

Análise Qualitativa de Segurança para a Remoção e Transferência de Rejeito Líquido Radioativo em uma Instalação de Apoio em Terra para um Submarino de Propulsão Nuclear

L. A. Amaral

Departamento de Ciência, Tecnologia e Inovação, Centro Tecnológico do Corpo de Fuzileiros Navais
Rio de Janeiro, RJ, Brasil
leonardo.amaral@marinha.mil.br

N. J. Ferro

Coordenador de Ciência e Tecnologia, Comando do Material de Fuzileiros Navais
Rio de Janeiro, RJ, Brasil
newtonferro@yahoo.com.br

P.F. Frutuoso e Melo

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, Brasil
frutuoso@nuclear.ufrj.br

1. INTRODUÇÃO

Brasil e França firmaram, em 2008, um acordo a fim de viabilizar a produção do primeiro submarino brasileiro de propulsão nuclear (SN-BR) e de mais quatro submarinos de propulsão convencional diesel-elétrico, o Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB). Além da concepção do SN-BR, há ainda o complexo sistema de apoio em terra ao submarino, em construção na cidade de Itaguaí-RJ. Esse complexo sistema de apoio em terra aos submarinos deve contemplar a realização de uma análise de segurança [1], pois apoiará, quando necessário, o SN-BR quando estiver atracado ou docado, realizando as atividades de rotina ou não, e por também possuir um complexo radiológico (CR-EBN) que terá o objetivo de tratar e armazenar materiais radiológicos provenientes do SN-BR.

A análise de segurança das instalações de apoio em terra para o SN-BR seria um estudo complementar à análise de segurança do próprio submarino [2]. Portanto, a postulação e classificação de cenários de operação para o conjunto formado pelo SN-BR e pelas instalações de apoio em terra poderá auxiliar a compreensão do problema da segurança nuclear para as mesmas. A importância de se postular cenários acidentais para esse tipo de instalação torna-se muito relevante para uma melhor gestão do risco e a minimização de acidentes com consequências indesejáveis.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise qualitativa de risco de uma instalação de apoio em terra de um submarino de propulsão nuclear, haja vista que o mesmo possui um reator nuclear que receberá apoio de instalações em terra para diversas operações com materiais radioativos. O estudo foi realizado especificamente para uma operação específica que será a remoção e transferência de rejeitos líquidos produzidos pelo SN-BR de duas formas distintas de execução para compará-las qualitativamente quanto ao risco em uma matriz de risco, usando a técnica de identificação de perigo denominada Análise Preliminar de Perigos (APP).

Acredita-se que os resultados servirão de subsídios para possíveis análises de segurança, referentes às atividades operacionais realizadas em instalações de apoio em terra para o SN-BR, como troca de combustível, movimentos de cargas e armamentos para o submarino, dentre outras. Outra aplicação será a possibilidade de, após obtidos os resultados, tomar uma decisão por uma das formas de operação, segundo a classificação de risco encontrada.

3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

Para este trabalho, será usada a técnica APP para postulação dos cenários acidentais, pois se trata de uma técnica estruturada para identificar os perigos potenciais decorrentes da instalação de novas unidades/sistemas ou da operação de unidades/sistemas existentes que usam materiais perigosos, enquadrando-se bem ao projeto em construção do CR-EBN [3]. Seu uso contribui para a seleção das áreas da instalação nas quais outras técnicas mais detalhadas de análise de riscos devam ser usadas posteriormente. Um exemplo de planilha é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Planilha de APP a ser usada no Estudo

Análise Preliminar de Perigos (APP)								
Sistema:			Módulo:				Data:	Pág.:
Perigo	Causa(s)	Modo(s) de Detecção	Efeito(s)	Categoria de Frequência	Categoria de Severidade	Categoria de Risco	Recomendações	Nº do cenário

Para o preenchimento da planilha, determinou-se as frequências dos cenários acidentais postulados e estimou-se as severidades para cada um deles. A Tabela 2 apresenta a classificação adotada dos cenários identificados de acordo com a categoria de sua frequência de ocorrência e a Tabela 3, a classificação adotada dos cenários identificados de acordo com a categoria de severidade [4].

Tabela 2. Classificação das Categorias de Frequência para a APP [4]

Classificação	Detalhamento	Frequência (a^{-1})	Descrição
A	Ocasional	$f > 10^{-2}$	Espera-se que ocorra ao menos uma vez durante a vida útil da instalação
B	Provável	$10^{-4} \leq f \leq 10^{-2}$	Espera-se que ocorra até uma vez durante a vida útil da instalação
C	Pouco provável	$10^{-5} \leq f \leq 10^{-4}$	Pouco provável que ocorra durante a vida útil da instalação
D	Praticamente improvável	$10^{-7} \leq f \leq 10^{-5}$	Extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil da instalação
E	Improvável	$f < 10^{-7}$	Não deve ocorrer durante a vida útil da instalação

Tabela 3. Classificação das Categorias de Severidade para a APP [4]

Classificação	Detalhamento	Descrição
I	Catastrófica	Danos irreparáveis aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente, levando à parada desordenada da unidade e/ou sistema (reparação lenta ou impossível); e provoca mortes ou lesões graves em várias pessoas (em funcionários e/ou em pessoas extramuros).
II	Crítica	Danos severos aos equipamentos, à propriedade e/ou meio ambiente, levando à parada ordenada da unidade e/ou sistema; lesões de gravidade moderada em funcionários, em terceiros e/ou pessoas extramuros (probabilidade remota de morte de funcionários e/ou terceiros); e exige ações corretivas imediatas para evitar seu desdobramento em catástrofe.

III	Marginal/Moderada	Danos leves aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente (os danos são controláveis e/ou de baixo custo de reparo); lesões leves em funcionários, terceiros e/ou em pessoas extramuros.
IV	Baixa ou Insignificante	Sem danos ou danos insignificantes aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente; não ocorrem lesões/mortes de funcionários, de terceiros (não funcionários) e/ou de pessoas extramuros (indústrias e comunidade); o máximo que pode ocorrer são casos de primeiros socorros ou tratamento médico menor.

A classificação das categorias de severidade para cada cenário acidental postulado foi arbitrada pela estimativa de quantidade de rejeito líquido radioativo vazado durante sua remoção e transferência para a Unidade de Tratamento de Rejeito Líquido no CR-EBN, seguindo o critério mostrado na Tabela 4 [5].

Tabela 4. Classificação das Categorias de Severidade para a Estimativa de Quantidade de Material Radioativo Vazado [5]

Tipos de Cenários	Severidade
Cenários com pequeno vazamento (até 10%) do inventário total	Baixa
Cenários com grande vazamento, sem vazamento de todo o conteúdo (até 50% do inventário total)	Moderada
Cenários com grande vazamento com mais de 50% de vazamento do inventário total	Crítica
Cenários com grande vazamento, com vazamento de todo o inventário	Catastrófica

Com as informações obtidas das categorias frequência de ocorrência e de severidade é possível qualificar os riscos para cada um dos cenários de acidentes postulados, utilizando uma matriz de risco, conforme mostrado na Figura 1, onde sua classificação pode ser identificada como as categorias de risco Insignificante, Marginal, Moderado, Crítico e Catastrófico [4].

		SEVERIDADE			
		Baixa	Moderada	Crítica	Catastrófica
FREQUÊNCIA	Ocasional	Insignificante*	Moderado*	Crítico*	Catastrófico*
	Provável				
	Pouco Provável		Marginal*		
	Praticamente improvável				
	Improvável				

Figura 1. Matriz de Risco usada para classificar cenários de acidentes [4].

*A classificação nas caixas coloridas refere-se às diferentes categorias de risco.

As operações realizadas em atendimento ao SN-BR compreenderão todas as atividades durante o seu ciclo de vida útil que ocorrerão quando ele estiver presente no CR-EBN. Para efeitos deste trabalho, consideraram-se os possíveis cenários acidentais a ocorrer durante a operação de remoção e transferência de rejeitos líquidos do tanque de drenos do circuito primário do reator e do tanque de alívio do pressurizador do SN-BR. Para a verificação das condições de segurança nuclear por ocasião da realização da operação foram

verificados os possíveis estados do reator nuclear (desligado a quente, em prontidão a quente e desligado a frio) quando o SN-BR estiver recebendo apoio do CR-EBN ao término de um período de missão no mar, que foi considerado como sendo de 90 dias [2]. As seguintes condições do reator foram admitidas, segundo [6]:

- a) Desligado a Quente - condição nominal do reator que será estabelecida nos cais do CR-EBN. Nesta condição, o SN-BR deverá receber alimentação elétrica das instalações em terra e o reator deverá encontrar-se na condição subcrítico;
- b) Em Prontidão a Quente - condição que acontecerá logo após o desligamento do reator. O sistema primário estará quente e pressurizado. Desta condição o reator deve ser levado para desligado a quente, com pressão e temperaturas mais baixas, com reator na condição subcrítica; e
- c) Desligado a frio - condição acontecerá quando se necessitar fazer alguma manutenção nos sistemas auxiliares do reator do SPN, ou quando se preparar para entrar no dique e realizar manutenção no compartimento do reator. Nessa condição, o SN-BR deverá estar atracado com suprimento de energia elétrica e água para resfriamento proveniente do cais ou dique do CR-EBN e o reator está subcrítico.

Esta operação ocorrerá normalmente para o esgotamento do tanque de drenos do sistema de descarga de refrigerante do circuito primário e do tanque de alívio do pressurizador. O circuito primário do reator nuclear do submarino permanecerá no cais no estado prontidão a quente. Caso haja a necessidade de levá-lo para o estado desligado a quente, haverá uma contração volumétrica, que pode ser estimada entre 1 e 2 m³ do volume do refrigerante, sendo assim, reposto pelo sistema de injeção do refrigerante. Quando houver o reaquecimento, haverá uma expansão volumétrica equivalente que será descarregada no tanque de dreno do submarino. O líquido desse tanque deverá ser removido para o cais e transportado à unidade de tratamento de rejeito líquido. A atividade específica do líquido radioativo será a mesma do refrigerante do primário [6].

Para calcular a frequência de operação da atividade de remoção e transferência de rejeito líquido do SN-BR, precisou-se estimar a sua vida operacional. A experiência das marinhas estrangeiras indica que a vida operacional média dos submarinos nucleares varia entre 20 e 30 anos [7]. No caso do SN-BR foi considerada uma vida operacional de 30 anos [2]. Além disso, foi considerada a proposta de uma possível rotina de manutenções para um submarino ao longo de sua vida operacional, mostrada na Tabela 5, apresentando os períodos de manutenção, desde os testes iniciais para o início das operações do mesmo no mar, até o fim de sua vida útil e desativação [8]:

Tabela 5 – Número de Períodos de Manutenção do SN-BR [9]

Período de Manutenção	Quantidade ao longo da vida útil
Período de Manutenção de Rotina (PMR)	35
Período de Docagem de Rotina (PDR)	4
Período de Docagem de Rotina (PDR) com troca de combustível	4
Período de Manutenção Geral (PMG)	3
Período de Docagem Final (PDF)	1

A operação de remoção e transferência de rejeito líquido ocorrerá normalmente para esgotamento do tanque de drenos do sistema de descarga de refrigerante do circuito primário e do tanque de alívio do pressurizador. O líquido desse tanque deverá ser removido para o cais e transportado à unidade de tratamento de rejeito líquido no CR-EBN. Levando em consideração a duração de cada missão do SN-BR no mar de 90 dias, o cais e o dique deverão estar preparados para receber até 5 m³ (estimativa) de rejeito líquido [2], que considerou a potência térmica do reator do SN-BR como sendo da ordem de 50 MWt e o inventário de produtos radioativos proporcional a um reator nuclear de uma usina nucleoeletrica como a central de Angra II, como sendo de um fator da ordem de 70 vezes menor.

Um estudo realizado sobre a análise de segurança para a transferência de rejeitos líquidos das usinas nucleoeletricas de Angra 1 para Angra 2 chegou à conclusão que a atividade do rejeito líquido, após o esgotamento dos tanques de drenos do reator nuclear, era igual a 0,137 Tbq/m³ [5], classificado como sendo de médio nível de radiação [10]. Para o caso do SN-BR, apesar de operar com cerca de 2,5% da potência de um reator nuclear como o de Angra 2, espera-se que os transientes pelas necessidades frequentes de mudança de regime operacional de seu reator, produzam efeitos de forma a gerar material radioativo de médio nível de radiação.

O cálculo da frequência de um cenário acidental (F_c) envolveu o emprego da frequência de algum evento (F_{op}) que não seja uma falha (por exemplo, a frequência anual de transferência de rejeito líquido radioativo do SN-BR ao longo de sua vida útil) e as probabilidades associadas a ela (P_f), as quais se referem à ocorrência de falhas ou de eventos que podem levar a falhas (por exemplo, falha de equipamentos e erros de procedimento em determinada operação), sendo expressa por meio da equação:

$$F_c = F_{op} \cdot p_f \quad (1)$$

Para o cálculo das frequências de cenários com falhas de equipamentos (vazamento de válvulas, flanges, gaxetas e juntas) utilizou-se a expressão [11]:

$$p_f = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (2)$$

onde, λ_1 e λ_2 são as taxas de falha referentes aos vazamentos dos equipamentos envolvidos na operação.

Para calcular as frequências de erros humanos foi usada a técnica *TESEO* (técnica empírica para a estimação de probabilidades de erro de operadores), que permite estimar a probabilidade de um erro humano pelo produto de fatores relacionados com o tipo de atividade [12]. Essa técnica foi escolhida por não se ter outros parâmetros, já que as instalações em estudo estão em construção ainda.

Foi então estabelecido o nível de risco, utilizando a matriz da Figura 1, indicando a frequência e a severidade dos eventos indesejáveis, conforme indicado nas Tabelas 2 e 3.

4. RESULTADOS OBTIDOS

A F_{op} [Eq. 1] foi calculada baseado na quantidade de vezes que o SN-BR estará no cais realizando a operação de remoção e transferência de rejeitos líquidos ao longo de sua vida operacional, o que se dará nos períodos de manutenção de rotina (PMR), constante da Tabela 5. Portanto, foi considerada que a operação em lide seja realizada, no cais, em todos os PMR, ou seja, 35 vezes ao longo de 30 anos de vida operacional do submarino e que dure, em média 2 horas por vez [9]. Logo, a frequência da operação será dada por 1,17 vezes/ano x 2 horas/vez, o que, reduzindo às mesmas unidades tem-se que

$$F_{op} = 2,67E-04/\text{ano} \quad (3)$$

Essa frequência operacional foi usada para todos os cenários acidentais postulados.

Como exemplo, para calcular a probabilidade de falha (P_f) para um cenário que contemplou falhas nos diversos equipamentos envolvidos na operação remoção de rejeito líquido, usou-se a Eq. (2). Considerando que durante a operação serão utilizadas 4 válvulas, 10 flanges, 10 gaxetas e 1 mangueira, a taxa de falha total será o somatório das taxas de cada uma delas multiplicada pelas respectivas quantidades. Os dados das taxas de falha foram extraídos de [13]. Daí, chega-se ao valor de $P_f = 6,63E-05$. Aplicando a Eq. (1) calcula-se a frequência para o cenário F_c com pequeno vazamento por falha de equipamentos no trecho de enchimento do Veículo de Remoção do Rejeito Líquido, considerando um fator de líquido radioativo que forma a poça como 0,792, que representa a fração de líquido não evaporado, da seguinte maneira [5]:

$$F_c = 2,67E-04/\text{ano} \times 6,63E-05 \times 0,792 = 1,40E-08/\text{ano}$$

Usando as Tabelas 2, 3 e 4 pode-se observar que o referido cenário acidental possuirá uma frequência Improvável e severidade baixa, portanto sendo classificado quanto ao risco como insignificante.

Como exemplo para o cálculo da frequência de cenários que envolvem falha humana, como a queda de ferramentas pesadas que possam danificar os equipamentos utilizados na remoção de rejeito líquido durante manutenções e obras civis no cais, considerou-se no emprego da técnica *TESEO*, que a atividade de manutenção seja simples e de rotina ($K1 = 0,001$), que a atividade dure 20 segundos ($K2 = 0,5$), se quem estiver executando a tarefa estiver mal treinado ou possui pouco conhecimento ($K3 = 3$), se a situação for normal ($K4 = 1$) e se o Microclima e interface com a planta forem discretos ($K5 = 3$). Logo, se pode chegar a uma probabilidade de erro humano (P_h) [9]:

$$P_h = (0,001) \times (0,5) \times (3) \times (1) \times (3) = 4,5E-03 \quad (4)$$

Portanto, pode-se calcular a frequência do cenário pela equação (1):

$$F_c = F_{op} \times P_h = 2,67E-04 \times 4,5E-03 = 1,20E-6/\text{ano}$$

Foi realizada uma APP para cada forma de remoção e transferência do rejeito líquido. Uma forma foi através de bombeamento pela bomba do sistema de descarga de refrigerante do SN-BR, onde serão usados equipamentos como válvulas, gaxetas e flanges, que serão conectados às tomadas do tanque de dreno do circuito primário e no Vaso de Remoção de Rejeitos Líquidos (VRRL) e ligados por uma mangueira flexível com características específicas por onde o rejeito líquido fluirá. A outra forma foi usando ampolas de sucção a vácuo através de conexões de engate rápido pressurizado para extrair o líquido do tanque de dreno, de onde seria levado diretamente para a Unidade de Tratamento de Rejeito Líquido pelo Veículo de Transporte (VT).

Foram postulados 26 cenários acidentais para a operação de remoção e transferência de rejeito líquido por mangueira flexível (cenários M), dentre os quais 15% foram classificados quanto ao risco, como risco marginal e 85%, insignificantes. Já para a remoção por ampolas, postularam-se 17 cenários acidentais (cenários A), onde apenas 5,9% foram classificados como possuindo risco marginal e 94,1%, insignificantes, como mostra a matriz de risco da Figura 2, onde M(X) significa que o cenário postulado foi pela forma de remoção por mangueira e A(X) que o cenário foi pela remoção de rejeito líquido por ampola de sucção a vácuo, sendo X a quantidade de cenários postulados, ou seja, M(4) representa quatro cenários postulados na APP por remoção do rejeito líquido por mangueira flexível classificados quanto ao risco como Marginal [9].

		SEVERIDADE			
		Baixa	Moderada	Crítica	Catastrófica
FREQUÊNCIA	Ocasional				
	Provável				
	Pouco Provável	M(1) e A(2)			
	Praticamente improvável	M(4) e A(4)	M(4) e A(1)		
	Improvável	M(9) e A(3)	M(5) e A(4)	M(3) e A(3)	

Figura 2 – Matriz de Risco para a Operação de Remoção e Transferência de Rejeito Líquido por Mangueira Flexível M(X) e por Ampolas a Vácuo A(X)

4.1 Cenários Acidentais Postulados para Remoção por Mangueira Flexível

Dos 26 cenários postulados de vazamento de rejeito líquido durante a remoção ou transferência para o CR-EBN pelo veículo de transporte (VT), cabe destacar os 4 que tiveram classificação de risco marginal e os

Artigo Completo nº 20170807163944

3 que, apesar de serem classificados como Insignificante, a categoria de severidade foi Crítica, conforme descrição na Tabela 6.

Tabela 6 – Descrição de Cenários Acidentais na Operação de Remoção e Transferência de Rejeito Líquido por Mangueira Flexível com Classificação de Risco Marginal e Severidade Crítica

Cenário	Descrição
M-15	Grande vazamento por falha de equipamentos como válvulas, flanges, juntas, gaxetas e mangueira, no trecho de enchimento do Veículo de Remoção de Rejeito Líquido (VRRL) com a bomba de alimentação ligada
M-17	Grande vazamento por queda de objeto sobre a mangueira flexível, causando corte do tipo guilhotina com a bomba de alimentação ligada e formando poça radioativa formando poça radioativa sobre a superfície asfáltica do cais, podendo atingir a rede de drenagem e expondo o pessoal envolvido na operação à radiação
M-18	Grande vazamento por queda de objeto sobre a mangueira, causando corte do tipo guilhotina com a bomba de alimentação ligada formando nuvem radioativa de fração do líquido vazado
M-21	Grande vazamento por rompimento ou corte da mangueira por fragmentos oriundos de explosão da tubulação de ar-comprimado de alta pressão do cais com a bomba ligada formando poça radioativa sobre a superfície asfáltica do cais, podendo atingir a rede de drenagem expondo o pessoal envolvido na operação à radiação
M-24	Grande vazamento causado por incêndio seguido de explosão no veículo de transporte causado pelo vazamento de combustível que provoca a ruptura de uma linha de drenagem do VRRL
M-25	Incêndio seguido de explosão no VT causado pelo vazamento de combustível provoca a ruptura de uma linha de drenagem do VRRL formando nuvem radioativa de fração do rejeito líquido vazado
M-26	Incêndio seguido de explosão no VT causado pelo vazamento de combustível provoca a ruptura de uma linha de drenagem do VRRL com Liberação de material radioativo direto do Veículo de Transferência formando uma nuvem

Para tais cenários, a Tabela 7 mostra um resumo dos resultados da APP para as categorias de frequência, severidade e de risco, além das recomendações para evitá-los ou mitigá-los. Além das recomendações descritas, as ações de acionar o serviço de proteção radiológica e realizar a limpeza e remediação da área contaminada são recomendadas para todos os cenários.

Tabela 7 – Resumo da APP para Cenários Acidentais da Tabela 6

Cenário	Categoria de Frequência	Categoria de Severidade	Categoria de Risco	Recomendações
M-15	1,40E-08/ano Praticamente Improvável	Moderada	Marginal	Manter controle de inspeções, manutenções e condições de armazenamento dos equipamentos. Drenar a poça de rejeito líquido derramada.
M-17	1,20E-6/ano Praticamente Improvável	Moderada	Marginal	Evitar quaisquer serviços que envolvam o uso de ferramentas e equipamentos pesados e/ou cortantes no cais durante a transferência de rejeito líquido. Em caso de emergência, deve-se adiar a operação de transferência até o término da mesma. Drenar a poça de rejeito líquido derramada.
M-18	2,5E-07/ano Praticamente Improvável	Moderada	Marginal	Evitar quaisquer serviços que envolvam o uso de ferramentas e equipamentos pesados e/ou cortantes no cais durante a transferência de rejeito líquido.
M-21	Praticamente Improvável (estimada por falta de dados)	Moderada	Marginal	Manter a rede de ar comprimido de alta pressão do cais em periódicas inspeções e manutenções.
M-24	1,69E-10/ano Improvável	Crítica	Insignificante	Realizar a manutenção e inspeções periódicas no VT. Criar um procedimento escrito para esta operação. Realizar treinamentos com equipe de CAV do CR-EBN para combater o incêndio. Drenar a poça de rejeito líquido derramada.
M-25	3,52E-11/ano Improvável	Crítica	Insignificante	Realizar a manutenção e inspeções periódicas no VT Criar um procedimento escrito para esta operação.
M-26	2,04E-10/ano Improvável	Crítica	Insignificante	Realizar a manutenção e inspeções periódicas no VT Criar um procedimento escrito para esta operação

Como exemplo de cálculos para as categorias de frequência, a postulação do cenário M-18 envolveu a probabilidade de queda de ferramentas pesadas que pudessem danificar os equipamentos utilizados na remoção de rejeito líquido, já demonstrada anteriormente pela Eq. (4), onde a $Ph = 4,5E-03$ é a probabilidade de falha humana associada ao evento. Para o cálculo da frequência deste cenário, foi levada em conta a parcela de evaporação da poça formada pelo vazamento de rejeito radioativo [5], considerado para cálculo de cenário similar, um fator de fração de líquido evaporado como 0,208, segundo modelo apresentado por [14]. Logo, a frequência do cenário foi calculada usando a Eq. (1) e os resultados das Eq. (3) e (4) acrescida do fator mencionado:

$$F_{M-18} = 2,67E-04 \times 4,5E-03 \times 0,208 = 2,5E-07/\text{ano}$$

Portanto, o cenário foi classificado como Praticamente Improvável quanto à categoria de frequência e, como se trata de um cenário de vazamento de grande quantidade de rejeito líquido, foi classificado quanto à severidade como Moderado, portanto, classificado na matriz de risco como um cenário acidental marginal. As recomendações propostas visam minimizar e mitigar os seus efeitos, sendo recomendado evitar quaisquer serviços que envolvam o uso de ferramentas e equipamentos pesados e/ou cortantes no cais durante a transferência de rejeito líquido. Em caso de emergência, deve-se adiar a operação de transferência até o término da mesma. E caso ocorra o cenário, drenar a poça de rejeito líquido derramada.

A postulação dos outros cenários encontra-se disponível em [9].

4.2 Cenários Acidentais Postulados para Remoção por Ampolas a Vácuo

De forma similar, para os 17 cenários postulados de vazamento de rejeito líquido durante a remoção e transferência para o CR-EBN por ampolas de sucção a vácuo, cabe destacar o cenário que obteve classificação de risco marginal e os 3 que, apesar de serem classificados como insignificantes, a categoria de severidade foi Crítica, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Descrição de Cenários Acidentais na Operação de Remoção e Transferência de Rejeito Líquido por Ampola de Sucção a Vácuo com Classificação de Risco Marginal e Severidade Crítica

Cenário	Descrição
A-10	Grande vazamento por queda de objeto sobre uma ampola no cais, causando corte do tipo guilhotina com formação de poça na superfície do cais expondo o pessoal envolvido na operação à radiação
A-13	Grande vazamento causado por incêndio no veículo de transporte (VT) carregado que teve combustível derramado queimando as ampolas
A-15	Grande vazamento causado por incêndio seguido de explosão no VT causado pelo vazamento de combustível que provoca a ruptura das ampolas carregadas com formação de poça sobre a superfície asfáltica do cais, podendo atingir a rede de drenagem do cais e expondo o pessoal envolvido na operação à radiação
A-16	Grande vazamento causado por incêndio seguido de explosão no VT causado pelo vazamento de combustível que provoca a ruptura das ampolas carregadas com formação de nuvem radioativa de fração do rejeito líquido vazado

Para tais cenários, a Tabela 9 mostra um resumo dos resultados da APP para as categorias de frequência, severidade e de risco, além das recomendações para evitá-los ou mitigá-los. Além das recomendações descritas, as ações de acionar o serviço de proteção radiológica e realizar a limpeza e remediação da área contaminada são recomendadas para todos os cenários.

Tabela 9 - Resumo da APP para Cenários Acidentais da Tabela 8

Cenário	Categoria de Frequência	Categoria de Severidade	Categoria de Risco	Recomendações
A-10	1,20E-6/ano Praticamente Improvável	Moderada	Marginal	Evitar quaisquer serviços que envolvam o uso de ferramentas e equipamentos pesados e/ou cortantes no cais durante a transferência de rejeito líquido. Em caso de emergência, deve-se adiar a operação de transferência até o término da mesma. Drenar a poça de rejeito líquido derramada.
A-13	1,69E-10/ano Improvável	Crítica	Insignificante	Realizar a manutenção e inspeções periódicas no VT. Criar um procedimento escrito para esta operação. Realizar treinamentos com equipe de CAV do CR-EBN para combater o incêndio. Drenar a poça de rejeito líquido derramada.
A-15	1,69E-10/ano Improvável	Crítica	Insignificante	Realizar a manutenção e inspeções periódicas no VT. Criar um procedimento escrito para esta operação. Realizar treinamentos com equipe de CAV do CR-EBN para combater o incêndio. Drenar a poça de rejeito líquido derramada.
A-16	1,06E-11/ano Improvável	Crítica	Insignificante	Realizar a manutenção e inspeções periódicas no VT. Criar um procedimento escrito para esta operação.

Como exemplo de cálculo para as categorias de frequência, a postulação do cenário A-16 requer a frequência de ocorrência de incêndios a céu aberto por ano e o seu tempo de duração. Essa frequência foi obtida por uma abordagem bayesiana [15,16] para se fazer uma estimativa da frequência anual de incêndios (λ_i), usando uma distribuição não informativa, chamada de distribuição de Jaynes [16]:

$$f(\lambda_i) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} \quad (5)$$

onde λ_i é a frequência desejada. Para determinar esse parâmetro, usou-se a média da distribuição de Poisson [17] a posteriori que é dada por:

$$\lambda_i = \int_0^\infty \lambda f(\lambda | r, t) d\lambda = \frac{r+1/2}{t} \quad (6)$$

onde r é o número de ocorrências em um período de tempo t .

A frequência λ_i foi calculada admitindo-se uma ocorrência ($r = 1$) para um período de 30 anos (vida útil do SN-BR). Usando a Eq. (6), chega-se ao valor de $\lambda_i = 5,0 \times 10^{-2}/\text{ano}$, ou seja, um incêndio a cada 20 anos.

Portanto, o cálculo da probabilidade (P_i) de ocorrência de um incêndio de 20 minutos de duração no VT enquanto ele trafega no trecho do cais até o CR-EBN para a transferência do rejeito líquido foi calculada aplicando a Eq. (2), dada pela expressão abaixo:

$$P_i = 1 - \exp \left(- \left(5 \times 10^{-02} / \text{ano} \times 20 / \frac{h \times 1 \text{ano}}{60} / \frac{8760 \text{h}}{8760 \text{h}} \right) \right) = 1,9\text{E} - 06 \quad (7)$$

Da Eq. (1) chega-se à frequência do cenário A-16, onde $P_f = P_i$, acrescentando o fator de evaporação da poça radioativa no valor de 0,208 [18]:

$$F_{A-16} = 2,67\text{E}-04 \times 1,90\text{E}-07 \times 0,208 = 1,06\text{E}-11/\text{ano}$$

Portanto, o cenário foi classificado como Improvável quanto à categoria de frequência e, como se trata de um cenário de vazamento de grande quantidade de rejeito líquido, foi classificado quanto à severidade como Crítica e classificado quanto ao risco como um cenário acidental Insignificante. As recomendações propostas visam a minimizar e mitigar os efeitos do cenário, sendo recomendado realizar a manutenção e inspeções periódicas no VT e criar um procedimento escrito para esta operação.

4. CONCLUSÕES

Foi realizada uma comparação qualitativa entre duas formas distintas para execução da operação de remoção e transferência de rejeito líquido do SN-BR no CR-EBN. Os resultados obtidos pela APP, se valendo das descrições e diretrizes abordadas, demonstram, em determinada medida, que as mesmas podem servir de parâmetros para realização de uma Análise de Segurança para outras operações descritas neste trabalho que ocorrerão nas instalações de apoio em terra para o SN-BR. Vale lembrar que é necessário que as frequências de ocorrência de alguns cenários postulados precisam ser melhor calculadas, em virtude de que neste estudo, não se pôde conseguir informações precisas, por se tratar de um assunto reservado e com disponibilidade restrita na literatura. Porém, quando o CR-EBN estiver em fase de licenciamento, os dados referentes às operações descritas deverão ser calculados por pessoal especializado da Marinha do Brasil.

Apesar dessas incertezas sobre o cálculo das frequências dos cenários acidentais, pôde-se perceber que os resultados das matrizes ficaram próximos dos resultados para o mesmo tipo de operação de transferência de rejeito líquido das unidades de Angra 1 para Angra 2 [5].

Pôde-se também analisar, em termos percentuais, as categorias de frequência, que para a operação de remoção e transferência de rejeito líquido bombeado por mangueira flexível, 65,4% dos cenários postulados foram classificados como Improvável, 30,7% como Praticamente Improvável e apenas 3,9% como Pouco Provável. Já para a mesma operação usando as ampolas de sucção a vácuo, obteve-se 58,8% dos cenários postulados como Improvável, 29,4% como Praticamente Improvável e 11,8% como Pouco Provável. Esses dados podem apontar para Cenários que merecerão maior atenção para realização de estudos quantitativos posteriores.

Por fim, recomenda-se que as diretrizes operacionais do SN-BR e do CR-EBN descritas neste estudo sirvam como fonte de informações e princípios para a realização de uma análise de segurança complementar, tanto qualitativa, como quantitativa e que os cenários acidentais postulados classificados quanto ao risco, como marginais neste estudo, sejam fruto de uma Análise Probabilística de Segurança, bem como os

classificados quanto à severidade crítica, a partir do instante em que se obtenham informações mais apuradas sobre as frequências de ocorrência das operações descritas.

5. REFERÊNCIAS

- [1] TALARICO, M. A., 2015, Considerações sobre a Aplicação da Tomada de Decisão com Informação do Risco ao Processo de Licenciamento de Instalações Industriais Especiais, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- [2] GUIMARÃES, L. S., 1999, Síntese de Doutrina de Segurança para Projeto e Operação de Submarinos Nucleares, Tese de D.Sc., USP, São Paulo, Brasil.
- [3] SILVA, A. C. B., 2011, Operação Offloading: Análise Preliminar de Perigo e os Impactos Ambientais. Revista Eletrônica - Novo Enfoque, ano 2011, v. 13, n. 13, p. 207 – 221.
- [4] MRS-Estudos Ambientais Ltda, EIA-RIMA do Depósito Inicial – Depósito 2-B de Rejeitos Radioativos da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto CNAEA e Prédio de Monitoração do Ativo Isotópico do CGR, Brasília, Brasil, 2005.
- [5] ALVES, A. S. M., PASSOS, E. M., DUARTE, J. P., MELO, P. F. F., 2013, “Radiological Risk Curves for the Liquid Radioactive Waste Transfer from Angra 1 to Angra 2 Nuclear Power Plants by a Container Tank”, International Nuclear Atlantic Conference, Recife, PE - COPPE/UFRJ, PEN. Nov. 24, 2013.
- [6] MAIA, Y. M, 2015, Descomissionamento de Submarinos Nucleares no Brasil, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- [7] KOPTE, S. Nuclear Submarine Decommissioning and Related Problems – paper 12 –BICC, 1997. p. 1-47. Disponível em: <http://www.bicc.de/uploads/tx_bicctools/paper12.pdf>. Acesso em: 14 out. 2014.
- [8] BIRKLER, J., SCHANK, J., SMITH, G., TIMSON, F., CHIESA, J., GOLDBERG, M., MATTOCK, M., MACKINNON, M., The U.S. Submarine Production Base, An Analysis of Cost, Schedule and Risk for Selected Force Structures, National Defense Research Institute, RAND, 1994.
- [9] AMARAL, L.A., Diretrizes Operacionais para a Postulação de Cenários Acidentais de Instalações de Apoio em Terra para Submarinos de Propulsão Nuclear. Dissertação de Mestrado UFRJ/COPPE, 2016.
- [10] CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN-NE-6.05 - Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas. Rio de Janeiro. 1985.
- [11] LEWIS, E. E., *Introduction to Reliability Engineering*, Wiley, New York, 1996.
- [12] BELLO, G. C. & COLOMBARI, V., The human factors in risk analyses of process plants: the control room operator model TESEO, Reliability Engineering, vol. 1, pp. 3-14, 1980.
- [13] MANNAN, S., *Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier Butterworth- Heinemann, Burlington, MA, 2005.
- [14] CROWL, D., LOUVAR, J., 2002, *Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [15] BOX, G. E. P. & TIAO, G. C., *Bayesian inference in statistical analysis*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA, 1973.
- [16] SIU, N. O. & KELLY, D. L., *Bayesian parameter estimation in probabilistic risk assessment*, Reliability Engineering and System Safety, vol. 62, pp. 89-116, 1998.
- [17] SOONG, T. T., *Fundamentals of probability and statistics for engineers*, Wiley, New York, 2004.
- [18] SÉRGIO, ERIVALDO, FRUTUOSO E ANDERSON, Evento E2 – Estudo do Escoamento de Rejeito Líquido do Contêiner-Tanque para o Meio Ambiente devido à Capotagem do Mesmo, Relatório ETN BN 2_0068_1170_09018, Rio de Janeiro, 2009.