INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Desenvolvimento de um plano preliminar de descomissionamento de um navio
com uma planta de potência nuclear embarcada**

ADALBERTO RODRIGUES SOBREIRO JUNIOR

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientador:
Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade**

**São Paulo
2021**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Desenvolvimento de um plano preliminar de descomissionamento de um
navio com uma planta de potência nuclear embarcada**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

ADALBERTO RODRIGUES SOBREIRO JÚNIOR

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientador:
Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade**

**São Paulo
2021**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

SOBREIRO JUNIOR, A. ***Desenvolvimento de um plano preliminar de descomissionamento de um navio com uma planta de potência nuclear embarcada.*** 2021. 100 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Sobreiro Junior, Adalberto
Desenvolvimento de um plano preliminar de
descomissionamento de um navio com uma planta de potência
nuclear embarcada / Adalberto Sobreiro Junior; orientador
Delvonei Alves de Andrade. -- São Paulo, 2021.
100 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2021.

1. navios mercantes nucleares. 2. usina nuclear móvel. 3.
descomissionamento de usinas nucleares. I. Alves de Andrade,
Delvonei, orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos meus pais pelo incessante apoio e incentivo em todos os momentos, à minha esposa Ligia pela compreensão e pela minha ausência e aos meus filhos Rômulo e Chiara com amor e gratidão por suas presenças em minha vida.

AGRADECIMENTO

Agradeço, em primeiro lugar, a meus pais que sempre me incentivaram a dar continuidade em minha carreira, a minha esposa Ligia e meus filhos Rômulo e Chiara pelo carinho e paciência e ao colega Dr. Luciano Ondir Freire que contribuiu significativamente com sugestões, orientações, colaborações com as referências bibliográficas deste estudo e como único apoio por parte da Marinha do Brasil.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer ao Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares da Universidade de São Paulo, por transmitir todo o conhecimento possível no estado da arte em Engenharia Nuclear e por receber a mim e demais colegas do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo em uma parceria de longa data sempre com especial carinho e apreço por todos.

Finalmente, ao Professor Dr. Delvonei Alves Andrade, sempre muito gentil, paciente e atencioso em suas orientações correções, apoio, comentários e demais diversas observações que contribuíram muito durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

SOBREIRO JR., A. R., **Desenvolvimento de um Plano Preliminar de Descomissionamento de um navio com uma Planta de Potência Nuclear embarcada. 2021.** Dissertação de Mestrado –IPEN/CNEN/SP. São Paulo.

Para reduzir as emissões de gases do efeito estufa por navios mercantes, o emprego de energia nuclear seria uma opção viável, porém o descomissionamento traz custos elevados os quais impactam a viabilidade econômica. A experiência da Marinha Americana indica que o custo de um descomissionamento, depois de estabelecido um processo bem definido, é próximo de 25% do custo do reator, porém a experiência da Marinha Britânica, que protelou o descomissionamento, salienta um custo muito maior, ou seja, um bom planejamento reduz custos e atrasos. Portanto, é importante desenvolver uma boa política de reciclagem após a inativação do navio com uma usina nuclear. O objetivo deste trabalho é propor um método de descomissionamento para navios com propulsão nuclear através de pesquisas trazendo a experiência e *feedback* de outros países sobre esse assunto. Além de um processo enxuto de descomissionamento que atende as normas vigentes, este trabalho identificou requisitos de projeto e de base que trariam benefícios econômicos a um empreendimento nuclear. O potencial máximo de ganho com a adoção do método proposto e o atendimento dos requisitos identificados seria de 10,3% de economia sobre o preço da tarifa da energia vendida ao consumidor. No entanto, existem custos adicionais no projeto, cuja estimativa, às vezes, é de difícil obtenção.

Palavras-chaves: navios mercantes, usina nuclear móvel, descomissionamento

ABSTRACT

SOBREIRO JR., A. R., **Development of a Preliminary Proposal for a Nuclear Power-Plant Ship Decommissioning. 2021.** Master's degree in Nuclear Engineering) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN/SP.

The use of nuclear energy would be a feasible option to reduce the greenhouse gases emission by merchant ships; however, decommissioning brings high costs, which affect the economic feasibility. The experience from US Navy indicates that the decommissioning cost, after the establishment of a well-defined process, is close to 25% of the reactor cost. Nevertheless, the experience the Royal Navy that postponed the decommissioning highlights a cost much higher, showing that a good planning decreases cost and delays. Therefore, it is important to develop a good recycling policy after deactivation of a ship with nuclear-power propulsion. The objective of this work is to propose a decommissioning method for nuclear propulsion ships through a survey bringing the experience and feedback from other countries about this subject. Furthermore, beyond a simple decommissioning process, which is following the standards from Nuclear Regulation, this work found design and base requirements, which would bring economic benefits to a nuclear facility. The maximum potential gain with the adoption of the proposed method and the fulfilment of the identified requirements would be 10.3% savings on the price of the energy sold to the consumer. Still, there are additional costs in the project whose estimate are, sometimes, difficult to obtain.

Keywords: merchant ships, mobile nuclear plant, decommissioning

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estaleiros certificados para remoção do combustível nuclear.	39
Tabela 2 - Potência Elétrica de uma Planta Nuclear de Vapor (1000 Mwe)	58
Tabela 3 - Comparação de preço para fontes de eletricidade alternativas	59
Tabela 4 – Parâmetros técnico-econômicos de termelétricas–geração nuclear ...	60
Tabela 5 - Custo conhecido de descomissionamento de navios nucleares	63
Tabela 6 - Principais práticas adotadas no processo de descomissionamento	70
Tabela 7 - Conversões de datas e suas respectivas fontes	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reator de Sal Derretido no Laboratório Nacional de Oak Ridge	18
Figura 2 - Etapas do projeto de desativação de uma usina nuclear [25].....	34
Figura 3. - Reatores descomissionados [28]	37
Figura 4 - USS George Washington, primeiro submarino balístico americano	37
Figura 5 - Submarinos americanos descomissionados aguardando corte	38
Figura 6 - Vista superior de Puget Sound	39
Figura 7 - Corte da seção do reator muito empregado em estaleiros americanos	40
Figura 8 - Aguardando descomissionamento-Devonport, Plymouth	44
Figura 9 - Projeto de Desmontagem de Submarinos	45
Figura 10 - K-19, o primeiro submarino balístico russo.....	48
Figura 11 - Descomissionamento de submarinos na Rússia	49
Figura 12 - Planta de Potência do N.S. Savannah.....	53
Figura 13 - Retirada do reator de sua respectiva seção, NS Otto Hahn	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AgNSNQ	Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
ASD	<i>A Ser Definido</i>
BEP	<i>Breakeven or Break-even point</i> – Ponto de equilíbrio
BWR	<i>Boiler Water Reactor</i> - Reator refrigerado a água fervente
CARE	Centro Acompanhamento Resposta Emergência Nuclear/Radiológica
CCO	Custos de Construção <i>Overnight</i>
COS	<i>Construction Order Specification</i>
Centena	Centro Nacional de Tecnologia Nuclear e Ambiental
CGEE	<i>Centro de Gestão de Estudos Estratégicos</i>
CNAAB	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CNEN	Comissão Nacional de Energia Atômica
CNPDE	Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro
DCNS	<i>Direction Constructions Navales Services</i> - Naval Group
DDLP	De-fuel, De-equipment e Lay-up Preparation
DGA	<i>Direction Generale de L'Armement</i> - Diretoria Geral do Armamento
DSA	Autoridade em Segurança Nuclear e Radiação da Noruega
EC	Elemento Combustível
ECI	Elemento Combustível Irradiado
EPA	Agência de Proteção Ambiental
EPC	<i>Engineering Procurement Construction Costs</i>
EUA	Estados Unidos da América
GDF	<i>Geological Disposal Facility</i> - Instalação de Eliminação Geológica
GSI	Gabinete de Segurança Institucional
GT	Grupo Tarefa
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
ILW	<i>Intermediate Level Waste</i>

INB	Indústrias Nucleares do Brasil
INRF	<i>Idaho National Research Facility</i> - Laboratório Nacional de Idaho
LDC	Convenção de Londres
LENR	<i>Low Energy Nuclear Reaction</i>
LFTR	<i>Lead Fast Temperature Reactor</i>
LLRF	Instalação de Reabastecimento de Baixo Nível
LMR	<i>Liquid Metal Reactor</i>
LRW	<i>Liquid Radioactive Waste</i> (baixa e média radioatividade)
LtWbS	<i>Long Term Waterborne Storage</i>
LWR	<i>Light Water Reactor</i>
MAD	<i>Mutual Assured Destruction</i>
MB	Marinha do Brasil
MD	Ministério da Defesa
MNF	<i>Marine Nationale Française</i>
MoD	<i>Ministry of Defence</i>
MSR	<i>Molten Salt Reactor</i>
NAVSEA	Comando de Sistemas Navais
NEI	<i>Nuclear Energy Institute</i>
NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i>
NSRP	<i>Nuclear Steam Raising Plant</i>
NSSS	<i>Nuclear Steam Supply System</i>
OCC	<i>Overnight Construction Cost</i>
OMQ	Oficina Mecânica Quente
ONR	<i>Office of Nuclear Regulation</i>
PCB	Bifenilpoliclorados
PEC	Piscina de Elementos Combustíveis
PHWR	<i>Pressurized High Water Reactor</i> - Reator água pesada pressurizada
PNB	Programa Nuclear Brasileiro

PST	Tanque Primário de Proteção
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RAH	<i>Reactor Access House</i>
RBMN	Repositório Nacional Rejeitos Radioativos Baixo / Médio Nível
RPV	<i>Reactor Pressure Vessel</i>
SAE	Secretaria de Assuntos Estratégicos
SDP	<i>Submarine Dismantling Program</i>
SIPRON	Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro
SN	Submarino Nuclear
SRP	<i>Ship and Submarine Recycling Program</i>
SRW	<i>Solid Radioactive Waste</i> (baixa e média radioatividade)
SSBN	Submarinos Lançadores de Mísseis Balísticos
SSN	Submarinos Nucleares de Ataque
ToT	<i>Transfer of Technology</i>
US Navy	<i>Marinha dos Estados Unidos da América</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	26
3	METODOLOGIA	27
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
4.1	Previsão descomissionamento: usinas do Brasil (Angra)	32
4.2	Descomissionamento de reatores na Marinha Americana.....	36
4.3	Descomissionamento de reatores na Marinha Britânica	41
4.4	Descomissionamento de reatores na Marinha Russa.....	46
4.5	Descomissionamento de reatores na Marinha Francesa.....	50
4.6	Descomissionamento dos navios mercantes	51
4.6.1	NS Savannah.....	51
4.6.2	NS Otto Hahn	53
5	PROPOSTA DE UM PROCESSO DE DESCOMISSIONAMENTO	58
5.1	Identificação de um conjunto mínimo de requisitos	62
5.2	Proposta de processo de descomissionamento	63
5.3	Requisitos do estaleiro.....	73
5.3.1	Área de recebimento, inspeção e armazenamento de EC	79
5.3.2	Área de transporte de combustível irradiado	80
5.3.3	Área de armazenamento de combustível irradiado	80
5.3.4	Área de treinamento	81
5.3.5	Área de preparação e testes de embalagens	82
5.3.6	Área de oficina quente.....	82
5.3.7	Área intermediária de armazenamento de rejeitos	83
5.3.8	Laboratório de monitoração radioecológica.....	83
5.3.9	Lavanderia	83
5.3.10	Área de tratamento de rejeitos.....	84
5.3.11	Laboratório radioquímico	85
5.3.12	Chaminé	85
5.3.13	Sistema de exaustão da chaminé.....	86
5.3.14	Sistemas de processos independentes	86

5.3.15	Sistemas ou atividades comuns a diversas áreas	86
5.4	Proposta de Estratégia de descomissionamento	87
6	DISCUSSÃO	89
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

O impulso da inovação reduz o custo e aumenta a flexibilidade da energia nuclear. Os desenvolvimentos de módulos compactos e padronizados de reator que podem ser produzidos em fábrica e transportados para o local da usina aumentam essa flexibilidade.

A "produção em massa" de módulos de reator em instalações centralizadas seria muito mais barata do que a construção em um local, e projetos padronizados agilizariam o processo de licenciamento. Além disso, o capital inicial seria uma fração do que é necessário para uma grande usina, tornando essa forma de energia nuclear muito mais acessível.

A experiência com pequenos reatores nucleares remonta ao desenvolvimento posteriores de reatores para submarinos e porta-aviões nucleares. Cerca de 700 desses reatores foram usados por diversas nações do mundo para a potência de propulsões de embarcações desde a década de 1950, muitos deles padronizados em projeto e construção. Com algumas exceções, foi construída para navios militares e principalmente a Rússia desde o período soviético até hoje tem usado reatores compactos com sucesso para alimentar seus navios de quebra-gelo no Ártico. A Rússia também opera o único navio de contêineres movido a energia nuclear do mundo, o Sevmorput [1].

Com base nessa experiência, a empresa nuclear estatal russa Rosatom desenvolveu uma usina nuclear flutuante, que pode ser transportada pela água para locais costeiros, fornecendo eletricidade para comunidades e regiões locais. No final do ano passado, a Rússia iniciou a operação de sua primeira usina nuclear flutuante, a Almirante Lomonosov. A usina tem dois reatores do tipo KLT-40 padrão, de outra forma usado em embarcações quebra-gelo movidas a energia nuclear. Fornecendo cerca de 70 MW de energia elétrica, a Almirante Lomonosov está agora instalado em Pevek, Chukotka, no Extremo Oriente do país. A fábrica será a primeira de uma série, que a Rosatom pretende comercializar em todo o mundo.

Com o progresso da energia nuclear, principalmente no que tange à propulsão de embarcações, projetos dessa magnitude fazem parte de uma nova visão do governo brasileiro.

Percussora e pioneira, a indústria da Defesa provê não só uma fonte de geração de empregos no País, mas um estímulo ao desenvolvimento científico e tecnológico brasileiro (fomento para a indústria naval brasileira).

A aquisição de equipamentos com esse nível tecnológico é fundamental para um país continental que possui uma enorme costa litorânea e que precisa zelar pela sua soberania. Usinas nucleares navais dessa grandiosidade, modernas, geralmente passam a ser as primeiras de futuras classes.

Portanto, é de vital importância começar a desenvolver, com antecedência, um plano de descomissionamento a fim de que órgãos fiscalizadores possam criar e exigir o cumprimento da legislação necessária.

A estratégia de descomissionamento deve atender alguns requisitos como *feedback* de outros países, transferência de tecnologia através de *know-how* bem como obedecer sempre às políticas do país quando abordamos o tema sobre descomissionamento de uma planta nuclear. Adicionalmente, uma estratégia deve ser feita para prever formas de gerência e armazenamento dos rejeitos de todas as classes a serem gerados durante as atividades de descomissionamento.

Na etapa de descomissionamento, não existe ainda experiência nacional relacionada às nossas centrais nucleares, pois até o presente momento não houve nenhum processo de desativação das usinas instaladas.

O conceito de risco é atribuído à incerteza futura utilizada para avaliar o potencial efeito de um acidente em termos da sua frequência de ocorrência e da magnitude das suas consequências, considerando separadamente os efeitos a indivíduos (lesões ou fatalidades), à propriedade e/ou ao meio ambiente. De forma geral, as pesquisas realizadas no Brasil indicam que a possibilidade de acidentes, ou seja, o risco associado à utilização da energia nuclear, assim como a destinação dos resíduos radioativos, são os principais responsáveis pela percepção negativa quanto à utilização da energia nuclear no país, sendo a questão dos resíduos radioativos o principal aspecto que impacta desfavoravelmente a opinião pública, principalmente no que tange a uma usina nuclear móvel.

Infelizmente, na transição para a produção de eletricidade comercial por reatores nucleares, a maioria dos projetos inovadores de reatores desenvolvidos no início do período, foi descartada em favor de um único tipo básico: o reator a água leve (*Light Water Reactor -LWR*). Aqui o ponto de partida no Ocidente foi o bem-sucedido programa da Marinha dos EUA para desenvolver reatores para abastecer submarinos. Outros tipos de reatores, como os chamados reatores rápidos, até agora, desempenharam apenas um papel marginal.

Entretanto, com a evolução da geração de reatores (III e III+), uma quantidade de resíduos tem sido identificada, com um tratamento de rejeitos mais barato, uma vida útil mais longa para a usina e uso de materiais não ativáveis. Contudo, merecem ainda destaque outros aspectos menos triviais a serem estudados.

Atualmente, a energia nuclear é quase inteiramente baseada em um único combustível: o isótopo de urânio U-235, que representa 0,7% do urânio natural. Os 99,3% restantes consistem em U-238.

Se tivermos nêutrons suficientes, no entanto, podemos transmutar U-238 em um excelente combustível nuclear, ou seja, plutônio (mais precisamente Pu-239), aumentando assim a base de recursos para a energia nuclear em 140 vezes.

Podemos gerar ainda mais combustível nuclear transmutando o tório para outro isótopo de urânio, o U-233. O U-233 não é apenas um excelente combustível, mas sua fissão produz apenas isótopos relativamente curtos, reduzindo consideravelmente o problema dos resíduos nucleares. O tório é pelo menos três vezes mais abundante na natureza do que o urânio.

De todos os projetos avançados de reator, o reator de sal fundido (*Molten Salt Reactor*) evocou de longe o maior entusiasmo, conforme pode ser observado no Laboratório Nacional de Oak Ridge na Figura 1. Entre as características positivas deste tipo de reator estão a segurança intrínseca e sua adequação para utilizar o tório como fonte de combustível. O tório é muito mais comum do que o urânio, e promete simplificar muito o problema representado pelos chamados resíduos nucleares.

Figura 1 - Reator de Sal Derretido no Laboratório Nacional de Oak Ridge

Os *Molten Salt Reactors* podem ser feitos de forma barata porque são simples em comparação com os reatores convencionais, não exigindo grandes cúpulas de contenção pressurizadas e muitos sistemas de segurança adicionais complicados encontrados nos sistemas convencionais. Ter muito menos sistemas e peças tornam os MSRs inerentemente mais baratos. Essa simplicidade também permite que os MSRs sejam menores em tamanho, o que, por sua vez, os torna ideais para fabricação.

Os MSRs podem funcionar com urânio e estoques existentes de plutônio e resíduos nucleares. Uma variante de um MSR, um reator líquido (*Lead Fast Temperature Reactor-LFTR*), será capaz de usar o tório abundante como combustível.

A existência das chamadas Reações Nucleares de Baixa Energia (LENR) apontam para a possibilidade de uma geração essencialmente livre de radioatividade de energia por processos nucleares [2] (isso sendo uma enorme promessa). Por um lado, há muitos experimentos relativamente simples, especialmente os experimentos japoneses, os quais demonstram boa reprodutibilidade. Mas, há muitas incógnitas, incluindo como regular e controlar os processos LENR para aplicações práticas. Ainda falta uma explicação física confirmada. De um ponto de vista otimista, pode-se imaginar uma aplicação relativa em curto prazo como uma fonte de calor de baixa ou média temperatura.

Evidências de transmutação, encontradas em muitos experimentos de LENR, também sugerem uma maneira potencial de eliminar resíduos radioativos; pesquisa nessa direção já foi iniciada no Japão.

Existem ainda reatores que não utilizam moderador, conhecidos como reatores rápidos, em oposição aos reatores térmicos. O núcleo do reator rápido é envolvido por uma camada de urânio, que recebe os nêutrons que escapam do núcleo, gerando urânio e plutônio físséis. O plutônio é mais adequado à fabricação de bomba, o que torna este tipo de reator visado do ponto de vista militar. O sistema de controles internacionais (pela Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA) foi criado para resolver esse problema [3]. No entanto, alguns países não aceitaram os controles, por exemplo, Coreia do Norte e Irã.

Na atividade nuclear, o termo descomissionamento refere-se ao conjunto de atividades a serem realizadas ao fim da vida útil de instalação nuclear para garantir que o sítio, onde a instalação está localizada, não apresente nenhum risco ao público e possa ser liberado para o uso irrestrito.

Para evitar dúvidas, o descomissionamento de navios com propulsão nuclear seria um conjunto de atividades a ser realizada ao fim de sua vida útil para garantir que não apresente qualquer risco à população e possa ser auditada pela Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade.

O processo de descomissionamento de um navio com propulsão nuclear consiste das seguintes atividades, conforme [4]:

1. Fase preparatória – proposta de reduzir o risco de contaminação ambiental (remoção de contaminantes não radiológicos) e preparar o navio para a retirada do combustível (navio aguarda no berço de desativação do estaleiro com remoção de calor pelos sistemas nucleares de bordo ou de suporte de terra e em desligamento a frio – *cold shut down*). Tempo entre a desativação e retirada do combustível de 1 a 3 anos;
2. Desativação, limitada à preparação do navio com propulsão nuclear para o armazenamento temporário (até a remoção do combustível nuclear);

3. Remoção do combustível nuclear, fluidos refrigerantes do circuito primário e rejeitos radioativos, sejam eles sólidos ou líquidos;
4. Gerenciamento do combustível nuclear e demais rejeitos radioativos;
5. Fase de gerenciamento de materiais ativados da seção do reator. O propósito é reduzir o risco de contaminação radiológica. Depois da retirada do combustível, a radioatividade na seção do reator vem de materiais ativados (aproximadamente 1% da radioatividade prévia no reator). A seção do reator será cortada e separada do resto do casco da plataforma do navio em razão de confinar os materiais ativados. O armazenamento temporário da seção do reator até o seu desmantelamento é de 30 a 60 anos [4] (prática norte-americana possível de ser adotada no Brasil); e
6. Fase de desmantelamento do casco. Proposta de reduzir o risco de contaminação ambiental por materiais tóxicos e a reciclagem de materiais valiosos de dentro do resto da embarcação (reuso de equipamentos grandes como diesel geradores, turbinas, bombas, aço especial, cobre, alumínio.) além de um depósito seguro de materiais tóxicos (isolantes térmicos, elétricos e acústicos).

Após todas as fases descritas acima, o próximo passo é o desmantelamento total do navio ou a conversão em um navio museu.

Em fonte aberta na literatura, existe muita informação sobre processos de descomissionamento adotados por navios com propulsão nuclear no que diz respeito a submarinos. Cada processo apresenta diferenças entre si, que serão apresentados no decorrer deste estudo [6, 7, 8, 9 e 10].

Vale ressaltar a potencial importância de uma usina nuclear móvel no tráfego marítimo para o comércio, principalmente na redução da quantidade de gases responsáveis pelo efeito estufa, oriundo de navios convencionais, os quais acabam jogando monóxido e dióxido de carbono na atmosfera. Atualmente, o transporte marítimo é responsável por 95% da cadeia de fornecimento global, o qual é um importante colaborador na emissão de óxidos de nitrogênio, carbono e enxofre. Nova restrição à emissão de poluentes irá requerer o uso de combustíveis mais caros, fazendo ainda uso de combustíveis fósseis [11].

Preocupações com os efeitos climáticos de aquecimento global e efeito estufa oriundos do CO e CO₂ causados pelo homem em suas emissões, levaram organizações a investimentos gigantescos nas chamadas fontes de energia renováveis: eólica, solar, hidrelétrica e biocombustíveis. Enquanto isso, em um grande erro, a energia nuclear, uma confiável fonte de energia livre de emissões de gases, que produz 14% da eletricidade mundial, foi deixada muito para trás [12].

A fim de manter um custo razoável no comércio marítimo, novas tecnologias de energia para emprego em navios necessitam aparecer. As energias solar e eólica poderiam ser uma escolha se a velocidade média dos navios se resumisse a 10 nós (atualmente, navios contêineres viajam entre 20 até 25 nós), além da viagem poder variar muito, uma vez que as energias solar e eólica dependem do tempo. Tomando por base a carga elétrica em lugares remotos, a energia proveniente do sol e vento não é competitiva, porque necessita de um acúmulo de energia e grandes superfícies de terra, impactando na agricultura. Portanto, a energia nuclear é a solução para cortar as emissões do efeito estufa, a qual é estável para o fornecimento elétrico e não depende do tempo.

Após décadas marcadas por ações isoladas e esparsas, o Programa Nuclear Brasileiro (PNB) foi reativado e, mais importante, passa a ter uma coordenação, um anseio do setor. Várias medidas indispensáveis e adiadas entraram na pauta dos grupos de trabalho do Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro (CDPNB), criado em 2008, vinculado à Secretaria de Assuntos Estratégicos (SAE), e transferido em 2017 para o Gabinete de Segurança Institucional (GSI) da Presidência.

Desde 1956, ano de criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), autarquia federal responsável por regular as atividades nucleares no país, as iniciativas do setor foram marcadas pela descontinuidade. Essa lacuna de 60 anos começou a ser preenchida em 5 de dezembro de 2018, com o decreto 9.600, que consolida as diretrizes sobre a Política Nuclear Brasileira.

Um exemplo é a decisão de se construir o repositório de rejeitos de baixa e média atividade, com a definição do projeto e do cronograma de construção, uma dívida do setor nuclear para com a sociedade. Outra importante decisão é a

criação de uma agência reguladora para usinas nucleares embarcadas, denominada Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade, cuja norma e documentação necessária estão sendo produzidas no presente momento, a fim de atender à solicitação da Marinha do Brasil para o primeiro submarino brasileiro com propulsão nuclear.

Com a retomada das obras de Angra 3 e a crescente expansão das usinas nucleares que constará no Plano Nacional de Energia (PNE 2050), é de vital importância prever planos de descomissionamento para estas futuras usinas. A saber, o PNE 2030 sinalizava a ampliação do parque nuclear, com quatro novas usinas, além de Angra 3, sendo duas no Nordeste e as outras duas no Sudeste.

No que diz respeito à segurança, diversos aprimoramentos têm sido incorporados, não apenas nos novos projetos, mas, também, nas usinas já existentes e em construção.

O artigo 1º do decreto diz que a Política Nuclear Brasileira “tem por finalidade orientar o planejamento, as ações e as atividades nucleares e radioativas no País, em observância à soberania nacional, com vistas ao desenvolvimento, à proteção da saúde humana e do meio ambiente”.

A Política Nuclear Brasileira foi elaborada pelo Comitê de Desenvolvimento do PNB. O CDPNB foi criado em 2 de julho de 2008, vinculado à Secretaria de Atividades Estratégicas (SAE) da Casa Civil da Presidência da República, e retomado pelo decreto de 22 de junho de 2017, quando foi transferido para a coordenação do Gabinete de Segurança Institucional (GSI) da Presidência da República.

O Decreto nº 9.828, de 10 de junho de 2019, reestruturou o Comitê, estabelecendo como sua competência: a formulação de políticas públicas relativas ao setor nuclear; proposição de aprimoramentos ao Programa Nuclear Brasileiro; a supervisão do planejamento e a execução de ações conjuntas de órgãos e entidades relativas ao desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro.

O CDPNB tem como missão assessorar o Presidente da República, por meio de um colegiado de alto nível, no estabelecimento de diretrizes e metas para o desenvolvimento do PNB e supervisionar sua execução, a fim de contribuir para o

desenvolvimento nacional e para a promoção do bem-estar da sociedade brasileira.

Outra iniciativa do novo governo foi à atualização do Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro (SIPRON), instituído por lei de 2012 e que tem como atribuição a coordenação das ações para atender permanentemente às necessidades de segurança e proteção do Programa Nuclear Brasileiro. Formado por um conjunto de Ministérios e Órgãos de regulação vinculados aos governos federal, estadual e municipal, e coordenado pela Secretaria de Assuntos Estratégicos (SAE) da Presidência da República, o SIPRON funciona com uma estrutura de colegiados e centros de resposta.

Dentre os grupos técnicos do CDPNB, podemos destacar:

1. Em andamento, o Grupo Tarefa GT8, o qual estabelece diretrizes e metas para o desenvolvimento do empreendimento Repositório Nacional de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN), através da viabilização do Centro Nacional de Tecnologia Nuclear e Ambiental (Centena), que abrigará o Repositório Nacional de Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação.
2. A ser constituído, o Grupo Tarefa GT10 GSI, procurando dinamizar a área reguladora para o desenvolvimento do setor nuclear brasileiro no qual está a Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade (AgNSNQ).

A sanção presidencial de 7 de janeiro de 2020 conferiu competência ao Comando da Marinha para promover o licenciamento e a fiscalização dos meios navais e suas plantas nucleares embarcadas para propulsão, por organização militar independente específica para esse fim, além do transporte de seu combustível nuclear.

O custo do descomissionamento é importante na busca de economia. Convém ressaltar que muito pode ser economizado com um planejamento adequado.

O custo de obtenção ou de construção de um submarino convencional pode ser até quatro vezes menor do que o de um submarino nuclear [13]. Se somados os custos do ciclo de vida com treinamento, manutenção e descomissionamento,

a diferença aumenta ainda mais, podendo alcançar até dez vezes, dependendo do tipo de submarino nuclear.

É importante mencionar a diferença entre os casos inglês e americano, onde a falta de planejamento causou um aumento de custos e muitos atrasos à Marinha Britânica.

No fim de 1994, existiam 180 submarinos nucleares construídos nos Estados Unidos. Aproximadamente 80 destes navios foram descomissionados, e 43 seções de reatores foram cortadas e transportadas para o Depósito Nuclear de Hanford.

Existe um plano para descomissionar todos os submarinos construídos até o ano de 1970 (classe pré-Los Angeles e pré-Ohio). Este programa custará US\$2,7 bilhões, portanto os gastos por unidade de submarino será de US\$ 25-40 milhões.

Adicionalmente, em 1995, o programa inicial foi preparado para descomissionar submarinos da 3ª geração (classes “Los Angeles” e “Ohio”), a maioria dos quais já foram descomissionados. O custo do programa foi estimado em US\$1,5 bilhão, se o esquema atual fosse adaptado. A variante, a qual assume a reciclagem das seções do reator e o reuso do metal deste compartimento, custará aproximadamente US\$9,4 bilhões.

O governo britânico admitiu que existe realmente falta de conhecimento especializado para o Projeto de Desmantelamento de Submarinos (SDP). Há muita concorrência do setor civil que está ocupando o descomissionamento de antigas usinas nucleares. O SDP é uma tarefa muito necessária, mas pouco glamorosa, e pode ter dificuldades em atrair engenheiros que tenham a oportunidade de trabalhar em projetos mais interessantes. Diante de orçamentos e pessoal limitados, o Ministério da Defesa (*Ministry of Defence*) tem pouca opção a não ser continuar nesse ritmo muito lento. Até que o trabalho no HMS Swiftsure seja concluído, o MoD está relutante em se comprometer com um cronograma, mas afirma que, em média, um submarino será desmantelado a cada 12 a 18 meses em cada site a partir de 2022. Espera-se que um progresso mais rápido possa ser feito, caso contrário, qualquer que seja o futuro da Base Naval de

Davenport, o estaleiro ainda poderia estar desmantelando submarinos da classe Vanguard na década de 2050.

A culpa por esta situação não pode ser colocada nos políticos de hoje, e sim em muitas administrações, que remontam a várias décadas. Na indústria nuclear civil, os operadores são obrigados por lei a reservar fundos e fazer planos durante a vida da usina para pagar pelo desmantelamento. Seria prudente se um princípio similar fosse aplicado pelo MoD a toda nova construção de embarcações com propulsão nuclear.

2 OBJETIVO

O presente estudo tem o objetivo de analisar os processos de descomissionamento de usinas nucleares móveis estrangeiras, através da literatura existente em fonte aberta, a fim de convergir todas as práticas comuns adotadas em diferentes países de modo a estabelecer um plano preliminar de descomissionamento de um navio com uma planta de potência nuclear embarcada adequado a nossa legislação e as nossas instalações de terra em território nacional. Tal plano poderá servir como subsídio para projetos futuros de descomissionamento de outras usinas nucleares móveis.

Diferentemente de outro tema trabalhado anteriormente na UFRJ/COPPE [4], onde a abordagem focou na proposta para o descomissionamento de submarinos nucleares no Brasil, é importante salientar que o descomissionamento traz custos elevados, os quais impactam a viabilidade econômica. Portanto, esta dissertação difere, além de um processo enxuto de descomissionamento que atende as normas vigentes, na análise também de navios mercantes, considerando requisitos atualizados de projeto e de base identificados como benéficos e economicamente viáveis para um futuro empreendimento nuclear.

3 METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo deste trabalho, propõem-se os seguintes métodos: revisão dos procedimentos, definir um processo economicamente viável, definir requisitos para o estaleiro e definir requisitos de projeto da usina nuclear móvel. Igualmente, escolher os procedimentos mínimos para atender os requisitos os quais serão objetivos e mensuráveis; e listar todas as instalações físicas e competências técnicas.

O primeiro passo, seguindo às leis da Comissão Reguladora Nuclear americana (*Nuclear Regulatory Commission*), será identificar os objetivos quantitativos de segurança, bem como as normas relacionadas. Basicamente, esse passo é um levantamento das normas.

O segundo passo é identificar os aspectos aplicáveis a um reator naval, sintetizando uma lista de requisitos objetivos e quantificáveis. Esse passo também incluirá considerações socioeconômicas da proteção radiológica, corrigindo certos níveis de exigência para a realidade e estágio de desenvolvimento nacional.

O terceiro passo é revisar os processos de licenciamento de várias usinas nucleares navais [14, 15, 16, 17, 18 e 19]. Ao revisar aspectos de descomissionamento em outros reatores, existe a necessidade de identificar os pontos mais utilizados em cada processo de descomissionamento e avaliar a adequação a um plano preliminar de uma usina nuclear móvel.

O quarto passo será escolher um conjunto de procedimentos mínimos para atender os requisitos identificados no passo 2. Também é necessário, neste passo, verificar se os pontos mais empregados são suficientes para atender todos os requisitos identificados no passo 2, complementando com os procedimentos adicionais julgados necessários.

Igualmente, existe também a particularidade de listar as instalações físicas e competências técnicas de que um estaleiro precisa para realizar o

descomissionamento de uma usina nuclear móvel. Assim, o quinto passo será a especificação do estaleiro para cumprir o procedimento escolhido no passo 4.

O último passo será identificar requisitos aplicáveis ao projeto da usina nuclear móvel para que o processo de descomissionamento seja acelerado, seguro e tenha custos reduzidos.

A segurança nuclear é um conjunto de atividades relacionadas à obtenção de condições operacionais, prevenção e controle de acidentes ou à mitigação dos impactos desses, que resulta em proteção de indivíduos expostos, do público e do meio ambiente contra riscos indevidos da radiação, obtida por meio de um conjunto de medidas de caráter técnico e administrativo, incluídas no projeto, na construção, no comissionamento, na operação, na manutenção e no descomissionamento de uma instalação.

Qualquer navio com uma planta nuclear embarcada deve ser autônomo para fins de segurança nuclear naquela situação em que, para uma determinada condição inicial, é assegurado o desempenho das funções de segurança necessárias para fazer frente aos acidentes da base de projeto possíveis naquela condição e trazê-lo a um estado seguro, sem a necessidade de conexão a sistemas externos de suporte de terra.

Para desempenhar adequadamente suas funções, a embarcação deve considerar alguns aspectos a fim de garantir sua segurança nuclear ou mitigar os impactos aos indivíduos do público e do meio ambiente:

- **Acidente da base de projeto:** um acidente postulado que leva a condições de acidente, para as quais a instalação é projetada, em concordância com critérios de projeto estabelecidos e metodologias conservadoras, e para as quais liberações de material radioativo sejam mantidas abaixo de limites aceitáveis [20].
- **Critério de falha simples:** um critério (ou requisito) aplicado a um sistema, de forma que ele deva ser capaz de executar suas tarefas mesmo se tiver ocorrido qualquer falha simples [20].
- **Evento iniciador:** um evento identificado que leva a ocorrências operacionais previstas ou condições de acidentes. O evento iniciador

demanda a ativação de sistemas de segurança para evitar que um acidente ocorra [20].

- **Evento iniciador postulado:** um evento postulado, identificado em projeto capaz de levar a ocorrências operacionais previstas ou condições de acidente [20].
- **Falha simples:** uma falha que resulte na perda da capacidade de um único sistema ou componente de desempenhar sua(s) função (ões) de segurança prevista(s) e qualquer (quaisquer) falha(s) consequente(s) que dela resulte(m) [20].
- **Segurança Relacionada:** Classificação aplicada a um item ao qual é confiada uma função relacionada à segurança necessária durante ou após um acidente da base de projeto [20].
- **Segurança Não-Relacionada:** Classificação aplicada a um item que não é classificado como *Safety Related* [20].
- **Segurança Relacionada com Requisitos Especiais:** Classificação aplicada a um item que não é classificado como *Safety Related*, mas ao qual é confiada uma função durante um evento especial ou ao qual um requisito ou comprometimento de licenciamento é aplicado [21].

Podemos dizer que um navio com propulsão nuclear é autônomo para fins de segurança nuclear quando atracado ao seu cais nas condições normais, com e sem manutenção programada dos sistemas de segurança nuclear, quando em período de manutenção atracado.

Quando a embarcação estiver docada com combustível nuclear, devido à impossibilidade dos seus sistemas de resfriamento e dos seus geradores a diesel de operar em dique seco sem conexão de sistemas externos ao navio, este não é autônomo para fins de segurança nuclear. A ausência de autonomia do navio no dique, mesmo quando nenhum equipamento de segurança nuclear está indisponível devido à manutenção, leva à necessidade de adotar a classificação funcional de segurança *Safety Related* para sistemas do dique. Quando o reator

estiver com o núcleo descarregado, não existe a necessidade de avaliar a autonomia para fins de segurança nuclear.

Para atracação em portos diversos, não se podem estimar os suportes disponíveis no cais, impossibilitando a preservação de sistemas do navio. Em portos diversos, não serão executadas manutenções relevantes em sistemas de segurança. Desta forma, entende-se que o navio permanece em condição semelhante à operação em potência no mar, quando atracado em portos diversos, condição na qual este é autônomo.

Para os sistemas do cais não devem ser confiadas funções de segurança em cenário acidental. Os sistemas do cais são usados para preservação dos sistemas de bordo, embora suas falhas possam gerar eventos iniciadores. Desta forma, considerou-se que os equipamentos, sistemas e estruturas do cais são itens de Segurança não Relacionada.

O processo de descomissionamento proposto para um navio com uma planta nuclear embarcada, conforme a autoridade da AgNSNQ, requisitos de gerenciamento de rejeitos radioativos e descomissionamento tem como premissas:

- O processo proposto privilegia o uso de instalações e equipamentos disponíveis no estaleiro de forma a não incorporar custos adicionais de construção/locação de novas estruturas, sem implicar grande impacto em requisito de segurança e do meio ambiente;
- Os rejeitos oriundos do descomissionamento serão processados e armazenados nas instalações do estaleiro até sua deposição final; e
- Os processos de remoção do combustível e rejeitos radioativos, bem como, seu transporte, processamento e armazenamento durante o seu descomissionamento serão os mesmos realizados ao longo da vida operativa da embarcação.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica compila dados disponíveis em fonte aberta sobre o descomissionamento de planta nuclear embarcada em submarinos e navios mercantes. As informações sobre navios com propulsão nuclear, suas usinas e combustíveis e outras instalações nucleares de terra estão apresentadas nos capítulos subsequentes como parte das condições de contorno necessárias para atingir o objetivo e o entendimento do plano preliminar de descomissionamento. A fim de atender o objetivo dessa dissertação, as fontes consideradas para essa revisão bibliográfica limitam-se ao escopo de usinas nucleares móveis, exceção feita a nossa usina terrestre nacional (excluindo-se as internacionais), a qual pode considerar algumas informações pertinentes contidas nessa dissertação as quais poderão ser de grande ajuda para o futuro descomissionamento de suas instalações.

As informações são apresentadas sequencialmente como:

1. Previsão de descomissionamento: usinas nucleares do Brasil (Angra);
2. Descomissionamento de reatores na Marinha Americana;
3. Descomissionamento de reatores na Marinha Britânica;
4. Descomissionamento de reatores na Marinha Russa; e
5. Descomissionamento de navios mercantes.

4.1 Previsão descomissionamento: usinas do Brasil (Angra)

De modo a estabelecer um plano preliminar de descomissionamento adequado a nossa legislação, as nossas instalações de terra devem possuir um conjunto de atividades a serem realizadas ao fim da vida útil de instalação nuclear para garantir que o sítio, onde a instalação está localizada, não apresente nenhum risco ao público e possa ser liberado para o uso irrestrito.

Ao comparar os processos de descomissionamento de usinas nucleares estrangeiras, através da literatura existente em fonte aberta e a fim de convergir todas as práticas comuns adotadas em diferentes países, a experiência obtida se baseia em:

- Retirada de operação;
- Gestão dos rejeitos oriundos da operação e do descomissionamento;
- Desmantelamento.

A estratégia de descomissionamento deve prever gerenciamento e estocagem dos rejeitos de todas as classes a serem gerados durante as atividades de descomissionamento.

Não existe ainda experiência nacional relacionada às nossas centrais nucleares, pois até o presente momento não houve nenhum processo de desativação das usinas instaladas.

O único descomissionamento realizado em uma instalação nuclear no Brasil foi feito pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB) na Usina Santo Amaro na antiga Nuclemon, empresa controlada pela INB, que processava areias monazíticas extraíndo terras raras, urânio e tório.

Segundo o órgão regulamentador no Brasil, no Relatório Final de Análise de Segurança, salienta-se que durante a vida operacional da usina e após o fim da operação, a organização operadora, ou a organização gestora oficialmente estabelecida, deve garantir a gestão adequada de recursos financeiros, pelo período necessário, de modo a cobrir os custos associados à implantação do Plano Final de Descomissionamento previamente aprovado pela Comissão Nuclear de Energia Nuclear (CNEN).

No descomissionamento da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), considerando o comissionamento e funcionamento de ANGRA 3 ao longo de toda sua vida útil, é desejado um desmantelamento protelado, mantendo as outras unidades intactas até atingir um nível de decaimento radioativo aceitável de contaminação, proporcionando o desmantelamento das três unidades em sequência (Angra 1, 2 e 3).

O importante é identificar os elementos aplicáveis a uma usina embarcada a fim de definir um plano e identificar seus requisitos de projeto para facilitar o descomissionamento (teor de cobalto, acessibilidade de componentes e vida mínima de componentes, por exemplo).

As licenças de operação emitidas pela *Nuclear Regulatory Commission* (NRC), nos Estados Unidos, para usinas de Geração II, estão sendo prorrogadas após a devida avaliação de segurança. No caso dos Estados Unidos, as maiorias dos elementos combustíveis irradiados estão armazenadas em piscinas localizadas nas instalações das próprias usinas nucleares onde foram usados [23 e 24].

Uma vez que a capacidade da piscina tenha se esgotado, é possível optar pelo armazenamento a seco dos elementos combustíveis irradiados usando-se cascos para o seu armazenamento. Neste método, o elemento combustível irradiado é colocado em um *canister*, que pode ser metálico ou feito de concreto, e que contém um gás inerte. Tal *canister* pode ser usado tanto para armazenamento como para transporte. Como exemplo, nos Estados Unidos atualmente 17 usinas nucleares utilizam a opção do armazenamento a seco.

Segundo relatório parcial elaborado pelo CGEE [25], a Figura 2 apresenta as principais etapas de um empreendimento de uma usina nuclear, desde o momento que é projetada até a sua desativação:

Figura 2 - Etapas do projeto de desativação de uma usina nuclear [25]

Descomissionar uma usina nuclear móvel depende da sua disponibilidade de recursos (sejam humanos ou orçamentários), instalações necessárias (complexo radiológico ou centro de manutenção especializada) e do estado do meio naval (especialmente do núcleo).

A saber, um submarino nuclear não guarda combustível irradiado (já queimado) e muito menos rejeitos no seu interior (como a usina de Angra 2). Após o combustível queimado ser removido de bordo, o mesmo deve ser armazenado em piscinas e depósitos especiais de terra.

A ausência de um sítio ou local específico ainda é discutível para que se possa desconsiderar o inventário e possa ser liberado para uso ao final do processo. O armazenamento temporário é o período que uma embarcação com propulsão nuclear permanecerá atracado a um cais de espera, aguardando que os seus radioisótopos de meia-vida curta decaiam naturalmente, reduzindo seus produtos de fissão e removendo o calor residual do núcleo.

Para qualquer meio naval, recomenda-se o desmantelamento protelado, e um plano preliminar deve ser apresentado como parte do processo de licenciamento à Agência Nuclear responsável, na ocasião de submissão do Relatório Preliminar de Análise de Segurança, propondo a estratégia a ser adotada, demonstrando que pode ser implantado de forma segura para alcançar o estado final previsto para o local e estruturas remanescentes.

No Decreto 9.600 [26], assinado em 5 de dezembro de 2018 pelo então presidente da República Federativa do Brasil em exercício, Michel Temer, consolidavam-se as diretrizes da Política Nuclear Brasileira e tinha por finalidade orientar o planejamento, as ações e as atividades nucleares e radioativas no País, em observância à soberania nacional, com vistas ao desenvolvimento, à proteção da saúde humana e do meio ambiente.

A nova legislação visa, entre outros objetivos, garantir o domínio da tecnologia relativo ao ciclo do combustível nuclear, a busca da autonomia tecnológica nacional e o estímulo à sustentabilidade econômica dos projetos do setor, bem como preservar o domínio da tecnologia nuclear em busca de um Repositório Nacional de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Nível de Radiação.

Na área de regulação da Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade (AgNSNQ), adotou-se estrutura normativa similar àquela da Agência Internacional de Energia Atômica, considerando simultaneamente princípios fundamentais e requisitos integrados à segurança naval e nuclear, em decorrência da necessidade de operação submersa e do uso controlado da energia nuclear em ambiente confinado, com demandas de potência variáveis.

4.2 Descomissionamento de reatores na Marinha Americana

Desde o lançamento do primeiro submarino movido à propulsão nuclear, o USS Nautilus, a *US Navy* já colocou em serviço e desativou cerca de oitenta Submarinos Nucleares de Ataque (SSN) e Submarinos Lançadores de Mísseis Balísticos (SSBN). Para o descomissionamento de suas plantas nucleares, o processo é mais rápido e dura, em média, dois anos desde a remoção do combustível até o desmantelamento do casco. A saber, o primeiro submarino nuclear americano demorou quatro anos (possivelmente na primeira vez os americanos não tinham um bom plano de descomissionamento, trazendo como consequência um tempo duas vezes maior). Se assumirmos que o custo está essencialmente relacionado à mão de obra, a redução pela metade do tempo no cronograma de planejamento de descomissionamento (de quatro anos iniciais para apenas dois anos), a experiência americana nos diz que através de um bom planejamento podemos reduzir 50% do custo [27].

A Marinha Americana possui um sítio pertencente ao Departamento de Energia em Hanford, no deserto de Washington, contendo seções de reatores oriundas de embarcações contendo o vaso do reator, geradores de vapor, bombas, válvulas e tubulações, segregados do combustível nuclear, como parte do processo de desativação.

Os fluidos são drenados dos sistemas do reator e suas respectivas tubulações são seladas. A seção inteira do reator e algumas interfaces de compartimentos adjacentes são cortadas, e uma placa de aço passa a ser soldada em cada lado a fim de selar o compartimento (essa nova seção no lugar da anterior denomina-se dummy) e a seção é levada a um depósito para reatores, semelhante ao que pode ser observado na Figura 3.

Figura 3. - Reatores descomissionados [28]

Em 1959, os EUA lançam o primeiro submarino balístico com propulsão nuclear, o USS George Washington (Figura 4).

Figura 4 - USS George Washington, primeiro submarino balístico americano

O descomissionamento de submarinos na Marinha Americana é dividido em três principais etapas, para logo após ficarem atracados aguardando seu desmantelamento conforme a Figura 5:

1. Remoção do combustível nuclear;
2. Remoção e descarte da seção do reator; e
3. Reciclagem do casco.

Figura 5 - Submarinos americanos descomissionados aguardando corte

O Comando de Sistemas Navais (NAVSEA) é o órgão responsável pelas atividades de desativação e desmantelamento de submarinos nucleares, determinando através de certificação quais serão os estaleiros responsáveis pelo descomissionamento (ver Tabela 1).

Tabela 1 - Estaleiros certificados para remoção do combustível nuclear.

Estaleiro	Local
Puget Sound	Bremerton, Washington
Mare Island	Vallejo, Califórnia
Portsmouth	Kittery, Maine
Charleston	Charleston, South Carolina
Pearl Harbour	Hawaii

O Programa de Reciclagem de navios e Submarinos (*Ship and Submarine Recycling Program-SRP*) é o processo adotado pela Marinha Americana para reciclar seus meios navais com planta nuclear embarcada.

O SRP é inteiramente conduzido em Puget Sound, Bremerton - Washington, devido à sua proximidade de Hanford, sendo o único estaleiro responsável por remover as seções de reator e desmantelar os seus respectivos cascos. A Figura 6 apresenta a vista superior de PSNS.

Figura 6 - Vista superior de Puget Sound

No estaleiro o submarino nuclear é colocado no dique seco e sua seção do reator é cortada e segregada do restante do navio. A seção do reator recebe

anteparas a montante e a jusante de suas extremidades para garantir a estanqueidade. A Figura 7 ilustra o corte da seção do reator do restante do navio.

Figura 7 - Corte da seção do reator muito empregado em estaleiros americanos

O casco todo é cortado em grandes seções para facilitar sua retirada do dique seco, realizando dessa forma um inventário de todo o material, catalogando como recicláveis e rejeitos.

Os rejeitos são separados em materiais perigosos (tóxicos) e não perigosos. Os rejeitos perigosos e tóxicos são identificados e removidos obedecendo todas as devidas regras relacionadas quanto a normas ambientais.

Os materiais recicláveis são em geral metais ferrosos e não ferrosos de alta qualidade (aços especiais, alumínio, cobre zinco, bronze etc.).

4.3 Descomissionamento de reatores na Marinha Britânica

Existem atualmente vinte submarinos nucleares desativados que pertenceram à Marinha Real Britânica aguardando descarte em Rosyth e Davenport. Eles não representam um grande perigo, mas mantê-los em segurança enquanto aguardam o desmantelamento é um dreno crescente no orçamento da defesa.

Os planos para a eliminação segura e oportuna de submarinos nucleares deveriam ter sido elaborados desde a década de 1970, mas sucessivos governos evitaram decisões e entregaram o problema aos seus sucessores. Os submarinos da *Royal Navy* foram projetados para que o vaso de pressão do reator fosse removido do casco.

A capacidade de armazenar mais submarinos em Davenport é limitada. Cada atraso adicional aumenta o custo de um orçamento de defesa que é muito menor em termos reais do que quando os submarinos foram concebidos no auge da Guerra Fria. Além dos altos custos de adiamento em curto prazo, uma das principais causas de atrasos tem sido a seleção de um local de armazenamento em terra para os resíduos radioativos.

Enquanto aguardam desmantelamento, os submarinos desativados são armazenados dentro de uma baía sem efeito da maré no estaleiro. Equipamentos, armazéns e materiais inflamáveis são removidos juntamente com lemes, hidroplanos e hélices, enquanto o casco recebe tratamentos para ajudar a postergar sua vida útil. Todos os submarinos em Rosyth tiveram seus elementos combustíveis removidos, mas a maior parcela em Davenport, ainda é recarregada. Isso porque, em 2003, as instalações para a extração do combustível não eram mais seguras o suficiente para atender aos padrões modernos de regulamentação e o processo foi interrompido. Os submarinos que não tiveram seus elementos combustíveis removidos tiveram o circuito primário do reator tratado quimicamente para garantir que permaneça inerte e equipamentos adicionais de monitoramento de radiação foram instalados.

Mais de £16 milhões foram gastos entre 2010 e 2015 (aproximadamente 3,2 milhões de libras por ano) apenas para manter esses velhos cascos armazenados enquanto os custos continuam a aumentar (em 20 anos, estima-se que serão gastos 2 milhões de libras só para mantê-los). Além do monitoramento regular, os cascos precisam ser retirados da baía para ocasionais docagens no dique seco para inspeção e repintura, a fim de proteger o casco da corrosão. Todo esse esforço e despesa é um dreno de recursos preciosos para nenhum ganho direto. O cuidado responsável pelo crescente número de cascos significa que eles representam pouco risco para a população.

Atualmente o Projeto de Desmontagem de Submarinos (SDP) iniciado em 2016, utilizará o HMS Swiftsure, o qual está no dique seco em Rosyth, como projeto “piloto” para provar o processo de desmantelamento. A eliminação do total de vinte cascos custará pelo menos £ 7,5 bilhões em cento e vinte anos e continuará até os anos 2040 (aproximadamente £96 milhões (US\$ 128 milhões) por casco para desmontar). Mas existem outros custos, como o armazenamento temporário e definitivo.

Nos últimos anos, o Davenport tem trabalhado no projeto *De-fuel, De-equipment e Lay-up Preparation* (DDLDP), que se concentrou na preparação de um dique para o desmantelamento de submarinos. No início dos anos 2000, uma grande atualização para as instalações nucleares foi concluída para apoiar tanto a manutenção como o futuro desmantelamento de submarinos. O *Reactor Access House* (RAH) usado dedicado aos componentes do reator é um compartimento móvel que atravessa o dique e é montado em trilhos em suas paredes. Os pisos dos diques foram erguidos, resistentes a impacto, mantendo a integridade das entradas e novos berços submarinos de isolamento foram instalados junto com guindastes de cais em um dique seco construído sobre rocha a fim de resistir a abalos sísmicos (terremotos) garantindo assim que tenham qualificação nuclear.

Para operações de abastecimento ou de não abastecimento, o RAH é colocado sobre o compartimento do reator do submarino e fornece uma área protegida estável responsável por guardar as ferramentas de guindaste e de remoção de combustível as quais os operadores podem trabalhar com segurança.

Como único local que pode extrair o combustível dos submarinos, o Devonport está bem equipado para realizar o trabalho de desmantelamento e suas instalações agora atendem aos mais recentes padrões do *Office of Nuclear Regulation* (ONR). Além dos diques, existe a única ferrovia sistemicamente qualificada no Reino Unido e a Instalação de Reabastecimento de Baixo Nível (LLRF), que pode armazenar núcleos de reatores utilizados e barras de combustível, antes de serem enviados para armazenamento em Sellafield.

Os Vasos de Pressão do Reator (RPV, *Reactor Pressure Vessel*) removidos dos submarinos são classificados como resíduos de nível intermediário (ILW, *Intermediate Level Waste*) e serão armazenados em locais construídos acima do solo. Eles serão eventualmente transferidos para uma Instalação Subterrânea de Eliminação Geológica Permanente (GDF) que deve ser construída no Reino Unido, depois de 2040. Após consulta à opinião pública, a *Royal Navy* optou por depósito radiológico como sítio para a deposição de seus rejeitos nucleares. Consequentemente, vislumbra-se não realizar mais o corte da seção do reator (devido à impossibilidade prática de transportar e armazenar a seção inteira no seu depósito radiológico).

Uma vez que o submarino esteja no dique seco, a primeira tarefa principal será remover os dois geradores de vapor através de cortes no topo do casco de pressão e em contêineres suspensos do RAH. Em seguida, a tubulação do circuito primário, pressurizador e bombas de refrigeração podem ser removidos. A cabeça do vaso de pressão do reator (RPV) é classificada como LLW e é removida separadamente e uma cabeça temporária é colocada no lugar. O Tanque Primário de Proteção (PST) que circunda o RPV deve ser drenado de produtos químicos perigosos antes que o RPV seja então fixado a um berço de elevação no RAH. O RPV é então retirado e colocado em um recipiente especial pronto no fundo do dique. Uma vez que o RPV é selado no recipiente, ele é levantado em um transportador para ser retirado. As partes restantes do PST também são removidas e cortadas em tamanhos gerenciáveis. Todos os líquidos e materiais removidos durante o processo devem ser separados, segregados,

reduzidos em tamanho, se necessário, e acondicionados em recipientes adequados, prontos para serem armazenados reprocessados ou reciclados.

Apenas cerca de 1% de cada submarino compreende o ILW mais radioativo. Cerca de 4% é LLW e 5% são resíduo perigoso não radioativo. Os restantes 90% são compostos principalmente de aço que podem ser vendidos para reciclagem (dependendo da classe do submarino, qualquer coisa entre 3.000 – 7.000 toneladas). Até agora, não houve nenhum anúncio público sobre como os submarinos serão desmantelados, uma vez que os componentes perigosos tenham sido removidos. O casco de pressão terá que ser aberto em alguns pontos para a remoção da NSRP (*Nuclear Steam Raising Plant*) e se os cascos forem transferidos para outro lugar, será necessário mais trabalho para torná-los navegáveis. Os submarinos são notoriamente difíceis de rebocar, mesmo quando equipados com um mecanismo de manobra em funcionamento. Há muito poucos desmantelamentos de navios feitos até agora no Reino Unido (a maioria das embarcações ex-militares são desmontadas na Turquia), então é quase certo que os cascos terão que ser desmantelados em Devonport (conforme Figura 8) e Rosyth e a sucata levada via transporte marítimo.

Figura 8 - Aguardando descomissionamento-Devonport, Plymouth

O passo aplicável ao processo de desmantelamento da Marinha Britânica pode ser descrito pelas seguintes ações:

1. Preparação;
2. Docagem;
3. Retirada do combustível (defueling);
4. Transporte e armazenamento do combustível irradiado; e
5. Recompôr a integridade do casco.

Os procedimentos para a descomissionamento seguem a Figura 9.

Figura 9 - Projeto de Desmontagem de Submarinos

:

4.4 Descomissionamento de reatores na Marinha Russa

A Marinha Russa, diferentemente das outras nações, adota a troca de combustível nuclear dos seus submarinos nucleares no cais (sem o uso de diques). Tal procedimento mostra-se inadequado para emprego no Brasil, por aumentar consideravelmente o risco de contaminação nuclear e radiológica.

A Noruega encontrou um nível de radiação na faixa de 800 Bq próximo aos destroços de um submarino russo que naufragou no mar do país em 1989, em um incêndio que matou quarenta e dois tripulantes. Uma amostra coletada pela Marinha da Noruega mostrou que existe césio vazando, onde níveis normais da água da região são de 0,001 Bq.

O submarino, conhecido na Rússia como K-278, afundou carregando dois torpedos com ogivas nucleares de plutônio, além de diversos outros torpedos e mísseis carregados de material tóxico e explosivo. De acordo com a Autoridade em Segurança Nuclear e Radiação da Noruega (DSA), as defesas do reator de água pressurizada do K-278 desligaram-no imediatamente assim que o incêndio começou, evitando que uma catástrofe nuclear acontecesse. Mas com o dano sofrido pelo fogo e pelo choque do casco com o fundo do oceano, uma tubulação, oriunda da seção do reator, acabou trincando, provocando vazamento de Césio.

Os dois submarinos nucleares, que juntos contêm 1 milhão de curies de radiação, ou cerca 25% do que foi liberado no primeiro mês do desastre de Fukushima, no Japão, serão um desafio ainda maior.

Um deles é o K-27, outrora conhecido como o "peixe dourado" por causa de seu alto custo. O submarino de ataque de 360 pés (118 metros), projetado para caçar outros submarinos, foi atormentado por problemas desde seu lançamento em 1962 com seus reatores experimentais refrigerados a metal líquido, um dos quais se rompeu seis anos depois e expôs nove marinheiros a doses fatais de radiação.

Em 1981 e 1982, a marinha encheu o reator com asfalto e afundou-o a leste da ilha Novaya Zemlya em apenas 108 pés (33 metros) de água. Um rebocador

teve que bater na proa depois que um buraco aberto nos tanques de lastro levou a afundar apenas a popa.

O K-27 foi afundado após a instalação de algumas medidas de segurança que devem manter os destroços seguros até 2032. Mas outro incidente é mais alarmante. O K-159, um submarino de ataque de 350 pés (107 metros) que esteve em serviço em 1963 afundou sem nenhum aviso, enviando 800 kg de combustível de urânio usado para o fundo do mar sob áreas de pesca e rotas de transporte ao norte de Murmansk.

Na baía de Andreyeva, por exemplo, onde 600 mil toneladas de água tóxica vazaram para o mar de Barents de uma piscina de armazenamento nuclear em 1982, o combustível irradiado de mais de cem submarinos foi mantido parcialmente em recipientes enferrujados a céu aberto.

Temendo contaminação, a Rússia e os países ocidentais, incluindo o Reino Unido, iniciaram uma grande limpeza, gastando US\$ 1,3 bilhão para desativar e desmontar cento e noventa e sete submarinos nucleares soviéticos, descartar baterias de estrôncio de mil faróis de navegação e começar a remover combustível e resíduos da baía de Andreyeva e de três outros locais costeiros perigosos.

Enquanto isso, a Frota do Norte está construindo pelo menos oito submarinos e tem planos para construir vários outros, bem como oito destruidores de mísseis e um porta-aviões, todos eles movidos a energia nuclear. Também está testando um drone subaquático com propulsão nuclear e um míssil de cruzeiro. No total, poderia haver até 114 reatores nucleares em operação no Ártico até 2035, quase o dobro de hoje, apontou um estudo de 2019 do site jornalístico Barents Observer [29, 30 e 31].

Em 1960, os soviéticos lançam ao mar o K-19 (Figura 10), o primeiro submarino balístico. Esse é o auge da guerra fria, onde a ideia “*clauswitziana*” de guerra caía de vez por terra. O submarino nuclear passa a ter a nítida função de dissuasão (*Mutual Assured Destruction – MAD*). Caso um país decidisse atacar o outro de surpresa e o país inimigo fosse completamente destruído, ainda

assim haveria a potencial retaliação e destruição total do adversário pelos submarinos nucleares.

Figura 10 - K-19, o primeiro submarino balístico russo.

Para o desmantelamento, as seguintes etapas devem ser seguidas:

1. Remover o combustível;
2. Remover o fluido refrigerante e líquidos radioativos;
3. Desmantelar o casco; e
4. Enviar a seção do reator para uma ilha isolada.

Como aplicação para a tecnologia proposta, o conceito de esquema tecnológico da desmontagem e reciclagem do complexo de submarinos nucleares descomissionados pode ser representado como segue na Figura 11.

Figura 11 - Descomissionamento de submarinos na Rússia

Como complemento de preparação preliminar no sítio de armazenamento temporário, o navio é rebocado para o píer da planta de desmontagem do navio (*ship-disassembly plant* – SDP).

No primeiro estágio, são desmontados nos seguintes passos: todo o equipamento caro, dispositivo eletrônico e ótico, metais preciosos e não ferrosos, pequenos motores elétricos e dispositivos domésticos que são passados para lojas especializadas para triagem, processando primeiramente, dando uma aparência comercial e preparando para a venda.

No segundo estágio, o submarino é transferido através da doca de transferência da planta para o estaleiro principal (*main hall*) onde é desmontado de acordo com a tecnologia introduzida na planta.

4.5 Descomissionamento de reatores na Marinha Francesa

Conforme os termos de Contrato de Transferência de Tecnologia (ToT) N°40000/2008-006/00 celebrado em 23 de dezembro de 2008, entre a União, por meio da Marinha do Brasil, representada pela Diretoria Geral do Material da Marinha e Consórcio Baía de Sepetiba, a então DCNS *Société Anonyme* (hoje Naval Group) e Construtora Norberto Odebrecht S.A., em especial os de suas Cláusulas 8.1 e 8.2, a empresa contratada, responsável pela assessoria técnica e auditoria, se obriga a empregar todos os meios necessários para o fim de capacitar-se a implementar a tecnologia, *know how e expertise* em relação a todos os aspectos técnicos necessários para o cumprimento correto e integral do objeto do contrato, transferidos pela Naval Group, sem prejuízo ou limitação de suas obrigações no contrato principal e/ou nos documentos contratuais para a Marinha do Brasil, obrigando-se ainda a observar as disposições de confidencialidade prevista na cláusula 20 do Contrato de ToT.

O termo de compromisso de manutenção e sigilo para a fabricação, construção e entrega de um submarino de propulsão nuclear e o termo de responsabilidade individual classifica o assunto com responsabilidades pela manutenção do segredo dos conhecimentos sigilosos no âmbito do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB).

As obrigações da empresa Naval Group, conforme o disposto na cláusula 3.1 não inclui o fornecimento do Reator Nuclear; a instalação, montagem e integração do Reator Nuclear; qualquer obrigação relativa a fornecimentos, serviços ou atividades nucleares e/ou radiológicas, que serão sempre de exclusiva e integral responsabilidade da Marinha do Brasil.

4.6 Descomissionamento dos navios mercantes

Os períodos de descomissionamento de navios com propulsão nuclear são relativamente longos. Em fontes abertas [32 e 33], algumas embarcações para fins pacíficos ratificam essa ideia (exemplo os seguintes navios: NS Savannah-Estados Unidos, NS Otto Hahn-Alemanha, NS Mutsu-Japão e o NS Sevmorput-Rússia). Ainda existe o navio NS Lenin (Rússia), o qual não foi descomissionado, apenas convertido em museu. Somente um quebra-gelo (NS Sibir) começou o seu descomissionamento por US\$ 25 milhões. Semelhante ao desmantelamento de submarinos franceses, o custo mencionado diz respeito somente à desmontagem em si (o NS Sibir ficou em armazenamento temporário de 1993 a 2017, ou seja, por 24 anos).

Atualmente, exceto o navio contêiner russo Sevmorput (e quebra-gelos nucleares), não há navios mercantes nucleares em operação. Também, exceto a barca nuclear Akademik Lomonosov, a qual tem a função de fornecer energia no norte do Ártico (e o projeto Chinês ACPRS 50), localizações remotas do globo terrestre como ilhas empregam óleo combustível para produzir energia elétrica. Em locais remotos, o tamanho menor (comparado a grandes geradores) ocasiona menores eficiências de ciclo, transporte e aumento nos custos de manutenção.

4.6.1 NS Savannah

O primeiro navio mercante nuclear no mundo foi o N.S. Savannah, descomissionado em 1972 no esforço de reduzir gastos pela Administração Marítima Americana (Figura 12). Entretanto, além da questão política, o elemento proibitivo se mostrou na questão financeira, pois os altos custos de operação e o alto investimento em infraestrutura fizeram com que praticamente todas as embarcações movidas a energia nuclear do mundo fossem militares.

Foi uma obra inovadora do ponto de vista da engenharia, pois pôde comprovar o uso da energia nuclear para fins totalmente pacíficos. O N.S. Savannah operou durante nove anos (1962-1971) porém teve seu projeto ceifado por questões de exequibilidade econômica.

O suporte fornecido pelo oficial responsável pela proteção radiológica tinha como atribuições além do desenvolvimento de procedimentos, suporte técnico radiológico e avaliação anual do programa, também como principal função elaborar o planejamento de descomissionamento da embarcação.

Em maio de 2009, o Savannah estava em Baltimore, no desenvolvimento de seus procedimentos para o apoio de descomissionamento.

De acordo com o status de descomissionamento, o *Nuclear Steam Supply System* (NSSS) está atualmente em armazenamento protegido. Esta fase de atividades de descomissionamento é caracterizada por vigilância ativa, monitoramento e manutenção das instalações nucleares abrigada a bordo do navio, e custódia e manutenção do navio como a primeira barreira de proteção e contenção física primária do sítio licenciado. O descomissionamento final das instalações nucleares do NSSS será realizado por um método o qual o equipamento, estrutura e partes da instalação e sítio que contém contaminantes radioativos são removidos ou descontaminados até um nível que permita o término da licença após cessar as operações.

Com relação ao *status* do relatório de fundos anual, a quantia de fundos estimada para ser requerida para atividades licenciadas foram aproximadamente US\$3 milhões anuais. Foi previsto um plano em 2018 para docar o NSSS para uma manutenção regular e durante todo o período de armazenagem de proteção, estimou-se um custo de aproximadamente US\$6.8 milhões.

Figura 12 - Planta de Potência do N.S. Savannah

4.6.2 NS Otto Hahn

O NS Otto Hahn (primeiro navio mercante nuclear alemão), além de ter problemas de ordem econômica, sofreu também por questões políticas, pois vários portos do mundo se recusaram a recebê-lo sob a justificativa de risco de acidentes nucleares (Figura 13).

Figura 13 - Retirada do reator de sua respectiva seção, NS Otto Hahn

Durante o descomissionamento do NS Otto Hahn, quatro fases distintas foram programadas (pré-trabalhos ou de preparação, desmantelamento, desmontagem da unidade do reator e descontaminação da área controlada). Dentre as principais lições aprendidas durante esse trabalho de dois anos (um ano dedicado à limpeza da área controlada), fora a quantidade de trabalhadores nas diferentes fases (doze na preparação e trinta e cinco na desmontagem), além das principais taxas de dose atingidas durante a fase de desmontagem.

Fase 1: Pré-trabalho – Nos três compartimentos nucleares foram tomadas intensas e numerosas medidas, feitas por diferentes instrumentos, para determinar as taxas de dose no próprio compartimento, sobre a superfície das várias instalações e nos componentes. De acordo com a taxa de dose medida, foi feita uma classificação das áreas de trabalho demarcadas com alto e baixo nível de taxas de dose, as quais foram a base para o planejamento dos trabalhos de desmontagem.

Fase 2: Desmantelamento – Os trabalhos de desmantelamento iniciaram em paralelo nos três compartimentos com prioridade de desmantelamento de componentes com mais alta atividade, com exceção da unidade do reator. Componentes grandes e pesados foram descontaminados no local antes de serem desmontados, outros no lugar de descontaminação depois da desmontagem. O resultado do processo de descontaminação foi examinado como uma amostragem o qual tomou como exemplo geral a superfície para ser verificada pelo descarte eletrolítico. As instalações desmontadas foram segregadas de acordo com o nível de atividade e o tamanho.

Fase 3: Desmontagem da unidade do reator - Foi decidido no conceito de desmantelamento remover a unidade do reator como um todo. Os primeiros componentes de grande tamanho como as bombas de resfriamento do reator, a plataforma do reator e o mecanismo das barras de controle foram desmontados na contenção logo depois de removidas no compartimento acima mencionado para serem catalogados. A unidade do reator foi descontaminada e fornecida com um revestimento de proteção. O transporte da unidade tem os seguintes passos: içamento com um guindaste flutuante colocado sobre um *pontoon*, enviado via

marítima a um cais, içado sobre um trailer de carga pesada puxada por quatro caminhões os quais são levados via estrada terrestre para armazenagem em um centro de pesquisa.

Fase 4: Descontaminação da área controlada – O último passo dos trabalhos de desmantelamento foi remover as instalações remanescentes e limpar a área controlada inteira dos restos de contaminação. Os trabalhos de limpeza iniciaram com a contenção e finalizaram com os sistemas secundários, os quais têm sido contaminados devido ao vazamento do gerador de vapor. Os trabalhos de descontaminação foram feitos com métodos mecânicos e químicos e foram finalizados quando aprovados. A descontaminação do navio para sua liberação para maior uso foi envolvida com um considerável gasto de tempo e trabalho. Como experiência obtida após o desmantelamento do navio destaca-se:

- Um conhecimento preciso do arranjo estrutural e o estado radiológico das instalações é uma condição importante para um trabalho de sucesso. Isto implica que o trabalho é feito de forma contínua pela mesma equipe de trabalhadores bem treinados com conhecimento do projeto da área nuclear do navio e das taxas de dose existentes nas estações de trabalho.
- O uso de métodos mecânicos para a desmontagem das instalações mostrou duas vantagens (com a desvantagem de espaço requerido para que o trabalhador possa ter acesso ao corte): a exposição dos trabalhadores pode ser reduzida e os trabalhos de limpeza após a remoção das instalações podem ser simplificados (exemplo, contaminação por aerossol causada por métodos de desmontagem térmicos é muito maior do que por métodos mecânicos). A experiência mostra que o ideal pode ser alcançado com ferramentas de corte. Alguns métodos mecânicos são inadequados para a desmontagem de componentes porque ferramentas como serras e máquinas siderúrgicas foram proibidas, ou seja, como requisito importante a considerar será usar somente materiais que possam ser cortados; neste caso métodos de fundição são mais apropriados antes da desmontagem.

- É desejável o uso de blindagens móveis para o serviço de descomissionamento, podendo ser instaladas e desmontadas de uma forma rápida. Usar métodos como aparafusar ao invés de soldar durante a montagem é um conceito de proteção radiológica mais eficaz.
- Empregar blindagens móveis devido ao problema de aerossol e contaminação oriundo da limalha de chumbo.

A experiência de navios mercantes nucleares (NS Otto Hahn) mostrou que em um trabalho de descomissionamento de no mínimo dois anos, aproximadamente um ano foi dedicado apenas à limpeza da área controlada vazia. O transporte da unidade do reator, o qual aparenta ser simples, pode levar até cinco dias para a sua conclusão. A principal taxa de dose alcançada foi durante a fase de desmontagem dos equipamentos. Durante o pré-trabalho e desmantelamento, muitas coletas de amostragem da radiação devem ser feitas.

Adicionalmente, o conhecimento do estado radiológico das instalações fornece a possibilidade de escolher ambos os métodos de descontaminação ideal sob aspectos de efetividade e proteção contra a radiação.

Falando apenas da plataforma dos navios mercantes (considerando o prévio corte da seção do reator) a cada ano, cerca de 700 grandes navios, entre cargueiros, petroleiros, *contêineres* e até ex-luxuosos transatlânticos de passageiros, são desativados, desmanchados e transformados em sucata em todo o mundo. Mais da metade desses navios acaba em uma praia da Índia, chamada Alang, dona do maior desmanche naval do planeta.

Dependendo do tamanho do navio, o prazo para ele ser desmantelado por completo varia entre um mês e um ano. O serviço começa com encalhe proposital das enormes embarcações. Os estaleiros aproveitam as marés mais altas para arremessar os navios na direção da praia, até que eles encalhem. Quanto mais perto o navio ficar da praia mais fácil será o trabalho de desmanche manual deles.

Por conta da mão de obra barata (e do fato de que praticamente tudo é feito, literalmente, à mão), o desmantelamento de um navio em Alang chega a custar cem vezes menos do que na Europa, o que explica a quantidade de navios

que são recebidos (exemplo: porta-aviões Minas Gerais, que foi vendido em 2002, após sua baixa na Marinha do Brasil, para uma empresa chinesa que levou a embarcação para ser desmantelada em Alang).

5 PROPOSTA DE UM PROCESSO DE DESCOMISSIONAMENTO

O descomissionamento de uma usina nuclear de terra difere do de um navio com propulsão nuclear na liberação de materiais, baseado na contaminação da superfície (procedimentos de medição realizados obedecendo a normas sobre medições de atividade de materiais sólidos considerados para reciclagem reuso ou descarte como rejeito radioativo e normas sobre a avaliação da contaminação da superfície).

A primeira desmontagem ocorre na seção do reator, onde as varetas de combustível são retiradas antes de o navio ser docado e, toda a seção do compartimento do reator, removida para serem após soldadas as seções a montantes e a jusante, iniciando assim a retirada de equipamentos de bordo.

Os custos estimados de uma planta de potência nuclear de 1000 MWe, baseado nos custos estimados por Kilowatt apresentados são conforme a Tabela 2 [34]:

Tabela 2 - Potência Elétrica de uma Planta Nuclear de Vapor (1000 Mwe)

Investimento da planta	U\$1700-3000M
Custo Combustível/ano	U\$32M
Custo de manutenção e operação/ano	U\$42M
Custo de entrega/ano	U\$37M

Os números não incluem os custos de descomissionamento da planta, estimado em US\$1B para uma planta de 1000 MW [35]. Isto é ignorado na análise financeira presente por causa da margem de lucro na estimativa do investimento da planta. Em adição, os custos do depósito do rejeito nuclear não estão incluídos. Nenhuma solução para este problema foi encontrada, mas programas procuram uma solução onde tenha um recurso financeiro “calção” em US\$800M/ano. Se existe divisão igualitária percentual entre os custos de

operação das plantas nucleares presentes, isto adicionaria aproximadamente US\$8M/ano aos custos de operação de uma planta típica.

Depreciação é uma quantidade que é listada como um gasto anual no cálculo de impostos para permitir a substituição da instalação no fim de sua vida útil.

Desde que os custos de construção são reduzidos como tamanho dos componentes, é desejável estimar os preços dos produtos projetados baseados sobre os mesmos resultados totais para cada sistema comparado. Na Tabela 3 o número de módulos necessários para gerar a saída de potência elétrica desejada é apresentado na coluna 8, os preços de venda de eletricidade na coluna 9 e o investimento total na coluna 10.

Tabela 3 - Comparação de preço para fontes de eletricidade alternativas

(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Custo EC (\$/GJ)	Investimento da planta (\$M)	Resultado (kWh/ano)	Custo Anual (\$M/ano)	Ponto de equilíbrio no Preço vendas (\$/kWh)	Nº de módulos para 10 ¹⁰ kWh/ano	Preço vendas (\$/kWh)	Investimento Para 10 ¹⁰ kWh/ano (\$B)
7,0	2350	5,3x10 ⁹	84,0	0,069	2	0,063	4,5

De maneira geral, cerca de dois terços do custo do empreendimento nuclear são representados pelos custos de investimentos básicos. Vale salientar que o termo "*overnight costs*" ou "*engineering procurement construction costs (EPC)*" é frequentemente utilizado para designar o custo de construção, excluídos os gastos com juros. Os custos de financiamento dependem da taxa de juros da dívida, da proporção da dívida e, em última análise, do tempo considerado necessário para a recuperação do capital. Gastos com equipamentos e mão de obra de montagem (custos diretos) representam cerca de 50% do EPC.

A outra metade dos custos refere-se aos custos relacionados à infraestrutura adicional necessária, como instalações de transmissão, torres de resfriamento, água necessária à operação da unidade, prédios administrativos, depósitos, estradas, equipamentos de transporte, gerenciamento do projeto, dispêndios com

seu desenvolvimento, licenças e autorizações, impostos, recrutamento e treinamento.

Os custos de descomissionamento das centrais nucleares são de responsabilidade do operador ou do proprietário da planta e estão diminuindo progressivamente, contribuindo apenas para uma pequena parcela do custo total da geração elétrica. Segundo estudos realizados pela *Nuclear Energy Institute* (NEI), os custos foram desagregados em relação às atividades geralmente desenvolvidas nos programas de descomissionamento: ações de pré descomissionamento, atividades para o desligamento, aquisição de equipamentos e materiais gerais, atividades de desmontagem, tratamento e eliminação de rejeitos, segurança e vigilância, limpeza e paisagismo, gerenciamento de projetos, combustível e outros custos. O não cumprimento ou a simples prorrogação de uma fase específica pode representar um aumento dos custos totais de descomissionamento, principalmente em função da expansão dos custos com armazenagem e vigilância.

NEI procurou estimar os custos para descomissionamento para os principais tipos de reatores. Embora as estimativas apresentadas não sejam plenamente compatíveis, o conjunto de dados por país/planta destina-se a avaliar a tendência. Vale ressaltar que o custo de descomissionamento de uma usina nuclear não está diretamente relacionado a capacidade da planta, ou seja, os custos fixos, como segurança, proteção, gestão de projetos e gestão de rejeitos, são relativamente mais elevados para plantas de pequeno e médio porte. Para os PWRs os custos foram estimados entre US\$ 200/kW e US\$ 500/kW. A Tabela 4 apresenta os parâmetros técnico-econômicos de termelétricas nucleares [2].

Tabela 4 – Parâmetros técnico-econômicos de termelétricas–geração nuclear
Parâmetros

Custo de Investimento (US\$/kW)	5000
Custo de Operação e Manutenção (US\$/MWh/ano)	110
Custo do combustível (US\$/MWh)	9
Vida útil (anos)	60
Tempo de construção (%)	7

Parâmetros	
Eficiência (%)	33
Potência da planta (MW)	1000
Fator de Capacidade Médio (%)	85
Custo de Descomissionamento (US\$/kW)	200 a 500

5.1 Identificação de um conjunto mínimo de requisitos

Para especificações, existe um conceito muito importante que é a flexibilidade de requisitos. Nesse contexto, a flexibilidade de um requisito pode ser: opcional, desejável, negociável ou obrigatório. Um requisito opcional é aquele em que o cliente aceita uma dada característica ou função, mas não está disposto a pagar mais por isso. Também podem ser permissões ou ideias que servem para guiar o trabalho de projeto, mas sem compromisso contratual. Requisitos desejáveis são aqueles pelos quais o cliente está disposto a pagar, mas podem ser ignorados de maneira unilateral pelo fornecedor. Em uma concorrência, o atendimento a tais requisitos pode ser usado como critério de desempate. Requisitos negociáveis podem ser parcialmente ignorados mediante uma negociação com o cliente, deixando-o ciente dos desvios. Requisitos obrigatórios são aqueles cujo atendimento integral é absolutamente necessário, sendo suficientes para condenar uma solução em caso de não atendimento. A importância da flexibilidade vem do fato de que ninguém tem conhecimento total sobre o que é possível ou não na prática.

Os requisitos funcionais de um sistema incluem as funções ou ações que ele realiza para sistemas clientes e as transições entre *status*, sendo as declarações dos objetivos do sistema. Requisitos não funcionais impõem limites para propriedades intrínsecas do sistema como peso, volume e custo, sendo declarações dos limites aceitáveis dos inconvenientes do sistema.

5.2 Proposta de processo de descomissionamento

A Tabela 5 apresenta como base o custo do submarino como um todo. Como os sistemas de combate são muito caros, a proporção dos custos para um navio mercante tipicamente fica muito diferente.

Tabela 5 - Custo conhecido de descomissionamento de navios nucleares

Classe de submarino / nação	CONSTRUÇÃO		DESCOMISSIONAMENTO				R ¹
	Deslocamento (ton)	CUSTO (bilhões dólares)	Homem dia (x 10 ³)	CUSTO (milhões de dólares)			%
				Mão de obra	Material	TOTAL	
<i>SSN Los Angeles</i> [36]	6927	1,24	103	38.625	12.000	60,80	4,90 ²
<i>SSBN Le Tonnant</i>	8080	0,81	-	-	-	29	3,60
<i>SSBN Yankee</i>	9300	-	79	-	-	31,50	-
<i>SSN Astute</i>	7400	3,72	-	-	-	128,40	3,7
<i>SSN Swiftsure</i> [37]	4900	0,63	-	-	-	120 ³	15,2
<i>NS Sibir</i> [38]	33540	0,72 ⁴				25	18
<i>NS Savannah</i> [32]	13,599	0,43				112,80	26
MÉDIA	7072	-	-	-	-	-	-

¹ Relação percentual (R) entre o custo de descomissionamento e o de construção. As diferentes características dessas nações impactam igualmente nos custos de construção e de descomissionamento, permitindo considerar insignificativamente o seu impacto financeiro para a determinação da ordem de grandeza do custo de descomissionamento por meio do uso da razão desses custos.

³ Os custos de descomissionamento de submarinos nucleares britânicos, representados pelo HMS Swiftsure, foram desconsiderados devido à adoção de um processo de descomissionamento distinto (sem o corte e remoção da seção do reator). Adicionalmente, referem-se a valores médios que englobam submarinos nucleares de ataque (somente propulsão nuclear) e balísticos (ogivas nucleares), com e sem combustível nuclear.

⁴ Trata-se de custo de um navio similar construído em 2019.

A bordo não é realizado nenhum tratamento de rejeitos. Os rejeitos devem ser armazenados durante a operação do meio até a atracação no estaleiro, os quais devem ser retirados da embarcação ao atracar. As funções principais do complexo radiológico devem ser transportar e armazenar os elementos combustíveis irradiados, transportar e tratar rejeitos sólidos, líquidos e gasosos coletados no cais e no dique e realizar o carregamento de elementos combustíveis novos.

Existem áreas específicas destinadas para a deposição de rejeitos radioativos, os quais podem ser citados: em minas abandonadas (Alemanha, Espanha e República Tcheca), depósitos intermediários (usinas Angra I e II) ou depósitos geológicos (Finlândia e Nevada) [39, 40 e 41].

As opções de segurança adotadas para o processo de descomissionamento proposto se baseiam nos processos bem-sucedidos de descomissionamento de submarinos nucleares e navios mercantes, onde foi adotada a estratégia de desmantelamento protelado. Para programar essa estratégia, o processo de descomissionamento pode ser dividido em cinco fases:

a) Fase Preparatória:

A Fase Preparatória tem como objetivo principal preparar a embarcação para a remoção do combustível nuclear e reduzir o risco de contaminação ambiental (não nuclear) devido a contaminantes presentes a bordo do próprio navio.

Essa fase inicia-se com a baixa de operação do navio, como preconizado no Licenciamento de Meios Navais com Propulsão Nuclear e termina antes da docagem no dique do estaleiro para remoção do combustível nuclear, que ocorrerá na fase seguinte.

O reator estará desligado a frio (*cold shutdown*) e a remoção de calor residual será feita pelos sistemas de segurança nuclear de bordo. Estes sistemas serão preservados e guarnecidos por seus tripulantes até que ocorra a remoção do combustível.

Nessa fase, todo o material sigiloso deve ser removido de bordo após a baixa do navio. Em seguida, a embarcação será movimentada para um cais de espera, onde permanecerá em armazenamento temporário.

O armazenamento temporário é o período que o navio permanecerá atracado a um cais de espera no estaleiro aguardando que os radioisótopos de meia-vida curta decaiam naturalmente, reduzindo o inventário de produtos de fissão e a quantidade de calor a ser removida do núcleo (calor residual).

b) Fase de Remoção de Combustíveis e Rejeitos:

A Fase de Remoção de Combustíveis e Rejeitos tem como objetivo principal reduzir o risco de contaminação nuclear e radiológica oriunda do navio por meio da remoção desses materiais.

Essa fase inicia-se com a movimentação da embarcação para o dique do estaleiro, onde ocorrerá a remoção definitiva do combustível nuclear, e termina com a remoção dos rejeitos radioativos sólidos e líquidos existentes na seção do reator, incluindo aqueles oriundos dos processos de limpeza e descontaminação desta.

Durante essa fase, o navio será movimentado para um dique seco com certificação nuclear no estaleiro. Dentro do dique, todas as funções de segurança nuclear serão suportadas por um complexo radiológico.

O navio docado receberá uma unidade móvel de contenção. A remoção do combustível e dos rejeitos radioativos, através dessa unidade, permitirá o desligamento dos sistemas nucleares da embarcação e reduzirá a necessidade de apoio do estaleiro.

Ao término dessa fase, o navio (sem combustível) poderá ser retirado do dique e movimentado para um cais ou outras instalações convencionais (não nucleares), liberando o dique do estaleiro para realizar as atividades relacionadas à manutenção de outros navios não nucleares operacionais.

Deverão ser realizadas as seguintes atividades:

- 1) Preparar a plataforma do navio e a planta nuclear embarcada para a remoção de combustível nuclear no dique do estaleiro;
- 2) Docar o navio no dique do estaleiro;
- 3) Instalar a unidade móvel de contenção;
- 4) Remover o combustível nuclear irradiado;
- 5) Notificar a remoção definitiva do combustível do vaso do reator à AgNSNQ (notificação de remoção definitiva do combustível nuclear); e
- 6) Remover todos os rejeitos radioativos sólidos e líquidos (circuito primário), inclusive aqueles oriundos dos processos de limpeza e descontaminação da seção da planta nuclear embarcada.

c) Fase de Gerenciamento de Combustíveis e Rejeitos;

A Fase de Gerenciamento de Combustíveis e Rejeitos tem como objetivo principal garantir o transporte e armazenamento destes materiais, em conformidade com a legislação nacional, desde a sua remoção até o seu processamento e descarte ou envio ao depósito final de rejeitos.

Essa fase, que deve ocorrer nas instalações do complexo radiológico, inicia-se após a remoção do combustível nuclear e termina com o descarte dos rejeitos processados (abaixo dos limites previstos) ou o envio de combustível irradiado e demais rejeitos ao depósito final.

Nessa fase serão realizadas as seguintes atividades:

- 1) Transportar e armazenar o combustível irradiado na piscina de elementos combustíveis do complexo radiológico do estaleiro;
- 2) Transportar e tratar os rejeitos radioativos sólidos e líquidos, segundo as normas nacionais, e enviar aos depósitos iniciais aquilo que não puder ser descartado;
- 3) Solicitar à AgNSNQ, a Autorização para Descomissionamento;

- 4) Transportar o combustível irradiado da piscina de elementos combustíveis para o depósito intermediário de armazenamento e lá armazená-lo; e
- 5) Transportar o combustível irradiado e rejeitos radioativos sólidos e líquidos para armazenamento no depósito final.

d) Fase de Gerenciamento de Materiais Ativados:

A Fase de Gerenciamento de Materiais Ativados tem como objetivo principal reduzir o risco de contaminação radiológica por materiais ativados oriundos da seção da planta nuclear embarcada. Para tal, a seção da planta nuclear embarcada será cortada e separada do restante do navio de forma a segregar os materiais ativados lá existentes.

Essa fase inicia-se com a solicitação da autorização de descomissionamento e termina com o descarte/reciclagem dos materiais ativados, cuja atividade esteja abaixo dos limites previstos, ou com o envio para depósitos licenciados dos materiais que excedam tais limites. Nela ocorrerá o descomissionamento formal do navio, ou seja, o fim do controle regulador da AgNSNQ sobre a totalidade dos materiais constituintes da seção do reator.

Nessa fase serão realizadas as seguintes atividades:

- 1) Atender aos requisitos preconizados no Licenciamento de Meios Navais com Propulsão Nuclear;
- 2) Receber a autorização da AgNSNQ para descomissionar o navio (autorização de descomissionamento);
- 3) Preparar o navio para o corte do casco e a remoção da seção da planta nuclear, descontaminando todos os circuitos de redes de bordo e cabeamento que atravessem a seção da planta nuclear;
- 4) Movimentar o navio para um elevador hidráulico (*Shiplift*) e realizar o *load in* no estaleiro de construção (instalação que realizará o corte da seção da planta nuclear);

- 5) Cortar o casco e remover a seção da planta nuclear no estaleiro de construção;
- 6) Preparar a seção do reator para o armazenamento temporário e instalar anteparas especiais a montante e a jusante da seção do reator para garantir a sua estanqueidade e o confinamento dos radioisótopos lá existentes;
- 7) Instalar um sistema de HVAC na seção do reator para permitir efetuar uma verificação anual para verificar a evolução dos materiais e garantir o armazenamento adequado;
- 8) Encapsular a seção da planta nuclear;
- 9) Transportar a seção da planta nuclear cortada para o seu local de armazenamento temporário no estaleiro (depósito inicial);
- 10) Armazenar a seção do reator no depósito inicial até que esta seja desmantelada;
- 11) Monitorar a atividade dos radioisótopos existentes na seção da planta nuclear;
- 12) Remover a seção do reator do depósito inicial no estaleiro e transportar para a instalação industrial que fará o seu desmantelamento;
- 13) Desmantelar a seção da planta nuclear e reciclar os materiais ativados, cuja atividade já esteja abaixo dos limites previstos;
- 14) Preparar e embalar os materiais ativados, cuja atividade ainda esteja acima dos limites previstos, para deposição final (armazenamento definitivo); e
- 15) Transportar e armazenar no depósito final os materiais que ainda apresentem atividade acima dos limites previstos.

e) Fase de Desmantelamento do Casco.

A Fase de Desmantelamento do Casco tem como objetivo principal a redução do risco de contaminação ambiental pelos materiais tóxicos perigosos contidos no interior das seções restantes e a reciclagem dos materiais e equipamentos ainda existentes no navio. Nela, todos os materiais e equipamentos serão triados, processados e reciclados ou armazenados, em conformidade com a legislação ambiental em vigor.

Essa fase inicia-se após a remoção da seção do reator e termina com o desmantelamento das seções de vante e de ré do casco e a reciclagem, descarte ou armazenamento desses materiais. Alternativamente, o navio em descomissionamento poderá ser transformado em navio museu, encerrando essa fase.

Nessa fase serão realizadas as seguintes atividades:

- 1) Transformar a embarcação em navio museu; ou
- 2) Transportar as seções restantes do casco para uma instalação específica de desmantelamento;
- 3) Cortar o restante do casco em subseções;
- 4) Remover todos os equipamentos reutilizáveis que só possam ser retirados de bordo após cortar o casco;
- 5) Realizar a triagem dos materiais existentes nas subseções, reciclar os materiais reaproveitáveis e descartar ou armazenar os materiais tóxico perigosos; e
- 6) Desmantelar as seções de vante e de ré do casco.

A Tabela 6 exemplifica as principais práticas adotadas no processo de descomissionamento.

Tabela 6 - Principais práticas adotadas no processo de descomissionamento

Nº	Principais práticas de descomissionamento	SSN EUA [42]	SSN França [43]	SSN Rússia [44]	SSN GRB [45 e 46]	Mercantes [47]	Adotar
1	Retirar material sigiloso e sensível	Sim	Sim	Sim	Sim	Não aplicável	Sim
2	Movimentar para o cais de espera	Eventualmente	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
3	Retirar equipamentos para serem reaproveitados	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
4	Desativar os sistemas não nucleares	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
5	Drenar e remover fluidos dos sistemas desativados	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
6	Preservar todos os sistemas de apoio ao reator	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
7	Preparar para remover o combustível	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
8	Movimentar para o dique qualificado nuclearmente	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim
9	Docar o navio para a remoção do combustível	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim
10	Remover o combustível queimado	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
11	Drenar água do primário e remover rejeito radioativo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
12	Tratar rejeitos segundo normas e enviar ao depósito	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
13	Transportar o combustível queimado para a piscina	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
14	Armazenar o combustível queimado na piscina	Sim	Sim	Eventualmente	Sim	Sim	Sim
15	Preparar o combustível e enviar para armazenar	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
16	Transportar combustível queimado para armazenar	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
17	Preparar para a remoção da seção do reator	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
18	Cortar e separar a seção do reator	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim
19	Instalar anteparas nas extremidades (seção reator)	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim
20	Encapsular a seção do reator	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
21	Preparar a seção para armazenamento temporário	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim
22	Transportar a seção e armazenar temporariamente	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim
23	Armazenar a seção do reator até ser desmantelada	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim
24	Instalar HVAC para verificação e armazenamento	Não	Sim	Não	Não	Sim	Sim
25	Desmantelar a seção do reator	Ainda não	Ainda não	Ainda não	Ainda não	Sim	Ainda não
26	Remover todos os equipamentos reutilizáveis	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
27	Transformar em navio museu	Sim	Sim	Sim	Ainda não	Sim	Sim
28	Preparar para armazenamento provisório flutuando	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
29	Armazenar o casco do navio flutuando, sem o reator.	Sim (passado)	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
30	Transportar o casco para desmantelamento	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
31	Desmantelar as seções de vante e de ré e reciclar materiais	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
32	Prover um sistema para remover rejeitos de tanques	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim

Além dos fatores apresentados acima, convém destacar alguns requisitos técnicos imprescindíveis a serem adotados por uma usina nuclear móvel:

- 1) Usar aços sem cobalto para evitar ativação;
- 2) O projeto da blindagem deve reduzir o tempo de desmantelamento. Por exemplo, usar limalha de chumbo ao invés de placas, painéis parafusados ao invés de soldados;
- 3) Ter uma instalação fixa de remoção do chumbo das blindagens (exemplo: tubos e adutores ligados ao fundo dos tanques de blindagem responsáveis por drenar o chumbo sem a exposição do pessoal);
- 4) Garantir a qualidade da água do primário para evitar deposição de produtos de corrosão ativados (e altos níveis de radioatividade);
- 5) Preferência por arquiteturas integrais ou tubo duplo a fim de reduzir a exposição do pessoal;
- 6) Estabelecer rotas de remoção de equipamentos que reduzam a exposição dos trabalhadores (exemplo, um *soft patch* em cima dos equipamentos a serem removidos);
- 7) Não trabalhar com soldagens que envolvam ligas de titânio a fim de evitar a necessidade de uma atmosfera controlada no estaleiro;
- 8) O arranjo dos compartimentos deve prever acesso para atividades de desmantelamento para todos os componentes;
- 9) Idealmente, os componentes devem durar mais do que a vida da usina para permitir reciclagem;
- 10) Tanques que armazenem material potencialmente radioativo devem ter dispositivos de limpeza que reduzam a ação humana local (por exemplo, o tanque pode ter fundo cônico e uma saída

no seu ponto mais baixo, a ser empregada no desmantelamento);

- 11) O projeto deve incluir um plano de desmantelamento para cada componente;
- 12) A escolha de materiais ou componentes deve reduzir o tempo de desmantelamento;
- 13) O desmantelamento não deve gerar aerossóis (evitar o uso de solda na montagem);
- 14) A remoção de materiais deve empregar, em ordem de preferência: bombeamento por tubulações fixas; bombeamento por tubulações móveis; desparafusamento; corte; fundição com maçarico;
- 15) O projeto da barreira de pressão deve buscar a redução da quantidade de material com radioatividade média;
- 16) A gestão do ciclo de vida deve manter o registro detalhado das alterações feitas durante a vida da usina. Tal informação será útil durante o desmantelamento; e
- 17) O projeto deve verificar se o nível de radioatividade após o período de espera de decaimento estará suficientemente baixo para enquadrar o material como inofensivo.

A experiência de descomissionamento em navio mercante (NS Otto Hahn) mostrou que em seus compartimentos foram instalados, além de seus respectivos equipamentos nucleares, serviços para o núcleo, tais como piscina onde os combustíveis irradiados podem ser armazenados, e outros como sistemas auxiliares nucleares, uma área quente, funcionando como oficina ou *atelier*, laboratórios para coletas de amostras e/ou mesmo, uma área fria para a troca de roupas.

5.3 Requisitos do estaleiro

O projeto da infraestrutura de um estaleiro deve permitir a construção e manutenção das instalações da plataforma do navio com propulsão nuclear. Deve-se desenvolver um complexo de manutenção especializada, sendo responsável por oferecer apoio logístico e operativo, a fim de atender todas as demandas de suporte do navio, quando este estiver atracado ou docado, sendo composto por, no mínimo, as seguintes áreas:

- Escritório;
- Administrativa;
- Cais para apoio operacional e manutenção, quando o navio estiver atracado;
- Subestação elétrica (alta e baixa voltagem, fornecimento de potência de emergência);
- Oficina de ativação de baterias;
- Docagem, com um dique seco para operação de manutenção; e
- Instalações próprias para atender as atividades de manutenção do compartimento do reator, armazenar combustível novo e já utilizado e para o tratamento de efluentes radioativos (*pre-outfitting* da seção do reator).

Assumindo tais hipóteses, as principais funções do *pre-outfitting* da seção do reator na sequência do processo são:

- Desempenho de todas as operações de montagem e manufatura dentro de um “ambiente limpo”,
- Testes e aceitação dos equipamentos,
- Integração dos equipamentos do NSSS e suas instalações,
- Inspeção de soldas realizadas na rede de tubulações antes da montagem,
- *Pre-outfitting* do módulo completo antes da montagem no compartimento do NSSS e

- Garantir *start up* de instalações e testes.

Enquanto as funções secundárias de “*pre-outfitting* da seção do reator” são:

- Preparação do trabalho, cronograma e coordenação,
- Armazenamento de material bruto,
- Armazenamento de equipamento,
- Armazenamento de ferramentas em compartimentos limpos e não limpos,
- Acomodações dos trabalhadores em escritórios e compartimentos de troca de roupas limpos e não limpos,
- Arquivamento de documentos e
- Reparo de equipamentos e ferramentas.

Considerando as necessidades operacionais de um navio com propulsão nuclear, deve-se incluir uma infraestrutura de apoio adicional, considerando a proximidade de oficinas para manutenção e armazéns para estoque de sobressalentes, além de especificação de subestações elétricas e instalação responsável por armazenar óleo diesel, além de um sistema industrial de efluentes e uma brigada de combate a incêndio.

Uma unidade de ventilação móvel deve ser prevista para garantir a ventilação no compartimento do reator em um dique seco ou cais, durante certas fases de trabalho neste compartimento, e então garantir:

- Confinamento dinâmico do compartimento do reator; e
- Purificação do ar no compartimento do reator pela circulação sobre um filtro particulado (se necessário, carvão ativado) um absorvedor de iodo o qual pode ser usado em caso de contaminação radioativa do ar no compartimento do reator.

A unidade de ventilação móvel deve ser projetada para duas configurações de operações distintas:

- Um circuito fechado (*loop*) para garantir o monitoramento radiológico e purificação da atmosfera, se necessária, antes de entrar no compartimento do reator; e
- Circuito aberto para garantir a renovação e purificação da atmosfera e confinamento dinâmico do compartimento do reator.

A unidade de ventilação móvel deve ser projetada para ser instalada em um abrigo marítimo a qual pode ser montada sobre trilhos. Deve ser composta de uma área de ventilação e uma área de supervisão técnica. O sistema deve ser projetado para transporte dentro de uma área de manutenção especializada.

A unidade de ventilação móvel deve incluir os equipamentos das seguintes sub-montagens funcionais:

- Um módulo de extração de ar conjugado com um ventilador, um sistema de filtração de alta eficiência (carvão ativado), absorvedores de iodo;
- Um sistema de monitoramento de atividade radiológica; e
- Uma unidade elétrica para fornecer a potência elétrica, controle remoto e circuitos de sinalização.

De posse de informações de supervisão e comunicação, permite aos operadores especificar os requisitos operacionais das instalações do cais e identificar as comunicações específicas e supervisão das instalações requeridas para cada instalação de suporte de terra.

Estas informações permitem aos operadores controlar das salas de controle do Centro de Manutenção Especializada, Estação de Utilidades do Cais e do Dique e outras utilidades, os seguintes sistemas:

- Equipamento de resfriamento de água doce;
- Utilidades elétricas (redes trifásicas de 440V – 60 Hz, 220 V – 60 Hz);
- Sistemas de suporte móveis;
- Outras instalações de fluidos, ventilação e ar condicionado;
- Sistema de segurança (Combate a incêndio);

- Sistema de comunicação;
- Sistema de água de serviço;
- Sistema de ar comprimido; e
- Sistema de vapor auxiliar (caldeiras, oficina mecânica quente).

Neste último item, o sistema de segurança serve para a detecção e fornecimento de equipamento de combate a incêndio na área do cais, além de permitir instalar mangueiras de incêndio. Dessa forma, garante-se:

- Detecção e alarme de incêndio;
- Brigada de incêndio;
- Bombeamento de água do mar para fornecer ao cais uma rede de hidrantes;
- Fornecimento de hidrantes com água do mar;
- Fornecimento de uma rede interna de “*sprinkler*” com água doce para as instalações, se necessário; e
- Sistema de gás fixo para extinção em compartimentos técnicos e subestações elétricas.

Outras infraestruturas de apoio, que controlam e supervisionam o acesso para esta área (segurança orgânica) merecem destaque, através de seu sistema de controle de acesso e vigilância. O sistema de controle de acesso permite garantir a área segura pelo monitoramento e controle do acesso de partes sensíveis da instalação. Necessita estar em conformidade com os requisitos e com as medidas de proteção identificadas. Isto consiste em:

- Pontos de controle de acesso em áreas controladas do cais, para pedestres e veículos autorizados;
- Defesa física (cerca) de proteção ao redor da área permitindo o isolamento do resto do estaleiro;
- Sistema de vigilância com vídeos, detecção de intrusos e controle de acesso; e

- Ponto de controle de acesso a bordo da embarcação em todos os cais.

Quanto à lista de competências técnicas que o estaleiro precisa manter (formação de pessoal), algumas variáveis precisam ser resolvidas, como, por exemplo, recursos humanos, infraestrutura, “Especificações de Ordem de Construção” (*Construction Order Specification – COS*) e a necessidade de se mapear claramente as funções do papel da Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade (AgNSNQ) no estaleiro a fim de se minimizar o impacto no cronograma da obra sem causar prejuízo ao processo de licenciamento.

Um estaleiro deve abrigar uma estrutura de comando e controle dos meios navais, organizações de manutenção, logística e adestramento das tripulações.

Deve-se englobar ainda ao estaleiro para a construção e manutenção (dos equipamentos e sistemas) dos navios com propulsão nuclear, um centro de manutenção especializada, plataforma elevatória de navios (*Shiplift*), além da área administrativa para o programa.

Outro aspecto técnico que merece atenção consiste no treinamento adequado do pessoal e a manutenção de uma capacitação técnica para um futuro apoio logístico, evitando a possível perda do conhecimento e comprometimento da memória de projeto.

As mínimas interfaces de segurança nuclear do estaleiro com a embarcação nuclear devem garantir prover no cais e no dique seco o suporte de:

1. **Água do mar para resfriamento externo do compartimento do reator no dique seco:** Mantendo a temperatura do compartimento do reator em condições de trabalho adequadas (remoção de calor residual);
2. **Água desmineralizada:** Recebendo água desmineralizada (de alta qualidade), quando o navio não estiver em condições de produzir por meios próprios;
3. **Remoção de rejeito líquido radioativo:** Função com suporte de terra a fim de transferir o rejeito líquido radioativo para um

sistema de movimentação de rejeitos líquidos no cais e no dique seco;

4. **Remoção de rejeito gasoso radioativo:** Essa interface será necessária para desgaseificação e desaeração do circuito primário e outras instalações da barreira de pressão do primário. A remoção dos gases contaminados do circuito primário será promovida pelo *Mobile Workshop* que deve enviar para um sistema de processamento de rejeitos gasosos na unidade de tratamento de rejeitos no dique seco;
5. **Remoção de rejeito radioativo sólido:** Função necessária para transferir as resinas exauridas do deionizador do primário para um sistema de processamento de rejeitos sólidos da unidade de tratamento de rejeitos no dique seco;
6. **Retirada do elemento combustível do compartimento do reator nuclear:** Refere-se à retirada do combustível nuclear da embarcação no dique seco através de uma unidade móvel de confinamento (*Mobile Workshop*);
7. **Renovação de ar dentro do compartimento do reator:** São requisitos para o sistema de ventilação e ar condicionado de uma unidade móvel de confinamento. Para a embarcação nuclear atracada, deve ser considerada a renovação de ar pelo sistema do navio. Entretanto, pode existir a necessidade de renovação de ar do compartimento por um módulo de ventilação externo;
8. **Subpressão no compartimento confinado abaixo da pressão (atmosférica) dos compartimentos adjacentes:** A qual deve ser considerada requisito para o projeto do sistema de ventilação e ar condicionado da unidade móvel de confinamento.

Outras considerações pertinentes resumem-se ao inventário do combustível nuclear (termo fonte), definição sobre a classificação dos sistemas do

cais tendo em vista um parecer técnico da agência reguladora nuclear responsável, manutenção da seção do reator no cais e dique, além da necessidade de se classificar nuclearmente o dique seco.

Devem-se cumprir também as operações principais do complexo radiológico:

- Monitoração radioecológica do sítio,
- Preparação e testes de tambores para rejeitos de média e baixa atividade,
- Remoção do calor residual da piscina de elementos combustíveis,
- Manutenção do nível da piscina de elementos combustíveis,
- Radioproteção,
- Monitoração radioquímica e lavanderia quente,
- Armazenamento de internos do reator e treinamento e qualificação de pessoal para a manobra de carga e descarga de elementos combustíveis irradiados e,
- Remoção de peças contaminadas, descontaminação e transporte até as oficinas.

Outras áreas do estaleiro necessitam cumprir alguns requisitos. A seguir são descritas as principais com as devidas recomendações ao empreendimento.

5.3.1 Área de recebimento, inspeção e armazenamento de EC

Prover uma área para recebimento e estocagem de elementos combustíveis novos. Ainda nesta área, os elementos combustíveis novos deverão ser inspecionados quanto a prováveis danos ocorridos no transporte e então armazenados. Fazem parte dessa área todos os equipamentos necessários para realizar as atividades de inspeção, transporte e movimentação dos elementos combustíveis, desde o recebimento para inspeção, armazenamento até o carregamento. A configuração de estocagem deverá ser a seco e manter a sub-criticalidade dos ECs, seja em operação normal, seja em condição de acidente.

Esta área deverá privilegiar sempre a segurança contra a criticalidade nuclear e a otimização do fluxo operacional.

5.3.2 Área de transporte de combustível irradiado

A transferência de Elementos Combustíveis Irrradiados ocorre entre o reator e a área de armazenamento de combustíveis irradiados, durante as operações de recarga do Reator. Para a interligação destas áreas deveriam ser previstas duas Oficinas Móveis, as quais deverão garantir o confinamento das atividades no ambiente do navio durante a retirada do elemento combustível do reator para a piscina de estocagem do combustível no Prédio do Combustível. Os equipamentos de manobra de peso deverão, portanto, ser dimensionados para transportar os dispositivos de troca de combustível definidos neste procedimento, bem como acomodá-los.

5.3.3 Área de armazenamento de combustível irradiado

Os ECI, após o término do seu ciclo, devem ser transferidos do reator para a área de armazenamento de combustível irradiado, onde devem ser armazenados no interior da Piscina de Estocagem de Combustível (PEC). A PEC deverá prever áreas distintas para a segregação dos ECIs com defeitos dos não defeituosos. Assim, poderão ser previstos sistemas de comportas para o confinamento das áreas e mecanismos para o deslocamento dos elementos no seu interior ou dispor de outros meios para a sua movimentação de modo a manter a segregação da água e da contaminação. A piscina deve dispor de meios para a detecção, localização e reparos de vazamentos de água pelo seu revestimento, caso esse vazamento seja de grande proporção, devem ser adotadas medidas para a sua contenção. A piscina ainda deve prever iluminação submersa adequada para a monitoração visual da estocagem. A piscina deve ser projetada para a não ocorrência de acidente de criticalidade, tanto em caso de operação normal quanto em condição acidental. Normalmente, estas funções associadas à piscina de estocagem são desempenhadas através dos sistemas de processo com as funções descritas abaixo.

- Sistema de Resfriamento da Água da PEC, cuja função é remover o calor residual existente nos elementos combustíveis irradiados, proveniente do decaimento dos produtos de fissão;
- Sistema de Água de Resfriamento de Segurança do Prédio do Combustível que tem por função servir como fonte de água de resfriamento para os trocadores de calor do Sistema de Resfriamento da Água da PEC;
- Sistema de Limpeza e Purificação da Água da PEC, cuja função é a remoção de impurezas da água da PEC para reduzir a atividade a níveis aceitáveis e, também, manter a transparência da água pela remoção de partículas sólidas flutuantes na sua superfície para possibilitar a inspeção visual dos elementos combustíveis irradiados estocados;
- Sistema de Amostragem da Água da PEC, que tem como função avaliar a qualidade da água da PEC (medidas em linha, via painel de amostragem, e de análises em laboratório);
- Sistema de Estocagem e Controle de Nível da PEC, que tem por função permitir o enchimento inicial da PEC e estocar água desmineralizada para reposição na PEC em todas as condições operacionais;
- Sistema de Coleta e Detecção de Vazamentos da PEC, cuja função é detectar, coletar, quantificar e determinar a origem de eventuais vazamentos do revestimento da PEC; e
- Sistema de Drenagem da área de armazenamento de ECI, que tem por função coletar a água de transbordo da PEC, além de vazamentos e drenagens de equipamentos e regiões desta área.

5.3.4 Área de treinamento

Deve ser prevista uma área de treinamento para a operação de troca de combustível, quando os operadores treinarão em uma maquete do reator e manipularão uma maquete de elemento combustível também em escala natural. A área de treinamento deverá possuir dimensões que possibilitem o seu alagamento e drenagem.

5.3.5 Área de preparação e testes de embalagens

O Prédio de Preparação e Testes de Embalagens tem como função, abranger as dependências e instalações necessárias para a realização das atividades de preparação e testes de qualificação das embalagens de rejeitos radioativos de baixa e média radioatividade, gerados basicamente nas áreas de troca de combustível nuclear e de armazenamento de elementos combustíveis irradiados.

As principais atividades a serem desenvolvidas neste prédio são:

- Recebimento e inspeção de embalagens brutas e expedição de embalagens manufaturadas;
- Recebimento e inspeção de insumos para pintura e para a central de concreto;
- Armazenamento de embalagens brutas e manufaturadas;
- Pintura externa e identificação;
- Blindagem interna de tambores com concreto;
- Instalação de blindagens externas removíveis de chumbo;
- Ensaaios físicos para testes das embalagens prontas; e
- Preparação e montagem dos aros e flanges utilizados no fechamento dos tambores.

5.3.6 Área de oficina quente

Na Oficina Mecânica Quente (OMQ), são executadas as manutenções corretivas e preventivas e descontaminação de peças e equipamentos com níveis de contaminação radioativas iguais ou superiores aos limites operacionais de 1000 dpm/100cm² para emissão beta e gama e 20 dpm/100cm² para emissores alfa. Após o processo de descontaminação (a ser realizado na sala de descontaminação), o equipamento contaminado será envolvido em plástico e encaminhado para a área de manutenção onde será submetido a manutenção sob bancada ou piso devidamente preparado. Os resíduos gerados (por exemplo,

resultantes de algum processo de usinagem, soldagem, peças substituídas, lubrificantes, isolamentos térmicos, etc.) serão monitorados e, se contaminados, serão encaminhados à estação de encapsulamento (sendo, então, tratados por procedimento específico) ou à sala de descontaminação (para armazenamento temporário), conforme o caso. Os rejeitos líquidos deverão ser drenados para os tanques de armazenamento. Agentes químicos que, por sua natureza, não possam ser drenados, deverão ser armazenados em recipientes adequados.

5.3.7 Área intermediária de armazenamento de rejeitos

A área de intermediária de armazenamento de rejeitos é constituída das seguintes regiões:

- Um estacionamento fechado para o veículo de transporte;
- Uma região de recebimento com plataforma de descarga e carga dos embalados, ao nível da carroceria do veículo de transporte;
- Um vestiário com sanitários;
- Uma região de reembalamento e descontaminação;
- Regiões de circulação de embalados e pessoal;
- Uma área de armazenamento dos embalados.

5.3.8 Laboratório de monitoração radioecológica

Deverá ser previsto um Laboratório para executar o Programa de Monitoração Ambiental Radiológica que será conforme as normas vigentes da CNEN e IBAMA. O prédio do Laboratório deverá ser localizado em área isolada das demais instalações nucleares para evitar possíveis interferências ou contaminações das análises ambientais. O Laboratório deverá ter recursos para efetuar análises radiológicas em águas do mar, em terra, em cursos de águas doces e águas subterrâneas.

5.3.9 Lavanderia

Área dedicada para a higienização e descontaminação de roupas e equipamentos de proteção individual com contaminação radiológica, gerados nos

prédios nucleares. Os rejeitos radioativos líquidos gerados na lavanderia conterão detergentes e, como tal, apresentam inconvenientes no seu processamento. A localização desta área, portanto, deve ser a mais próxima possível da área de tratamento de rejeitos (principalmente do Sistema de Tratamento de Rejeitos Líquidos). Esta área deverá prever uma região de recebimento e monitoração das roupas, uma região de triagem, equipamentos de lavanderia e secagem de roupas. Deve conter uma sala de descontaminação e uma área de estocagem de roupas limpas.

5.3.10 Área de tratamento de rejeitos

Os projetos das plantas de tratamento de rejeitos radioativos devem garantir a segregação das correntes, a estocagem e o seu processamento, seja na fase gasosa, líquida ou sólida. Após o processamento dos rejeitos, estes deverão estar em condições de liberação para o meio ambiente ou de armazenamento intermediário dos rejeitos radioativos na instalação. Para isso, adota-se uma filosofia de gerenciamento dos rejeitos radioativos que atenda à legislação nacional referente aos controles radiológicos, físicos e administrativos.

Esta área normalmente contempla as seguintes funções e seus sistemas principais:

- Processar os rejeitos radioativos gasosos, através do Sistema de Processamento de Rejeitos Gasosos;
- Processar os rejeitos radioativos líquidos através do Sistema de Processamento de Rejeitos Líquidos;
- Processar os rejeitos radioativos sólidos, através do Sistema de Processamento de Rejeitos Sólidos;
- Laboratório de Radioquímica; para apoio analítico ao prédio nuclear,
- Sistema de Drenagem para recolher os líquidos das diversas áreas;
- Sistema de Ventilação e Ar Condicionado para promover o insuflamento e a exaustão de todas as correntes gasosas pela chaminé; e

- Sistema Móvel de Descontaminação para descontaminação de equipamentos.

Os sistemas deverão ser distribuídos nesta área de forma compacta e integrados. Os equipamentos e componentes dos sistemas de processamento de rejeitos radioativos deverão estar localizados e arranjados de tal forma que o critério ALARA seja respeitado em todas as fases operacionais da instalação.

5.3.11 Laboratório radioquímico

Responsável pela capacidade de fazer análise físico-química e radiológica de fluídos que circulam pelo circuito primário e secundário da embarcação, como também pelos sistemas de fornecimento de água potável, desmineralizada, destilada tanto da embarcação nuclear quanto de todas as instalações do empreendimento.

Deverá ter capacidade para analisar as características físicas químicas de todos os efluentes do empreendimento.

- Composição Radioisotópica, nuclídeos presentes e sua atividade em Bq;
- Atividade Específica (β , γ) em Bq/m³;
- Concentração de sólidos; e
- Composição Química.

5.3.12 Chaminé

A chaminé é o ponto de liberação dos efluentes gasosos, de todos os prédios, para o ambiente. A chaminé é a ponta final dos sistemas de exaustão dos prédios. O Sistema de Exaustão da Chaminé visa, após a monitoração, captar o ar de exaustão dos sistemas de ventilação dos prédios e descarregá-los para a chaminé, de modo a suprir as perdas de carga estática e dinâmica da chaminé. O Sistema de Exaustão da Chaminé é basicamente composto por um *plenum* para captação do ar de exaustão dos sistemas contribuintes.

5.3.13 Sistema de exaustão da chaminé

O sistema deve também monitorar e registrar o inventário radiológico liberado, através do Sistema de Amostragem e Monitoração da Chaminé.

5.3.14 Sistemas de processos independentes

Prever no prédio do dique fonte de água do mar para resfriamento de equipamentos e estruturas de classe de segurança nuclear e não nuclear. Este sistema será a fonte final de dissipação de calor residual. Deverá ter condições de fornecer água do mar com dique inundado e seco. A descarga da água aquecida será feita fora do ambiente do dique. Também devem ser responsáveis pelo:

- Sistema de Geração de Vapor Auxiliar (gerar vapor para testes no circuito secundário com o reator desligado); e
- Sistema de Remoção de Calor Residual do núcleo.

5.3.15 Sistemas ou atividades comuns a diversas áreas

- Sistema elétrico;
- Instrumentação e controle;
- Arquitetura e Engenharia civil; e
- Sistemas Auxiliares.

Quanto aos arranjos externos, eles são dispostos para permitir acesso ao recebimento de caminhão para o módulo do NSSS, evacuação de pessoal e via de emergência, mobilidade de pessoas, para recebimento de veículos e evacuação de rejeitos e acessibilidade e manutenibilidade de equipamento pesado.

5.4 Proposta de Estratégia de descomissionamento

A estratégia de descomissionamento deve atender alguns requisitos como considerar a experiência internacional, bem como as políticas nacionais vigentes para descomissionamento e prever formas de gerência e armazenamento dos rejeitos de todas as classes a serem gerados durante as atividades de descomissionamento.

1. **Projeto** - fazer uma usina que seja fácil de descomissionar (tudo acessível, sem materiais ativáveis com vida longa, dispositivos que permitam remover fluidos remotamente, alto percentual de material reciclável, vida longa etc.);
2. **Operação** - no que tange ao cenário tecnológico, reatores nucleares de Geração III e III+ [48] configuram-se como candidatos potenciais para a hipótese de expansão da geração nuclear na matriz elétrica pelos seguintes motivos: (i) características de segurança passiva, simplificação significativa de projeto, cumprimento das normas reguladoras e menores custos de instalação e de operação e manutenção; (ii) tendência (padronização) da indústria na utilização deste tipo de reator e iii) modularidade e simplificação de projeto. De maneira geral, cerca de dois terços do custo do empreendimento nuclear são representados pelos custos de investimentos básicos. Os custos de financiamento dependem da taxa de juros da dívida, da proporção da dívida e, em última análise, do tempo considerado necessário para a recuperação do capital.
3. **Baixa** - esperar decaimento para um rápido descomissionamento (bom planejamento).
4. **Limpeza** - adotar estratégia de descomissionamento protelado para instalações e embarcações nucleares tende a reduzir o custo.
5. **Desmantelamento** – o tempo para desmantelamento e isolamento do reator pode variar conforme a experiência de cada nação.

6. **Isolamento** – A Marinha Americana estima para as etapas de remoção e descarte da seção do reator e reciclagem do restante do casco (desmantelamento) uma média de doze meses, totalizando dois anos para o descomissionamento, sem desmantelar a seção do reator, que fica armazenada em Hanford.

6 DISCUSSÃO

Um ponto importante a ser abordado consiste na redução de tripulação devido à automação. Assumindo proporções similares, isso fornece uma economia aos requisitos propostos, os quais podem gerar redução do custo.

Uma usina com tudo acessível seria muito mais rápida para descomissionar do que uma sem nenhum cuidado. Uma usina sem material ativável (aço sem cobalto) seria mais reciclada e mais rápida de desmontar, pois os operários não precisariam se revezar devido à dose. Sem revezamento, a mão de obra poderia ser reduzida pela metade.

Vale ressaltar uma análise financeira de redução de custo de descomissionamento em caso de levantamento de fundos ao longo da vida útil da usina para realizar o descomissionamento versus o custo *overnight* do descomissionamento. A comparação de custos é diferente quando comparada para uma vida de 30 anos e para uma vida de 60 anos [50].

De fato, existe experiência limitada com reatores nucleares comerciais descomissionados e por essa razão, uma base inadequada para custos finais de descomissionamento. Uma hipótese típica é que o descomissionamento custaria entre 9% a 15% do custo capital inicial da planta de potência nuclear. Assumindo um custo capital de US\$3000/kW, que traduz para US\$270-US\$450/kW em dólares atuais. Custo estimado fornecido por alguns países OECDS (*Organisation for Economic Co-operation and Development*) e uns poucos outros para a Agência de Energia Nuclear sugere que, na média, descomissionando PWRs, BWRs, e PHWRs Canadenses custam US\$320/kW, US\$420/kW e US\$360/kW, os quais são todos algo maior que a faixa previamente mencionada.

Ambos, descomissionamento e manuseio com rejeitos radioativos são processos caros, mas devido muito ao custo que será incluído no futuro, seus custos descontados, para qualquer tarifa de desconto, será pequena.

Os três parâmetros críticos que determinam a economia da energia nuclear são os Custos de Construção *Overnight* (OCC), isto é, não incluindo juros durante a construção, o período de construção e a tarifa de desconto. Custos fixos de reatores nucleares são comumente discutidos em unidades de dólares por kW de capacidade instalada. Existe uma enorme incerteza sobre ambos o OCC e o período de construção, e existe também algum debate sobre a escolha apropriada da tarifa de desconto. Inicialmente, o desempenho de reatores nucleares, são medidos por índices tais como taxas de corte e fatores de capacidade, tendo uma ampla influência no custo da energia nuclear, mas em décadas recentes, o desempenho de reatores tem melhorado consideravelmente, e este assunto é agora apenas de significância secundária em cálculos de custos.

Ao tratar sobre as incertezas e dúvidas, vale a discussão sobre:

1. Faixa de valores possíveis de custos de descomissionamento;
2. Possíveis mudanças na legislação;
3. Taxas de juros a fim de obter um fundo para descomissionamento; e
4. Criação de um depósito permanente pode reduzir os custos.

Contudo, podemos afirmar sobre os seguintes aspectos:

1. Evitar exposição do pessoal durante o descomissionamento;
2. Planejamento reduz consideravelmente custos e atrasos;
3. Levantamento de fundos durante a vida útil reduz custo;
4. Aumento da vida útil da usina a fim de reduzir o custo; e
5. Automação, atuação remota e planejamento podem reduzir o custo do descomissionamento.

Os valores de custos de descomissionamento do submarino nuclear *SSN Swiftsure*, divergem dos valores mais atuais encontrados sobre o projeto de

desmantelamento dos submarinos da Marinha Britânica [46]. Referem-se a valores médios que englobam submarinos nucleares de ataque (somente propulsão nuclear) e balísticos (ogivas nucleares), com e sem combustível nuclear.

A saber, a grande diferença entre estudos de caso das Marinhas Americana e Britânica com descomissionamento planejado, conforme Tabela 7, um SSN da classe Los Angeles custa aproximadamente 1,24 bilhões de dólares do custo do submarino (210 milhões de dólares para substituir o reator e seu descomissionamento custa 60,8 milhões de dólares, levando em conta o custo de armazenagem por todos esses anos).

Além disso, devemos comparar razões similares e não a razão entre custo do descomissionamento e custo do reator para a *US Navy* e a razão entre custo de descomissionamento e custo do submarino para a *Royal Navy*. Se adotarmos a razão entre custo de descomissionamento e custo do submarino, o impacto do descomissionamento pode ser muito maior, passando por 5,9% (*US Navy*) do valor do reator a mais do que 15,2% (*UK Royal Navy*) (considerando o *HMS Swiftsure* como projeto “piloto” para o desmantelamento do custo do reator como base).

Para provar o processo de desmantelamento, a eliminação do total de vinte e sete cascos custará pelo menos £ 7,5 bilhões de libras, com aproximadamente £ 400 milhões de libras por casco para resolver o problema em cento e vinte anos [7, 14, 45].

Tabela 7 - Conversões de datas e suas respectivas fontes

PARÂMETRO	FY1990	FY2000	FY2015
Custo de um USS Los Angeles	900	-	1629
Custo de recarga do reator do Los Angeles	-	210	289,80
Custo de descomissionamento de reator	23,60	-	60,80
Razão custo reator / custo submarino	0,21	-	-
Custo operacional anual do USS Los Angeles	21	-	38,01
Vida útil do Los Angeles até descomissionar	33 anos	-	-
Custo operacional de um reator S6G (assumindo que a fração dos custos operacionais do reator em relação aos custos globais seja a mesma do custo de aquisição do reator sobre o custo de compra do	-	-	263,16

PARÂMETRO	FY1990	FY2000	FY2015
submarino)			
Custo de ciclo de vida de um reator S6G (US)	-	-	613,76
Valor do contrato de descomissionamento de 20 reatores ingleses	-	-	10400
Câmbio libra dólar	-	-	1,25
Custo de descomissionamento inglês	-	-	128
Custo de ciclo de vida de um reator (UK)	-	-	19,45
Fração do custo de ciclo de vida US para descomissionamento	-	-	10%
Fração do custo de ciclo de vida UK para descomissionamento	-	-	15,2%
Aumento na tarifa devido diferenças de método	-	-	10,3%

O submarino SSN Astute é um submarino muito mais fácil de manter devido a um casco maior, logo o trabalho de descomissionamento, foi estimado como sendo muito menor até do que os submarinos da *US Navy*.

Outro parâmetro que merece destaque são os navios mercantes, pois os mesmos tem outra ordem de custo relativo, já que esse tipo de navio não possui sistema de combate. Como os sistemas de combate são muito caros, a proporção dos custos para um navio mercante tipicamente fica muito diferente.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Desta análise buscou-se identificar uma estratégia para um plano preliminar de descomissionamento de um navio com propulsão nuclear.

Os submarinos nucleares são, indiscutivelmente, os ativos de defesa mais importantes da Grã-Bretanha, porém a incapacidade de lidar prontamente com seu legado tem sido um escândalo nacional. Embora tenha havido discussões e consultas nos últimos anos, apenas recentemente houve ações para realmente iniciar o processo de descarte.

O primeiro submarino nuclear da Marinha Real Britânica, o *HMS Dreadnought*, desativado em 1980, atualmente está atracado em Rosyth, aguardando o descarte por mais tempo do que ele esteve em serviço ativo.

A Autoridade de Serviços de Disposição do MoD (DSA) está em consulta com a Babcock (com os sites Rosyth e Devonport) para concordar com os prazos finais e custos para o projeto. A tarefa em Rosyth é mais fácil com apenas sete submarinos que tiveram seu combustível removido há algum tempo.

Como recomendação, salienta-se tentar cumprir o resumo dos principais requisitos de projeto (flexibilidade e funcionais), operação (estaleiro capaz de permitir a construção e manutenção das instalações da plataforma do navio com propulsão nuclear e um complexo radiológico a fim de atender todas as demandas de suporte do navio, quando este estiver atracado ou docado) e descomissionamento (desmantelamento protelado da seção do reator, que não implicará em novos custos de construção de instalações para corte e separação da seção do reator, tratamento de rejeitos e armazenamento de combustíveis e rejeitos radioativos).

A diferença entre os casos da Marinha Americana (descomissionamento planejado com aproximadamente 5,9% do custo do submarino como base) e da

Marinha Britânica (15,2%) indica que um bom planejamento reduz custos e atrasos.

REFERÊNCIAS

1. TENNENBAUM, JONATHAN. **Tomorrow's nuclear reactors: small but beautiful**. Por Claudio Scarpinella no seu blog, 31/01/2020. Berlin.
2. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. Novembro de 2018.
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Standard Format and Content for Safety Related Decommissioning Documents**, (Safety Report Series N°45) Vienna, 2005.
4. MAIA, YRAN LEITE, **Uma proposta para o descomissionamento de submarinos nucleares no Brasil**, Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.
5. **La dépollution de cinq sous-marins nucléaires français démarre à Cherbourg**. https://www.bfmtv.com/environnement/la-depollution-des-sous-marins-nucleaires-demarre-a-cherbourg_AN-201809110037.html.
6. **La dépollution des sous-marins nucléaires démarre à Cherbourg**. https://www.lepoint.fr/societe/la-depollution-des-sous-marins-nucleaires-demarre-a-cherbourg-11-09-2018-2250239_23.php.
7. Ministry of Defense. **Investigation into submarine defueling and dismantling**, March 2019. Report by the Comptroller and Auditor General. Ordered by the House of Commons.
8. **SSN-688 Los Angeles-class-Navy Ships** FAS Military Analysis Network <https://fas.org/man/dod-101/sys/ship/ssn688.htm#:~:text=The%20three>

%20options %20under%20review,class%20 (SSN%20774)%20subs%20at-08-19-2020.

9. **Submarine defueling and dismantling.** House of Commons Committee of Public Accounts. Published on 19 June 2019 by authority of the House of Commons.
10. **The painfully slow process of dismantling ex-Royal Navy nuclear submarines** <https://www.savetheroyalnavy.org/the-painfully-slow-process-of-dismantling-ex-royal-navy-nuclear-submarines/06-24-2018>.
11. ECEN, ALVIM C.F.; FERREIRA O.C; GUIDICINI O. M.; EIDELMAN F; FERREIRA P. A.; BERNARDES M. A. S. **Comparação da emissão de gases de efeito estufa (GEE) na geração nuclear de eletricidade no Brasil com as de outras fontes.** Economia & Energia Ano XV-No 79 Outubro/Dezembro de 2010.
12. EYRING, V. et al. **Transport Impacts on Atmosphere and Climate: Shipping, Atmospheric Environment.** Journal of Atmosphere and Environment, v. 44, n. 37, p. 4735-4771, 2009. ISSN 1352-2310. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009003379>.
13. ANDRADE, Israel de Oliveira, FRANCO E SILVA, Márcio Magno de Farias, HILLEBRAND, Giovanni Roriz Lyra e FRANCO, Luiz Gustavo Aversa. 2018. **Submarino Nuclear Brasileiro: Defesa Nacional e Externalidades Tecnológicas.** Brasília, Novembro de 2018.
14. **UK's decommissioned nuclear submarines kept in storage for decades.** 3 April 2019. <https://news.sky.com/story/uks-decommissioned-nuclear-submarines-kept-in-storage-for-decades-11682779-09-09-2020>.
15. NORMA CNEN NN 9.01, **Descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas, Resolução CNEN 133/12, Publicação: DOU 21.11.2012.**

16. SLOVAK REPUBLIC RESOLUTION N°610/2009. **Rules for Institutional Radioactive Waste (IRAW)** Captured Radioactive Material (CRAM) Management,
17. SOUZA VIVAS, ARY DE. **Desenvolvimento do Plano Preliminar de Descomissionamento do Reator IPEN/MB-01**. IPEN-INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. 2014.
18. WILLEM NOTELTEIRS, Process engineer D&D. Belgo Process, **“Release of decontaminated material”**. Presented to the Scientific Visit of Brazilian expert. February, 09th 2015.
19. WILLEM NOTELTEIRS, Process engineer D&D. Belgo Process., **“Treatment of spent ion-exchange resins (LLW and ILW) and Institutional Waste”**. Presented to the Scientific Visit of Brazilian expert. February, 09th 2015.
20. **Parecer Técnico: Conceito de “Autonomia para fins de segurança nuclear do SN-BR”**. Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade, Rio de Janeiro, 2019.
21. ANSI/ANS 58.14-2011. American National Standard, 2011. **Safety and Pressure Integrity Classification Criteria for Light Water Reactor**.
22. SANTOS, RICARDO LUÍS PEREIRA DOS, **A Energia Nuclear no Sistema Elétrico Brasileiro**, Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Estratégico, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.
23. NRC, **Nuclear Regulatory Commission. Radioactive Waste: Production, Storage, Disposal**; U.S, 2002.
24. NUREG-0492, **U.S. Nuclear Regulatory Commission. Fault Tree Handbook**, Date Published: January 1981.

25. CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, **Estudo da Cadeia de Suprimento do Programa Nuclear Brasileiro Relatório** Parcial: Novembro 2010.
26. Informativo da Associação Brasileira de Energia Nuclear. **Brasil Nuclear**. Ano 26. Número 50. Outubro de 2019.
27. **Nuclear Submarines Navy Efforts to Reduce Inactivation Costs**, July 1992, United States General Accounting Office, National Security and International Affairs Division, Washington, D.C. 20548
28. OREGON DEPARTMENT OF ENERGY, "Naval Nuclear Reactor Compartment Shipments on the Columbia River": September 2013.
29. BUKHARIN, OLEG AND JOSHUA HANDLER. 1995. "**Russian Nuclear-Powered Submarine Decommissioning**". Science & Global Security. Vol. 5, p.245-271.
30. CENTER FOR ARMS CONTROL, Energy and Environmental Studies at MIPT, Nuclear Powered Submarine Inactivation and Disposal in the U.S. and Russia: A Comparative Analysis, Paper presented at the International Conference "**Radioactive Waste. Storage, Transportation, Recycling. Environment and Human Impact**" in October 14-18, 1996, in St.-Petersburg, Russia.
31. NIELSEN, THOMAS, IGOR KUDRIK AND ALEXANDER NIKITIN. 1996. **The Russian Northern Fleet. Sources of Radioactive Contamination**. Bellona Report Nº. 1. Moscow, 19 April.
32. JAMES P. TARZIA, M.S., CHP, N. S. **Savannah History and Decommissioning Status**, Presented to the North Carolina Chapter of the Health Physics Society: March. 13, 2009.

33. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, Maritime Administration, **DECOMMISSIONING FUNDS STATUS REPORT FOR CY2015**, Washington, DC, March 31, 2016.
34. W.F. STOECKER. **Design of Thermal Systems**. International Student Edition. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. 1980, 1971.
35. WILLIAM H. AVERY AND CHIH WU. **Renewable energy from the ocean**. Oxford University Press, 1994.
36. **Draft Environmental Impact Statement on the Disposal of Decommissioned, Defueled Cruiser, Ohio Class, and Los Angeles Naval Reactor Plants**, August 1995, United States, Department of the Navy.
37. **HMS Swiftsure**. [https://en.wikipedia.org/wiki/HMS_Swiftsure_\(S126\)#cite_ref-jfs85_p616_1-0](https://en.wikipedia.org/wiki/HMS_Swiftsure_(S126)#cite_ref-jfs85_p616_1-0).
38. **NS Sibir icebreaker vessel details**. <https://www.cruisemapper.com/ships/Sibir-icebreaker-1770-09-01-2020.7>.
39. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas**, CNEN-NN-9.01, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
40. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de Instalações Nucleares**. Rio de Janeiro. CNEN, 2002. (CNEN-NE-1.04).
41. NORMA CNEN NN 9.02, **Gestão dos Recursos Financeiros Destinados ao Descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas**, Resolução CNEN 204/16, Publicação: DOU 26.10.2016.
42. GOODALL, JAMES C., USAF. **Fast Attack Submarines Vol.1**. Shiffer Publishing, Ltd. 2017.
43. LAISNY, ANDRÉ. **Le Redoutable & l'histoire des techniques des sous-marins**. Marines Éditions. Février 2012.

- 44. Russia prepares to dismantle first nuclear icebreaker.**
<https://www.neimagazine.com/news/newsrussia-prepares-to-dismantle-first-nuclear-icebreaker-5684161>.
- 45. Nuclear submarines: MoD criticized over submarine disposal, 3 April 2019.** <https://www.bbc.com/news/uk-47792539>.
- 46. PODER NAVAL; O processo dolorosamente lento de desmantelar submarinos nucleares** ex-Royal Navy. 24 de junho de 2018. Disponível em: <<https://www.naval.com.br/blog/2018/06/24/o-processo-dolorosamente-lento-de-desmantelar-submarinos-nucleares>>. Acessado em: 24 jun. 2018.
- 47. ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. Future Ship Powering Options exploring alternative methods of ship propulsion.** Royal Academy of Engineering. United Kingdom. 2013.
- 48. Gen III/III+ Nuclear Reactors Research Needs and Challenges.** Presented by TVO's Olkiluoto Nuclear Power Plant in Finland. FISA 2009, Prague.
- 49. GOLDBERG, STEPHEN M.; ROSNR, ROBERT. "Nuclear Reactors: Generation to Generation. In: American Academy of Arts & Sciences":** March. 2011.
- 50. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050.** Série ESTUDOS DE LONGO PRAZO. NOTA TÉCNICA PR 07/18. Rio de Janeiro. Novembro de 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.