção ou pequena indisponibilidade da produção (de 1 a 4 horas). Sem danos a equipamentos.	Pode haver reclamação do cliente.
2 Marginal	Danos irrelevantes ao meio ambiente e à comunidade externa.	Ferimentos leves, com atendimento médico.	Poluição temporária e confinada ao interior da instalação. Possibilidade de odor ou ruído fora da instalação.	Pode haver parada da produção. Comprometimento da qualidade do produto. Danos a equipamentos menores. Média indisponibilidade de produção (1 a 2 dias).	Pequeno impacto para o cliente.
3 Crítico	Possíveis danos ao meio ambiente devido a liberações de substâncias químicas tóxicas ou inflamáveis, alcançando áreas externas à instalação. Pode provocar lesões de gravidade moderada na população externa ou impactos ambientais com reduzido tempo de recuperação.	Ferimentos graves com afastamento. É possível haver necessidade de abandono da instalação.	Poluição no exterior da instalação.	Parada da produção com produto fora de especificação. Danos a equipamentos importantes. Grande indisponibilidade da planta.	Impacto para o cliente. Afeta a imagem da empresa.
4 Catastrófico	Impactos ambientais devido a liberações de substâncias químicas tóxicas ou inflamáveis, atingindo áreas externas às instalações. Provoca mortes ou lesões graves na população externa ou impactos ao meio ambiente com tempo de recuperação elevado.	Morte ou invalidez. Abandono da planta e evacuação de áreas próximas.	Poluição importante e durável ao exterior da planta. Requer medidas de remediação e recuperação.	Parada da produção e produto fora de especificação. Danos a equipamentos importantes.	Grande impacto para o cliente. Afeta a reputação da empresa e a perenidade do produto/projeto

Fonte: Adaptado [9]

Após identificar cada cenário e classificar a severidade e a frequência, é possível classificar o risco associado, através de uma combinação cartesiana e qualitativa entre severidade e frequência de ocorrência resulta na matriz de categoria de risco, que define o nível de risco, conforme demonstra a Tabela 3.

Tabela 3: Matriz de Classificação Categoria de Risco

Grau de Risco					
Severidade	Probabilidade				
	Classe	1	2	3	4
	4	II	II	III	III
	3	II	II	II	III
	2	I	II	II	II
	1	I	I	II	II

Notas: Classe de Risco: I – Baixo; II – Moderado; III – Alto.

Fonte: Adaptado [9]

Observa-se que eventos que associam severidades e probabilidade muito baixas são classificados como classe de “risco I” ou risco baixo. À medida que um dos fatores de severidade ou probabilidade aumenta, o risco é reclassificado como “risco II” ou moderado. E por fim, quando o grau de severidade e de probabilidade de ocorrência aumenta a níveis altos, o risco é reclassificado para “risco III” ou risco alto.

Mais importante que classificar a classe de risco de um cenário é entender o que implica cada classificação e quais são as recomendações de medidas corretivas e/ou preventivas aplicáveis a cada classe. AMARAL(2008) sugere recomendações, sintetizadas na tabela 8, para o resultado encontrados de acordo com a classe de risco obtida.

Tabela 4: Aplicação de medidas segundo o grau de risco

Classe do Risco	Risco	Medidas Preventivas e Corretivas
I	Baixo	Não é necessário adotar nenhuma medida. Avaliar o custo-benefício de se incluir medidas adicionais no projeto ou no plano de melhorias da área.
II	Moderado	Avaliar aplicação de medidas administrativas ou operacionais. Incluir medidas adicionais no projeto ou no plano de melhorias da área.
III	Crítico	Medidas adicionais preventivas e corretivas deverão ser aplicadas para reduzir o risco.

Fonte: Adaptado [9]

Classificar o grau de risco é importante pois sinaliza que um conjunto de cenários merece atenção total em um processo. No entanto a tal divisão mostra-se ineficiente quando é necessário avaliar cenários da mesma classe de risco. Nesse caso, associar a ferramenta de Ranking Relativo (RR) à matriz de categoria de risco é uma inteligente alternativa para subclassificar cenários de uma mesma classe qualitativa de risco e indicar a priorização de ações e mitigação ou minimização do risco associado a um cenário, pois permite a visualização de qual é mais grave e também entre as nuances das variações existentes de severidade e probabilidade.

O RR pode ser obtido pelo simples produto entre as classes de severidade e probabilidade, estabelecendo valores inteiros e positivos que vão de 1 (menos relevante) a 16 (muito relevante) conforme mostra a tabela 5.

Tabela 5: Matriz de Ranking Relativo de Importância

Grau de Importância Relativa					
Severidade	Probabilidade				
	Classe	1	2	3	4
	4	4	8	12	16
	3	3	6	9	12
	2	2	4	6	8
	1	1	2	3	4

Notas: Classe de Risco: [1;2] – Baixo; [ 2;9] – Moderado; [9;16] – Alto.

Fonte: Adaptado [11]

Observa-se que a classe de “risco I” abriga o intervalo de [1,2], a classe de “risco II” compreende o intervalo de [3,9] e por fim, a classe de “risco III” compreende o intervalo [12,16]. Com isso, é perceptível que, quanto maior o grau de importância relativa no RR, o cenário estudado torna-se um objeto mais prioritário em ações para mitigação ou minimização do risco.

Dessa forma associando ferramentas consagradas como APP, MACQ, RR aliadas a coleta e tratamento estatístico dos dados, torna-se possível classificar de forma conservativa, salvo melhor juízo, o grau de risco associado a um equipamento do sistema que possa expor um potencial perigo à instalação.

### 2.1. Definição do objetivo

Analisar o risco dos inerentes aos processos dos sistemas fabris que processam UF<sub>6</sub> de uma Instalação do Ciclo do Combustível, com a finalidade de identificar, classificar e elencar prioridade de ações para itens que podem oferecer riscos não identificados na análise dos acidentes base de projeto e sugerir análises determinísticas em cenários cuja classe de risco encontrada for alta.

### 2.2. Escopo do estudo

A definição de um cenário de acidente considera uma combinação de: (a) condições do local; (b) indivíduos potencialmente afetados; (c) projeto de instalações, inventários de materiais, configurações de equipamentos e procedimentos operacionais; (d) modos de falha; (e) vias de exposição intra-instalações e ambientais que produzem impactos adversos potenciais maiores do que aqueles associados às operações normais [8].

Como afirma AMARAL (2016), a Análise de Acidentes constitui-se na base do trabalho submetido ao licenciamento de instalações nucleares, o qual demonstra, aos olhos do órgão licenciador, que os dispositivos técnicos de segurança existentes na instalação nuclear são capazes de mitigar adequadamente a evolução de cada um dos acidentes postulados, denominados acidentes básicos de projeto [9].

### 2.3. Coleta de informações sobre a Instalação

Como premissa, assume-se que os Acidentes Base de Projeto (ABP), cujas falhas postuladas são fruto de hipóteses bastante conservativas e estudos que abrangem, inclusive análises

quantitativas, não fazem parte do escopo deste trabalho, por entender-se que os mesmos já tiveram suas consequências analisadas e licenciadas por órgãos reguladores.

Para tal adota-se a estratificação da Instalação em sistemas, considerando, sempre que pertinentes, as suas fronteiras de interação e analisando a segurança de funcionamento destes sistemas, segundo condições e parâmetros previamente estabelecidos. As principais características dos sistemas levadas em consideração no processo de análise foram: funções, estruturas, condições de funcionamento, condições de operação e ambiente.

Para orientar o processo de investigação e o tratamento ordenado das informações necessárias e suficientes para análise e avaliação dos riscos inerentes ao processo industrial de uma Instalação de Enriquecimento Isotópico, para atendimento ao objetivo estabelecido, de modo a balizar a aquisição de informações, fazendo com que a representatividade dos dados se tornasse útil e adaptada ao objetivo.

Conforme a ABNT NBR ISSO/IEC 31010 a metodologia de APP compreende a execução das seguintes etapas: Definição do objetivo; Definição do escopo e fronteiras; Coleta de informações sobre a instalação; Divisão do processo em subsistemas; Preenchimento da planilha da APP; Definição estatística de frequência dos cenários de risco e da severidade(MACQ)); Estratificação do RR; Análise e conclusão dos resultados. [6]

#### **2.4.Descrição de uma Instalação Hipotética de Enriquecimento de UF6**

Uma instalação de Enriquecimento de Urânio Hipotética possui diversos sistemas que são responsáveis por alimentar UF<sub>6</sub> natural proveniente dos cilindros, realizar a separação isotópica, retirar o UF<sub>6</sub> enriquecido e depletado para seus respectivos cilindros de armazenamento. Após seu enchimento o cilindro de urânio enriquecido precisa ser homogeneizado através de liquefação por aquecimento. Quando necessário ajustes finos no percentual podem ser feitos por meio de um sistema de recomposição isotópica. Para fins de preenchimento de pré-requisito legais a instalação apresentou todos os estudos relativos aos ABP, conseguindo assim a licença de operação inicial.

O risco associado à operação de uma planta de enriquecimento isotópico de urânio está essencialmente ligado ao UF<sub>6</sub> que é um composto tóxico, radioativo e altamente reativo com várias substâncias. Eventos envolvendo a liberação de UF<sub>6</sub> podem acarretar danos à saúde e contaminar o meio ambiente [15].

No entanto é necessário ressaltar que o UF<sub>6</sub> é altamente reativo ao entrar em contato com o ar e reage com as moléculas de água e forma UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> e HF. O HF traz risco à pele, sendo extremamente irritante e corrosivo para a pele e membranas mucosas. As queimaduras são de difícil cicatrização e podem variar grandemente, dependendo da concentração de HF. A penetração do HF através da pele é rápida e profunda e a ação corrosiva se adiciona à esclerose óssea por fixação de cálcio pelo íon fluoreto. Conforme a concentração do ácido, estes efeitos podem tardar muito a se manifestar. Quando inalado age inicialmente como um irritante intenso do sistema respiratório, causando lesões às mucosas dos pulmões. O HF ataca violentamente a membrana conjuntiva dos olhos e, quase sempre, conduz à cegueira. Quando há ingestão de soluções de HF, há irritação intensa sobre o aparelho respiratório. As tabelas 6 e a tabela 7 apresentam as características físico-químicas e características da toxicologia do UF<sub>6</sub> e do HF respectivamente.

Tabela 6: Propriedades físico-químicas e Características da toxicologia do UF<sub>6</sub>

Substancia	UF <sub>6</sub>	CAS	7783-81-5	Inventário	136 t/ano
Propriedades					
P <sub>vap</sub> (mmHg)		109 a 20 °C	OSHA PEL TWA (mg/m <sup>3</sup> )		0,05
ACGIH TLV TWA (mg/m <sup>3</sup> )		0,2	ACGIH STEL (mg/m <sup>3</sup> )		0,6
PF (°C)		64,05 a 2 atm	PE (°C)		56,4 a 1 atm
DR		4,7 a 20 °C			
Características da substância					
Aparência		Sólido cristal monoclínico deliquescente volátil, incolor ou branco.			
Solubilidade		Reage vigorosamente em água e em solventes como: Fluorocarbonos, cloro líquido e bromo, nitrobenzeno, tetracloreto de carbono, clorofórmio, tetracloreto de etano.			
Toxicidade		Após exposição à umidade do ar, libera fluoreto de hidrogênio que é um gás venenoso e corrosivo para a pele, olhos e trato respiratório, assim como o fluoreto oxi-uranílico, que é uma nefrotoxina. O envenenamento afeta os rins, fígado, pulmões, sistema hematopoiético e causa distúrbios no metabolismo de proteínas e carboidratos. As mortes relatadas pela inalação aguda de hexafluoreto de urânio foram devidas ao efeito corrosivo do composto nos pulmões.			
Reatividade		Altamente reativo com água, hidrocarbonetos, éter, a maior parte dos metais e álcool (reação exotérmica).			
Radioatividade		O material geralmente tem um baixo nível de radioatividade, com o risco químico excedendo em muito o risco de radiação para todos os materiais, exceto os altamente enriquecidos.			
Inflamabilidade		Perigo de incêndio: na forma de sólido ou pó apresenta perigo quando exposto ao calor ou chama. Perigo de explosão: moderado, na forma de pó quando exposto a chama. Reação explosiva com hidrocarbonetos quando em estado líquido.			

Fonte: Adaptado de [16]

Tabela 7: As propriedades físico-químicas e características da toxicologia do HF.

Substancia	Ácido fluorídrico (HF)	CAS	7664-39- 3	Inventário	---
Propriedades					
P <sub>vap</sub> (mmHg)		110 a 20 °C	OSHA PEL TWA (mg/m³)		0,05
ACGIH TLV TWA (ppm/ar)		3,0	ACGIH STEL (mg/m³)		6,0
PF (°C)		-83 atm	PE (°C)		56,4 a 1 atm
DR		N.D			
Características da substância					
Aparência		Líquido corrosivo e fumegante quando sob pressão e a temperaturas inferiores a 19°C			
Solubilidade		Solúvel em água.			
Toxicidade		Apresenta forte odor irritante detectável a uma concentração de 0,0333 mg/m3, - tornando-se irritante a 4,17 mg/m3 - STEL (15 min): 6 ppm - Limite de tolerância / TWA (8 horas): 3 ppm - Limite de tolerância Valor teto: 3 ppm. - IPVS: 30 ppm. - LD50 (Oral): 25 mg/Kg - LC50 (Inalação em rato): 1276 ppm/1hora			
Reatividade		Ataca vidros e outros materiais que contenham sílica. Em contato com o ar pode liberar fumos corrosivos irritantes.			
Radioatividade		Não se aplica			
Inflamabilidade		Não disponível			

Fonte: Adaptado de [16]

Para fins de aplicação o estudo se limita a exemplificar o cenário da homogeneização por conter condições consideradas mais severas, se comparado a outros cenários possíveis em uma instalação deste tipo.

Uma instalação hipotética de enriquecimento Isotópico de Urânio opera um Sistema de homogeneização e amostragem líquida, que é composto por vaso de contenção hermeticamente fechado com sistema de exaustão, tratamento de filtragem de ar para o exterior da instalação. No interior do vaso de contenção, resistências elétricas para o aquecimento do cilindro são posicionadas no entorno do cilindro. Por especificações de processo o cilindro deve ser aquecido até o limite de 80°C e uma pressão máxima de 2,5bar. Para controlar tais parâmetros o sistema possui uma malha de controle de pressão controlada pelo CP002 e uma malha secundária do controle da temperatura interna controlada pelo CT002 através da energização e desligamento da resistência elétrica. Outra malha existente é a malha de segurança, cujo funcionamento consiste em monitorar a pressão interna do vaso medida pelo CP001 e aciona o dispositivo de exaustão, tratamento e filtragem do ar quando a pressão registrada no CP001 foi igual a registrada no CP002 e a temperatura registrada no CT002 for igual ou maior a 80°C. Neste instante também a resistência de aquecimento é desligada. Para fins de leitura de campo o Sistema também é dotado de indicação da temperatura do costado do cilindro CT001.

O Sistema possui uma válvula de engate a rosca, dois pontos de conexão por meio de flanges, um para a conexão cilindro do tipo 1S isolado por válvula, e outro para conexão do instrumento de pressão CP002

Considerando que este sistema de homogeneização é capaz de processar por vez apenas um cilindro de UF6 de um cilindro do tipo 30B, contendo um inventário de 2000Kg de UF6 durante o aquecimento para realização de liquefação e amostragem líquida. Este inventário de UF6 é processado de modo confinado nos cilindros, equipamentos e tubulações dos sistemas sendo a ocorrência de liberação de UF6, em fase líquida ou gasosa, tida como o principal perigo decorrente na operação do sistema. A ocorrência de um evento iniciador hipotético, falha ou mau funcionamento de um equipamento ou dispositivo, que acarrete a possível liberação de UF6 proveniente do cilindro 30B deve ser avaliado de forma não só classificar o grau de risco associado ao processo, mas identificar e avaliar o grau de risco associado a vulnerabilidade de cada dispositivo do sistema de modo que possa indicar um tratamento diferenciado a esses itens.

### **2.5.Resultados Esperados**

Inicialmente, a abordagem adotada baseia-se em uma avaliação qualitativa de pontos vulneráveis do sistema que possam acarretar o na liberação de UF6, identifica-se falha nos instrumentos, falha na vedação das conexões e válvulas do sistema e vedação do vaso de pressão.

Foram identificados sete cenários conforme a tabela 10. Para que a metodologia possa ser representativa, foram atribuídos tempos de falha nos equipamentos com base num histórico de 4 anos de funcionamento do sistema. A média anual desse histórico de falhas é convertido para fatores de frequências adimensionais como mostra a tabela 8.

Tabela 8: Classificação da Frequência do Sistema

Cenário	Frequência [horas/ano]				Média da Frequência [horas/ano]	Média fator [ano]	Classificação
	2015	2016	2017	2018			
1	4,333	0	0	0	1,083333333	1,45E-04	2
2	0	0	0	0,333	0,083333333	1,12E-05	1
3	0	7,5	1	2	2,625	3,53E-04	2
4	0	0	0	2,5	0,625	8,39E-05	1
5	0	8,5	0	0	2,125	2,85E-04	2
6	1,667	20,5	5,5	0	6,916666667	9,29E-04	2
7	80	67	68	83	74,5	1,00E-02	3

Fonte: Autores

Posteriormente, a avaliação dos aspectos e impactos de cada cenário baseado na MACQ que auxilia na minimização da subjetividade sobre a classe da severidade, foram especificados também novos parâmetros hipotéticos. Os resultados são mostrados na tabela 9.

Tabela 8: Classificação da Severidade do Sistema

Cenários	T (°C)	P(bar)	Inventário (kg)	Exposição trabalhadores	MACQ	Severidade
1	80	2,5	10	3	B121	1
2	80	2,5	2000	0	B111	4
3	80	2,5	2000	0	B111	4
4	80	2,5	2000	0	B111	4
5	80	2,5	2000	3	B221	4
6	80	2,5	2000	3	B222	3
7	80	2,5	2000	3	B221	4

Fonte: Autores

É importante ressaltar que os fatores decisivos para escolha do caminho na árvore de consequência é o tamanho inventário que pode contaminar o interior do vaso de aquecimento e consequências aos indivíduos potencialmente expostos na abertura ou na perda de estanqueidade da porta do vaso de aquecimento.

No entanto é importante ressaltar que cada cenário postulado na avaliação do sistema possui um inventário específico e por isso, a fim de conferir representatividade, para cada cenário hipotético postulado estima-se de maneira conservativa que todo o inventário possa ser liberado. Considera-se, com exceção da perda da vedação do vaso de aquecimento, que o sistema de exaustão, filtragem e tratamento de ar possui redundâncias e está apto a atender situações emergenciais, levando em consideração as características locais do sistema de processo.

Realizada a avaliação de classificação é possível realizar a aplicação da classificação do grau de risco e da aplicação da matriz de RR, conforme demonstra a tabela 10.

Tabela 10: Análise Preliminar de Risco e Perigos e Classificação da do Grau de Risco e Ranking Relativo de Importância do Sistema

CENÁRIO	PERIGO	CAUSA	EFEITOS	S	F	R	RR
1	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha no controlador de temperatura CT001 com aumento da temperatura para valores acima de 80°C	Aumento imperceptível da pressão no interior do cilindro. Possibilidade de deslocamento de ar quente ao abrir a porta do vaso de aquecimento.	1	2	I	2
2	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha no instrumento de temperatura CT002 com aumento da temperatura para valores acima de 80°C	Aumento da pressão no interior do cilindro. Possibilidade de rompimento de válvula e dispositivo de amostragem	4	1	II	4
3	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha no controlador de temperatura CT002 com aumento da temperatura para valores acima de 80°C	Falha no controle de temperatura das resistências de aquecimento. Aumento da pressão no interior do cilindro. Possibilidade de rompimento de válvula e dispositivo de amostragem	4	2	II	8
4	Liberação de UF <sub>6</sub>	Ruptura ou trincas no dispositivo de amostragem líquida	Vazamento de UF <sub>6</sub> no interior do vaso	4	1	II	4
5	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha no instrumento de pressão CP001 com leitura de pressão abaixo do valor real	Indicação de pressão de UF <sub>6</sub> diferente do diagrama de fase. Exposição do Operador na abertura da porta após vazamento de UF <sub>6</sub> no interior do vaso Contaminação da vaso	4	2	II	8
6	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha no instrumento de pressão CP002 com leitura de pressão abaixo do valor real.	Exposição do Operador ao UF <sub>6</sub> na abertura da porta após vazamento de UF <sub>6</sub> no interior do vaso	3	2	II	6
7	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha na vedação do vaso de pressão	Exposição do Operador na durante vazamento de UF <sub>6</sub> no interior do vaso pela vedação	4	3	III	12

Legenda: S severidade; F frequência de ocorrência, R risco; RR ranking relativo

## 1. DISCUSSÃO

Classificados os riscos de cada cenário e seu índice de importância de um ranking relativo, o estudo deve servir para auxiliar a gestão da instalação na tomada de decisões e auxiliar nas previsões de melhorias no projeto ou plano de manutenção, seletivamente orientado para os equipamentos e as atividades de maior relevância.

Outro ponto é que cenários classificados como catastróficos devem ser objeto de estudos determinísticos que especifique as consequências do evento de maneira mais próxima da realidade através de modelos matemáticos e simulações computacionais. Tais estudos ajudam a melhorar a segurança de funcionamento da planta, implementando novos métodos de controle ou barreiras em profundidade.

Portanto, mais importante que classificar a classe de risco de um cenário é entender o que implica cada classificação e quais são as recomendações de medidas corretivas e/ou preventivas aplicáveis a cada classe. A tabela 8 sugere recomendações para o resultado encontrado na APP de acordo com a classe de risco obtida.

*Tabela 8: Aplicação de medidas segundo o grau de risco*

<b>Classe do Risco</b>	<b>Risco</b>	<b>Medidas Preventivas e Corretivas</b>
<b>I</b>	<b>Baixo</b>	Não é necessário adotar nenhuma medida. Avaliar o custo-benefício de se incluir medidas adicionais no projeto ou no plano de melhorias da área.
<b>II</b>	<b>Moderado</b>	Avaliar aplicação de medidas administrativas ou operacionais. Incluir medidas adicionais no projeto ou no plano de melhorias da área.
<b>III</b>	<b>Crítico</b>	Medidas adicionais preventivas e corretivas deverão ser aplicadas para reduzir o risco.

Fonte: Adaptado [9]

A diminuição do risco associado a um cenário postulado implica em reduzir a severidade da consequência ou minimizar, tanto quanto possível, a frequência de ocorrência. Com base nisso são estabelecidos três alternativas de redução de risco possíveis dependendo da classe de risco obtida para cada cenário.

1. **Ações de Prevenção:** age na redução da frequência de ocorrência
2. **Ações de Proteção:** age na redução da severidade
3. **Ações de Resseguro:** age na redução de severidade e de frequência de ocorrência.

Evidencia-se que onde ou quando não for possível agir com ações de proteção, deve-se agir com ações de prevenção de modo a garantir principalmente que sejam tomadas medidas que conduzam a frequências inferiores às consideradas em projeto e/ou histórico de frequência de falha da instalação.

Adicionalmente, a NUREG 1513, indica elementos importantes que devem ser considerados para um eficaz gerenciamento de segurança, tais como: Implementação de Procedimentos, Treinamento, Manutenção, Investigação de incidentes, Registro de falhas de itens e componentes [11].

Logo em ordem de importância temos:

- A recomendação de um estudo determinístico para o cenário 7 com a aplicação imediata de medidas de resseguro;
- Recomenda-se medidas de resseguro para os cenários 3,5,6 respectivamente nessa ordem de prioridade;
- Recomenda-se medidas de proteção para os cenários 2 e 4;
- Recomenda-se medidas de prevenção para o cenário 1;

## 2. CONCLUSÃO

Baseado no exposto, a metodologia acima fundamentada e prescrita apenas apresenta o produto da aplicação combinada de ferramentas amplamente consagradas e mostra-se eficiente e conservativa, servindo de base para promover a uma crítica a consecução de itens importantes à segurança de funcionamento do sistema. Para manter a integridade de tais itens é de suma importância a adoção de boas práticas de garantia da qualidade para o controle do projeto e da manutenção.

Outro ponto importante que a análise destaca é quando a consequência do evento afeta o capital humano, o meio ambiente ou a imagem da Usina, o que pode levar a danos econômicos irreversíveis e perda de mercado.

Também é eficiente para garantir que cada alteração de projeto na instalação, esteja submetida aos mesmos critérios de segurança iniciais de um sistema.

Cabe salientar, a importância do estabelecimento de uma rotina periódica de revalidação da análise, ao menos, pelo período mínimo que foi estimada a frequência, de modo que seja garantida a representatividade do grau de risco dos cenários perante a realidade da instalação.

Outro aspecto importante é que, inicialmente, a metodologia recomenda a realização de estudos quantitativos, determinísticos apenas para em cenários classificados como críticos o que pode gerar muita economia em avaliação de risco, pois tais estudos requerem especialistas e recursos que tem custos associados elevados.

### 3. REFERENCIAS:

- [1] "Ciclo do Combustível Nuclear," INB - Industrias Nucleares do Brasil, [Online]. Available: <https://www.inb.gov.br/pt-br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear>. [Accessed 11 09 2019].
- [2] "Enriquecimento," INB - Industrias Nucleares do Brasil, [Online]. Available: <https://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Enriquecimento>. [Accessed 22 10 2019].
- [3] CNEN, "CNEN NE 1.04 – Licenciamento de Instalações Nucleares," Comissão Nacional de Energia Nuclear, Dezembro / 2002.
- [4] "ICMBIO," IBAMA, [Online]. Available: [http://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Instrucao\\_normativa/2008/in\\_ibama\\_184\\_2008\\_licenciamentoambientalfederal\\_revga\\_in\\_65\\_2005\\_altrdn\\_ibama\\_14\\_2011.pdf](http://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Instrucao_normativa/2008/in_ibama_184_2008_licenciamentoambientalfederal_revga_in_65_2005_altrdn_ibama_14_2011.pdf). [Accessed 2019 09 20].
- [5] CNEN, "CNEN NN 1.16 - Garantia da Qualidade para Segurança de Usinas Nucleoeletricas e Outras Instalações," Comissão Nacional de Energia Nuclear, ABRIL/ 2000.
- [6] ABNT, "Gestão de Riscos – Técnicas para o processo de avaliação de riscos," *NBR ISO/IEC 31010*, 2012.
- [7] A. E. Brown, "Boletim Técnico. Ano III / No 01," Janeiro/1998..
- [8] NRC, "Nuclear fuel cycle facility accident analysis handbook," *NUREG/CR-6410*, 1998.
- [9] L. A. d. Amaral, "Diretrizes Operacionais para a Postulação de Cenários Acidentais de Instalações de Apoio em Terra para Submarinos de Propulsão Nuclear," *UFRJ/COPPE*, 2016.
- [10] L. d. S. Guimarães, Gerenciamento de Riscos e Segurança de Sietemas, Rio de Janeiro: ABDAN, 2003.
- [11] NRC, "Integrated Safety Analysis Guidance Document," *NUREG/CR-1513*, 2001.
- [12] A. S. V. Neto and F. Correa, "Visão geral de métodos de análise de risco aplicados a instalações perigosas. .," *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*.
- [13] V. d. VASCONCELOS, M. SENNE JR and E. JORDÃO, "Metodologia para avaliação de riscos de instalações nucleares," *CDTN/CNEN*.
- [14] A. C. B. Silva, "Operação Offloading: Análise Preliminar de Perigos e os Impactos Ambientais," *Revista Eletrônica – Novo Enfoque*, pp. v. 13, n. 13, p. 207-221,

2011.

- [15] J. M. Oliveira Neto, A. C. Nardocci and P. F. Woiblet, "Análise de risco em instalações de enriquecimento isotópico de urânio".
- [16] CETESB, "Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência," *Norma Técnica P4.261*, Dezembro 2011.