

MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE-EFOMM

ITALO MORENO BARROS MATHEUS

Energia nuclear: Reator e Usina nuclear

RIO DE JANEIRO

2018

ITALO MORENO BARROS MATHEUS

Energia nuclear: Reator e Usina nuclear

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas, especializado em Máquinas Marítimas, do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador(a): Prof.^a Hermann

RIO DE JANEIRO
2018
ITALO MORENO BARROS MATHEUS

Energia nuclear: Reator e Usina nuclear

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Formação de Oficiais de Máquinas como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas, especializado em Máquinas Marítimas ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador(a): titulação e nome completo

Assinatura do(a) Orientador(a)

Assinatura do(a) Aluno(a)

Assinatura do(a) Aluno(a)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e amigos.

RESUMO

O objetivo deste estudo é analisar o reator nuclear e a usina nuclear evidenciando como estes são importantes para as embarcações modernas. A fim de entender as qualidades desta energia precisamos saber um pouco da história e sua criação, o processo do reator e como ele transforma energia nuclear em elétrica e suas vantagens em relação a outras energias. As áreas a serem focadas neste trabalho serão o reator em si, a usina nuclear, submarino, porta avião e navios de superfície que utilizam desta energia, alguns acidentes e evidenciar o problema do lixo radioativo. A energia nuclear ainda não é aplicada na área da marinha mercante, dentro deste estudo descobriremos que a propulsão elétrica tem suas desvantagens em relação a nuclear, tanto em espaço como em consumo de combustível. Não se sabe ao certo sobre o receio que se tem sobre o uso desta fonte de energia, pode ser que seja o medo e a discriminação que a população tenha por causa das bombas atômicas e seu histórico negativo de como foi utilizada, outro motivo talvez seja sobre a grande perda financeira que as grandes empresas que fornecem combustível sofreriam, logo, a pressão destas industrias atrapalharia o uso da energia nuclear a bordo de navios mercantes.

Palavras-chave: Reator nuclear, Energia nuclear, Marinha Mercante

ABSTRACT

The main purpose of this study is to analyze the nuclear reactor and the nuclear plant pointing out how these are important to new vessels. Willing to understand the qualities of this power we need to know a little bit about the history and its creation, the process of the reactor and how it transforms nuclear power into electrical and its advantages over other energies. The focus of this work will be the reactor itself, the nuclear plant, submarine, aircraft carrier and surface ships that use this kind of power, some accidents and the problem with the radioactive trash. The nuclear power is not available in the merchant marine in this abstract we will see that the electrical propulsion has its disadvantages both in space to storage and consume of fuel. We don't know it why this power is not used now days. Could be that the use of this power frightens the population, but this fear is due to the preconception that this energy can only be used to create nuclear bombs, other point could be that the big companies that provide fuel would stop its production and stop selling and even going bankrupt, so the pressure made by these industries get in the way of development of the nuclear energy in merchant vessels.

Keywords: Nuclear reactor, Nuclear energy, Merchant marine

LISTA DE ILUSTRAÇÕES/FIGURAS

Figura 1:	Reação em cadeia e fissão do Urânio	17
Figura 2:	Funcionamento de um Reator nuclear	19
Figura 3:	USS Nautilus	22
Figura 4:	Animais que sofreram mutações em Chernobyl	25
Figura 5:	Reciclagem de combustível nuclear	30
Figura 6:	Potência x armazenamento	31
Figura 7:	Custo da Geração de energia	32
Figura 8:	Turbina de Angra 2	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
EFOMM	Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica

LISTA DE SÍMBOLOS

Γ	Raio Gama
$^{-1}\beta$	Partícula Beta
$^{92}\text{U}^{235}$	Urânio 235
$^{56}\text{Ba}^{142}$	Bário
$^{36}\text{Kr}^{91}$	Criptônio
D_2O	Água pesada
GBq/m^3	Giga becquerel por metro cúbico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	ENERGIA NUCLEAR: USINA E REATOR NUCLEAR	12
2.1	Resumo histórico	12
2.2	Primeiro reator e usina nuclear	13
2.3	Funcionamento de uma usina nuclear	16
3	RETORES EM EMCARCAÇÕES E ACIDENTES	19
3.1	NS 50 Let Podbody: Navio movido a energia nuclear	19
3.2	Reator submarino Nautilus	21
3.3	Acidentes nucleares	23
4	USINA DE REPROCESSAMENTO	26
4.1	Lixo radioativo	26
4.2	Usina de reprocessamento	28
5	SITUAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL	31
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

Este estudo tem por objetivo analisar a energia nuclear e sua utilização em embarcações, verificando também, usinas e reatores nucleares em terra. Abordam-se a trajetória histórica desta energia até sua utilização em submarinos, porta avião e navios de superfície e como foi importante ao longo dos anos o desenvolvimento de tal tecnologia.

Com o avanço tecnológico desenvolveram-se inúmeras embarcações que utilizam o combustível nuclear já que em águas glaciais era impossível permanecer navegando por muito tempo sem reabastecer, logo, a única solução era desenvolver uma fonte de energia que durasse tempo necessário para se manter navegando mesmo em áreas com navegação restringidas pelo gelo. O reator nuclear possui uma vida útil de aproximadamente 200 mil horas dando à embarcação a possibilidade de uma longa permanência em áreas glaciais.

Sobretudo, ainda se tem a necessidade de explanar sobre os perigos causados pela exposição ao material radioativo. Existem protocolos de como se manusear este tipo de material para que não haja perigo para as pessoas quanto para o meio ambiente. Acidentes marítimos que envolvem a liberação de substâncias tóxicas ao mar afetam diretamente o ecossistema global, porém, estes acidentes aconteceram em tempos onde não se tinha muito conhecimento sobre como lidar com a energia nuclear.

Tendo em vista os assuntos citados anteriormente é notório perceber que o espaço para o desenvolvimento e aprimoramento dessa “nova” tecnologia é extenso principalmente na área das grandes embarcações que superaram barreiras que antes não eram transpostas por falta de tecnologia, logo, é essencial este estudo para o aprimoramento da Marinha Mercante.

2 REATOR NUCLEAR: USINA NUCLEAR E REATOR PWR

2.1 Resumo histórico

Segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em sua apostila “A História da energia nuclear” diz-se que a teoria atomística foi moldada no quinto século antes de Cristo pelos filósofos gregos Leucipo e Demócrito.

Em sua teoria, Demócrito afirma que o Universo tem uma constituição elementar única que é o átomo, uma partícula invisível e indivisível. A partir daí a pesquisa sobre o átomo só foi retomada no início do Século XIX por John Dalton em 1803 e foi fundamentada por três postulados:

- I) Os elementos químicos consistem de partículas discretas de matéria, os átomos, que não podem ser subdivididos por qualquer processo químico conhecido e que preservam a sua individualidade nas reações químicas.
- II) Todos os átomos do mesmo elemento são idênticos em todos os aspectos, particularmente em seus pesos; elementos diferentes têm átomos diferentes em peso. Cada elemento é caracterizado pelo peso dos seus átomos.
- III) Os compostos químicos são formados pela união de átomos de diferentes elementos em proporções numéricas simples, isto é: 1:1, 1:2, 2:1, 2:3, etc.

Mas o primeiro modelo atômico mesmo foi somente apresentado por J. J. Thomson, o modelo conhecido mundialmente como o “pudim de ameixas”. O átomo é composto por um núcleo positivo (pudim) e neste núcleo ficam incrustados os elétrons(ameixas). Depois de falecer em 1940 ele foi substituído pelo seu assistente Rutherford. Ao longo dos anos decorrentes foram-se desenvolvendo diversas teorias sobre a física atômica, como as descobertas do RAIOS X, Radioatividade, Polônio, rádio, Raios alfa beta e gama e outros.

Entre os anos de 1913 e 1915, Niels Bohr, a fim de tentar resolver o problema da instabilidade do átomo de Rutherford, estabeleceu uma teoria baseada em hipóteses quânticas no movimento dos elétrons. Os postulados de Bohr são fundamentados pelos seguintes enunciados:

- I) Um sistema atômico possui um número de estados (órbitas) nos quais os

elétrons não emitem radiação. São chamados de estados estacionários do sistema, isto é, a energia permanece constante. O primeiro postulado contraria as leis da eletrodinâmica clássica.

II) Qualquer emissão ou absorção de radiação deve corresponder à uma transição entre dois estados estacionários. A variação de energia entre dois estados estacionários é um número inteiro de quanta.

III) O momento angular do elétron em órbita é um número inteiro de h (constante de Planck) dividido por 2π .

Com o desenvolvimento e a formatação de diversas teorias e postulados chegamos até o descobrimento do MESON 11, nos Estados Unidos, no grupo que pesquisava estava o brasileiro Cezar Lattes dando assim motivando a criação do existente hoje Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

2.2 Primeiro reator e usina nuclear

Um Grande marco para o início das pesquisas para a construção do primeiro reator nuclear foi a carta de Albert Einstein para o presidente Franklin Delano Roosevelt mandada em 2 de agosto de 1939 exposta a seguir em seu todo:

ALBERT EINSTEIN
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island

2 de Agosto de 1939

F.D. Roosevelt
Presidente dos Estados Unidos
Casa Branca
Washington, D.C.

Senhor:

Alguns trabalhos recentes de E. Fermi e L. Szilard, que me foram comunicados em manuscrito, levaram-me a crer que o elemento urânio possa ser transformado em uma nova e importante fonte de

energia em um futuro próximo. Certos aspectos da situação que se criou parecem exigir atenção e, se necessário, rápida ação por parte da Administração. Creio, portanto, que é meu dever trazer a sua atenção para os seguintes fatos e recomendações:

No decorrer dos últimos quatro meses, foi provado - através do trabalho de Joliot na França, bem como de Fermi e Szilard na América - que é possível a criação de uma reação nuclear em cadeia em uma grande massa de urânio, através da qual vastas quantidades de energia e grandes quantidades de novos elementos semelhantes ao rádio são gerados. Agora, parece quase certo que isso possa ser conseguido em um futuro próximo.

Esse novo fenômeno levaria também à construção de bombas e é concebível - embora não tão certamente - que bombas extremamente poderosas de um novo tipo possam ser construídas. Uma única bomba deste tipo, carregada por um barco e explodida em um porto, pode muito bem destruir todo o porto, juntamente com parte do território circundante. Contudo, tais bombas podem muito bem revelar-se demasiado pesadas para o transporte por via aérea.

Os Estados Unidos têm apenas minérios de urânio de baixa qualidade e em quantidades moderadas. Há algumas boas reservas no Canadá e na ex-Tchecoslováquia, mas a grande fonte de urânio está no Congo Belga.

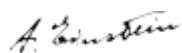
Perante a situação, o senhor pode pensar que é desejável ter mais contato permanente entre a Administração e o grupo de físicos que trabalham em reações em cadeia nos Estados Unidos. Uma forma possível de alcançar este objetivo pode ser o senhor confiar esta tarefa a alguém de sua confiança que poderia, quem sabe, atuar em condição extraoficial. Sua tarefa pode compreender:

a) abordar aos Departamentos Governamentais, mantê-los informados sobre o desenvolvimento e apresentar recomendações para a ação do Governo, dando especial atenção ao problema de garantir fornecimento de minério de urânio para os Estados Unidos;

b) acelerar o trabalho experimental, que está atualmente sendo feito dentro dos limites dos orçamentos dos laboratórios das universidades, fornecendo fundos, caso sejam necessários, pelo contato com pessoas privadas dispostas a contribuir para esta causa, talvez, inclusive, buscando a cooperação de laboratórios industriais que têm o equipamento necessário.

Eu entendo que a Alemanha realmente parou a venda de urânio das minas da Tchecoslováquia que ela assumiu. Talvez se compreenda por que haja tomado essa ação rápida, pelo fato do filho do Subsecretário de Estado Alemão, von Weizsäcker, ser ligado ao Kaiser-Wilhelm-Institut, em Berlim, onde alguns dos trabalhos americanos sobre o urânio estão agora sendo repetidos.

Atenciosamente,



(Albert Einstein)

Uma real audiência fora conseguida somente em 11 de outubro. Após ler a carta o Presidente Roosevelt nomeou o Dr. Lyman J. Briggs para ser o presidente deste movimento de desenvolvimento da pesquisa sobre o urânio, o objetivo desta comissão era mobilizar a ciência para atividades bélicas. Um grupo de europeus e americanos trabalham juntos para entender a ideia da solução da Reação em Cadeia. Em 1941 sinais da participação dos físicos americanos no projeto nuclear se tornou mais evidente. Os físicos Compton e Lawrence passaram a ter mais participação nos trabalhos pois achavam que as pesquisas estavam se desenvolvendo muito lentamente, sendo assim, segundo a apostila “A história da energia nuclear” da CNEN, a situação nos primeiros dias de dezembro de 1941 era:

I) não havia ainda sido realizada uma Reação em Cadeia;

II) era mínima a produção de Urânio-235 necessário à preparação de um artefato nuclear (é grande a seção de choque desse isótopo do urânio para nêutrons térmicos). Era ponto pacífico entre cientistas que o urânio natural não poderia ser utilizado como explosivo. Foi um triunfo da Tecnologia e da Ciência americana a separação do urânio-235 em larga escala. Devemos destacar os nomes de Urey, Dunning, Boothm Cohenm e Lawrence e das grandes indústrias Dupont, Union Carbide e Eastman nesta pesquisa. Fermi não participou desses trabalhos;

III) só haviam sido preparados alguns microgramas de Plutônio-239 com o Ciclotron de Berkeley. Os Físicos e Químicos vendo a produção insuficiente de Plutônio-239, sugeriram a construção de um sistema (Reator Nuclear) que gerasse maior quantidade de Plutônio. Os resultados foram comunicados por Seaborg a Briggs, em carta secreta, por questões de segurança. Briggs comunicou essas conclusões a Fermi.

A grande decisão de acelerar o projeto nuclear foi de Compton, que foi visitar Fermi na Universidade de Colúmbia para recolher informações sobre a Bomba Atômica, transferiu então os trabalhos da Universidade de Colúmbia para de Chicago, onde Compton era professor. Formou uma grade organização

chamada “*Mettalurgical Laboratory*”, a partir daí começou-se a construção de uma pilha nuclear com proporções maiores da sido programada em Colúmbia. Este reator foi construído no estádio de atletismo da Universidade, apesar das objeções de Compton e do General L. R. Greves. No desenvolvimento da construção deste reator, os pesquisadores se depararam com dois grandes problemas, a colocação geométrica do combustível no reator e a escolha de um bom moderador para os nêutrons. Felizmente Fermi e Szilard resolveram os problemas geométricos da alimentação por urânio e utilizaram o grafite como moderador de nêutrons, material que poderia ser produzido em grandes quantidades e com alto grau de pureza. Para o controle de fluxo de nêutrons na pilha, Fermi utilizou barras de Cádmiio a qual possuíam grande seção de choque de absorção para nêutrons, sendo assim, em 2 de dezembro de 1942, com a presença de: W. Arnold, H. M. Barton, R. F. Christy, A. H. Compton, R. J. Fox, S. A. Fox, D. K. Forman, A. C. Graves, C. H. Grenewalt, D. L. Hill, W. H. Hinch, W. R. Kanne, P. G. Koontz, H. E. Kubtscheck, G. Miller, G. Monk Jr., W. P. Overbeck, H. J. Parson, G. S. Pawlicki, L. Sayvetz, L. Seren, L. A. Slotin, F. H. Speeding, R. J. Watts, G. L. Weil, E. P. Wigner, V. C. Wilson, E. O. Wollan, Miss L. Woods, Norman Hilberry, Samuel Allison, Thomas Brill, Robert G. Nobles, Warren Nyer, and Marvin Wilkening, Harold Agnew, William Sturm, Harold Lichtenberger, Leona W. Marshall, and Leo Szilard, Enrico Fermi, Walter H. Zinn, Albert Wattenberg, e Herbert L. Anderson, entrou em operação o primeiro reator nuclear com reação em cadeia autossustentável. Começou assim a Era Nuclear.

2.3 Funcionamento de uma usina nuclear

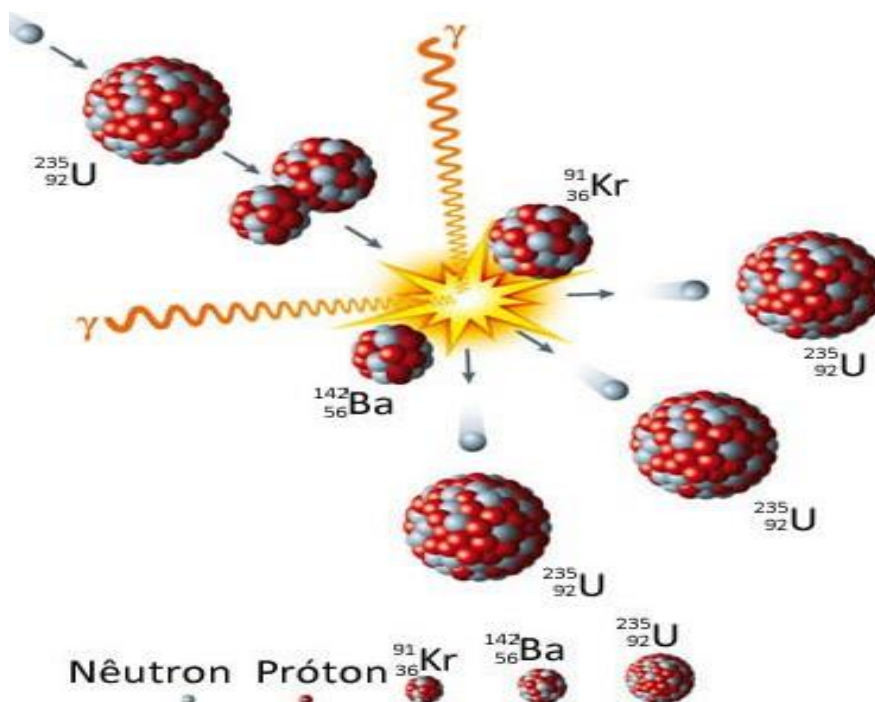
Como mencionado na história da energia nuclear, nos meados de 1933 o físico italiano Enrico Fermi observou que quando o núcleo de um certo elemento era bombardeado por nêutrons em uma velocidade moderada, o mesmo capturava nêutrons, emitindo assim os conhecidos hoje como raio gama (γ). Logo após esse mesmo núcleo desintegrava-se por emissão de partícula beta (${}_{-1}^0\beta$) formando novos núcleos de outros elementos.

A primeira pesquisadora ao tentar explicar tal fenômeno foi Lise Meitner que deu nome de “fissão nuclear” a tal evento, segundo ela a fissão nuclear

ocorre quando um núcleo atômico pesado e instável é partido por causa do bombardeamento por nêutrons moderados, originando dois novos núcleos atômicos médios e liberando também 2 ou 3 nêutrons, além de uma quantidade extraordinariamente grande de energia.

Essa grande liberação de energia ocorre, por exemplo, com o núcleo do urânio 235 (${}_{92}\text{U}^{235}$). Quando este é bombardeado por nêutrons a uma velocidade moderada, ele se parte e origina vários novos pares de núcleo diferentes. Cerca de 200 isótopos diferentes de 35 elementos químicos já foram produzidos na fissão do urânio 235. Em um exemplo a seguir em que são liberados os isótopos do bário (${}_{56}\text{Ba}^{142}$) e do criptônio (${}_{36}\text{Kr}^{91}$), e mais 3 nêutrons:

Figura 1 - Reação em cadeia e fissão do Urânio



Fonte: Brasil Escola

Quando os 3 nêutrons forem liberados na fissão em velocidade moderada, estes então poderão reagir novamente com outros núcleos de urânio 235 que estiverem ali, continuando assim a reação em cadeia que se desenvolverá pouco a pouco. Porém, tal processo só ocorrerá se o urânio 235

uma certa quantidade mínima de massa. Massa crítica é o termo que denomina a menor massa fissionável que sustenta a reação em cadeia. Caso a massa do urânio 235 estiver menor que o necessário para a reação ocorrer denominamos de massa subcrítica.

Tal energia fora usada em bombas nucleares ao longo dos anos, porém hoje a aplicação da energia nuclear que ao contrário de causar destruição agora é para a geração de energia elétrica através das usinas nucleares. Estas basicamente funcionam controla-se a reação em cadeia com um reator nuclear e o calor gerado pela fissão é usado para aquecer a água até a vaporização e este vapor aciona uma turbina que opera um gerador elétrico e produz assim energia elétrica.

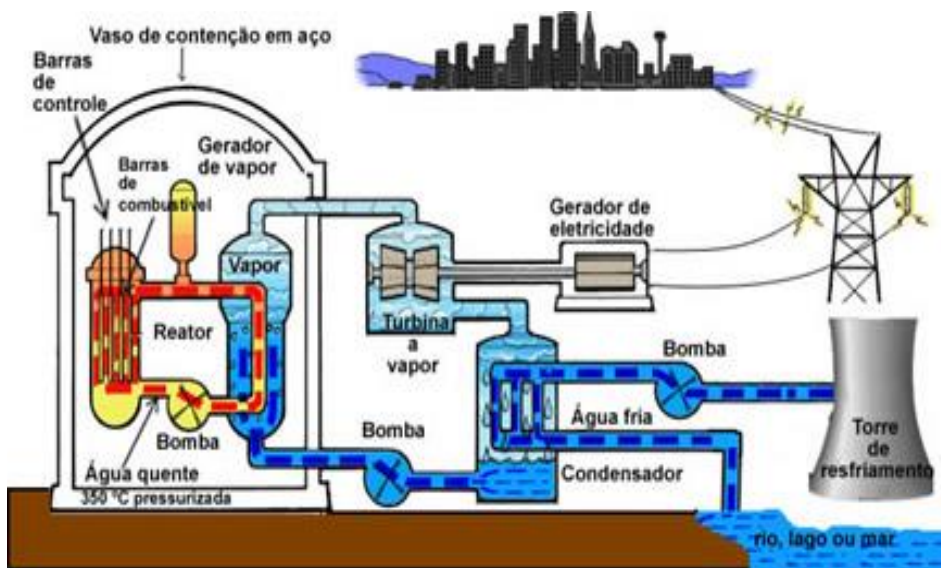
Um reator atômico controla a energia liberada pela fissão, o reator é algo tão resistente que ele consegue conter a reação que ocorreria em uma bomba nuclear. Isto ocorre porque o reator é um dispositivo usado em usinas que controla a reação através de barras do combustível físsil intercaladas, normalmente é o urânio enriquecido ou o plutônio 239, com barras de moderadores de nêutrons. Os moderadores podem ser de barras de carbono na forma de grafite, cádmio, água pesada (D_2O), esta usada nos reatores mais modernos. A composição da água pesada é diferente da água normal, no lugar de átomos de hidrogênio normais, ela tem átomos de deutério, que é um isótopo mais pesado que o hidrogênio.

Os nêutrons dos moderadores estão ali junto a reação para que na hora que ela aconteça partes dos nêutrons liberados na fissão nuclear colidam com os nêutrons dos moderadores e sejam absorvidos por estes sem causar outra fissão. O resultado disto é uma reação mais controlada, onde apenas um dos nêutrons liberados em cada fissão pode reagir novamente.

A energia gerada em forma de calor faz com que a temperatura no interior do reator aumente, transformando assim está água em vapor, em seguida este vapor é direcionado para o acionamento de uma turbina, e esta gera energia elétrica. O vapor que acionou a turbina agora é resfriado por um trocador de calor que funciona como um condensador, onde o vapor é resfriado

de forma natural por uma fonte geralmente próxima a usina como rios ou lagos, e depois de condensada volta para o circuito principal para ser evaporada novamente. Para não haver um consumo em demasia de água de resfriamento, as usinas são geralmente encontradas em regiões próximas ao mar.

Figura 2 - Funcionamento de um reator nuclear



Fonte: Brasil Escola

3 REATORES EM EMBARCAÇÕES E ACIDENTES

3.1 NS 50 Let podbody: Navio movido à energia nuclear

O desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos fez com que o homem pudesse superar barreiras antes não transpostas. O simples fato de conseguir navegar em águas repletas por gelo e se manter navegando por muito mais tempo só foi possível com o estudo da energia nuclear. Muitas pessoas não têm nem ideia da existência de navios capazes de navegar através do gelo, estes navios são conhecidos como quebra-gelo, estas embarcações são realmente capazes de se locomover em lugares completamente congelados e permitir que outros navios possam passar sem encalhar.

A grande questão está em se indagar o porquê do interesse em ter navios que possam quebrar o gelo se a maior parte navegável do nosso

planeta não é congelada, pois bem, a resposta está na parte norte da Rússia e do Oceano Ártico que é o local onde se abriga uma das maiores quantidades de petróleo do planeta, fazendo-o assim um lugar a querer ser explorado, motivo este que fez a antiga União Soviética a investir pesado em grandiosos navios quebra-gelo que poderiam abrir caminho nos lugares mais complicados, isso tudo graças à energia nuclear.

O funcionamento do NS 50 ao quebrar o gelo, ao contrário do que se imaginaria como uma proa bem afiada e pontuda é, na verdade, algo mais boleado que a dos transatlânticos, trazendo a lembrança de algo como uma colher. O intuito do navio não é cortar o gelo e sim passar literalmente por cima dele. Sendo assim não é necessária uma grande propulsão para atravessar o gelo, mas pelo contrário, o grande peso do navio abre caminho destruindo a geleira com a força da gravidade, como estas quebras gelos são gigantescos estes podem até romper uma camada de até seis metros de espessura.

Em navios quebra-gelo menos modernos, existia o grande problema quando se quebrava o gelo pela proa. Os destroços de gelo recém destruídos pelo navio danificavam o sistema de propulsão do navio. Ao se desenvolver novas tecnologias surgiu a ideia de fazer esta quebra do gelo com a ação da gravidade e utilizando a popa do navio, a fim de evitar o problema de danificar o propulsor. Esta ideia perseverou, porém, o sistema encontrado no NS 50 let Pobedy é mais sofisticado por que à medida que o navio progride, o seu casco, com formato especial, afasta o gelo triturado impedindo-o de entrar em contato com partes importantes da embarcação como o sistema de propulsão.

A grande e principal diferença entre os primeiros navios quebra-gelo construídos para os gigantes da União Soviética é a força de propulsão, que no caso dos mais modernos é gerada pela energia nuclear. O NS 50 conta com dois reatores nucleares capazes de gerar cinquenta e cinco megawatts de energia, o suficiente para abastecer uma cidade de 25 mil habitantes. Boa parte da capacidade gerada é transformada em potência, que empurra o barco sobre o gelo por meio de três motores elétricos que, juntos, possuem aproximadamente setenta e quatro mil cavalos, o equivalente a mil e cem

carros populares.

Toda essa energia nuclear gerada não é somente para a propulsão e sim para manter todo o navio em operação e suas instalações consta com academias, piscinas térmicas, restaurantes, sala de massagem e algumas outras mordomias que servem mais de 130 funcionários que trabalham a bordo desta embarcação. Estes tipos de navio que funcionam com energia nuclear começaram em 1950 estreando com o NS Lenin, lançado em 1957. Este tipo de energia foi escolhido por ser mais econômica e mais fácil de ser utilizada. Se os barcos fossem equipados com motores movidos a diesel, seriam necessárias mais de 100 toneladas de combustível por dia, enquanto a tecnologia nuclear consome certa de 1 quilo diário de urânio enriquecido para funcionar.

A utilização desta energia nos leva a refletir o porquê de não ser adotada em toda embarcação um reator nuclear, tendo em vista que o espaço para armazenamento, tempo de vida útil (em funcionamento), custo benefício, produção e consumo seriam em teoria menores, poderia ser o fato de que as grandes empresas que vendem toneladas e toneladas de diesel aos diversos navios pelo mundo sofreriam um grande impacto e abalaria economicamente as mesmas ou pelo pré conceito que se tem a respeito da energia nuclear e todos os desastres que ocorreram ao longo dos anos de desenvolvimento da tecnologia, por conseguinte o medo da criação de bombas nucleares que segundo estudiosos poderiam destruir nosso planeta, porém nada disto fora comprovado cientificamente.

Como prova do desenvolvimento desta tecnologia no ártico, existem navios cruzeiros que são quebra-gelo, estes proporcionam uma viagem diferente da que qualquer outro cruzeiro pode oferecer o navio finlandês sampo leva seus passageiros pelas mais incríveis geleiras e com uso de roupas de imersão eles podem aproveitar um mergulho em águas com a temperatura abaixo de zero grau.

3.2 Submarino USS Nautilus

Durante os períodos de guerra, as grandes potências estavam

desenvolvendo tecnologias para combate em território hostil, sendo necessário um elemento que fosse capaz de invadir o território inimigo sem ser notado., Então no dia vinte um de janeiro de 1954, no estaleiro naval norte-americano de Groton, foi lançado à água o USS Nautilus, o primeiro submarino nuclear do mundo, por mais que este tenha revolucionado os conceitos passados de guerra submarina, os submarinos nucleares nunca chegaram a entrar em combate.

Uma das grandes importâncias de ser o primeiro submarino nuclear foi o quanto este significou para os Estados Unidos durante a guerra fria, dando uma enorme vantagem em relação a Rússia até o lançamento do submarino russo Hiroshima (k-19) que tinha uma autonomia consideravelmente grande e poder de fogo.

O USS Nautilus era uma unidade de combate, com os equipamentos necessários e 6 tubos de torpedo. Mas como era o primeiro submarino nuclear do mundo tinha seus defeitos, um dos principais problemas era seu alto nível de ruído: o reator e as turbinas a vapor produziam muito mais ruído que os motores elétricos daqueles que eram utilizados em baixo da água pelos submarinos normais. Outro motivo de fazer tanto ruído era pelo formato do seu casco imperfeito, defeito este que teve de ser corrigido em gerações de submarinos futuras já que o principal objetivo era o fator que condicionava a furtividade, esta corrida contra o ruído vem desde os finais dos anos 50 até os dias de hoje.

Figura 3 - USS Nautilus



Este foi também o primeiro submarino a atravessar o polo norte, e fora retirado de serviço em 1979 e finalmente três anos mais tarde decidiram torná-lo um marco militar. Hoje, o submarino encontra-se na cidade de Groton exposto no “The Submarine Force Museum”.

3.3 Acidentes Nucleares

Não tem como falar sobre energia nuclear sem citar os seus riscos. E acidentes ao longo dos anos chamaram a atenção do mundo. Conhecido como o pior acidente da história e único a receber classificação máxima, nível 7, na escala da Agência Internacional de Energia Atômica, o acidente em Chernobyl ocorreu durante um teste de sistema no reator 4, que se localizava próximo a cidade de Pripyat, na antiga República Socialista Soviética da Ucrânia.

No dia 26 de abril de 1986 um dos 4 reatores explodiu e levou a diversas reações em cadeia, porém o motivo desta explosão é até hoje mal explicado. Muitos afirmam que foi apenas falha dos operadores e outros dizem que existia uma falha no projeto das hastes de controle do reator. As hastes são compostas por elementos, geralmente o Cádmio que tem a facilidade em absorver nêutrons e amenizar as reações no interior do reator. Contudo, é muito provável que muitos procedimentos de segurança tenham sido executados irregularmente e normas não tenham sido obedecidas.

Nos relatórios dos procedimentos feitos no dia 26 confirmam que a equipe operacional planejou testar se as turbinas do reator 4 seriam capazes de produzir energia necessária para manter as bombas do líquido de refrigeração funcionando caso algum problema de perda de potência ocorresse até que gerador de emergência fosse acionado. Em um intervalo muito curto de tempo a potência e temperatura do reator aumentaram significativamente produzindo explosões que geraram ainda mais energia para as reações e para complicar mais a situação houve a entrada de oxigênio que acentuou o processo de combustão ajudando na propagação da radiação.

A liberação de material radioativo ocorreu em sua maioria por um período

de dez dias. Materiais extremamente perigosos e encontrados em maior quantidade foram o Iodo 131, o gás Xenônio e o Césio 137 estes formavam 5% de todo o material radiativo de Chernobyl, aproximado em 192 toneladas, estas partículas levadas pelo vento chegavam em lugares como a Escandinávia e na Europa Oriental. A equipe de controle do acidente e bombeiros foram os que sofreram a mais intensa exposição a esse material, muitos deram as suas vidas para tentar impedir a proliferação desta catástrofe e para retirar as famílias de áreas próximas. Entre os 28 mortos nos primeiros dias, seis eram bombeiros. O governo soviético reassentou 220 mil pessoas moradoras das áreas próximas ao desastre.

Mesmo após a minimização do incêndio e passados alguns meses e anos, vários problemas de saúde foram registrados em consequência dos acidentes de Chernobyl. Entre 1990 e 1991, a AIEA enviou 50 missões com representantes de 25 países para avaliação de áreas contaminadas na Bielorrússia, Rússia e Ucrânia. Houve a identificação de ao menos 4 mil casos de câncer de tireoide, além destes foram registrados também casos de leucemia e outras formas de câncer agressivas em longo prazo, problemas de circulação e catarata. Foram encontrados casos relacionados também ao estado mental da população traumatizada pelo acidente, gestantes foram aconselhadas abortar para evitar possíveis efeitos teratogênicos nos fetos, porém ficou confirmado mais tarde que o nível de radiação liberado não era suficiente para causar danos aos bebês em fase gestacional, fora isso, as pessoas que eram crianças e adolescentes na época fazem parte do grupo de risco que tem a tendência na desenvoltura do câncer.

Medidas de segurança foram tomadas até para o comércio internacional. Logo após o acidente, vários países suspenderam a importação de produtos agrícolas como a batata e o leite. Mesmo hoje, não é recomendado consumir alimentos que tenham origem naquele território, com isso, houve a perda de fonte de renda de pequenos agricultores que tiveram que abandonar suas fazendas. A natureza também sofreu com a radiação. Além de diversos animais mortos encontrados, há vários animais que desenvolveram mutações genéticas como os lobos e roedores de pequeno porte e até mesmo animais

domesticados como gatos e bovinos.

Figura 4 - Animais que sofreram mutações em Chernobyl



Fonte: Google imagens

As plantas trazem o veneno desde a semente e sua forma também foi danificada e modificada pelo desastre, os riscos de contaminação é calculado para durar por 20 mil anos.

Diversos outros acidentes nucleares marcaram presença, mas nenhum tão poderoso e devastador quanto Chernobyl. Em 1957 em Kyshtym a usina de Mayak apresentou falha no sistema de refrigeração do compartimento de armazenamento de resíduos nucleares o que causou uma explosão em um tanque com 80 toneladas de material radioativo no dia 29 de setembro. Uma área de raio de 800k na região de Mayak e redondezas foi contaminada com o acidente. O governo russo forçou a evacuação de 10 mil pessoas das áreas afetadas na época, deixando-as sem explicações do motivo da partida. Só uma semana depois, com o aparecimento dos primeiros efeitos físicos e anomalias a população foi informada oficialmente do acidente. A estimativa de que pelo menos 200 pessoas morreram de câncer em decorrência da exposição à radiação.

Nem o Brasil escapou de ter um acidente radiológico. Em 13 de setembro de 1987, um acidente envolvendo Césio 137, poluente tóxico sem níveis seguros de exposição, perturbou a cidade de Goiânia. Uma cápsula de tal elemento foi encontrada nos destroços do Instituto Goiano de Radioterapia e vendida a um ferro velho. A luminosidade produzida pelo Césio chamou a atenção dos moradores da região que passaram de mão em mão o elemento.

Mais de 800 pessoas foram contaminadas e pelo menos 200 morreram devido a exposição à radiação.

Por último, uma embarcação submarina K-19 em 1961, primeiro submarino soviético a carregar mísseis balísticos, navegava pelo Atlântico Norte no dia 4 de julho, começou a apresentar falhas no sistema de refrigeração levando o reator a temperaturas elevadas a ponto de ameaçar derreter seu núcleo. Para reparar o problema, todos os 139 tripulantes mais o capitão, permaneceram a bordo, a mercê da radiação que vazava do reator. O sacrifício dos marinheiros impediu uma explosão nuclear semelhante à de Chernobyl.

4 USINA DE REPROCESSAMENTO

4.1 Lixo Radioativo

O lixo atômico nada mais é que um aglomerado de resíduos que contêm elementos químicos radioativos sem função prática, normalmente este é o subproduto de um processo nuclear, como a fissão nuclear. Porém, estes resíduos radioativos também podem ser gerados durante o processamento de combustível para reatores, armas nucleares ou até mesmo por aplicações médicas como a radioterapia e a medicina nuclear.

O grande problema de se usar esta forma de energia é o impacto que isso gerará para futuras gerações, o lixo atômico que uma usina nuclear produz leva aproximadamente 24 mil anos para ter sua radioatividade reduzida pela metade, isso se o elemento for o plutônio. O lixo é dividido em 4 categorias, os não classificados, os resíduos de baixa, média e alta atividade.

Os resíduos não classificados não possuem radioatividade suficiente para levar perigo à saúde das pessoas ou ao meio ambiente, este tipo aqui é cotado para uso convencional hoje e para gerações futuras.

Os resíduos de baixa atividade são os que possuem uma certa quantidade de radioatividade gama ou beta em níveis menores a $0,04 \text{ GBq/m}^3$ (unidade do sistema internacional de medidas para a radiação) no caso de serem líquidos, $0,00004 \text{ GBq/m}^3$ se forem gasosos e a taxa seja inferior a 20

mSv/h (unidade do sistema internacional de medidas que mede a dose de radiação absorvida pela matéria viva). Só podem ser considerados desta categoria se o período de semidesintegração destes forem menores que 30 anos.

Os resíduos de atividade média são aqueles que possuem radiação gama ou beta com níveis superiores aos resíduos de baixa atividade, porém inferiores a 4 GBq/m³ para líquidos, gasosos com qualquer atividade e sólidos cuja taxa de radiação em contato supere os 20mSv/h. iguais aos resíduos de baixa atividade os de média também só são considerados desta categoria se seu período de semidesintegração for inferior a 30 anos.

Os resíduos de alta atividade ou alta vida média são aqueles que emitem radiação do tipo alfa ou beta com níveis superiores aos resíduos de média atividade. E também somente aqueles que superem um período de 30 anos, ao contrário dos outros.

A alguns anos atrás ecologistas acusaram a Rússia de conspirar para transformar uma vasta área da Sibéria em um grande depósito de lixo nuclear descartado de todos os países do mundo em um plano multibilionário que botava o lucro na frente da segurança. As autoridades russas confirmaram que a ideia estava sendo examinada pelo chefe da agência internacional de energia atômica, Mohammed El Baradei, que sugeriu que a Rússia fosse o primeiro depósito de lixo atômico do mundo.

A princípio o governo russo estava interessado em importar combustível nuclear gasto para reprocessamento e possível armazenamento, o plano era explicitamente declarado pela Rosatom, a agência de energia nuclear da Rússia, ganhar moeda estrangeira através da importação destes resíduos. Na época o chefe da Rosatom, Alexander Rumyantsev, sugeriu que a Rússia desmanchasse os submarinos nucleares do mundo, apensar de ainda de ter 80 navios para serem desmontados da era soviética e além de só poder fazê-lo com muita ajuda.

O Greenpeace dizia que a Rússia não podia ser confiável para cuidar do lixo radioativo do mundo devido a tantos acidentes nucleares ao longo da

história tal como mayak, no Oeste da Sibéria. Logo após os promotores russos iniciaram uma ação criminal contra os gerentes das usinas Mayak alegando que lixo nuclear líquido havia sido bombeado para o rio Techa, causando taxas alarmantes de leucemia entre habitantes locais.

O 19º aniversário do Greenpeace foi um protesto contra toda essa situação na Rússia, os ativistas pularam a sede da Rosatom com faixas que diziam: "Chernobyl é o cemitério nuclear número um. A Rússia é o número dois?".

Toda esta confusão mostra o quanto os países mesmo anos atrás já buscavam a energia nuclear para armazenamento sabendo o quanto esta poderia ser útil a longo prazo. A tecnologia de reprocessamento que a Rússia possuía sozinha a anos atrás, agora é compartilhada com diversos países em usinas de reprocessamento.

4.2 Usina de Reprocessamento

O reprocessamento nuclear em si é uma técnica de separação e recuperação química do plutônio ou do urânio que estão presentes no combustível nuclear dos reatores. Esta técnica foi criada no final dos anos 40, com a finalidade de reciclar e reaproveitar a matéria prima do combustível nuclear.

Esta técnica separa elementos utilizáveis, como o urânio e o plutônio, removendo-os do produtos de fissão e outros materiais do combustível nuclear gasto nos reatores.

O processo tecnológico em si envolve varias operações químicas, sendo um processo complexo que envolve componentes também radioativos. Normalmente, o objetivo final é fazer com que o combustível de óxido mesclado produzido no final tenha elementos utilizáveis adicionados a ele. Em um dos processos, o plutônio e o urânio são separados de outros resíduos nucleares inclusos nos combustíveis. Depois de finalizado esses dois elementos podem ser utilizados em reatores e armar nucleares.

O urânio e o plutônio reprocessado englobam a maior parte do material combustível irradiado. Depois de usada, cada pastilha contem 97% de material

radioativo, aproximadamente 96% é reciclado em cima do urânio e do plutônio está presente 1% no total e grande parte é utilizado no combustível de óxido misto. A composição do urânio depende dos fatores do seu enriquecimento inicial e do combustível que foi usado no reator, outros elementos hoje em dia são reaproveitados além do plutônio e do urânio. Como estes elementos são difíceis de serem encontrados por todo o mundo, a prática de reprocessamento é muito valiosa para evitar o desperdício de recursos.

As grandes vantagens de aplicar esta tecnologia de reprocessamento são evitar o desperdício já que todo o urânio e plutônio não utilizado nos elementos combustíveis são recuperados, concluindo assim o ciclo do combustível em que há um ganho de 25% a mais de energia quando comparamos o urânio do processo original. Outra vantagem está na redução do volume do material retirado como resíduo de alto risco em cerca de um quinto. Sendo o nível de radiatividade no reprocessamento de resíduos menor, deveria então ajudar na utilização mais segura de energia.

Em relação à destinação dos rejeitos, nem todos os países que possuem uma usina nuclear tem uma usina de reprocessamento, muitos armazenam este lixo radioativo fazendo apenas acúmulos dentro da própria usina ou em depósitos nas vizinhanças. Países como França, Rússia, Índia, Japão e Grã Bretanha já fazem esta reciclagem de cápsula de urânio usada como combustível nas usinas nucleares com uma tecnologia já conhecida pelo mundo desde a década de 40, porém esta reciclagem é considerada cara.

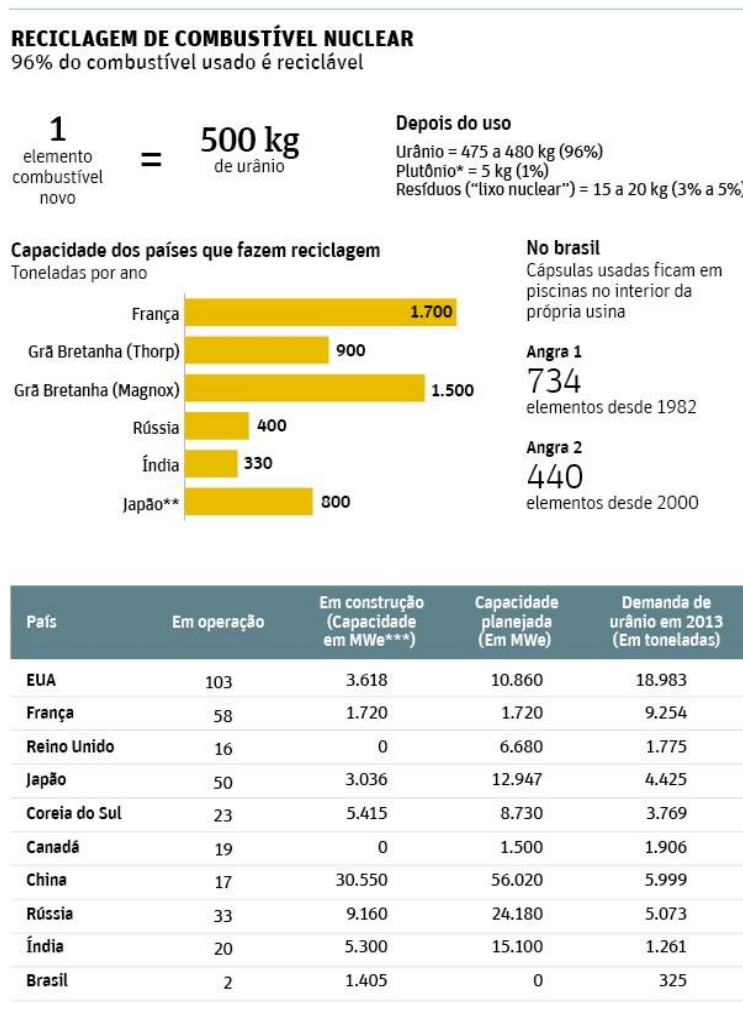
Mesmo assim, é uma questão de tempo até que países que não usam da prática do reprocessamento tenham que usar, já que os materiais utilizados no processo nuclear são raros no planeta. Porém países já começam a pensar na construção de suas próprias usinas de reprocessamento, até mesmo Brasil, em 2013 o presidente da Eletronuclear, Othon Luiz Pinheiro da Silva disse que o país poderá ter uma planta de reciclagem em 40, 50 anos quando o parque nuclear ganhar mais escala.

Os maiores especialistas já veem a fonte de energia nuclear como viável, se a solução do rejeito nuclear se tornar definitiva e criada em diversos países, a resistência à se instalar novas usinas nucleares será cada mais mais fácil de ser derrubada. Hoje países como os Estados Unidos possuem toneladas de lixo

atômico e esperam apenas uma solução econômica viável para reutilizarem. O processo de reaproveitamento é caro pois necessita de uma grande planta e muita solução química, uma tecnologia muito avançada. A Rússia, pioneira no incentivo e desenvolvimento de tal tecnologia, tem 22 mil toneladas de combustível usado e apto ao reprocessamento, mas paga pelo armazenamento deste volume. A estimativa da Rosatom é que processar será muito mais barato que armazenar, por isso eles tentam desenvolver esta tecnologia a anos.

A maioria das instalações comerciais de reprocessamento operam na França, Reino Unido e na Rússia, com a capacidade de cerca de 5 mil toneladas por ano.

Figura 5 - Reciclagem de combustível nuclear



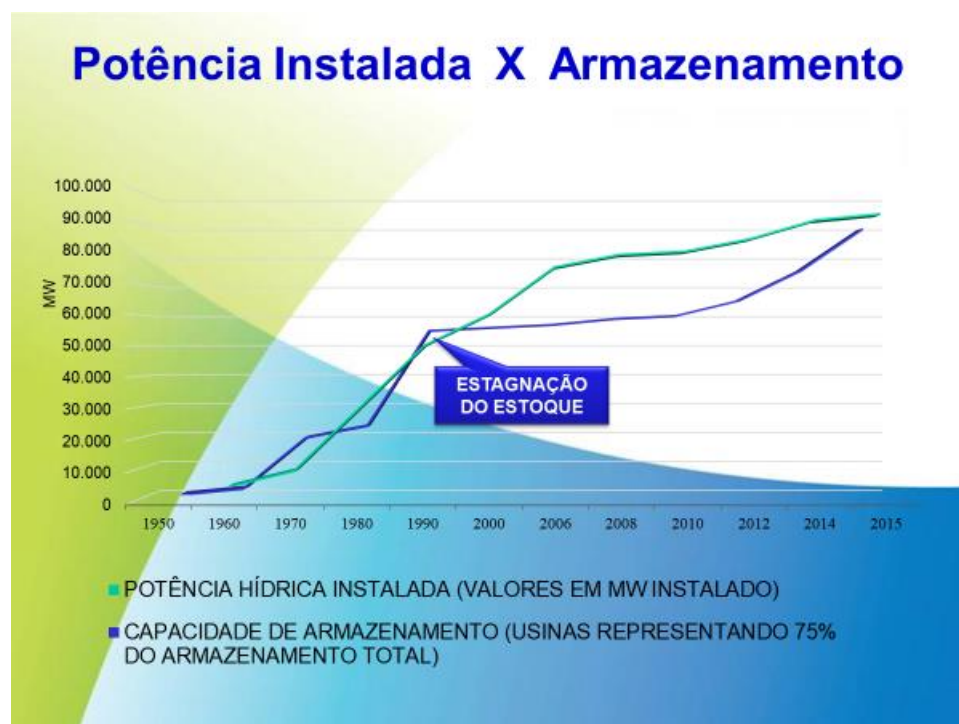
Fonte : Eletronuclear/FGV

5 SITUAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL

No Brasil existem duas plantas nucleares já contruídas e operando. Segundo informações obtidas pela própria empresa Eletrobras, a única empresa no Brasil a produzir eletricidade a partir de fonte nuclear, os potentes geradores das usinas Angra 1 e Angra 2 produzem aproximadamente 3% de toda a energia elétrica consumida no Brasil. A empresa acredita que este percentual torna-se-á mais expressivo quando Angra 3 estiver concluída.

Detentor de um dos maiores potenciais de geração hidroelétrica do mundo, o que lhe garante uma matriz elétrica entre as mais limpas do planeta. Porém, o país deve explorar outros caminhos para a produção de energia elétrica para que possa ter segurança e garantia do abastecimento já que não se pode depender apenas de uma fonte de geração de eletricidade. Possuidor da sétima maior reserva de urânio do mundo, o Brasil é um dos poucos países a deter a tecnologia de todas as etapas do ciclo do combustível nuclear.

Figura 6 - Potência x armazenamento



Fonte: Eletrobras Eletronuclear

A foto acima mostra o andamento, em forma de gráfico, da potência hídrica ao longo dos anos. A partir de 1990, quando começou o período de seca, a capacidade do armazenamento das hidroelétrica manteve-se quase constante e teve seu auge em 2001 no ano do racionamento onde o índice pluviométrico estava muito abaixo do normal. Esta informação mostra o quão importante é a necessidade de diversificar os modos de produção de energia elétrica já que diversos fatores podem atrapalhar a sua produção.

Além de ter diversas vantagens como não contribuir para o efeito estufa, não poluir o ar com óxidos de enxofre e de nitrogênio, não depender de chuvas, ventos ou outros fatores climáticos e ser o fonte mais concentrada de geração de energia, ao comparar os custos entre as centrais nuclear e térmica percebe-se que apenas as usinas de angra 1 e 2 são necessárias para equiparar a mesma geração bruta de energia de 6 usinas térmicas convencionais, como mostra a figura.

Figura 7 - Custo da Geração de energia

CUSTO DA GERAÇÃO – SIN (combustível) 2014

Usina	Tipo de combustível	Geração bruta (MWmed)	Geração bruta (MWh)	Custo do combustível (R\$/MWh)	Custo da geração (R\$)
Angra 1	Nuclear	569,59	4.989.575	23,21	115.808.025,84
Angra 2	Nuclear	1.192,20	10.443.677	20,12	210.126.785,48
Total Nuclear	Nuclear	1.761,79	15.433.252	21,12	325.934.811,32
NO.FLUMINENSE	Gas	770,78	6.752.033	37,80	255.226.839,84
UT.MARANHAO 3	Gas	42,56	372.826	63,17	23.551.393,15
CANDIOTA III	Carvão	223,28	1.955.933	64,08	125.336.173,82
TERMOPERNAMBU	Gas	431,28	3.778.013	70,16	265.065.378,05
B.FLUMINENSE	Gas	267,34	2.341.898	86,69	203.019.172,30
PORTO PECÉM I	Carvão	489,08	232.549	112,95	26.266.452,90
Total Térmicas Convencionais			15.433.252	58,22	898.465.410,06

Obs.: Comparação entre os custos de combustível das Usinas Nucleares e das térmicas convencionais despachadas centralizadamente pelo ONS em 2014, para gerar a mesma quantidade de energia

Fonte: Eletrobras Eletronuclear

Angra 2 conta com turbinas de alta e baixa, um gerador elétrico e sua excitatriz, esta é uma parte importante no processo de produção de energia,

após a água ser aquecida pelo reator ela chegará nas palhetas da turbina em forma de vapor acionando assim a turbina.

A segurança é um conceito empregado em usinas nucleares e na Eletrobras eles aplicam um método chamado defesa em profundidade, ou seja, barreiras em séries. Além destas as usinas contam com sistemas de segurança passivos que são acionados automaticamente para impedir acidentes além de também desligar e resfriar o reator em situações emergenciais. Entre outros princípios de segurança existe um que destaca a curiosidade, o piso onde a turbina se encontra é dividido em 2 níveis para evitar a ressonância estrutural, evitando assim qualquer acidente de desabamento, sendo assim, o piso que a turbina se encontra vibra independente da estrutura total da usina.

Figura 8 – Turbina de Angra 2



Fonte: Eletrobras Eletronuclear

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando se fala de energia nuclear, tudo o que vem a mente das pessoas geralmente são aspectos negativos sobre ela. Pelo fato de ter sido usada como bomba atômica com o intuito de destruir cidades, por ter causado acidentes tão devastadores ao longo da história que causaram irreversíveis danos ambientais e à saúde das pessoas e pelo fato de ser uma tecnologia muito desconhecida ainda pelo homem em termos de saber como reaproveita-la. Os únicos

impecílios que devem ser quebrados para a utilização de tal energia é o medo da população em seu uso, conhecimento mais aprofundado para evitar acidentes, e remodelação das plantas de instalações que geram energia através de outra fonte.

Os argumentos anteriormente apresentados tem como objetivo mostrar que a energia nuclear pode sim ser usada de modo pacífico como para propulsão em embarcações mercantes ou geração de energia elétrica tendo em vista que seu reaproveitamento é quase perfeito, cerca de 97%, logo, podemos ver que com o avanço da tecnologia nuclear, o desenvolvimento de embarcações da marinha mercante, tal como da marinha de guerra, propulsionadas por reatores nucleares que associa as vantagens da utilização da energia com grande aproveitamento permitindo a utilização do combustível nuclear durante décadas pode não mais ser um sonho tão obstante.

REFERÊNCIAS

SOUZA, Claudia. **História da energia nuclear**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Material didático CNEN, 2015.

KARASINSKI, Lucas. “**NS 50 Let Pobedy: O navio movido a energia nuclear**”. 2012. Disponível em <<https://www.tecmundo.com.br/navio/17189-ns-50-let-pobedy-o-navio-movido-a-energia-nuclear.htm>>. Acesso em 05 de julho de 2018.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. "Reator Nuclear". *Brasil Escola*. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/reator-nuclear.htm>>. Acesso em 07 de julho de 2018.

NEERACHER, Franz. “**Visitando o USS Nautilus, primeiro submarino de propulsão nuclear**”. 2016. Disponível em <<http://www.naval.com.br/blog/2016/10/30/visitamos-o-uss-nautilus-primeiro-submarino-de-propulsao-nuclear/>>. Acesso em 07 de julho de 2018.

GABINO, Anderson. “**O USS Nautilus levou a guerra submarina para outra dimensão**”. 2014. <Disponível em <http://www.defesaaereanaval.com.br/o-uss-nautilus-levou-a-guerra-submarina-para-outra-dimensao/>>. Acesso em 07 de julho de 2018.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. “**Reações de fissão nuclear**”. *Brasil Escola*. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/reacoes-fissao-nuclear.htm>>. Acesso em 07 de julho de 2018.

BEZERRA, Juliana. “**Acidente de Chernobyl**”. 2017. Disponível em <<https://www.todamateria.com.br/acidente-de-chernobyl/>>. Acesso em 14 de julho de 2018.

PEDROLO, Caroline. “**Acidente da usina nuclear de Chernobyl**”. 2014. Disponível em <<https://www.infoescola.com/fisica/acidente-da-usina-nuclear-de-chernobyl/>>. Acesso em 14 de julho de 2018.

BARBOSA, Vanessa. “**Os maiores acidentes nucleares da história**”. 2014. Disponível em <<https://exame.abril.com.br/tecnologia/os-maiores-acidentes-nucleares-da-historia/>>. Acesso em 14 de julho de 2018.

PACIEVITCH, Thais. “**Lixo atômico**”. Info Escola. Disponível em <<https://www.infoescola.com/fisica/lixo-atomico/>>. Acesso em 15 de julho de 2018.

OSBORN, Andrew. “**Siberia could become the world’s atomic waste dump, warn greens**”. 2005. Disponível em <<https://www.independent.co.uk/news/world/europe/siberia-could-become-the-worlds-atomic-waste-dump-warn-greens-491488.html>>. Acesso em 15 de julho de 2018.

SILVA, Débora. “**Reprocessamento Nuclear**”. Disponível em <<https://www.estudopratico.com.br/reprocessamento-nuclear-reciclagem-de-plutonio-ou-uranio/>>. Acesso em de julho de 2018.

LUNA, Denise. “**Reciclagem de ‘lixo nuclear’ pode impulsionar construção de usinas**”. 2013. Disponível em <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2013/09/1339682-reciclagem-de-lixo-nuclear-pode-impulsionar-construcao-de-usinas.shtml>>. Acesso em 15 de julho de 2018.