

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

**VICTOR JORDÃO MACHADO**

**GERAÇÃO DE ENERGIA A BORDO**

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**VICTOR JORDÃO MACHADO**

**GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR E UTILIZAÇÃO A BORDO DE NAVIOS**

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

Orientador: Msc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto  
Coorientador: Msc. Eng. Christiano De Luca

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**VICTOR JORDÃO MACHADO**

**GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR E UTILIZAÇÃO A BORDO DE NAVIOS**

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

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Orientador: Msc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

---

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus; aos meus pais, familiares e amigos por me ajudarem a chegar onde estou;  
Aos meus campanhas de camarote e turmas de EFOMM;  
Aos professores e mestres que auxiliaram direta ou indiretamente em minha formação;  
Ao meu orientador Paulo Pinto, e ao mestre Souza e Silva.

# EPÍGRAFE

The health of the eye seems to demand the horizon. We are never tired so long as we can see  
far enough.  
*(RALPH WALDO EMERSON)*

## **RESUMO**

Dentre os diversos tipos de energia existentes, podemos encontrar a energia nuclear, que, apesar de sua geração envolver instalações de alto custo inicial, tornam-se altamente rentáveis em longo prazo, pois é fonte de energia de alto rendimento devido a sua baixa necessidade de combustível e recarga do mesmo. Existem diversos tipos de reatores, os quais variam quanto ao processo intermanente realizado, porém mantem o mesmo princípio, no qual, ocorre a fissão do núcleo de um elemento radioativo que libera uma alta quantidade de energia, por volta de 200 Mev, provocando conseqüentemente a liberação de energia térmica, por essa ser uma reação exotérmica. O processo de geração de energia segue então o mesmo princípio utilizado em Usinas Termoelétricas que não utilizam o processo de fissão, onde, no caso das Usinas Nucleares, o líquido utilizado para refrigerar o sistema, chamado de líquido refrigerante, é drenado a partir de tubos, sendo o mesmo pressurizado (reatores PWR) ou não pressurizados (reatores BWR), para turbinas, em forma de vapor, dando então movimento a turbinas eletromagnéticas.

Palavras-chaves: energia nuclear, reação em cadeia.

## **ABSTRACT**

Among the various types of existing energy, we have nuclear energy, that, despite having installations with high initial cost, become highly rentable in a long term, because it is a source of energy with a high output due to its low necessity of fuel and refuelling. There are several types of reactors, which vary according to the process made, but maintain the same principle, in which, the fission of the core of a radioactive element that liberates a high quantity of energy, around 200 MeV, leading consequently to a liberation of thermal energy, because it is an exothermic reaction. The process of generating energy follows the same principle used in Thermoelectric Plants that don't use the fission process, where, in the case of Nuclear Plants, the liquid used for cooling the system, called cooling liquid, is drained from tubes, being it pressurized (PWR reactors) or not pressurized (BWR reactors), through turbines, in the form of steam, turning then electromagnetic turbines..

Keywords: nuclear energy, chain reaction.

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

- Figura 1 (NS Savannah no p er 13 de Baltimore, 2012)
- Figura 2 (NS Yamal)
- Figura 3 (Sevmorput na base de Atomflot)
- Figura 4 (Sistema de um reator nuclear de um submarino utilizado para propulsão)
- Figura 5 (Reator PWR do navio NS Savannah)
- Figura 6 (Funcionamento de um reator PHWR)

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>1      FUNCIONAMENTO DE UM REATOR NUCLEAR</b>	<b>12</b>
1.1    Fissão	13
1.2    Rendimento	13
<b>2      NAVIOS MERCANTES A ENERGIA NUCLEAR</b>	<b>14</b>
2.1    NS Savannah	14
2.2    NS Yamal	15
2.3    Sevmorput	16
<b>3      TIPOS DE REATORES NUCLEARES</b>	<b>18</b>
3.1    Classificação dos Reatores	18
3.2    Reatores de Água Leve	19
3.2.1 Reatores de Água Pressurizada (PWR)	19
3.2.1.1 Design	20
3.2.1.2 Vantagens	21
3.2.1.3 Desvantagens	21
3.2.2 Reatores de Água Fervente (BWR)	22
3.2.2.1 Reator de Água Fervente Avançado (ABWR)	22
3.2.2.2 Reator Simplificado de Água Fervente (SBWR)	22
3.2.2.3 Reator Simplificado de Água Fervente Econômico (ESBWR)	23
3.2.2.4 Vantagens	23
3.2.2.5 Desvantagens	24
3.2.2.6 Dando a Partida (Ponto Crítico)	25
3.3    Reator de Água Pesada (PHWR)	26
3.3.1 Água Pesada	27
3.3.2 Vantagens e Desvantagens	28

<b>3.3.3 Reator de Água Pesada Avançado (AHWR)</b>	<b>28</b>
<b>3.3.3.1 Inovação de Segurança</b>	<b>29</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>32</b>

## INTRODUÇÃO

No navio, o ciclo básico de energia começa na queima de combustível, passando pelo movimento do eixo de manivelas (virabrequim) do motor e sendo ou transmitido até o propulsor através de engrenagens e eixos, ou sendo ligado a um gerador para que se produza energia elétrica, ligando num quadro elétrico (principal, auxiliar ou de emergência) e alimentando os diversos equipamentos do navio. Isso é o que normalmente acontece. Transformamos o movimento do giro um eixo em energia elétrica. Mas esse movimento pode ser gerado de diversas formas, inclusive na 'força bruta', no entanto, para que se possa gerar mais energia, o movimento deve ser mais rápido, devido as propriedades do gerador. A principal forma utilizada nos navios é um motor de combustão interna auxiliar(MCA), para energia elétrica, e um motor de combustão interna principal(MCP), para movimentos do propulsor. Além disso, pode-se utilizar uma turbina movimentada a gás ou vapor, oriundo por exemplo de uma caldeira. Porém, uma forma que vem sendo estudada e utilizada recentemente é um reator nuclear gerando vapor para girar a turbina.

Reatores nucleares oferecem vantagens que não encontramos por exemplo em um motor de combustão interna. Um reator nuclear não gera gases poluentes ao meio ambiente, não requer oxigênio para sua fissão, e é uma fonte confiável, quando funcionando corretamente e de forma controlada, de calor para diversos fins, além de funcionar por diversos anos (dependendo do tipo) até precisar ser realimentado.

Um reator nuclear gera energia a partir da fissão, um processo no qual um núcleo atômico se divide gerando dois subprodutos menores. Durante a fissão, uma pequena quantidade de massa é convertida em energia, a reação exotérmica gerada, pode ser utilizada para alimentar um gerador e gerar energia elétrica. Essa energia também pode ser utilizada para propulsão nuclear, como é feita em diversos navios de guerra mundo a fora. Na 'Era Nuclear', a segurança desses reatores é posta em cheque com frequência, visto que já houve a ocorrência de muitos acidentes sérios em terra em usinas nucleares, tornando discutível sua utilização. O que é indiscutível, é o seu alto rendimento, tendo em vista que o reator, além de gerar uma quantidade relativamente alta de energia, gera combustível em seus processos, havendo casos (reatores de nêutrons rápidos) em que a quantidade de combustível gerado é maior do que aquela consumida pelo reator, sendo chamado então de reator super-regenerador.

## CAPÍTULO 1

### FUNCIONAMENTO DE UM REATOR NUCLEAR

Um reator nuclear é um dispositivo para iniciar e manter uma reação nuclear em cadeia de forma controlada. Em um navio é normalmente utilizado para esquentar a água e gerar o vapor necessário para girar uma turbina que auxilia na propulsão do navio, sendo o navio classificado como navio de propulsão nuclear. Porém também é usada para gerar energia elétrica, catapultar aviões em um porta-aviões, entre outras funções menores.

Alguns dos componentes de um reator nuclear são:

- Combustível, sendo urânio o mais comum deles.
- Núcleo do reator, onde acontece a reação.
- Moderador, um material que desacelera os nêutrons liberados da fissão, chamados nêutrons térmicos, para que possam interagir com outros núcleos (normalmente núcleos de urânio 235) e gerar novas fissões. Normalmente água, mas pode ser 'água pesada' (óxido de deutério) ou grafite (reatores antigos) .
- Barras de controle, feitas de materiais absorventes de nêutrons que não sofrem fissão, como cádmio, háfnio ou boro. São utilizadas para desacelerar uma taxa de reação, ou pará-la por qualquer motivo que seja, inserindo-as ou retirando-as no núcleo do reator. Em alguns tipos de reatores, são utilizadas barras especiais para manter um nível baixo de eficiência.
- Refrigerador, fluido que refrigera o sistema, absorve o calor gerado pela reação no núcleo e o transfere. Em reatores com apenas um circuito, tipo BWR, a água em contato direto com o núcleo, exposta ao material radioativo, é drenada diretamente, em forma de vapor, girando as turbinas; Em reatores com circuito secundário, tipo PWR, o líquido que passou pelo núcleo do reator transfere pelo processo de convecção o calor a um circuito secundário, o qual também contém um fluido refrigerante, não exposto ao material radioativo do núcleo, que é transformado em vapor e gira as turbinas. Utiliza-se mais reatores do tipo PWR, pelo fato de existir um sistema secundário e consequentemente evitar o escapamento de materiais radioativos através da água.
- Vaso de pressão, uma carcaça robusta de metal contendo o elemento combustível, que é formado por varetas de combustível, barras de controle, e fluido moderador e refrigerante.

- Blindagem, estrutura em volta do reator e geradores de vapor feita para protegê-los de qualquer entrada exterior, e proteger o exterior dos elementos radioativos em caso de mal funcionamento. Normalmente de metal e concreto.

## 1.1 Fissão

A fissão é o processo no qual o núcleo de um átomo instável como o urânio-235 ou plutônio-239 se divide quando bombardeado com partículas, como o nêutron e dá origem a dois novos átomos, produtos de fissão, cada um com um novo núcleo, liberando energia cinética, radiação gama e nêutrons livres. Esses nêutrons livres podem fissionar outros átomos e gerar novas fissões, desencadeando uma reação nuclear em cadeia.

Barras de controle, além de outros elementos que absorvem nêutrons são utilizadas para controlar essa reação em cadeia (visto que ela libera nêutrons continuamente, portanto acontecendo enquanto houver combustível), fornecendo átomos para absorverem esses nêutrons.

## 1.2 Rendimento

Iremos comparar um navio de propulsão nuclear com um queimando óleo combustível para explicarmos o rendimento de um reator nuclear.

"Um cálculo pode ajudar a explicar as características da propulsão nuclear que permitem ter vantagem de velocidade sobre navios que possuem motores de combustão interna. Se um navio precisa de 26,000 SHP (shaft horsepower) para navegar a 17 nós, ele irá queimar 1700 galões (6.4 toneladas) de combustível por hora. Se o mesmo navio aumentar sua velocidade para 25 nós, o consumo de combustível sobe para 8500 galões (32 toneladas) por hora enquanto a potência sobe para 130,000 SHP. "(RODNEY M. ADAMS, [http://www.atomicengines.com/Ship\\_paper.html](http://www.atomicengines.com/Ship_paper.html))

Levando em consideração que nos navios mercantes de hoje em dia, espaço sempre é algo muito limitado, quanto menos combustível for necessário carregar nos tanques de serviço, melhor. Os gastos de combustível para gerar energia só aumentariam os já altos gastos com a propulsão. No entanto um reator nuclear não necessita de combustível na faixa de toneladas, além de que no caso de um reator super-regenerador, a própria reação gera combustível mais que suficiente para o bom funcionamento do reator. Embora os gastos iniciais com a implantação de um reator no navio sejam altos, a longo prazo compensam pelo fato do reator ter vida útil de vários anos sendo realimentado poucas ou até nenhuma vez.

## CAPÍTULO 2

### NAVIOS MERCANTES A ENERGIA NUCLEAR

Embora seja uma fonte de energia confiável, não são muitos os navios mercantes que fazem uso de um reator nuclear a bordo.

Por causa de seu alto rendimento e potência, reatores nucleares foram e são mais utilizados em navios e submarinos de guerra, por precisarem de uma alta velocidade e capacidade de manterem-se funcionando a todo vapor o tempo inteiro, e porta-aviões, havendo casos em que um porta-aviões consegue catapultar dezenas de aviões de uma vez e utilizar toda sua capacidade de velocidade e energia, devido a reatores nucleares o alimentando. No entanto, um navio mercante não tem as mesmas funções que um navio de guerra, porém foram encontradas outras utilidades para um reator além das utilizadas em navios de guerra.

#### 2.1 NS Savannah



Figura 1 – NS Savannah no píer 13 de Baltimore, 2012.

NS Savannah foi o primeiro navio cargueiro a utilizar um reator nuclear. Também o único dos Estados Unidos até o momento.

Com o custo de 18.6 milhões de dólares pelo navio, e 28.3 milhões de dólares por sua usina nuclear e combustível, lançado em 21 de julho de 1959, esteve em operação de 1964 até 1972. Foi planejado e feito com o intuito dos EUA de mostrar ao mundo que poderiam usar tecnologia nuclear para a paz, e que um reator nuclear poderia ser utilizado para alimentar um navio civil. Era um navio rápido com incrível alcance, podendo circular a terra 14 vezes à 20 nós sem precisar ser realimentado. No entanto, o NS Savannah era um graneleiro atípico, podendo carregar apenas 8,500 toneladas de carga num espaço total de 18.500 metros cúbicos, muito abaixo de outros navios. Estava claro que o navio foi feito apenas para ser 'bonito', por parecer mais um iate do que um cargueiro, além de diversas acomodações como piscina e grandes salões. A tripulação também era maior do que uma de um navio cargueiro comum, e a quantidade de pessoas treinadas e o treinamento pelo qual passaram indicava um plano para mais navios com reatores nucleares. O navio foi condenado a uma vida curta.

"O Savannah operava bem de um ponto de vista operacional, mas em minha opinião os designers dele condenaram-no a uma vida curta pelo fato de ser design híbrido de navio cargueiro-de-passageiros. Nenhuma das funções foi comprovada por ser economicamente viável, e MARAD (Marine Administration/Administração Marítima) escolheu não gastar verbas adicionais para convertê-lo num cargueiro completo, ou num navio de passageiros completo, mas ao invés disso retirá-lo de serviço." (ROBERT J. BOSNAK, <http://atomicinsights.com/cover-story-why-did-savannah-fail/>)

Seu reator era um PWR (reator de água pressurizada) de 74 MW, que alimentava duas turbinas à vapor, e foi desativado devido ao alto custo de funcionamento à época, em 1972, embora possa se chegar a conclusão que seu funcionamento seria sim viável devido ao aumento do custo do óleo poucos anos depois do navio ter sido desativado. Chegou a se tornar um navio museu, sendo fechado pouco tempo após.

## 2.2 NS Yamal

Uma das utilidades encontradas para um navio com a 'potência' de um reator nuclear a bordo, foi quebrar gelo para abrir caminhos para outros navios nos polos. O NS Yamal começou a ser construído na Rússia da Era Soviética, sendo lançado em 1992, quando o comunismo já havia sido extinto na Rússia. Seu nome foi dado em virtude da Península de Yamal, Rússia. Foi criado para que se pudesse manter as rotas de navios abertas, principalmente durante o inverno, devido ao gelo. Possui dois reatores OK-150 de água pressurizada (PWR) utilizando urânio enriquecido U-235 de 171 MW alimentando duas turbinas e 6 geradores com uma potência total de 75,000 HP (55,3 MW). O navio não foi utilizado para os fins para os quais foi criado sendo mais utilizado para passeios turísticos, tendo feito uma viagem na virada do ano 2000 ao polo norte para fins de comemoração.

Devido a seu reator, o navio só pode viajar pelos mares árticos, pelo fato de precisar de constante água gelada para efetuar sua refrigeração, portanto uma viagem para por exemplo a Antártida é totalmente descartada pelo fato do navio ter de passar pela linha do equador, onde a água do mar não está em temperatura baixa o suficiente para efetuar a refrigeração do reator.



Figura 2 - NS Yamal

### 2.3 Sevmorput

O Sevmorput é um navio quebra-gelo cargueiro LASH (Navios que carregam barcas que são descarregadas para levar a carga até o porto) e contêiner. É o único navio nuclear civil da Rússia. Seu preço girou em torno de 265 milhões de dólares. O navio possui casco especial para ser utilizado para quebrar gelo, abrindo rotas marítimas. Foi construído em 1982 e lançado em 1986, sendo completado em 1988. O navio funciona a base de um reator nuclear de água pressurizada (PWR) KLT-40 de 135 MW. O reator utiliza combustível de 30~40% ou 90% de urânio enriquecido em uma liga de urânio-zircônio. Desde seu lançamento, até ser parado em 2012, o navio só precisou ser realimentado uma vez. Sua usina nuclear produz 215 toneladas de vapor por hora à uma pressão de 40 atm e temperatura de 290°C. Era capaz de carregar até 74 barcas de 300 toneladas cada. No começo de sua operação, foi negado em diversos portos do Leste Soviético, por conta de receios de vazamento de radiação e por conta do acidente de Chernobyl poucos anos antes. Seus custos operacionais diários giravam em torno de 90 mil dólares, e não era esperado qualquer lucro em seus dois primeiros anos de navegação.



Figura 3 – Sevmorput na base de Atomflot

No fim dos anos 90, o navio ficou ancorado em Murmansk devido a atrasos em seu reabastecimento, que acabou por acontecer em 2001, quando o navio retomou suas operações.

Em 2007 o navio seria convertido no primeiro navio-perfurador nuclear devido a pouca demanda para navios LASH e a necessidade de navios de perfuração especializada no Ártico Russo. Sua conversão, que demoraria 18 meses, foi cancelada junto com o projeto em 2008. Em 2009, foi dito que o navio poderia continuar em serviço por 15 anos. Mas em 2012, o navio, que esteve largado na base Atomflot, em Murmansk, teria sido removido dos registros russos e seria vendido para sucata. No entanto, no fim de 2013 foi dito que a decisão de desativar o navio foi cancelada e que ele retomaria suas operações em Fevereiro de 2016.

Na figura abaixo, vemos esquematicamente uma propulsão nuclear. O exemplo é de um submarino, que com a utilização desta possui uma enorme vantagem estratégica e logística em relação à propulsão convencional diesel-elétrica.

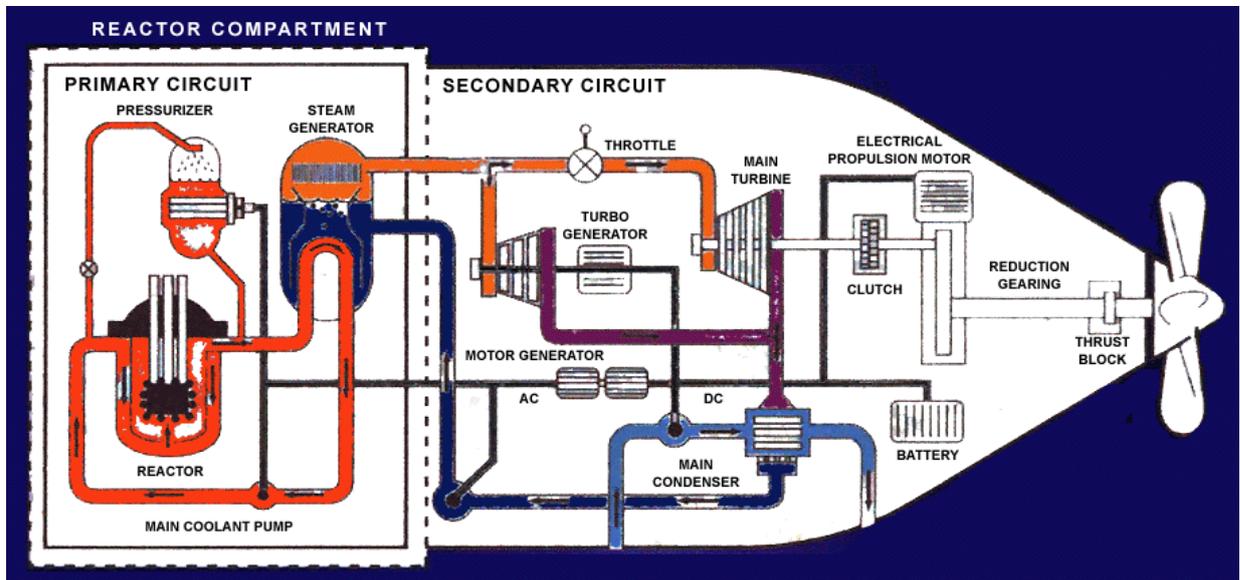


Figura 4 - Sistema de um reator nuclear de um submarino utilizado para propulsão

## CAPÍTULO 3

### TIPOS DE REATORES NUCLEARES

#### 3.1 Classificação dos Reatores

Existem dois tipos de reações conhecidas, a fissão nuclear e a fusão nuclear. A Fusão nuclear não é interessante pelo fato de ser uma tecnologia experimental e não ser utilizada para gerar energia já que seu controle ainda não é bem dominado (é o princípio de funcionamento do Sol). Todos os reatores comerciais são baseados na fissão nuclear, que normalmente utiliza urânio e plutônio gerado por capturas neutrônicas de átomos de urânio, como combustíveis. Reatores de fissão são divididos em duas classes: reatores de nêutrons térmicos e reatores de nêutrons rápidos. Reatores térmicos são a maioria, e utilizam nêutrons que são desacelerados para que fissionem o material combustível. Eles dependem de materiais moderadores de nêutrons para desacelerá-los até que possam interagir com o núcleo dos átomos a sua volta.

Reatores de nêutrons rápidos utilizam nêutrons rápidos para causar a fissão do combustível, sem a necessidade de um moderador de nêutrons.

No entanto, é preciso um combustível mais enriquecido em material físsil. Um ponto positivo para esse tipo de reator é que ele gera menos lixo transurânico, porém é mais difícil de construir e suas operações são mais caras.

Com relação a agentes moderadores, alguns utilizam grafite como agente moderador, e outros utilizam elementos mais leves como lítio ou berílio, mas podemos destacar os que tem água como agente moderador, que são divididos em Light Water Reactors (LWR), reatores de água leve e Heavy Water Reactors (HWR), reatores de água pesada. Existem também reatores que são refrigerados com metais líquidos, que utilizam uma liga de sódio e potássio, NaK, e seus primeiros reatores utilizavam mercúrio; e reatores refrigerados a gás, que utilizam um gás inerte, normalmente hélio em alta temperatura, embora dióxido de carbono tenha sido usado por usinas nucleares francesas e britânicas no passado. Alguns desses reatores refrigerados a gás são quentes o suficiente para o próprio gás girar uma turbina, outros mais antigos normalmente fazem o gás passar por um trocador de calor para gerar vapor para a turbina.

Também podemos classificar os reatores por geração, na qual temos Reatores de Primeira Geração, que são os primeiros protótipos, sem fins comerciais; Reatores de Segunda Geração, que foram os construídos entre 1965 e 1996; Reatores de Terceira Geração, que são os construídos de 1996 até 2010, os de Geração III +, com avanços em design e melhorias econômicas, que começaram a ser construídos em 2010 e continuarão até 2030; e Reatores de Quarta Geração, com tecnologias ainda em desenvolvimento e com data para começo de construção a partir de 2030.

## **3.2 Reatores de água leve (LWR)**

O reator de água leve é um reator térmico que utiliza água normal como moderador e refrigerante. Reatores de água leve são os tipos de reatores mais comuns entre os reatores térmicos. São divididos em reatores de água pressurizada (PWR), reatores de água fervente (BWR) e reatores de água supercrítica (SCWR), sendo este um reator de Quarta Geração.

Os reatores de água leve tendem a ser mais simples e baratos para construção do que outros tipos de reatores, sendo portanto a grande maioria dos reatores civis e de propulsão naval em serviço. Em terra, são mais utilizados nos Estados Unidos, para geração de energia elétrica, mas proporcionalmente a França é muito mais dependente dessa fonte de energia.

### **3.2.1 Reatores de água pressurizada (PWR)**

No reator de água pressurizada o refrigerante primário (água), é bombeada sob alta pressão até o núcleo do reator, onde é aquecida pela energia gerada da fissão dos átomos. A água aquecida é levada até um gerador de vapor, onde transfere sua energia térmica para um sistema secundário gerador de vapor e gira uma turbina, que por sua vez gira um gerador elétrico. Ao contrário do BWR, a pressão no sistema de refrigeração primário previne que a água ferva dentro do reator. PWRs são considerados reatores de Segunda Geração.

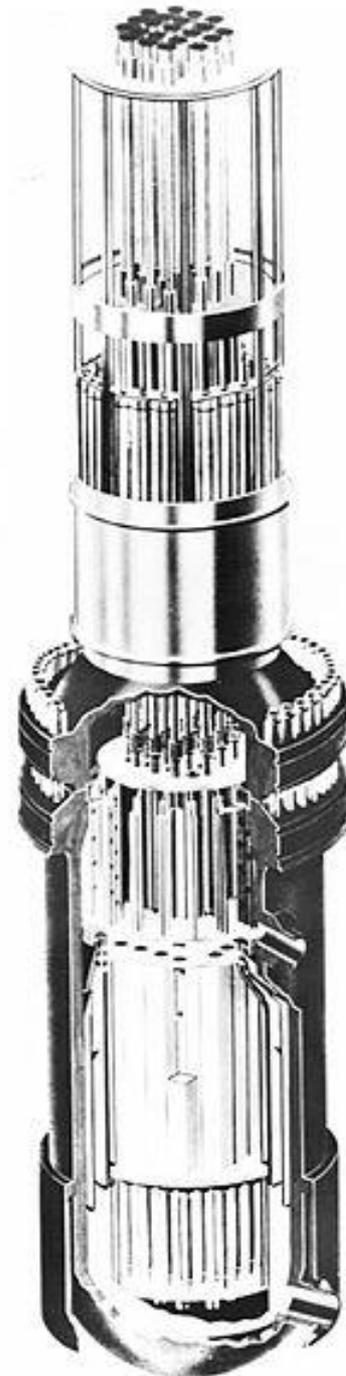


Figura 5 – Reator PWR do navio NS Savannah

### 3.2.1.1 Design

A reação de fissão em cadeia produz calor, esquentando água no sistema de refrigeração primário por convecção. O refrigerante primário é então bombeado até um trocador de calor, chamado de gerador de vapor, onde passa por centenas ou milhares de tubos. O calor é transferido através das paredes desses tubos para o sistema secundário de refrigeração em baixa pressão, gerando vapor pressurizado. A transferência de calor é feita sem misturar os dois fluídos, para evitar que o segundo refrigerante se torne radiativo.

Na usina nuclear, o vapor pressurizado passa por uma turbina que gira um gerador elétrico. Depois de passar pela turbina, o refrigerante secundário, uma mistura de água e vapor, é resfriado e condensado em um condensador. O condensador transforma o vapor em líquido novamente, para que possa ser reutilizado e novamente bombeado para o gerador de vapor, e também mantém um vácuo na saída da turbina para que a pressão caia na turbina, fazendo com que a energia extraída do vapor seja maximizada.

O vapor gerado tem outras utilidades além de geração de energia. Em navios e submarinos nucleares, o vapor é passado por uma turbina conectada a engrenagens de redução em um eixo utilizado para propulsão, e em porta-aviões é utilizado para catapultar aeronaves. Duas coisas são características de um PWR em comparação com outros tipos de reatores: o sistema de refrigeração é separado do vapor e da pressão dentro do sistema de refrigeração primário. Em um PWR, existem dois sistemas separados, o sistema primário e o secundário, sendo o primeiro de refrigeração, e o segundo para geração de vapor e movimentação de turbinas; ambos são preenchidos com água desmineralizada/deionizada.

### **3.2.1.2 Vantagens**

- Reatores PWR são muito estáveis devido a tendência de produzir menos energia quando a temperatura aumenta, fazendo com que o reator seja fácil de operar de um ponto de vista de estabilidade.
- O sistema de refrigeração secundário é separado do primário, para que a água não seja contaminada por materiais radioativos.
- Reatores PWR podem desativar o reator sozinhos em caso de falta de energia. As barras de controle são suspensas por ímãs eletromagnéticos e caem devido a gravidade quando a corrente é perdida. Sua total inserção desativa a reação nuclear primária.
- Seu reator é bem compacto, sendo perfeito para ser utilizado em navios e submarinos.

### **3.2.1.3 Desvantagens**

- A água de refrigeração deve estar altamente pressurizada para manter-se líquida em temperaturas altas. Isso requer tubulação de alta resistência e uma carcaça pressurizada, o que aumenta os custos de construção.
- Componentes de alta pressão (bombas, pressurizadores, geradores de vapor) também são requeridos, aumentando o custo e a complexidade da usina do reator PWR.
- Urânio natural possui somente 0.7% de urânio-235, o isótopo necessário para reatores térmicos. Isso faz com que seja necessário um enriquecimento do urânio, o que aumenta significativamente os custos de combustível, e também representa um alto risco de proliferação.

- Como a água age como moderador, não é possível construir um reator de nêutrons rápidos com design de um PWR.

### **3.2.2 Reatores de Água Fervente (BWR)**

O BWR é um reator de água leve utilizado para geração de energia elétrica. É o segundo tipo mais comum de reator utilizado para esse fim, atrás apenas do PWR. Sua principal diferença em relação ao PWR é que o BWR esquentava água no núcleo, que se transforma em vapor, girando uma turbina. O BWR foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Idaho e a General Electric em meados de 1960. O principal fabricante atualmente é a GE Hitachi Nuclear Energy, especializada na construção desse tipo de reator.

O BWR utiliza água como seu refrigerante e moderador de nêutrons. O calor produzido na fissão dentro do núcleo do reator faz com que a água ferva e vire vapor. Este vapor é usado diretamente para girar uma turbina, e após isso é refrigerado em um condensador, retornando ao estado líquido. O ciclo é fechado quando essa água retorna ao núcleo do reator.

#### **3.2.2.1 Reator de Água Fervente Avançado (ABWR)**

O ABWR é um novo design do BWR que incorpora tecnologias avançadas como controle por computador, planta automatizada, controle de movimentação, inserção e remoção de barras, e novas implementações de segurança nuclear nas séries originais de produção de reatores BWR, com uma saída de potência alta (aproximadamente 1350 MWe por reator), e uma probabilidade de danos no núcleo significativamente baixa. Além disso, o ABWR foi completamente padronizado, permitindo-o ser produzido em série.

#### **3.3.2.2 Reator Simplificado de Água Fervente (SBWR)**

A General Electric (GE) também desenvolveu um diferente conceito para um novo BWR, junto ao ABWR, conhecido como SBWR. Esse reator era menor (aproximadamente 600 MWe por reator) e era diferenciado devido à sua incorporação de princípios de "segurança passiva" em seu design.

Este conceito significa que o reator, ao invés de necessitar da intervenção de sistemas ativos, como bombas de injeção de emergência para manter o reator em faixas de operação seguras, foi desenvolvido para retornar a tal estado através da operação de forças naturais.

Por exemplo, se o reator esquentasse demais, iria ativar um sistema que soltaria absorvedores de nêutron solúveis, ou materiais que atrasariam a reação em cadeia absorvendo nêutrons no núcleo do reator.

O tanque contendo esse material estaria localizado acima do reator, e a solução de absorvedores fluiria através da força da gravidade e levaria a reação a uma situação próxima de parada. Outro exemplo é o sistema condensador isolado, que se baseava no princípio de ter água quente ou vapor se elevando para levar o refrigerante quente em grandes trocadores de calor localizados acima do reator a tanques bastante profundos de água, finalizando então a remoção do calor residual. Mais um exemplo foi a omissão das bombas de recirculação no núcleo; essas bombas eram usadas em outros tipos de BWR para manter o movimento de água de refrigeração; elas eram caras, difíceis de alcançar para reparos e falhavam ocasionalmente; portanto, para aumentar a confiança, o ABWR não utilizava menos do que 10 dessas bombas de recirculação, para que mesmo que muitas falhassem, um número suficiente continuaria funcionando para que não fosse necessário um desligamento indesejado do reator. Ao invés disso, os criadores do reator de água fervente simplificado utilizaram análise térmica para criar o núcleo do reator de forma que a circulação natural (água fria desce e água quente sobe) traria água para o centro do núcleo para ser fervida.

O resultado dos implementos de segurança passiva do SBWR seria um reator que não necessitaria de intervenção humana no caso de um sinistro por até 48 horas seguindo um plano de contingência. Ele só necessitaria de reabastecimento dos tanques de água de refrigeração localizados completamente fora do reator, isolados do sistema de refrigeração.

### **3.3.2.3 Reator Simplificado de Água Fervente Econômico (ESBWR)**

Durante um período no fim dos anos 90, engenheiros da GE propuseram a combinação das características do design do reator de água fervente avançado com os implementos de segurança diferenciados do reator simplificado de água fervente, juntos em uma construção de maior tamanho de 1,600 MWe.

Diz-se que esse reator tem uma probabilidade de dano do núcleo (PDN) de apenas  $3 \cdot 10^{-8}$  acidentes danosos ao núcleo por ano-reativo. (Basicamente seriam precisos 3 milhões de reatores de água fervente econômicos (ESBWRs) em operação antes de um deles sofrer um único acidente que danificaria seu núcleo durante seus tempos de vida de 100 anos. Designs anteriores do BWR (BWR/4) tinham probabilidades de dano no núcleo tão altas quanto  $1 \cdot 10^{-5}$  acidentes danosos ao núcleo por ano-reativo.) Essa PDN extraordinariamente baixa deixa os outros LWRs no mercado totalmente para trás.

### **3.3.2.4 Vantagens**

- O vaso do reator e componentes associados operam em uma pressão substancialmente baixa (aproximadamente 75 vezes a pressão atmosférica) comparado com um PWR (aproximadamente 158 vezes a pressão atmosférica).
- O Vaso pressurizado é sujeito a menos radiação quando comparado com um PWR, portanto não se torna tão quebradiço com o tempo.

- Opera com o combustível nuclear em baixa temperatura.
- Menos componentes, não utilizando por exemplo geradores de vapor. (BWRs mais velhos tem loops de recirculação externos, mas até essa tubulação é eliminada nos BWRs mais modernos, como o ABWR.)
- Menor risco de ruptura, causando perda de refrigerante, comparado com o PWR, e menor risco de dano ao núcleo em caso de ruptura. Isso é devido a ter menos tubos, menos tubos de diâmetros grandes, menos soldagem e nenhum tubo de gerador de vapor.
- Medição do nível de água no vaso de pressão é o mesmo tanto para operações normais quanto para operações de emergência, o que resulta em uma avaliação de condições de emergência mais fácil e intuitiva.
- Pode operar em baixos níveis de densidade de potência nuclear usando circulação natural sem fluxo forçado.
- O BWR pode ser construído de forma a operar usando somente circulação natural, para que as bombas de recirculação sejam eliminadas completamente. (Os novos ESBWR usam circulação natural).
- BWRs não utilizam ácido bórico para controlar o processo de fissão, levando a uma menor probabilidade de corrosão dentro do vaso do reator e na tubulação. (Corrosão por ácido bórico deve ser monitorada cuidadosamente nos PWRs, foi demonstrado que pode haver corrosão na cabeça do vaso do reator caso a mesma não seja propriamente cuidada. Já que o BWR não utiliza ácido bórico, essas contingências são eliminadas.)
- BWRs normalmente têm redundância N-2 na maioria de seus sistemas relacionados a segurança, o que normalmente consiste em 4 conjuntos de componentes. Isso normalmente quer dizer que até dois dos quatro componentes de um sistema de segurança podem falhar e o sistema ainda pode ser ativado se for necessário.
- Devido a seu único produtor (GE/Hitachi), a leva atual de BWRs tem um design uniforme e previsível, e apesar de não completamente padronizado, são geralmente muito similares um ao outro. Os designs do ABWR e do ESBWR são completamente padronizados. Falta de padronização permanece como um problema com os PWRs, porque, pelo menos nos Estados Unidos, há três famílias de designs representadas na leva atual de PWRs, sendo bastante divergentes uma da outra.
- BWRs são muito importados. Isso pode ser devido ao fato que os BWRs são mais aptos para usos pacíficos como geração de energia, aquecimento em geral, dessalinização, devido a seu baixo custo, simplicidade, foco na segurança, o que vem ao custo de um tamanho maior e uma eficiência térmica levemente mais baixa.

### 3.3.2.5 Desvantagens

- Cálculos complexos para gerenciar o consumo de combustível nuclear durante operação devido a "fluxo de fluidos de duas fases (água e vapor)" na parte superior do núcleo. Isso requer maior instrumentação no núcleo do reator. A inovação de computadores, no entanto, faz disso um problema menor.

- Contaminação da turbina por produtos de ativação de vida curta. Isso quer dizer que a blindagem e controle de acesso através da turbina são requeridos durante operações normais devido a níveis de radiação aumentados devido ao vapor que entra vindo diretamente do núcleo do reator. Esse é um problema mínimo, visto que a maioria da radiação é devido ao Nitrogênio-16, que tem tempo de meia vida na faixa de segundos, permitindo a entrada na câmara da turbina dentro de minutos após o desligamento do reator.
- Barras de controle são inseridas por baixo nos BWRs atuais. Há duas fontes de energia hidráulica que podem levar as barras de controle até o núcleo em caso de condições de emergência no BWR. Há um acumulador hidráulico dedicado de alta pressão e também a pressão dentro do vaso de pressão do reator disponível para controlar cada barra. Tanto o acumulador dedicado (um por barra) quanto a pressão do reator é capaz de inserir completamente cada barra. A maioria dos outros reatores utiliza entrada das barras pelo topo que são presas por eletroímãs, levando-as a cair por gravidade em caso de perda de energia do reator.

### 3.3.2.6 Dando a partida (Ponto Crítico)

A partida (criticalidade) é alcançada retirando as barras de controle do núcleo para aumentar a reatividade até um nível em que está evidente que a reação nuclear em cadeia seja autossustentável. Isso é conhecido como "alcançar o ponto crítico". A retirada das barras é feita lentamente, de forma a monitorar as condições do núcleo cuidadosamente enquanto o reator alcança a criticalidade. Quando o reator aparenta estar levemente supercrítico, isso é, a potência do reator está aumentando sozinha, o reator é declarado crítico.

O movimento das barras é feito utilizando drives de sistemas de controle de barra. BWRs mais novos como o ABWR e o ESBWR, assim como todos os BWRs alemães e suecos utilizam um sistema chamado de *Fine Motion Control Rod Drive system*, o que permite que várias barras sejam controladas com movimentos bem suaves. Isso permite que o reator aumente a sua reatividade uniformemente até que o reator se torne crítico. Modelos mais antigos do BWR utilizam um controle manual, o que normalmente limita o controle de uma a quatro barras por vez, e somente através de encaixes chanfrados com intervalos fixos entre essas posições. Devido a limitações do sistema de controle manual, é possível que enquanto o reator é iniciado, o núcleo seja colocado numa posição tal que uma única barra de controle possa causar uma mudança desequilibrada de reatividade que pode potencialmente desafiar as margens térmicas projetadas do combustível. Devido a isso, a GE desenvolveu um conjunto de regras em 1977 chamado de BPWS (Banked Position Withdrawal Sequence), que ajuda a minimizar o custo de cada barra de controle e prevenir danos ao combustível em caso de um acidente envolvendo a queda de uma barra.

BWPS divide as barras de controle em 4 grupos, A1, A2, B1 e B2. Então, ou todas as barras de controle A, ou todas as barras de controle B são puxadas em uma sequência definida para criar um padrão de tabuleiro. Em seguida o grupo oposto é puxado em uma sequência definida para posições 02, então 04, 08, 16, e finalmente todas puxadas (48), até que o reator entre na faixa de potência de operação onde os limites térmicos não são mais limitantes. Seguindo o BPWS, o sistema de controle manual pode ser utilizado para aumentar uniformemente e com segurança o núcleo até o estado crítico, e prevenir que qualquer vareta de combustível exceda 280 cal/gm de liberação de energia durante qualquer evento que possa danificar o combustível potencialmente.

### 3.3 Reator de Água Pesada (PHWR)

Um reator pressurizado de água pesada (PHWR) é um reator de potência nuclear que utiliza normalmente urânio natural como combustível, utiliza água pesada (óxido de deutério  $D_2O$ ) como refrigerante e moderador. A água pesada (refrigerante) é mantida sob pressão, permitindo que seja aquecida a altas temperaturas sem ferver, parecido com o PWR. Enquanto água pesada é significativamente mais cara que água leve, ela possui uma economia de nêutrons melhorada, permitindo ao reator operar sem necessidade de unidades de enriquecimento de combustível (compensando o custo de capital com água pesada) e geralmente melhorando a habilidade do reator de utilizar eficientemente ciclos de combustíveis alternativos.

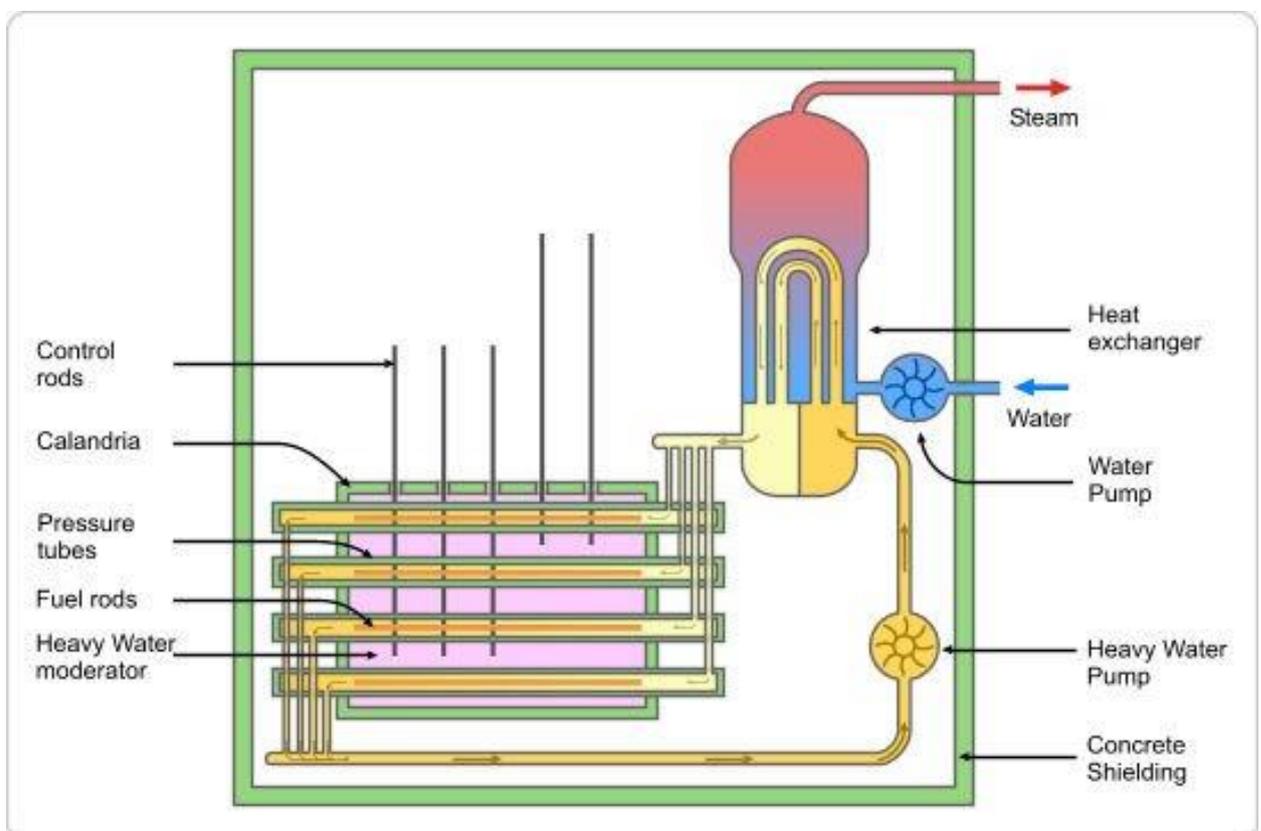


Figura 6 – Funcionamento de um reator PHWR

### 3.3.1 Água pesada

A chave para manter uma reação nuclear em um reator é utilizar os nêutrons liberados durante a fissão para estimular a fissão em outros núcleos.

Urânio natural consiste de uma mistura de vários isótopos, primariamente U-238 e uma quantidade bem menor de U-235. U-238 só pode ser fissionado por nêutrons que são relativamente energéticos, aproximadamente 1 MeV ou acima. Quantidade alguma de U-238 pode se tornar crítica, já que ele tenderá a absorver mais nêutrons do que ele libera através do processo de fissão. U-235, no entanto, pode manter uma reação em cadeia autossustentável, mas devido a pouca abundância natural de U-235, urânio natural não pode atingir criticalidade por si só.

O "truque" para manter o reator funcionando é desacelerar alguns dos nêutrons ao ponto onde a probabilidade de causar fissão no U-235 aumente a um nível que permita manter uma reação nuclear em cadeia no urânio por completo. Isso requer o uso de um moderador de nêutrons, que absorve um pouco da energia cinética dos nêutrons, desacelerando-o a um nível de energia comparável com a da energia térmica do núcleo do moderador utilizado (levando a terminologia de "nêutrons térmicos" e "reatores térmicos").

Durante esse processo de desaceleração, é benéfico separar fisicamente os nêutrons do urânio, já que o núcleo do U-238 tem uma afinidade parasítica enorme por nêutrons nessa faixa de energia intermediária (uma reação conhecida como de absorção de "ressonância"). Essa é uma razão fundamental para construir reatores com combustível sólido separado do moderador, ao invés de aplicar uma mistura mais homogênea dos dois materiais.

Água é um excelente moderador; os átomos de hidrogênio nas moléculas de água estão muito próximas em massa de um único nêutron, tendo a colisão uma transferência de momentos muito eficiente, similar ao conceito da colisão de duas bolas de bilhar. No entanto, além de ser um bom moderador, água é relativamente efetiva na absorção de nêutrons. Usar água como um moderador resultará numa absorção de nêutrons suficientes para que haja poucos nêutrons sobrando para reagir com a pequena quantidade de U-235 no combustível, novamente impedindo a criticalidade no urânio natural. Ao contrário, para abastecer um reator de água leve, a quantidade de U-235 deve primeiro ser aumentada, produzindo urânio enriquecido, o que geralmente contém 3% e 5% de U-235 por peso (o resto desse processo é conhecido como urânio empobrecido, consistindo primariamente de U-238). Nessa forma enriquecida há U-235 suficiente para reagir com os nêutrons que foram desacelerados pela água para manter a criticalidade. Uma complicação dessa aproximação é o requerimento de construir uma unidade de enriquecimento de urânio, o que é geralmente cara para construir e operar. Elas também apresentam uma preocupação de proliferação nuclear; os mesmos sistemas utilizados para enriquecer o U-235 também podem ser utilizados para produzir materiais mais puros utilizados como armamento (90% ou mais de U-235), propício a produção de uma bomba nuclear.

Uma solução alternativa a esse problema é utilizar um moderador que não absorva nêutrons tão prontamente quanto água. Nesse caso, todos os nêutrons liberados podem potencialmente ser desacelerados e utilizados em reações com o U-235, caso haja U-235 suficiente no urânio natural para manter a criticalidade. Um desses moderadores é água pesada, ou óxido de deutério. Embora reaja dinamicamente com os nêutrons de uma maneira similar a com a água leve (embora com menos transferência média de energia, já que o hidrogênio pesado, ou deutério, tem aproximadamente o dobro da massa do hidrogênio), ele ainda tem nêutrons extras que a água leve normalmente tenderia a absorver.

### 3.3.2 Vantagens e Desvantagens

O uso de água pesada como moderador é a chave para o sistema PHWR, permitindo o uso de urânio natural como combustível (na forma cerâmica de  $UO_2$ ), significando que ele pode ser operado sem unidades custosas de enriquecimento de urânio. Adicionalmente, o arranjo mecânico do PHWR, que coloca a maioria dos moderadores em baixas temperaturas, é particularmente eficiente porque os nêutrons térmicos são "mais térmicos" do que em designs tradicionais, onde o moderador normalmente flui quente. Isso quer dizer que o PHWR não só é capaz de "queimar" urânio natural e outros combustíveis, mas também tende a fazer isso mais eficientemente também.

PHWRs também tem algumas desvantagens. Água pesada normalmente custa de dólares por quilograma, embora essa seja uma troca equivalente devido ao baixo custo com combustível. A energia contida no urânio natural é reduzida comparada com a do urânio enriquecido o que requer uma reposição do combustível mais frequente, isso é normalmente conseguido através do uso de um sistema de reabastecimento *on-power*. A taxa aumentada de movimento de combustível através do reator também resulta em maiores volumes de combustível gasto do que em reatores utilizando urânio enriquecido; no entanto, como o urânio não enriquecido é menos reativo, o calor gerado é menor, permitindo ao combustível ser guardado muito mais compactamente.

### 3.3.3 Reator de Água Pesada Avançado (AHWR)

O AHWR é o último design indiano para a nova geração de reatores nucleares que queima tório no núcleo de combustível. É previsto para ser o terceiro estágio no plano de ciclo de combustível de três estágios da Índia. Essa fase do plano de ciclo de combustível deve ser começada com a construção de um protótipo de 300MW em 2016.

O Centro de pesquisa atômica de Bhabha (BARC) preparou uma grande infraestrutura para facilitar a criação e desenvolvimento desses AHWRs. Alguns itens a serem incluídos contemplam novas tecnologias de materias, componentes críticos, física de reatores, e análises de segurança. Várias instalações foram preparadas para experimentos com esses reatores.

A nova versão do AHWR será equipada com mais requerimentos de segurança em geral. Índia é a base para esses reatores devido à sua grande reserva de Tório, sendo pois, melhor para ter um uso contínuo e operação desse reator.

O AHWR é um reator vertical de tubos pressurizados resfriado por água leve fervente sob circulação natural. Uma característica única desse reator é um grande tanque de água acima da carcaça de contenção primária, chamada de *gravity-driven water pool* (Piscina de liberação de água por gravidade). Esse reservatório é utilizado para diversas funções de segurança passivas.

O design geral do AHWR é feito para utilizar grandes quantidades de tório e o ciclo de combustível de tório (ciclo que utiliza o isótopo abundante e natural de tório). O AHWR é parecido com o PHWR, visto que eles tem similaridades no conceito de pressão e de tubos de calandria, mas a orientação dos tubos no AHWR é vertical, diferente do PHWR.

### 3.3.3.1 Inovação da Segurança

Os últimos acidentes nucleares como Chernobyl e Fukushima fizeram com que um aperfeiçoamento na construção e manutenção das instalações se tornasse crucial. Esses acidentes tiveram o envolvimento reatores de urânio-235 e estruturas fracas das plantas nucleares onde estavam. Desde então a Agência Internacional de Energia Atômica implementou novos protocolos em usinas nucleares para evitar que esses acidentes ocorram novamente. Uma das principais medidas de segurança contra um derretimento nuclear é evitar que a radioatividade escape do reator. A Defense in Depth (DiD) é um método usado em usinas nucleares para a prática mais efetiva de contenção radioativa. O AHWR adquiriu o processo da DiD utilizando uma lista de provisões e materiais requeridos para manter a radiatividade no núcleo. O método da DiD define regulamentações que devem ser seguidas para reduzir incidentes de erro humano e malfuncionamentos das máquinas.

Os procedimentos são os seguintes:

- Nível 1: Prevenção de operação anormal e falhas.
- Nível 2: Controle de operações anormais e detecção de falhas.
- Nível 3: Controle de acidentes dentro da base de design.
- Nível 4: Controle de condições severas da usina, incluindo a prevenção da propagação dos acidentes e mitigação das consequências de acidentes severos.
- Nível 5: Mitigação de consequências radiológicas da liberação significativa de materiais radioativos.

O AWRH é uma inovação em segurança de energia renovável, já que irá limitar o uso de urânio-235 e substituir tal elemento pelo tório. A extração de energia nuclear do 90º elemento, Tório, é prevista para ter mais energia do que todo o óleo, carvão e urânio do mundo juntos. O AWRH tem características de segurança que o difere de um reator nuclear normal. Algumas dessas características são: sistemas de seguranças fortes, redução de calor do núcleo através de um sistema de arrefecimento interno, múltiplos sistemas desligamento, e um procedimento a prova de falhas que consiste de um veneno de nêutrons que desliga o sistema em caso de falha técnica (FBR). A potencial ameaça que cientistas tentam evitar em reatores é o acúmulo de calor porque energia nuclear se agrava quando reage com altas temperaturas, pressões, e reações químicas. O AWRH tem características que ajudam a reduzir a probabilidade dessa ocorrência através de coeficientes de reatividade negativos, baixa densidade de potência, baixo excesso de reatividade no núcleo e seleção apropriada de material.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um reator nuclear a bordo de um navio parecia algo inaceitável alguns anos atrás, devido ao fato de ser uma tecnologia considerada insegura. No entanto, após ser implantada com sucesso em navios de guerra e porta-aviões, e após diversos estudos e inovações em segurança nos reatores nucleares atuais, a energia nuclear parece ter um futuro promissor tanto em navios de guerra quanto em navios mercantes. Um fator crítico para isso é o fato de um reator nuclear poder operar durante anos sem precisar de combustível, o que o tornaria muito vantajoso em comparação ao motor a diesel do MCA, levando em consideração que o preço do óleo diesel vive em constante alta. Seu grande problema é o risco de uma explosão em caso de perda do controle do reator, no entanto, diversas medidas de segurança são tomadas para que isso seja evitado, e projetos futuros de reatores visam minimizar esse risco. Claro que ainda enfrentamos problemas como falta de mão de obra especializada suficiente para operações seguras e o fato de alguns portos, como por exemplo, o de Niterói, não permitirem navios nucleares em suas águas, além de potenciais casos de terrorismo utilizando tais navios. No entanto, se utilizada conscientemente e com segurança, tal tecnologia poderá ser de grande utilidade no transporte marítimo mundial futuramente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- <http://www.world-nuclear.org/info/nuclear-fuel-cycle/power-reactors/nuclear-power-reactors/>
- [http://www.atomicengines.com/Ship\\_paper.html](http://www.atomicengines.com/Ship_paper.html)
- <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/tekant1/>
- <http://www.radiationworks.com/nuclearships.htm>
- <http://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/26364-nuclear-propulsion-system-for-ships-using-small-nuclear-power-plants/>
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/reactor.html>
- <http://ieer.org/resource/classroom/types-of-nuclear-reactors/>
- [https://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear\\_power\\_plants/320.pressurized-heavy-water-reactor-phwr.aspx](https://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear_power_plants/320.pressurized-heavy-water-reactor-phwr.aspx)
- [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS407\\_scr/D407\\_scr1.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS407_scr/D407_scr1.pdf)
- <http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull313/31302392529.pdf>
- <http://barentsobserver.com/en/business/no-future-nuclear-powered-container-ship-24-10>
- <http://www.oldsaltblog.com/2012/11/the-worlds-only-nuclear-powered-containerlash-vessel-sevmorput-to-be-scrapped/>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Yamal\\_\(icebreaker\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Yamal_(icebreaker))
- <http://atomicinsights.com/cover-story-why-did-savannah-fail/>
- <http://www.radiationworks.com/ships/NSSavannah.htm>
- [http://www.coolantarctica.com/Antarctica%20fact%20file/ships/Yamal\\_ice\\_breaker.htm](http://www.coolantarctica.com/Antarctica%20fact%20file/ships/Yamal_ice_breaker.htm)
- [http://www.ge-energy.com/content/multimedia/\\_files/downloads/ge\\_hitachi%20brochure.pdf](http://www.ge-energy.com/content/multimedia/_files/downloads/ge_hitachi%20brochure.pdf)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor)
- <http://gcaptain.com/the-worlds-first-nuclear-merchant-ship-ns-savannah/>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Sevmorput>