

**MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM TECNOLOGIA NUCLEAR PARA
OFICIAIS
CAPITÃO-TENENTE DANIEL VILLALVA MARTINS**



OPÇÕES DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR PARA APLICAÇÃO NAVAL

Rio de Janeiro

2018

CAPITÃO-TENENTE DANIEL VILLALVA MARTINS

OPÇÕES DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR PARA APLICAÇÃO NAVAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro de Instrução
Almirante Wandenkolk para aprovação no
Curso de Aperfeiçoamento Avançado em
Tecnologia Nuclear para Oficiais.

Área de concentração: Tecnologia Nuclear

Orientadores: Dra. Claudia Giovedi Motta e
Dr. Alfredo Abe

Rio de Janeiro

2018

RESUMO

A tecnologia nuclear aplicada à propulsão naval representa uma ferramenta valiosa no fortalecimento do poder naval de um país e, o domínio de tal tecnologia empregada em submarinos, representa uma crucial arma de dissuasão. Contudo, atualmente há pouca informação em literatura ostensiva a respeito de combustíveis nucleares aplicados para este fim. Portanto, o presente trabalho se propôs a levantar e analisar os dados disponíveis sobre combustíveis nucleares aplicados à propulsão naval, considerando uma proposta de base normativa a ser aplicada. Os resultados obtidos até o momento permitem indicar possíveis alternativas de combustível nuclear a serem utilizadas, pela Marinha do Brasil, na otimização de combustíveis nucleares aplicados à propulsão naval.

Palavras-chave: Combustível nuclear, propulsão naval.

ABSTRACT

The nuclear technology applied to the naval propulsion represents a valuable tool in strengthening a country's naval power and the domain of this technology represents an important dissuasive weapon. However, actually, there is few ostentatious information within open literature on nuclear fuel for this purpose. Therefore, the present work intents evaluates some available data on nuclear fuels applicable to naval propulsion, considering normative base to be applied. The results obtained, allow to point out possibilities of nuclear fuel to be used by the Brazilian Navy in the optimization of nuclear fuels for naval propulsion.

Keywords: Nuclear fuel, naval propulsion.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------------|--|
| AgNSNQ | Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade |
| CNEN | Comissão Nacional de Energia Nuclear |
| CERMET | Cerâmica Metálica |
| DGDNTM | Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha |
| EUA | Estados Unidos da América |
| HEU | <i>High Enriched Uranium</i> |
| LABGENE | Laboratório de Geração Nucleoelétrica |
| LEU | <i>Low Enriched Uranium</i> |
| LOCA | <i>Loss-of-Coolant Accident</i> |
| MB | Marinha do Brasil |
| OM | Organização Militar |
| PNM | Programa Nuclear da Marinha |
| PWR | <i>Pressurized Water Reactor</i> |
| SAR | <i>Search and Rescue</i> |
| SN-BR | Submarino Nuclear Brasileiro |
| TOM | Transferência de Óleo no Mar |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 – ILUSTRAÇÃO REPRESENTATIVA DA AMAZÔNIA AZUL | 11 |
| FIGURA 2 – FOTO ILUSTRATIVA DE TOM..... | 12 |
| FIGURA 3 - CIRCUITOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO DO REATOR NUCLEAR | 15 |
| FIGURA 4 – ILUSTRAÇÃO DE MECANISMO DE DEFESA EM PROFUNDIDADE APLICADA A UM REATOR | 17 |
| FIGURA 5 – ILUSTRAÇÃO DA REAÇÃO EM CADEIA..... | 19 |
| FIGURA 6 – FOTO DE MINÉRIO DE URÂNIO | 23 |
| FIGURA 7 – FOTO DE <i>YELLOWCAKE</i> | 24 |
| FIGURA 8 – PASTILHAS DE URÂNIO | 25 |
| FIGURA 9 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO | 25 |
| FIGURA 10 – ILUSTRAÇÃO DO CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR | 26 |
| FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO DE ÁREAS DE ATUAÇÃO DO SUBMARINO CONVENCIONAL E NUCLEAR NA COSTA BRASILEIRA E PARTE DA AMAZÔNIA AZUL..... | 28 |
| FIGURA 12 – ILUSTRAÇÃO DE UMA CÉLULA UNITÁRIA DO URÂNIO METÁLICO | 37 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 - PRINCIPAIS COMPONENTES DO REATOR..... | 18 |
| TABELA 2 – COEFICIENTE DE REATIVIDADE NO REATOR PWR | 22 |
| TABELA 3 – COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DO URÂNIO NATURAL | 24 |
| TABELA 4 – PROPRIEDADES DE COMPOSTOS DE URÂNIO..... | 37 |
| TABELA 5 - MUDANÇAS DE FASE DO URÂNIO METÁLICO | 38 |
| TABELA 6 – PROPRIEDADES DAS LIGAS DE URÂNIO..... | 42 |
| TABELA 7 – MATERIAIS PARA O REVESTIMENTO DO COMBUSTÍVEL | 45 |
| TABELA 8 – MATERIAIS DE CONTROLE | 47 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 13 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL | 13 |
| 1.2.1 Objetivos Específicos | 13 |
| 1.3 METODOLOGIA | 14 |
| 1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA | 14 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 15 |
| 2.1 REATOR NUCLEAR | 15 |
| 2.1.1 Requisitos do Reator | 16 |
| 2.2 COMBUSTÍVEL NUCLEAR | 19 |
| 2.2.1 Fissão e Reação em Cadeia | 19 |
| 2.2.2 Seção de Choque | 20 |
| 2.2.3 Reatividade e Criticalidade | 21 |
| 2.2.4 Controle da Reação | 22 |
| 2.3 CICLO DO COMBUSTÍVEL | 23 |
| 2.4 COMPARAÇÃO SUBMARINO CONVENCIONAL E NUCLEAR | 27 |
| 2.5 BASE NORMATIVA | 30 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 32 |
| 3.1 CRITÉRIOS PARA DEFINIÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL | 32 |
| 3.2 CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DO MATERIAL DE REVESTIMENTO | 33 |
| 3.3 CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DO MATERIAL DE CONTROLE | 35 |
| 4 RESULTADOS | 36 |
| 4.1 RESULTADOS PARA O MATERIAL COMBUSTÍVEL | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.1 Urânio Metálico (U) | 37 |
| 4.1.2 Dispersão de Urânio em Alumínio (UAl_2 , UAl_3 , UAl_4) | 39 |
| 4.1.3 Dispersão de Urânio com Siliceto e Alumínio (U_3Si , U_3Si_2) | 40 |
| 4.1.4 Dispersão de Urânio com Óxido de Alumínio (U_3O_8) | 40 |
| 4.1.5 Urânio com Carboneto e com Nitreto (UC, UC_2) | 41 |
| 4.1.6 Dióxido de Urânio (UO_2)..... | 41 |
| 4.1.7 Liga de Metal Rica em Urânio | 42 |
| 4.2 RESULTADOS PARA O MATERIAL DE REVESTIMENTO | 44 |
| 4.3 RESULTADOS PARA O MATERIAL DE CONTROLE | 46 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 48 |
| 5.1 PARA O MATERIAL COMBUSTÍVEL | 48 |
| 5.2 PARA O MATERIAL DE REVESTIMENTO E CONTROLE | 49 |
| REFERÊNCIAS | 50 |

1. INTRODUÇÃO

A energia nuclear é produzida a partir da fissão do núcleo de um átomo, que libera uma grande quantidade de calor, suficiente para produzir energia considerada limpa e renovável (PADILHA; CABRAL, 2018). O reator nuclear é a estrutura no qual o combustível nuclear sofre fissão nuclear controlada e libera energia térmica, semelhante a uma caldeira.

Com o início do uso dessa energia aplicada à propulsão naval no submarino USS Nautilus da Marinha Americana, em 1954 (O EXPLORADOR, 2017), observou-se uma enorme evolução na forma como os meios navais podem navegar, tanto no quesito velocidade como na autonomia, influenciando consideravelmente também na parte tática das operações navais. Atualmente, a Marinha Americana, que é referência mundial, possui mais de 40% de sua frota com propulsão nuclear (DEPARTMENT OF THE NAVY OF THE UNITED STATES OF AMERICA, 2013).

Para fins de propulsão naval, observa-se a utilização de reatores refrigerados a água pressurizada (PWR, da sigla original em inglês *Pressurized Water Reactor*). Um dos desafios é colocar essa planta nuclear dentro de um ambiente compacto, como o interior de um navio, observando as necessidades militares e aos requisitos de segurança.

A Marinha do Brasil possui um programa nuclear (PNM), em execução desde 1979. A etapa referente ao domínio do ciclo do combustível já foi concretizada e, atualmente as atividades estão voltadas à consolidação das atividades relacionadas ao Laboratório de Geração Nucleoelétrica (LABGENE), que é o protótipo em terra de uma planta que poderá ser aplicada à propulsão naval. Há também um trabalho contínuo na capacitação tecnológica do projeto, construção, comissionamento, operação e manutenção de reatores nucleares tipo PWR.

Devido à dimensão enorme da Amazônia Azul, conforme figura 1, uma área com cerca de 3,5 milhões de quilômetros quadrados, é necessário que a nossa Marinha procure dotar-se de uma frota com raio de ação e autonomia suficientes para patrulhar, realizar tarefas de busca e salvamento, e defender o mar territorial brasileiro da incursão de frotas pesqueiras predatórias e traficantes de armas e drogas (CARVALHO, 2012).

Figura 2 – Foto ilustrativa de TOM



Fonte: PODER NAVAL (2013)

Outra situação em que o uso da propulsão nuclear oferece vantagem é no caso de uma eventual necessidade de se realizar busca e salvamento no mar (SAR, da sigla original em inglês *Search and Rescue*), pois tem-se um aumento considerável de eficácia e prontidão para o atendimento ao chamado.

Para o submarino nuclear, diferentemente do convencional, não haverá necessidade de ficar retornando à superfície para recarregamento de baterias, podendo ficar oculto no mar por longos períodos de tempo.

Devido aos fatores acima expostos, o submarino de propulsão nuclear é considerado uma arma “stealth” por excelência, contribuindo de maneira significativa na soberania do país, já que ainda é muito difícil encontrar um submarino abaixo da superfície do mar (PODER NAVAL, 2018).

Além disso, ele possui o fator chamado elemento surpresa, que contribui muito para o aumento do Poder Naval, pois segundo Silva¹ (2007, *apud* Silva, 2012), “O

submarino provoca na mente do inimigo uma sensação preocupante de onipresença”, contribuindo assim de forma considerável com o poder de dissuasão, que é o fato que consiste em desestimular ou reduzir a possibilidade do uso da força por algum adversário, para impor-nos sua vontade em assunto de interesse comum.

Tendo em vista às vantagens oferecidas pela propulsão nuclear, o presente trabalho visa a um melhor entendimento das opções de combustível disponíveis e de como cada tipo se comporta num reator naval, que no Brasil será do tipo PWR.

1.1 JUSTIFICATIVA

Países com uma Marinha forte possuem energia nuclear aplicada à propulsão naval. Tendo em vista a visão de futuro da Marinha do Brasil:

"[...] uma Força moderna, equilibrada e balanceada, e deverá dispor de meios compatíveis com a inserção político-estratégica de nosso País no cenário internacional e, em sintonia com os anseios da sociedade brasileira. Ela estará permanentemente pronta para atuar no mar e em águas interiores, de forma singular ou conjunta, de modo a atender aos propósitos estatuídos na sua missão". (Marinha do Brasil, 2017)

Faz-se mister a construção de meios que utilizem a propulsão nuclear, a fim de assegurar seu poder de combate e patrulha. O presente trabalho visa a contribuir para a discussão de possíveis alternativas de combustíveis nucleares a serem aplicados em propulsão naval no âmbito do Programa Nuclear da Marinha (PNM).

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é o levantamento bibliográfico, incluindo base normativa, referente à área de combustíveis nucleares voltados à propulsão naval, e quais devem ser os requisitos e características a serem atendidos por eles. Serão apresentados os diferentes tipos existentes e realizadas as devidas comparações.

1.2.1 Objetivos Específicos

Como objetivo específico, busca-se a avaliação de combustíveis nucleares aplicados à propulsão naval que sejam viáveis para a execução na MB, no âmbito do PNM, considerando-se as dificuldades de aquisição de materiais e equipamentos, a restrição orçamentária e outras dificuldades enfrentadas pelo Brasil.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia do estudo consiste em pesquisa bibliográfica para levantamento de dados e consulta a profissionais que atuam na área, seguida da compilação de dados e uma apresentação dos mesmos. Foi observada uma certa dificuldade de se obter bibliografias ostensivas a respeito do tema, pois os países detentores dessas tecnologias quando disponibilizam informações, o fazem com muitas restrições.

1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

O capítulo 1 consistirá numa apresentação de como a energia nuclear pode ser aplicada para a propulsão naval, e a importância do seu emprego no desenvolvimento da Marinha do Brasil, visando a contextualizar o leitor a respeito do tema proposto.

No capítulo 2, será feita uma revisão de literatura, no qual constarão os principais conceitos da área nuclear que são necessários para que haja um entendimento do assunto abordado, e seja possível realizar uma análise com os dados obtidos. Também serão apresentados os tratados e normas que delimitarão as possibilidades de execução do presente estudo pela MB.

O capítulo 3 indica os materiais e métodos utilizados, a fim de qualificar e realizar uma posterior relação de dados considerados importantes na escolha de um combustível nuclear, a partir da bibliografia aberta disponível.

O capítulo 4 mostrará os resultados obtidos a partir dos materiais e métodos utilizados no capítulo anterior, e as conclusões obtidas.

O capítulo 5 apresentará a conclusão a que se chegou ao final da compilação de todos os dados apresentados, e fará as considerações finais.

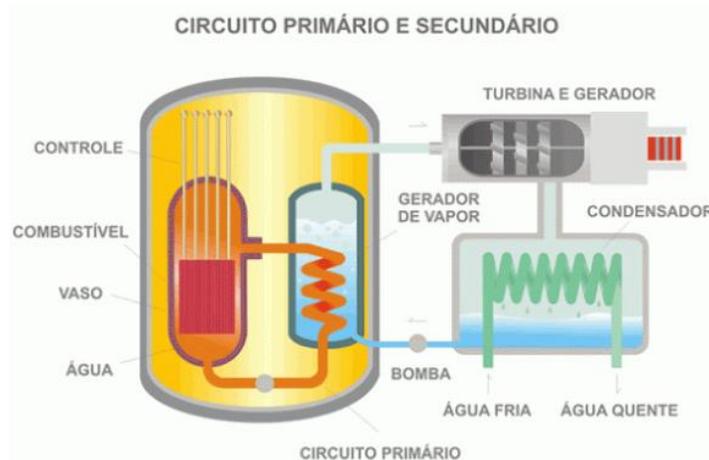
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 REATOR NUCLEAR

A energia nuclear advém da fissão do urânio num reator nuclear, e este é o local onde a mesma ocorre de forma controlada. Seu princípio de funcionamento é semelhante ao de uma termelétrica convencional, onde o calor gerado pela queima de um combustível produz vapor, que aciona uma turbina, acoplada a um gerador de corrente elétrica. O calor produzido pela fissão do urânio no reator necessita de um sistema de controle para a reação nuclear, o que é feito pelos absorvedores de nêutrons, e necessita, também, de uma blindagem eficiente contra os nêutrons e raios gamas emitidos pelos produtos da fissão.

O tipo de reator mais utilizado em propulsão naval e que está em desenvolvimento no âmbito do PNM é o PWR, o qual é constituído por dois circuitos: primário e secundário. No primário, a água de refrigeração pressurizada é aquecida pela energia liberada pela reação da fissão nuclear. Após isso, ela passa por uma tubulação trocando calor e vaporizando a água do secundário no gerador de vapor, sem que haja contato físico entre os dois circuitos. No caso da propulsão naval, a água do circuito primário é pressurizada a 15 MPa, aproximadamente, que circula através do núcleo. As temperaturas de entrada e saída do núcleo são por volta de 290 °C e 320 °C, respectivamente. O vapor gerado aciona uma turbina que alimenta os geradores do Sistema Elétrico (PADILHA, 2012)

Figura 3 - Circuitos primário e secundário do reator nuclear



Fonte: PADILHA (2012)

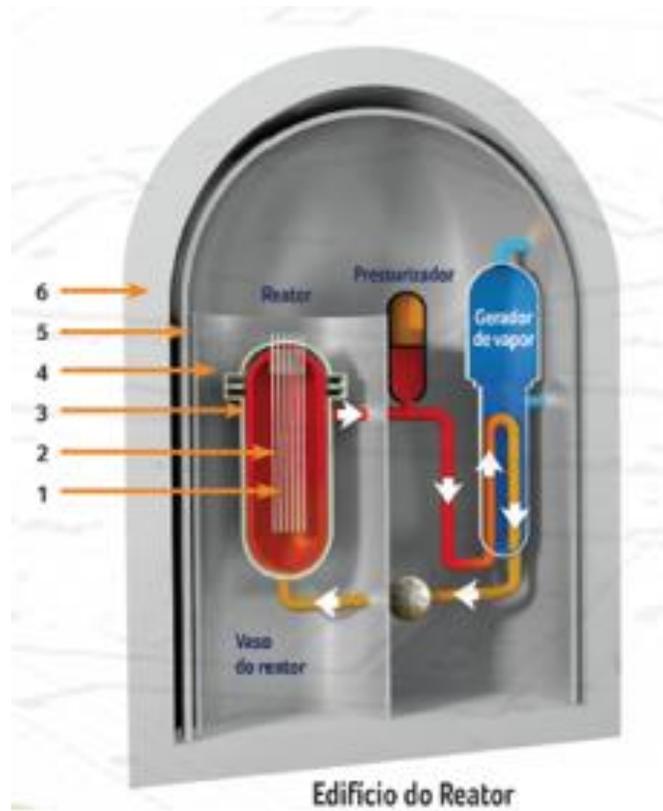
2.1.1 Requisitos do Reator

Alguns requisitos de projeto devem ser observados para um reator aplicado à propulsão naval: (BELL; ROSKOFF; HAGHIGHAT, 2014)

- a) Deve ser compacto: Tem que atender às limitações de peso e espaço, enquanto fornece potência que atenda às velocidades necessárias para engajamento e manobra;
- b) Deve ser seguro para a tripulação: A mesma vive e trabalha por longos períodos de tempo bem próxima ao reator. A água que flui através do núcleo é exposta ao fluxo de nêutrons, ocasionando uma reação com liberação de raios gama que são extremamente prejudiciais ao ser humano;
- c) Deve ser seguro para o meio ambiente: Devido à necessidade de se atracar em portos civis, não pode oferecer risco de contaminação para a população local. Além das barreiras citadas anteriormente, a pressão do casco do submarino serve como limite para o ambiente externo;
- d) Deve ser confiável: Fornecer potência e eletricidade ao meio naval suficientes para garantir operabilidade em diversos tipos de ambientes;
- e) Deve ser robusto: Suportar as diferentes condições de mar, e choques durante conflitos;
- f) Deve ser manobrável: Capaz de alterar rapidamente e de forma de frequente a potência necessária para as diversas manobras táticas dos navios;
- g) Deve ser resistente: Poder operar por vários dias antes de precisar reabastecer, ou então durar a vida inteira do núcleo, maximizando a disponibilidade do navio, diminuindo a exposição ocupacional, o custo do ciclo de vida e a demanda na infraestrutura de apoio; e
- h) Deve ser silencioso: A discricção é um fator importante para submarinos, não sendo tão relevante assim para os demais navios.

Referente às letras b) e c), do ponto de vista da segurança, há um conceito importante que se chama defesa em profundidade, que consiste na prevenção de futuros acidentes através de barreiras que separam o perigo do acidente. No caso de ocorrência de algumas dessas situações previstas em projeto, os sistemas de segurança serão capazes de controlá-la.

Figura 4 – Ilustração de mecanismo de defesa em profundidade aplicada a um reator



Fonte: ELETRONUCLEAR (2018)

Conforme ilustra a figura 4, o conceito de defesa em profundidade pode ser explicitado como se segue (ELETRONUCLEAR, 2018):

- 1- O combustível nuclear possui uma estrutura visando a reter a maior parte dos produtos gerados na fissão. As pastilhas de UO_2 são a primeira barreira de proteção, pois possuem uma estrutura molecular que retém grande parte dos produtos de fissão gerados;
- 2- O revestimento do combustível é feito de uma liga especial que assegura a integridade do revestimento durante a irradiação atuando na contenção dos produtos de fissão;
- 3- O vaso do reator serve como uma barreira estanque;
- 4- A blindagem radiológica permite que os operadores possam acessar locais próximos ao reator, em caso de necessidade;

- 5- Circuito primário isolado, a fim de proteger o pessoal que trabalha nas redondezas do reator; e
- 6- Prédio do reator serve como uma contenção final, que no caso do submarino será o casco do mesmo, que protegerá o meio ambiente em caso de acidente com vazamento ou impactos.

Os principais componentes de um reator são apresentados na tabela 1, bem como suas funções e os principais materiais utilizados. (PERROTA, 1999)

Tabela 1 - Principais componentes do reator

| Classificação | Função | Exemplos de Materiais |
|-------------------------------------|---|---|
| Combustível Nuclear | Conter os elementos físséis e férteis que irão produzir as fissões da reação em cadeia. | Urânio, plutônio e tório. |
| Estruturas | São todos os materiais utilizados como estrutura e revestimento dos diversos componentes do reator. | Zircaloy, ligas de níquel e aço inox. |
| Moderadores | Moderar a energia dos nêutrons produzidos na fissão e também servir como refletores na periferia do núcleo do reator de forma a minimizar a fuga de nêutrons do núcleo. | Grafite, água leve, água pesada, berílio. |
| Absorvedores (controladores) | Manter a controle da reação em cadeia dentro do núcleo. | Boro, cádmio, gadolínio. |
| Refrigerantes | Retirar o calor gerado do núcleo do reator devido às fissões nucleares. | Hélio, CO ₂ , água leve, Na, Pb-Bi |
| Blindagem | Servir de barreira para a radiação (blindar) de forma a atenuar os efeitos desta sobre componentes estruturais ou o meio exterior ao reator. | Água leve, chumbo e ferro. |

Fonte: Adaptado de PERROTA (1999)

O foco deste trabalho será o combustível nuclear, que é um dos principais componentes do reator.

2.2 COMBUSTÍVEL NUCLEAR

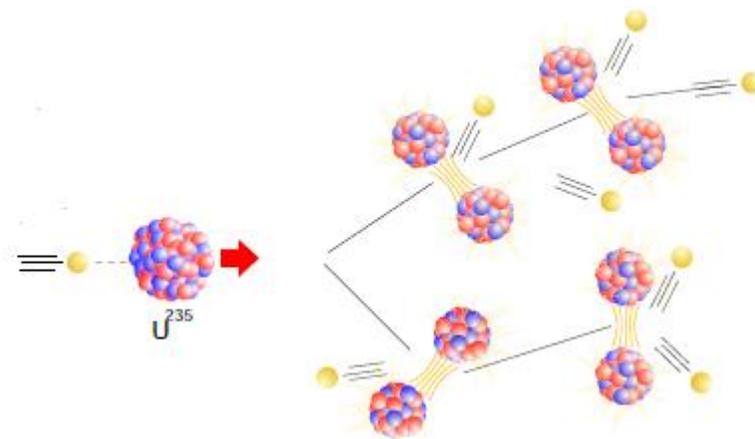
O combustível nuclear tem como funções básicas: gerar as fissões nucleares, transferir a energia gerada na fissão nuclear para o refrigerante e reter os produtos de fissão. Para isso, ele deve conter os elementos físséis e férteis que irão produzir as fissões da reação em cadeia. Os elementos físséis são: o urânio 233, o urânio 235 e o plutônio 239, e os férteis: o urânio 238 e o tório 232. (PERROTA, 1999)

2.2.1 Fissão e Reação em Cadeia

A fissão ocorre quando o núcleo de um elemento químico bombardeado por um nêutron, o absorve e passa para um estado de forte excitação, logo em seguida divide-se em duas partes maiores e alguns nêutrons juntamente com a liberação de energia, sofrendo uma cisão. Uma vez liberados, esses nêutrons podem se chocar com outros, repetindo o processo onde novos elementos são formados e mais energia é liberada, provocando uma sequência de fissões chamada reação em cadeia.

Elemento físsil é aquele com o qual é possível obter-se uma reação de fissão em cadeia autossustentável, isto é, uma vez iniciada é capaz de manter-se; já o elemento fértil é o combustível nuclear que pode transformar-se em físsil.

Figura 5 – Ilustração da reação em cadeia



Fonte: CNEN (2017)

A reação em cadeia pode ser descrita de forma quantitativa, considerando-se um fator de multiplicação de nêutrons – K, que é definido da seguinte forma:

$$K = \frac{\text{número de fissões de uma geração}}{\text{número de fissões da geração anterior}} \quad (1)$$

2.2.2 Seção de Choque

Um outro conceito importante é a “seção de choque”, relacionada à interação de um nêutron com o núcleo que se choca, o que é medido em termos da quantidade. A seção de choque total denota todos os tipos de interações possíveis, ou seja, nela estão inclusas a absorção e o espalhamento pelo núcleo. Logo, escreve-se:

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s \quad (2)$$

Onde:

σ_a - seção de choque de absorção

σ_s - seção de choque de espalhamento

Na seção de choque de absorção, estão inclusas as seções de captura radiativa, σ_γ , e de fissão, σ_f . Essa grandeza, usualmente chamada de seção de choque microscópica, possui dimensão de área e é medida em barns, onde $1b = 10^{-24} \text{ cm}^2$.

Há a seção de choque macroscópica, que é o resultado da grandeza anterior multiplicada pelo número de núcleos atômicos por unidade volume, tendo como unidade cm^{-1} :

$$\Sigma = N * \sigma \quad (3)$$

Onde:

Σ – seção de choque macroscópica

N – número de núcleos atômicos por unidade de volume

2.2.3 Reatividade e Criticalidade

Para um reator de dimensões finitas, ao invés do termo K, utiliza-se o termo de multiplicação efetiva - K_{eff} . E a partir desse, calcula-se a reatividade – ρ , que é um fator importante a ser considerado na análise de um reator. Essa condição depende da quantidade de material físsil, sua concentração, sua forma geométrica, e material não físsil nas suas vizinhanças. O controle da mesma aplica-se a todos os processos envolvidos no ciclo do combustível nuclear: enriquecimento do urânio, fabricação de elementos combustíveis, reprocessamento de combustíveis usados e transporte de material físsil. A reatividade e o fator de multiplicação efetiva relacionam-se da seguinte maneira:

$$\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}} \quad (4)$$

As reações de fissão então podem ser classificadas em:

- a) Crítica – reação em equilíbrio, na qual não há aumento da potência, da temperatura ou da população de nêutrons ($K_{eff} = 1$);
- b) Subcrítica - incapaz de se autossustentar, a população de nêutrons diminui com o tempo ($K_{eff} < 1$);
- c) Supercrítica - a taxa de fissão cresce, até ser controlada por algum mecanismo do reator levando-o ao equilíbrio ($K_{eff} > 1$).

No apêndice I do guia de segurança *Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants* da *International Atomic Energy Agency* (IAEA), demonstra-se como a reatividade é influenciada de acordo com o aumento de alguns parâmetros, conforme mostrado na tabela 2.

Tabela 2 – Coeficiente de Reatividade no Reator PWR

| Parâmetro | Reatividade |
|------------------------------------|--------------------|
| Temperatura do refrigerante | Diminui |
| Densidade do refrigerante | Aumenta |
| Temperatura do Moderador | Diminui |
| Temperatura do Combustível | Diminui |
| Potência | Diminui |

Fonte: IAEA (2005)

2.2.4 Controle da Reação

O controle da reação de fissão, em um reator do tipo PWR com combustível tipo vareta, é realizado por meio de barras de controle geralmente composta de uma liga de prata, índio e cádmio, que têm a propriedade de absorver nêutrons. Elas são introduzidas no elemento combustível através de tubos guias. Quando as barras de controle do núcleo estão totalmente retiradas do núcleo, o reator está trabalhando no máximo de sua capacidade para gerar energia térmica; e ao serem completamente inseridas dentro da estrutura do elemento combustível, o reator é desligado.

Também são utilizados no controle do reator venenos queimáveis que são materiais absorvedores de nêutrons, geralmente adicionados à pastilha combustível para um melhor controle da reatividade. Venenos queimáveis também são usados para outras finalidades: controle de excesso de reatividade no início de operação, prolongamento das etapas do ciclo, amenização de picos de potência, e possibilidade das barras de controle ficarem mais retiradas do núcleo. O veneno queimável pode ser misturado uniformemente com o combustível, ou colocado no reator em varetas separadas. As substâncias mais empregadas para esse fim são o óxido de boro e o óxido de gadolínio (PERROTA, 1999).

Para o controle de reatividade do núcleo, também podem ser utilizados absorvedores de nêutrons dissolvidos no refrigerante, causando um aumento na absorção de nêutrons. A sua utilização é homogênea em todo o núcleo do reator, não ocasionando distorções na distribuição de potência ou fluxo. A concentração do absorvedor solúvel varia ao longo da operação do reator, a fim de compensar a variação da reatividade. (PERROTA, 1999).

2.3 CICLO DO COMBUSTÍVEL

O urânio passa por várias etapas industriais, que vão desde a mineração até a geração de energia, o chamado ciclo do “combustível nuclear” (INB, 2017):

1ª etapa: Ocorre a mineração e o beneficiamento de urânio. Ao se descobrir a jazida é feita a avaliação econômica, e então é iniciada a mineração. O urânio é extraído do minério (figura 6), purificado e concentrado formando o conhecido *yellowcake*.

Figura 6 – Foto de minério de urânio



Fonte: Inovação tecnológica (2009)

2ª etapa: Realiza a conversão do *yellowcake* (figura 7) em hexafluoreto de urânio (UF_6), que é um sal com propriedade de passar para o estado gasoso em temperaturas da ordem de $60^\circ C$.

Figura 7 – Foto de *yellowcake*

Fonte: Inovação tecnológica (2009)

3ª etapa: Enriquecimento do urânio, o que é feito por meio do aumento da concentração do isótopo 235 do urânio como UF_6 na forma gasosa passando de 0,7% encontrado naturalmente (tabela 3) até o valor desejado.

Tabela 3 – Composição isotópica do urânio natural

| Nº de Massa | Composição Isotópica (%) | Massa Isotópica (u.m.a.) |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 234 | 0,0058 | 234,0409 |
| 235 | 0,720 | 235,0439 |
| 238 | 99,275 | 238,0508 |

Fonte: Adaptado de PERROTA (1999)

4ª etapa: Reconversão do UF_6 enriquecido, que é transformado em dióxido de urânio (UO_2) na forma de pó, e logo após é processado para a produção de pastilhas (figura 8).

Figura 8 – Pastilhas de urânio

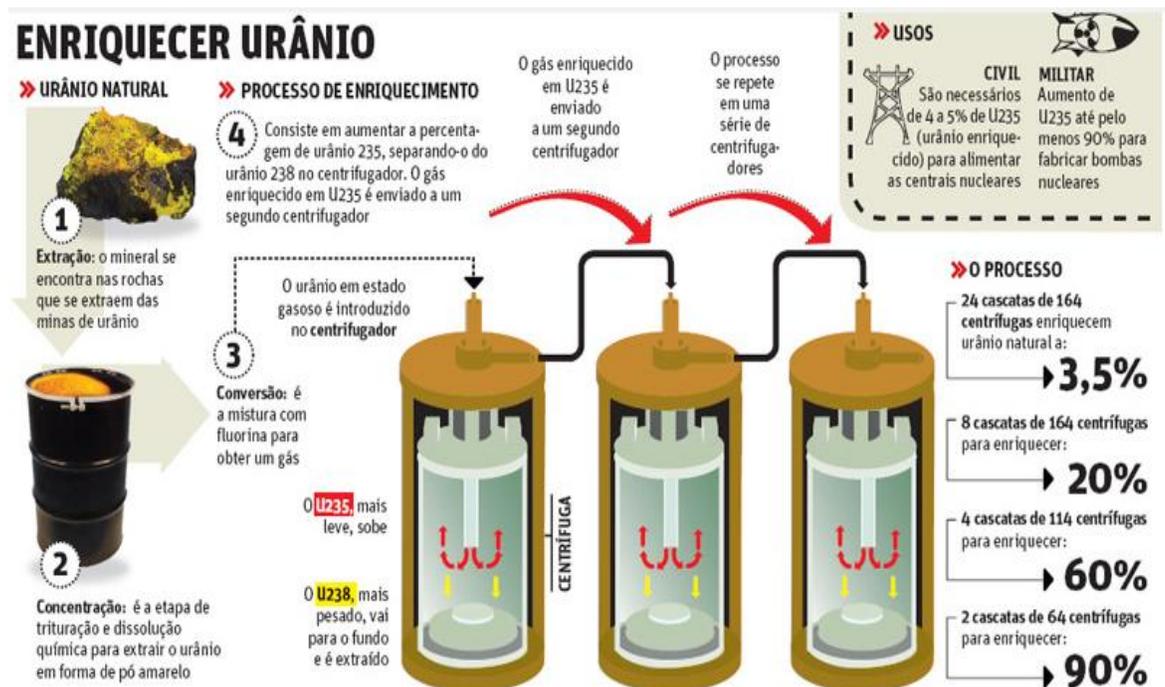


Fonte: Inovação tecnológica (2009)

5ª etapa: As pastilhas combustível são encapsuladas em tubos metálicos, formando um conjunto de varetas, e a estrutura é mantida rígida por grades espaçadoras, bocais e tubos guias, formando o elemento combustível.

A 3ª etapa, conforme indicado acima, consiste no enriquecimento de urânio, que se baseia na separação do isótopo urânio 235 do urânio 238 por meio do processo de ultracentrifugação, conforme ilustrado na figura 9.

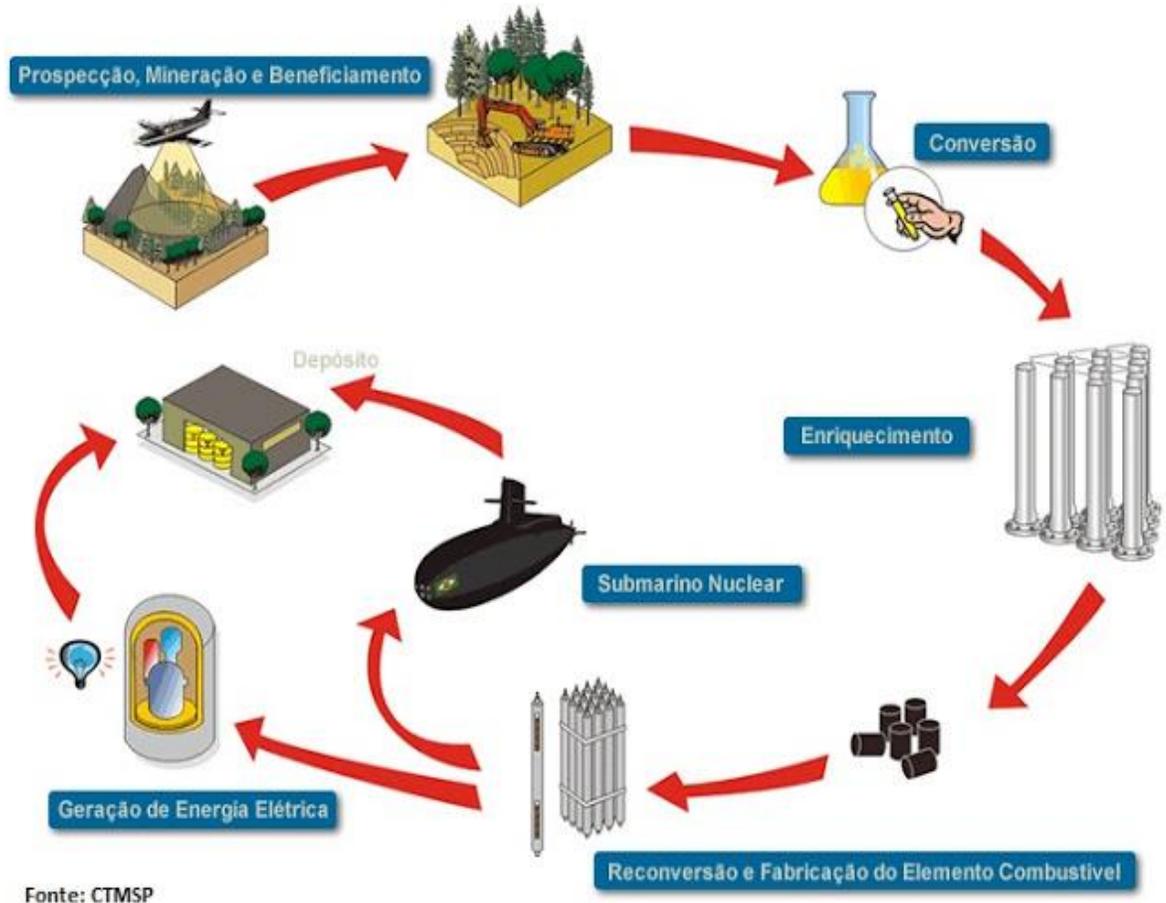
Figura 9 – Ilustração do processo de enriquecimento de urânio



Fonte: História-ancestral (2017)

Abaixo segue representado na figura 10 o esquema do ciclo do combustível nuclear, que será dominado por completo no Brasil com a conclusão do LABGENE e do SN-BR:

Figura 10 – Ilustração do ciclo do combustível nuclear



Fonte: CTMSP (2017)

Há também o combustível do tipo placa, que de acordo com (ANDRZEJEWSKI, 2005) fornece os seguintes benefícios quando aplicado em reatores de potência para aplicação naval:

Em relação ao desempenho da planta:

- Melhora na taxa de transferência térmica (maior relação área/volume para o combustível);
- Aumento na densidade de potência do combustível;

- c) Redução da temperatura de operação do composto combustível para um dado nível de potência, quando comparada com a geometria cilíndrica (vareta); e
- d) Utilização mais eficiente do volume ocupado pelo núcleo, permitindo a concepção de núcleos mais compactos (característica desejável seja do ponto de vista hidrodinâmico, quanto do arranjo dos sistemas no meio naval).

Em relação à segurança da planta:

- a) Maior capacidade de resistir a esforços/carregamentos dinâmicos externos, quando comparada com a configuração do tipo vareta; e
- b) Melhora no desempenho sob irradiação do combustível em função da redução da temperatura de operação do mesmo.

O Brasil é signatário do Tratado de Não-Proliferação de Armas Nucleares, podendo utilizar urânio enriquecido até 20%, pois acima disso já se considera que o urânio está altamente enriquecido. Nesse sentido, as atividades do programa nuclear do Brasil são fiscalizadas por três instituições: *International Atomic Energy Agency* (IAEA), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e *Brazilian-Argentine Agency for Accounting and Control of Nuclear Materials* (ABACC).

Levando-se em conta o limiar citado acima, estudos são voltados a fim de que haja o melhor aproveitamento dentro desta margem. Materiais que são utilizados como combustíveis e possuem maiores concentrações de urânio por unidade de volume, ao serem confeccionados com geometrias convenientes e materiais estruturais com baixa seção de choque de absorção de nêutrons, possibilitam a utilização de urânio levemente enriquecido no núcleo dos reatores com desempenho similar ao do altamente enriquecido.

2.4 Comparação Submarino Convencional e Nuclear

O submarino convencional é dotado de propulsão diesel-elétrica. Os motores movidos a diesel são responsáveis pelo carregamento, através de geradores elétricos, de um conjunto de baterias, as quais fornecem energia para um motor elétrico que é responsável pela propulsão (MACHADO, 2010). Para manter as baterias carregadas, é necessário se aproximar da superfície de forma periódica, ainda mergulhado, e içar o mastro do esnórquel. Dessa forma, é possível que os motores recebam ar atmosférico,

enquanto os gases resultantes da combustão são retirados. Esse procedimento é chamado de carga das baterias. O emprego desse tipo de submarino fica restrito a uma área de patrulha próxima a um ponto específico, numa área litorânea de pequena profundidade, e por um tempo limitado.

Já o submarino de propulsão nuclear, utiliza-se da energia resultante da fissão do núcleo do átomo de urânio, e pode ser empregado numa área bem mais extensa que o submarino convencional, não ficando limitado à patrulha de uma área específica, ele pode realizar busca e interceptação de alvos com sua alta velocidade (cerca de 30 nós) e autonomia.

Figura 11 – Ilustração de áreas de atuação do submarino convencional e nuclear na costa brasileira e parte da Amazônia Azul



Fonte: Adaptado de ARAGÃO (2013)

Na figura 11, as áreas em encarnado representam os locais de patrulha de submarinos convencionais, e as azuis as dos submarinos nucleares, e isso é importante pois “a defesa da integridade territorial, da soberania e dos interesses marítimos do Brasil requer a posse de submarinos nucleares e convencionais” (ARAGÃO, 2013).

Outras comparações de características consideradas importantes para os tipos de propulsão relacionados a submarinos são (MACHADO, 2010):

Submarinos Convencionais:

- 1- Possuem velocidade de cruzeiro de cerca de 5 nós, que é a máxima ideal e constante que a embarcação mantém, visando melhor economia sem forçar o motor, garantindo uma autonomia de cerca de 1 dia;
- 2- A velocidade máxima só é possível de ser mantida por curtos períodos de tempo: a velocidade máxima de corrida que é 10 nós, pode ser mantida por cerca de 8 horas, já a máxima para fuga de torpedo, que é de 21 nós, pode ser mantida por cerca de 1 hora;
- 3- Aumento das chances de detecção por inimigos ao içar o esnórquel por meio de satélites, aeronaves, navios e outros submarinos; e
- 4- Mobilidade restrita, pois necessita sempre economizar energia, a fim de evitar ao máximo o carregamento de baterias, o que expõe o navio. Atualmente leva-se cerca de 4 horas para uma carga completa.

Submarinos Nucleares:

- 1- A propulsão nuclear permite atingir a velocidade de cerca de 25 a 30 nós;
- 2- Pode manter a velocidade máxima por um período de tempo considerável se comparado com o submarino convencional;
- 3- Fica praticamente indetectável devido à ausência da necessidade de se aproximar da superfície para realizar esnórquel; e
- 4- Não possui mobilidade restrita, podendo se deslocar por longas distâncias em altas velocidades.

2.5 BASE NORMATIVA

Atualmente o órgão responsável pela elaboração das normas que regulamentam as atividades nucleares no Brasil é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), e ela também mantém atividades de pesquisa, orientação, planejamento e fiscalização, atuando em diversos setores envolvidos com a área nuclear.

No Brasil o processo de licenciamento também é realizado pela CNEN, porém na norma CNEN NE 1.04 - Licenciamento de Instalações Nucleares, o subitem 1.2.1.1 do campo de aplicação exclui o processo de licenciamento de meios de transporte ou propulsão: “1.2.1.1 Excluem-se aquelas atividades relacionadas com reatores nucleares utilizados como fonte de energia em meio de transporte, tanto para propulsão como para outros fins.” (CNEN, 2002). A intenção é que o licenciamento dos meios navais seja feito por meio da Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade (AgNSNQ), que foi oficialmente criada em 05 de fevereiro de 2018, pois a mesma “[...] funcionará como órgão regulador e fiscalizador das atividades da Marinha ligadas à segurança e ao licenciamento nucleares de meios navais e instalações terrestres.” (ELETRONUCLEAR, 2018)

No capítulo 6 da norma CNEN NE 1.27 Garantia da Qualidade na Aquisição, Projeto e Fabricação de Elementos Combustíveis, constam as seguintes considerações a serem feitas referentes ao controle de fabricação do combustível nuclear. Esses itens também são aplicáveis na fabricação de combustível do tipo placa, excetuando-se a letra e):

6.3.2 Deve ser dada consideração especial aos seguintes controles:

- a) Controle do Processo de Fabricação do Combustível: controle dos processos de conversão e de produção do combustível com relação a enriquecimento, homogeneidade, composição química e teor de impurezas, características físicas e dimensionais;
- b) Controle do Veneno: controle dos materiais de veneno com relação à sua homogeneidade e impurezas, e controle de fabricação das respectivas barras com relação às características físicas e dimensionais;
- c) Controle do Revestimento do Combustível: controle de fabricação do revestimento do combustível com relação à composição química, impurezas, propriedades mecânicas e metalúrgicas, integridade, dimensões e características de corrosão;

d) Controle dos Componentes Estruturais e Itens Associados: controle de fabricação de componentes com relação à composição química, impurezas, propriedades mecânicas e metalúrgicas, dimensões, integridade e características de corrosão;

e) Controle de Fabricação da Vareta: controle de fabricação da vareta com relação às características da coluna de pastilhas combustíveis, teor de hidrogênio, enriquecimento, integridade das soldas, pressão interna, análise do gás interno e dimensões;

f) Controle da Montagem do elemento combustível: controle durante a montagem do elemento combustível, com relação à identificação das varetas, posicionamento, dimensões, integridade das soldas, limpeza, condições superficiais, contaminação superficial por urânio. (CNEN, 1999)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos do presente trabalho basearam-se na pesquisa bibliográfica em literatura aberta e disponível, juntamente com a consulta a profissionais que atuam na área. Ressalta-se a dificuldade encontrada de se obter literatura referente ao assunto, tendo em vista que os países detentores dessas tecnologias costumam omitir as informações por se tratar de programa de Estado.

O desempenho do reator está intimamente ligado ao tipo de combustível utilizado, e a partir desse ponto serão estabelecidos alguns critérios para a avaliação dos mesmos em relação a vários requisitos considerados importantes na confecção de um combustível nuclear aplicado à propulsão naval.

A vida útil do elemento combustível varia de acordo com os materiais que são utilizados e a rotina de operação do reator, e o mesmo pode ser considerado um sistema de materiais interagindo, como:

- 1- Material combustível;
- 2- Material de revestimento; e
- 3- Material absorvedor.

Foi possível realizar o levantamento de dados importantes e pertinentes para a confecção do material combustível, do material de revestimento e do material absorvedor. Posteriormente foi apresentada a sua viabilidade ou não para a aplicação em um submarino nuclear.

3.1 CRITÉRIOS PARA DEFINIÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL

Para se definir o combustível a ser utilizado, deve-se considerar os seguintes fatores (PERROTA, 1999):

- a) Ser compatível com os materiais de revestimento, e refrigerante ou moderador;
- b) Ser estável mecânica e termicamente sob efeito da irradiação;
- c) Possuir boa resistência à corrosão e corrosão sob tensão;
- d) Ser resistente à fadiga;
- e) Ser de fácil fabricação e montagem;

- f) Ser de fácil reprocessamento, que no caso do Brasil, esse item não será observado, devido ao ciclo do combustível nuclear ser aberto, em outras palavras, o reprocessamento não faz atualmente parte do ciclo;
- g) Ter boa economia de nêutrons;
- h) Permitir longo tempo de operação no reator e alta queima; e
- i) Ser de baixo custo.

O anexo I da norma CNEN NE 1.27, estipula as seguintes propriedades, que requerem consideração particular, num projeto típico de combustível nuclear, referente à parte do combustível:

- a) Enriquecimento (composição isotópica): a porcentagem em peso de material físsil deve ser especificada.
- b) Impurezas: as substâncias que têm efeitos nocivos sobre o material combustível devem ser identificadas e os limites máximos estabelecidos.
- c) Estrutura: a homogeneidade, a densidade e a microestrutura devem ser especificadas.
- d) Dimensões: as dimensões devem ser definidas em detalhes suficientes para se obter os atributos desejados.
- e) Integridade: os limites para os quais a forma é mantida em relação a lascas, rebarbas, trincas, etc., devem ser definidos. (CNEN, 1999)

3.2 CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DO MATERIAL DE REVESTIMENTO

Praticamente, em todos os reatores, o combustível nuclear é coberto por um material de proteção ou revestimento, que possui as seguintes funções:

- a) Evitar a liberação de produtos de fissão radioativos da superfície do combustível para o refrigerante;
- b) Evitar a corrosão do combustível;
- c) Manter a forma original do combustível durante o tempo de vida da operação do elemento combustível;
- d) Permanecer intacto durante a operação do reator, e durante a retirada do elemento combustível; e
- e) Em reatores de potência com alta queima, deve resistir ao inchaço devido ao aumento da pressão causada pelo acúmulo dos gases de fissão.

Abaixo estão listadas o conjunto de características a serem consideradas na escolha do material de revestimento ideal:

- a) Possuir baixa seção de choque de absorção de nêutron, pois o material de revestimento diminui a reatividade no reator;
- b) Possuir alta condutividade térmica, para que a temperatura máxima da linha de centro do elemento combustível não diminua, a qual é necessária para a produzir a taxa de transferência de calor suficiente para atingir o nível de potência desejado;
- c) Possuir alto ponto de fusão, pois durante a operação normal, a temperatura média do combustível num reator PWR é de cerca de 1000°C e a do revestimento de cerca de 380°C. Caso contrário, em caso de acidente de perda de fluxo do refrigerante, o perfil de temperatura através do sistema revestimento-combustível do tipo placa se achataria num curto espaço de tempo, resultando na fusão do revestimento. Por isso a necessidade de se ter um alto ponto de fusão, pois assim aumenta-se a margem de segurança para a operação;
- d) O material deve possuir uma boa estabilidade à irradiação que induz ao inchaço e crescimento. A diferença entre inchaço e crescimento é que no primeiro ocorre alteração de forma e volume, enquanto que no segundo só há alterações na forma. As irradiações mais fracas já conseguem distorcer a forma dos elementos combustíveis;
- e) Possuir baixo coeficiente de expansão térmica pelos mesmos motivos citados anteriormente;
- f) Deve possuir alta resistência e ductilidade, propriedades conflitantes e de grande importância. A maioria dos materiais de alta resistência também são frágeis pois ficam sujeitos a uma grande falha quando sua elasticidade é excedida; e
- g) Deve ser resistente à corrosão a medida que é influenciado pelo contato com o material combustível e água do refrigerante a altas temperaturas. Alguns dos produtos de fissão mais voláteis como iodo e césio migram para as regiões mais frias do elemento combustível próximas ao revestimento, onde podem gerar rachaduras por estresse. Em reatores do tipo PWR, a concentração excessiva de hidrogênio na água do refrigerante pode reagir com alguns tipos de materiais componentes do revestimento e formar hidretos, que são materiais bem frágeis que podem ocasionar a falha de revestimento se formados em regiões de grande estresse.

O anexo I da norma CNEN NE 1.27 preconiza as seguintes propriedades que requerem consideração particular num projeto típico de combustível nuclear, referente ao revestimento:

- a) Composição química: os elementos contidos no material do revestimento devem ser especificados de acordo com as características da liga base desejada e com as características de absorção parasítica de nêutrons permitidas.
- b) Impurezas: as substâncias que têm efeitos nocivos sobre as propriedades do revestimento devem ser identificadas e os limites máximos estabelecidos.
- c) Resistência à corrosão: as características de corrosão sob condições operacionais e ambientais devem ser identificadas para o desempenho requerido.
- d) Propriedades mecânicas: a microestrutura e as propriedades a curto e longo prazo de material, para atender o desempenho desejado devem ser identificadas.
- e) Integridade: a condição da superfície e defeitos de material aceitáveis devem ser especificados para o revestimento.
- f) Dimensões: o diâmetro, espessura, retilinearidade e ovalização devem ser especificados. (CNEN, 1999)

3.3 CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DO MATERIAL ABSORVEDOR

Os materiais absorvedores devem atender aos seguintes requisitos:

- a) Controlar a reatividade no início do ciclo do reator;
- b) Fornecer a capacidade de modelamento da potência; e
- c) Melhorar a queima do núcleo.

O anexo I da norma CNEN NE 1.27 aponta para as seguintes propriedades que requerem consideração particular num projeto típico de combustível nuclear, referente ao veneno queimável:

- a) Composição química.
- b) Impurezas - as substâncias que têm efeitos nocivos sobre o material do veneno devem ser identificadas e os limites máximos estabelecidos.
- c) Homogeneidade.
- d) Densidade - a densidade deve ser especificada.
- e) Dimensões - as dimensões devem ser definidas em detalhes suficientes para se obter os atributos desejados. (CNEN, 1999)

4 RESULTADOS

A partir dos critérios apresentados, a revisão da literatura indicou que os materiais mais utilizados em combustíveis do tipo placa são: metálicos, dispersões e cerâmicos. Esses materiais apresentam as características adequadas para o uso em propulsão atendendo aos requisitos de resistência mecânica e densidade de potência.

Os combustíveis metálicos apresentam uma alta condutividade térmica, e a vantagem de possuir alta densidade de urânio, o que é uma característica importante, pois os combustíveis que possuem baixa densidade de urânio irão necessitar de níveis de enriquecimento maiores, a fim de garantir reações em cadeia autossustentadas.

Os combustíveis do tipo dispersão são caracterizados por uma disposição de partículas do combustível numa matriz metálica, devendo a mesma ser o mais uniforme possível para garantir bom desempenho sob irradiação. Eles se apresentam de duas formas: compostos combustíveis cerâmicos em matrizes metálicas, os *CERMETS*, e compostos combustíveis metálicos em matrizes metálicas (FROST, 1982).

Os combustíveis cerâmicos são caracterizados por seus altos pontos de fusão, permitindo que os mesmos possam ser utilizados em temperaturas mais elevadas, ocasionando uma maior eficiência térmica.

4.1 RESULTADOS PARA O MATERIAL COMBUSTÍVEL

As tabelas 4 e 6, apresentam os de materiais utilizados como combustíveis nucleares. A primeira (tabela 4) apresenta os compostos de urânio e a segunda (tabela 6) as ligas de urânio, bem como as propriedades consideradas importantes no desempenho desses materiais.

Tabela 4 – Propriedades de compostos de urânio utilizados como combustível nuclear

| Compostos de Urânio | Ponto de Fusão (°C) | Densidade (g/cm ³) | Densidade de Urânio (g/cm ³) | Condutividade Térmica (W/m-°K) | σ_a do Segundo Elemento (barns) |
|------------------------------------|---------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|--|
| U | 1133 | 18,9 | 18,9 | 35,0 (em 400°C) | - |
| UAl₂ | 1590 | 8,1 | 6,6 | - | 0,23 |
| UAl₃ | 1350 | 6,7 | 5,0 | - | 0,23 |
| UAl₄ | 730 | 6,0 | 4,1 | - | 0,23 |
| U₃Si | 930 | 15,6 | 14,91 | 20,0 (até 1000°C) | 0,16 |
| U₃Si₂ | 1665 | 12,2 | 11,3 | - | 0,16 |
| U₃O₈ | - | 8,4 | 7,1 | - | 0,00027 |
| UC | 2500 | 13,6 | 13,0 | 21,6 (até 1000°C) | 0,0032 |
| UC₂ | ~2500 | 12,9 | 10,6 | 35,0 (até 1000°C) | 0,0032 |
| UN | 2630 | 14,3 | 13,5 | 20,0 (até 1000°C) | 0,16 |
| UO₂ | 2875 | 10,96 | 9,7 | 3,5 (em 600°C) | 0,00027 |

Fonte: Adaptado de IPPOLITO Jr. (1990)

A seguir são discutidas as principais vantagens e desvantagens de cada um dos combustíveis apresentados.

4.1.1 Urânio Metálico (U)

Vantagem:

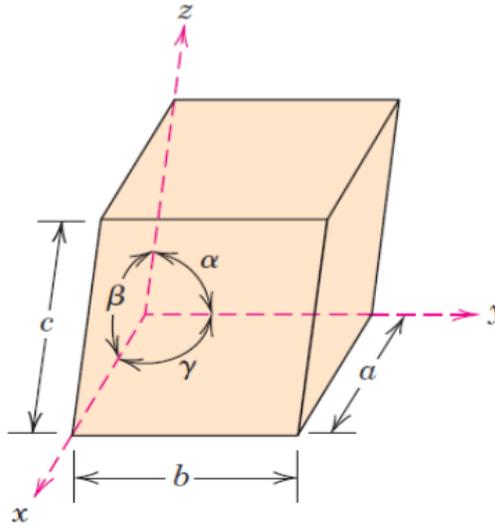
De acordo com a tabela 4, o urânio metálico seria o combustível ideal pois possui a maior densidade de massa de urânio e a sua alta condutividade térmica permite que a temperatura máxima do combustível seja da ordem de 500°C. Isso compensaria o ponto de fusão relativamente baixo, cerca de 1133°C.

Desvantagem:

Sua principal desvantagem é que há três estruturas cristalinas possíveis que são estáveis na faixa de temperatura de operação do combustível, tanto em operação normal como em condições de acidente ou transiente. O urânio metálico sofre mudanças de fase ao atingir 661°C, passando de urânio-alfa para urânio-beta, e a 769°C de urânio-beta para urânio-gama. O primeiro possui uma estrutura cristalina ortorrômbica, o segundo uma estrutura cristalina tetragonal, e o terceiro uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, conforme apresentado na tabela 5. Para um melhor entendimento dessas

estruturas, considera-se uma célula unitária como se fosse um paralelepípedo descrito em seis parâmetros chamados de “parâmetros de rede”, sendo a , b e c as arestas e α , β e γ os ângulos entre elas, conforme figura 12.

Figura 12 – Ilustração de uma célula unitária do urânio metálico



Fonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (2014)

Tabela 5 - Mudanças de Fase do Urânio Metálico

| Fase | Estabilidade | Estrutura Cristalina | Parâmetro de rede (Å) | Ângulo entre os eixos | Nº de átomos por molécula | Densidade teórica (g/cm ³) |
|-------------|----------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------------|--|
| Urânio-alfa | Até 661°C | Ortorrômbico | a = 2,852 b = 5,865 c = 4,91 | Todos iguais a 90° | 4 | 19,12 |
| Urânio-beta | Entre 661°C e 769°C | Tetragonal | a = 10,759 b = 5,656 | Todos iguais a 90° | 30 | 18,11 |
| Urânio-gama | Entre 769°C e 1133°C | Cúbica de corpo centrado | a = 3,52 | Todos iguais a 90° | 2 | 18,06 |

Fonte: Adaptado de YEMEL'YANOV e YEVSTYUKHIN (1969)

As mudanças de fase do U metálico ocasionam um aumento de volume que pode resultar na ruptura do revestimento, como por exemplo na mudança de fase de urânio-alfa para urânio-beta, a expansão volumétrica chega a aproximadamente 1% (LOPES, 2011). Assim, com a variação de temperatura do reator, numa transição de fase do urânio acompanhada por um aumento de volume do combustível, poderia ocorrer a ruptura do revestimento do combustível.

O urânio metálico oxida muito rápido em contato com água em altas temperaturas, e caso haja uma ruptura do revestimento ocorrerão mais oxidações e mais rupturas podendo assim destruir completamente o elemento combustível. Ele também apresenta um alto inchaço sob irradiação prolongada, devido ao acúmulo dos gases de fissão, o que limita muito a queima do combustível.

4.1.2 Dispersão de Urânio em Alumínio (UAl_2 , UAl_3 , UAl_4)

Os combustíveis do tipo dispersão são ligas de duas fases consistindo em um material composto de isótopos fissionáveis, que é uniformemente disperso em uma matriz de material não fissionável ou diluente. Esses combustíveis geralmente são preparados pela metalurgia do pó que consiste em processo em que pós finos da fase fissionável e não fissionável são misturados, compactados, sinterizados, e laminados para formar um material combustível contínuo.

Vantagens:

Esses combustíveis apresentam as seguintes vantagens:

- a) Danos ao material combustível devido a fragmentos de fissão ficam localizados na própria partícula de combustível e na região ao seu redor;
- b) A possibilidade de reação entre o combustível e o refrigerante é praticamente eliminada no caso de ruptura do revestimento, pois somente partículas na superfície do material combustível serão expostas ao refrigerante; e
- c) O fluxo de calor das partículas físseis passa por um meio não-físsil metálico altamente condutor, o que diminui a temperatura do combustível.

Desvantagens:

O combustível que possui compostos intermetálicos formados por urânio e alumínio, UAl_2 , UAl_3 e UAl_4 , pode ser dispersado em uma matriz contínua de alumínio,

para formar esse tipo de combustível, o qual tem sido muito utilizado em reatores de pesquisa que operam a temperaturas relativamente baixas, portanto não apropriado ao emprego em propulsão naval.

O alumínio metálico, não poderia ser utilizado como matriz do combustível ou material de revestimento em um reator do tipo PWR, pois seu ponto de fusão é de 600°C, que é facilmente ultrapassado em condições de transientes ou acidentes.

4.1.3 Dispersão de Siliceto de Urânio em Alumínio (U_3Si , U_3Si_2)

Os compostos U_3Si e U_3Si_2 são usados para produzir dispersões em matriz de alumínio.

Vantagens:

O composto de U_3Si_2 possui maior estabilidade sob irradiação que o U_3Si , além de um ponto de fusão relativamente alto (1665°C), comparado ao U_3Si (930°C). Combustíveis de dispersão de siliceto de urânio e alumínio possibilitam uma maior densidade de urânio comparados ao combustível de dispersão de urânio em alumínio.

Desvantagens:

A temperaturas de operação de 500°C ou mais elevadas, esse tipo de combustível apresenta inchaço excessivo sob irradiação. Ao atingir temperaturas superiores a 900°C, esse inchaço aumenta rapidamente.

4.1.4 Dispersão de Óxido de Urânio em Alumínio (U_3O_8)

Usado em reatores de pesquisa, o U_3O_8 é um combustível cerâmico que é disperso em alumínio e com revestimento também em alumínio.

Vantagem:

Apresenta uma seção de choque de absorção de nêutrons baixa (0,00027 barns).

Desvantagem:

A principal desvantagem é que o mesmo se reverte para UO_2 em temperaturas de aproximadamente 1200°C, efeito conhecido como reação térmica, que é uma reação em que o metal mais reativo "rouba" o oxigênio do outro óxido, com liberação de uma quantidade significativa de calor e diminuição do volume específico (IPPOLITO Jr., 1990; JOHNS, 2017).

4.1.5 Carboneto e Nitreto de Urânio (UC, UC₂, UN)

É possível a formação de dois carbonetos com o urânio, que são o UC e o UC₂.

Vantagens:

Ambos os carbonetos possuem altos pontos de fusão (~2500°C). O carboneto de urânio fornece uma densidade de urânio relativamente alta (13,0g/cm³ e 10,6g/cm³, respectivamente) com boa condutividade térmica (21,6W/m-°K e 35,0W/m-°K, respectivamente). Quando na forma de nitreto, UN, o combustível possui um ponto de fusão relativamente alto (2630°C) e boa condutividade térmica (20,0W/m-°K). Essas propriedades resultam em uma alta reatividade disponível e baixos gradientes térmicos no combustível.

Desvantagens:

Ambas as combinações, tanto com o carboneto quanto com o nitreto, exibem grande inchaço sob irradiação devido à retenção de gases de fissão, e isso ocorre em decorrência das altas densidades dificultando a difusão dos gases de fissão. Assim, a queima fica limitada de modo a evitar tensões sobre o revestimento.

4.1.6 Dióxido de Urânio (UO₂)

É um combustível cerâmico bastante usado atualmente.

Vantagens:

Oferece uma densidade de urânio relativamente alta, que combinada com a baixa seção de choque de absorção de nêutrons do oxigênio, permite o uso de urânio levemente enriquecido. Possui inércia química, que é a capacidade de não reagir com outras substâncias, e boa resistência à corrosão, quando exposto a altas pressões e temperaturas. Necessita de alta temperatura de operação máxima do combustível, devido à sua baixa condutividade térmica, possuindo também um alto ponto de fusão (2875°C).

Desvantagem:

Uma desvantagem da alta temperatura do combustível é que em condições de acidente, a temperatura do revestimento irá aumentar muito rápido. Logo, o tempo

disponível para o acionamento do mecanismo de refrigeração de emergência do núcleo é muito curto, comparado com temperaturas de operação do combustível mais baixas.

O zircaloy, que possui ponto de fusão de aproximadamente 1852°C, quando utilizado como material de revestimento possui um revés de reagir com a água a 1200°C liberando gás hidrogênio.

4.1.7 Liga de Metal Rica em Urânio

Propriedades do urânio metálico podem ser melhoradas com a adição de elementos não fissionáveis e em muito menor quantidade. Os materiais utilizados têm sido: molibdênio, nióbio, zircônio e alumínio, conforme apresentados na tabela 6. Esses combustíveis possuem alta condutividade térmica e alta densidade de urânio.

Tabela 6 – Propriedades das Ligas de Urânio

| Ligas de Urânio com: | Ponto de Fusão (°C) | Densidade (g/cm ³) | Densidade de Urânio (g/cm ³) | Condutividade Térmica (W/m-°K) | σ_a do Segundo Elemento (barns) | Σ_a do Segundo Elemento (cm ⁻¹) |
|----------------------------------|---------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|--|--|
| 10% em peso de molibdênio | 1150 | 17,33 | 15,67 | 29 | 2,5 | 0,257 |
| 10% em peso de nióbio | 1300 | 16,68 | 15,12 | - | 1,1 | 0,133 |
| 10% em peso de zircônio | 1135 | 15,76 | 14,25 | - | 0,18 | 0,027 |
| 75% em peso de alumínio | 1105 | 3,93 | 1,35 | - | 0,23 | 0,132 |

Fonte: Adaptado de IPPOLITO Jr. (1990)

Esse tipo de composição tem como objetivo:

- a) Estabilizar a fase gama do urânio metálico de 769°C, até a temperatura ambiente, em caso de resfriamento. Isso é feito por meio da adição de elementos de liga, com concentração de cerca de dez por cento em peso, de molibdênio, nióbio, ou zircônio que ajudam na supressão da formação das estruturas do urânio-beta e urânio-alfa à temperatura ambiente. Quando adicionados ao urânio fundido, a fase gama é mantida quando o urânio é resfriado até a temperatura ambiente. Dessa forma, consegue-se suprimir a

formação das fases alfa e beta, eliminando assim a mudança de fase que gera a alteração de volume, principalmente durante os transientes do reator;

- b) Elevar a temperatura de transformação das fases alfa e beta, em casos onde a fase gama não é estabilizada para a temperatura ambiente. Em ocasiões onde as temperaturas são relativamente baixas, abaixo da temperatura de transição para beta e para gama, o urânio-alfa pode ser usado, nos casos em que a temperatura de transformação para beta tenha sido aumentada pela adição de elementos de liga;
- c) Melhorar as propriedades mecânicas em função da temperatura, pois a adição de elementos de liga aumenta a elasticidade e, conseqüentemente, a resistência ao inchaço devido aos gases de fissão;
- d) Formar compostos de urânio com alto ponto de fusão, pois a adição de molibdênio, nióbio e zircônio aumenta o ponto de fusão do urânio metálico; e
- e) Melhorar a resistência à corrosão. Apesar de ser mais resistente que o urânio metálico em corrosão aquosa a altas temperaturas, ele se oxida rapidamente nessas condições, podendo ocorrer sérios problemas em caso de ruptura do revestimento. Portanto, em caso de ruptura do revestimento, considerando-se um reator do tipo PWR, esse tipo de combustível traria sérios problemas.

Molibdênio:

A liga de urânio-molibdênio foi testada em reatores rápidos, com temperaturas acima de 650°C, com concentrações de molibdênio a nove e dez por cento em peso, e esses elementos combustíveis ficaram limitados à taxa de queima de 2% da porcentagem atômica devido ao aumento excessivo de gases de fissão induzindo ao inchamento, o que ocorre geralmente em temperaturas acima de 400°C (IPPOLITO Jr., 1990).

Nióbio:

O nióbio, comparado ao molibdênio, possui uma seção de choque de absorção de nêutrons relativamente alta (1,1 barns), e também contribui na diminuição da reatividade do combustível abastecido com urânio levemente enriquecido.

Zircônio:

Possui seção de choque de absorção de nêutrons baixa (0,18 barns), alto ponto de fusão (1135°C), boa ductilidade e boa resistência à corrosão aquosa, porém apresenta problemas com inchaço quando submetido à irradiação intensa.

Alumínio:

Combustíveis de ligas de urânio-alumínio com revestimento de alumínio têm sido amplamente usados em reatores de pesquisa. A sua concentração deve ser menor que 35% em peso de urânio no material combustível, pois caso exceda esse valor fica muito difícil manter a homogeneidade do urânio no material combustível, o que é necessário para evitar pontos quentes.

Embora o combustível de liga de metal rico em urânio seja inadequado para o uso em elemento combustível tipo placa, eles podem ser usados em elemento combustível tipo vareta, onde há um espaço suficientemente grande entre a superfície externa do combustível e a superfície interna do revestimento, para acomodar o inchamento excessivo.

Durante a operação do reator, o inchaço devido aos gases de fissão chega a aumentar o volume original do combustível cerca de 20%, fazendo com que o mesmo entre em contato com o revestimento. Neste ponto, um número suficiente de bolhas de gás de fissão presentes nos contornos dos grãos de combustível, juntam-se para formar um caminho contínuo que permite a liberação de gás de fissão, evitando inchaço adicional.

Esses gases liberados, ficam acumulados em num espaço vazio na parte superior da vareta. Quanto maior o espaço entre o combustível e o revestimento, necessita-se de um meio altamente condutor, a fim de evitar temperaturas excessivas do combustível.

4.2 RESULTADOS PARA O MATERIAL DE REVESTIMENTO

Por meio do levantamento dos dados a respeito dos materiais listados na tabela 7, obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 7 – Materiais para o Revestimento do Combustível

| Material | Peso Atômico | Densidade (g/cm ³) | Condutividade Térmica (W/m-°K) | Ponto de Fusão (°C) | σ_a (barns) | Σ_a (cm ⁻¹) |
|----------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|
| Magnésio | 24,3 | 1,74 | 149 | 648,8 | 0,06 | 2,59 |
| Alumínio | 27,0 | 2,7 | 231 | 660,4 | 0,23 | 13,8 |
| Aço Inox | 55,3 | 7,92 | 55 | ~1535 | 3,0 | 258,0 |
| Zircônio | 91,2 | 6,44 | 21 | ~1852 | 0,18 | 9,8 |
| Zircaloy | 91,2 | 6,50 | 21 | ~1850 | 0,26 | 10,7 |
| Estanho | 118,7 | 7,31 | 66,6 | 232 | - | - |
| Ferro | 55,8 | 7,86 | 55 | 1535 | 2,6 | 221,0 |
| Cromo | 51,9 | 7,14 | 93,7 | 1907 | - | - |
| Níquel | 58,7 | 8,9 | 66 | 1453 | 4,6 | 422,0 |

Fonte: Adaptado de IPPOLITO Jr. (1990)

Magnésio:

Apesar de possuir uma baixa seção de choque de absorção de nêutrons (0,06 barns), ele é muito reativo com a água em altas temperaturas e altas pressões, e também possui um baixo ponto de fusão (648,8°C), que o torna inviável para utilização em reatores do tipo PWR.

Alumínio:

Possui uma baixa seção de choque de absorção de nêutron (0,23 barns), porém possui um baixo ponto de fusão (660°C) não podendo ser aplicado em reatores do tipo PWR.

Aço inox:

Possui uma resistência muito boa até 600°C, incluindo a resistência à corrosão e é dúctil, porém a desvantagem consiste em possuir uma alta seção de choque de absorção de nêutrons (3,0 barns).

Zircônio:

Possui a menor seção de choque (0,18 barns), porém apresenta as seguintes desvantagens:

- a) Não possui uma boa resistência à corrosão, pois ocorre a formação de películas sobre a superfície do revestimento que se desprendem facilmente resultando em corrosão contínua difícil de ser controlada. Esse processo se acelera a temperaturas acima de 300°C;

- b) Não possui uma boa resistência a altas temperaturas. Para que seja aumentada a resistência, seria necessário aumentar a espessura do revestimento o que resultaria em um aumento da perda de nêutrons por absorção; e
- c) É mais suscetível à absorção de hidrogênio, que gera o hidreto de zircônio, e isso aumenta a sua fragilidade. Caso ocorra em áreas de alta pressão e estresse pode resultar em falha do revestimento.

Zircaloy:

É uma liga de zircônio com uma boa seção de choque de absorção de nêutron (0,26 barns), em que há aproximadamente 98% de zircônio, com adição de outros materiais como estanho, ferro, cromo e níquel.

O estanho melhora a aderência da película formada devido à oxidação, que atua como camada protetora a fim de retardar a corrosão adicional, porém ainda ocorre um pouco de corrosão. Ao adicionar ferro, cromo e níquel, há uma melhora significativa do comportamento geral de corrosão do zircônio.

Essa liga possui uma boa seção de choque de absorção de nêutron (0,26 barns), e melhor combinação de propriedades mecânicas. Possui uma boa resistência a altas temperaturas; é dúctil; possui uma condutividade térmica relativamente alta (21W-m/°K) e um alto ponto de fusão (~1850°C). Porém, a sua temperatura num reator do tipo PWR deve ser inferior a 1200°C, pois nela ocorre uma reação exotérmica com liberação de hidrogênio.

4.3 RESULTADOS PARA O MATERIAL ABSORVEDOR

Para o material de controle, foi feito o levantamento dos materiais de acordo com a tabela 8:

Tabela 8 – Materiais de Controle

| Composto | Σ_a (cm^{-1}) |
|------------------------------------|--|
| B₄C | 759 |
| B₂O₃ | 759 |
| H₃BO₃ | 759 |
| Gd₂O₃ | 49000 |
| Ag-In-Cd | 63,6 – 193,5 - 2450 |

Fonte: Adaptado de IPPOLITO Jr. (1990)

Dos materiais listados na tabela 8, o óxido de gadolínio apresentou maior seção de choque de absorção de nêutron ($\Sigma_a = 49000 \text{ cm}^{-1}$). Ele é um material cerâmico que pode ser misturado numa solução sólida com o combustível cerâmico UO_2 onde se torna parte integrante do elemento combustível, eliminando assim a necessidade de algum outro absorvedor ou vareta de controle, que até o momento será o carbeto de boro (B_4C) e a Liga de Prata, Índio e Cádmio (Ag-In-Cd), respectivamente.

5 CONCLUSÕES

5.1 PARA O MATERIAL COMBUSTÍVEL

O urânio metálico (U) não pode ser considerado um bom combustível para o reator de um submarino nuclear, a operação do submarino requer altas variações de potência, o que leva a variações de volume, podendo ocasionar ruptura do revestimento.

A dispersão de aluminato de urânio em alumínio (UAl_2 , UAl_3 , UAl_4), por possuir baixo ponto de fusão, geralmente é utilizada em reatores de pesquisa, com uma média de densidade de urânio insuficiente para atingir a reatividade necessária em combustíveis com leve enriquecimento de urânio.

A dispersão de siliceto de urânio em alumínio (U_3Si , U_3Si_2) apresenta grande e rápido inchaço sob irradiação, o que muito é agravado em temperaturas acima de $900^\circ C$, o que ocorre facilmente num acidente de perda de refrigerante – *Loss Of Coolant Accident* (LOCA), tornando-o inviável para um submarino nuclear.

A dispersão óxido de urânio em alumínio (U_3O_8) apresenta uma conversão para UO_2 em altas temperaturas, que é acompanhada por um decréscimo relativamente alto do volume específico, o que pode ocasionar fratura, o que o torna incapaz para utilização em reatores do tipo PWR.

Os combustíveis de carboneto e nitreto de urânio (UC, UC_2 , UN) são reativos quimicamente com a água e, em caso de ruptura do revestimento, resultam na produção de gases oxidantes que os tornam impróprios para o uso em reatores do tipo PWR.

Em relação às ligas de metal ricas em urânio, a desvantagem em usar liga com molibdênio é que ele possui uma seção de choque de absorção de nêutron relativamente alta (2,5 barns), que pode diminuir de forma considerável a reatividade do combustível abastecido com urânio levemente enriquecido, tornando-o inviável para utilização em submarino nuclear. Em baixas temperaturas, as ligas urânio-molibdênio são mais resistentes ao inchaço que as de urânio-nióbio e urânio-zircônio. Nessas ligas, assim como nas de urânio-molibdênio, o inchaço devido aos gases de fissão a queimas de 2 a 4% do percentual atômico são indesejáveis em temperaturas acima de $400^\circ C$, o que faz com que esse tipo de combustível seja incapaz de alcançar os objetivos de um reator para submarino nuclear que opera acima dessa temperatura. A liga com alumínio na confecção do combustível resulta numa densidade de urânio muito baixa ($1,35 \text{ g/cm}^3$)

para fornecer a reatividade necessária para o reator de um submarino. Resumindo, nenhuma dessas ligas estariam aptas para utilização no submarino.

O dióxido de urânio (UO_2) é considerado o combustível mais adequado para o uso em submarino nuclear utilizando reator do tipo PWR, apesar das limitações devido à baixa condutividade térmica e ao inchaço devido aos gases de fissão, ele suporta relativamente bem a irradiação intensa. No caso do Brasil, ele seria vantajoso pois o país já domina o ciclo de produção desse combustível, sendo necessário uma variação da forma geométrica de pastilha para placa.

5.2 PARA O MATERIAL DE REVESTIMENTO E ABSORVEDOR

Referente ao material de revestimento, o zircaloy foi o que apresentou a menor seção de choque de absorção de nêutron (0,26 barns), e melhor combinação de propriedades mecânicas, como uma alta condutividade térmica ($21\text{W}\cdot\text{m}/^\circ\text{K}$) e um alto ponto de fusão ($\sim 1850^\circ\text{C}$). Ele possui uma boa resistência a altas temperaturas e é dúctil também. Porém, até o momento será utilizado o aço inox devido à dificuldade de aquisição do zircaloy no exterior, o aço inox apresenta uma boa resistência mecânica que é um fator importante a ser considerado numa planta de propulsão naval.

Para ao material absorvedor, o óxido de gadolínio (Gd_2O_3) apresentou maior seção de choque de absorção de nêutrons ($\Sigma_a = 49000 \text{ cm}^{-1}$). O mesmo precisa ser testado e validado para que possa ser utilizado como material absorvedor, pois já chegou a ser fabricado pelo Laboratório de Materiais (LABMAT) e fornecido para as Indústrias Nucleares Brasileiras (INB). O material absorvedor até o momento será carbeto de boro (B_4C), e para as varetas de controle a Liga de Prata, Índio e Cádmiio (Ag-In-Cd).

Como trabalhos futuros, sugere-se elaborar um estudo que mostre a diferença entre utilizar combustíveis em formato placa e vareta aplicáveis em reatores do tipo PWR.

REFERÊNCIAS

- ANDRZEJEWSKI, C. de S.; **AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE COMBUSTÍVEL TIPO PLACA PARA REATORES DE PEQUENO PORTE**. 2005. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) - Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Reatores, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- BELL, J.; ROSKOFF, N.; HAGHIGHAT, A. **Investigation into the Unintended Consequences of Converting the U.S. Nuclear Naval Fleet from Highly Enriched Uranium (HEU) to Low Enriched Uranium (LEU)**. Arlington: Virginia Tech Nuclear Science and Engineering Lab (NSEL), 2014.
- CARVALHO, J. F. de. **O espaço da energia nuclear no Brasil**. Estud. av., São Paulo, v. 26, n. 74, p. 293-308, 2012. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100021&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 21 jan. 2018.
- CNEN. Norma CNEN NE 1.27. **Garantia da Qualidade na Aquisição, Projeto e Fabricação de Elementos Combustíveis**. set de 1999.
- CNEN. Norma CNEN NE 1.04. **Licenciamento de Instalações Nucleares**. fev de 2002.
- DEPARTMENT OF THE NAVY OF THE UNITED STATES OF AMERICA. **The united states naval nuclear propulsion program**. Washington, 2013.
- ELETRONUCLEAR. **Marinha cria Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade**, 09 fev. 2018. Disponível em: <www.eletronuclear.gov.br/Noticias/NoticiaDetalhes.aspx?NoticialD=2037>. Acesso em: 30 abr. 2018.
- ELETRONUCLEAR. **Defesa em profundidade**. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Seguranccedila/Defesaemprofundidade.aspx>> . Acesso em: 30 abr. 2018.
- FROST, B. R. T. **Nuclear fuels elements - Design, fabrication and performance**, 1a Edição, Pergamon Press Inc., Oxford, GB, p. 1-49, 1982.
- História-ancestral. **Enriquecimento do urânio**. 2017. Disponível em: <<http://historia-ancestral.blogspot.com.br/2012/12/enriquecimento-do-uranio.html>>. Acesso em: 20 jan. 2018.
- IAEA. Safety Guide No. NS-G-1.12. **Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants**. Vienna, 2005.

INB. **Ciclo do Combustível Nuclear**. 2017. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/pt-br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Produção de urânio no Brasil**. 2009. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=producao-uranio-no-brasil#.WpOEAkxFzcc>> Acesso em: 21 fev. 2018

IPPOLITO Jr., T. D. **Effects of Variation of Uranium Enrichment on Nuclear Submarine Reactor Design**. Massachusetts: Massachusetts institute of technology, 1990.

JOHNS, C. **What is a thermite reaction?** 5 jul. 2017. Disponível em: <<https://www.quora.com/What-is-a-thermite-reaction>>. Acesso em: 03 mai. 2018

LOPES, D. A. **Caracterização Microestrutural De Ligas Do Sistema U-Nb-Zr, No Canto Rico Em Urânio**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

MACHADO, R. L. **O submarino nuclear brasileiro**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fábrica de Livros, 2010.

MARINHA DO BRASIL. **Programa Nuclear da Marinha**. 2017. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/ctmsp/programa-nuclear-da-marinha>>. Acesso em: 30 out. 2017.

PODER NAVAL. **Operação ATLANTIS II: Transferência de óleo no mar e de carga leve**. 6 set. 2013. Disponível em: <<http://www.naval.com.br/blog/2013/09/06/operacao-atlantis-ii-transferencia-de-oleo-no-mar-e-de-carga-leve/>>. Acesso em: 28 abr. 2018

PODER NAVAL. **Submarinos-convencionais-e-nucleares-de-ataque**. 2018. Disponível em: <<http://www.naval.com.br/blog/2013/05/25/submarinos-convencionais-e-nucleares-de-ataque/>> . Acesso em: 23 fev. 2018.

O EXPLORADOR. **Rickover, pai da marinha nuclear**. 2017. Disponível em: <<http://www.oexplorador.com.br/hyman-rickover/>>. Acesso em: 30 out. 2017.

PINTO, P. L. **O Emprego do Poder Naval em Tempo de Paz**. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação Geral da Marinha, 1989.

SILVA, M. M. F. F. **SUBMARINO NUCLEAR DE ATAQUE: Nova Dimensão Estratégica para a Defesa Nacional**. Rio de Janeiro: Escola Superior de Guerra, 2012.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **ESTRUTURA DOS SÓLIDOS CRISTALINOS**. 2º semestre de 2014. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/214452/mod_resource/content/1/PMT3100_Aula02_2014_2.pdf> Acesso em: 25 abr. 2018

YEMELYANOV V. S., YEVSTYUKHIN, A. I. **The metallurgy of nuclear fuel**. Editora: Pergamon Press, London, 1969.