

UNIVERSIDADE SAGRADO CORAÇÃO

ELIANDRO BISCHÉL

**USINAS NUCLEARES: FUNCIONAMENTO,
INSTALAÇÕES E PRINCIPAIS NORMAS DE
SEGURANÇA**

BAURU
2011

ELIANDRO BISCHÉL

**USINAS NUCLEARES: FUNCIONAMENTO,
INSTALAÇÕES E PRINCIPAIS NORMAS DE
SEGURANÇA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Química, sob a orientação do Prof. MS. Dorival Roberto Rodrigues.

**BAURU
2011**

Bischel, Eliandro

B6213u

Usinas nucleares: funcionamento, instalações e principais normas de segurança / Eliandro Bischel -- 2011.

42f. : il.

Orientador: Prof. Ms. Dorival Roberto Rodrigues.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) - Universidade Sagrado Coração - Bauru – SP

1. Usina nuclear. 2. Fissão nuclear. 3. Segurança. I. Rodrigues, Dorival Roberto. II. Título.

ELIANDRO BISCHÉL

**USINAS NUCLEARES: FUNCIONAMENTO,
INSTALAÇÕES E PRINCIPAIS NORMAS DE
SEGURANÇA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Química, sob a orientação do Prof. Ms. Dorival Roberto Rodrigues.

Banca Examinadora:

Prof. MS. Dorival Roberto Rodrigues (Orientador)

Prof^a. Dra. Terlize Cristina Niemeyer (Titular)

Prof^a. MS .Simone Grellet Pereira Fernandes (Titular)

Bauru, 16 de dezembro de 2011.

Dedico este trabalho,

*Primeiramente a DEUS, aos meus familiares e amigos, que
me incentivaram e apoiaram em todas as fases da vida.*

E a todos, que contribuíram para esse momento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que sempre está ao nosso lado em todos os momentos, e coloca em nosso caminho pessoas especiais.

À minha família meus amigos, meu orientador Prof. MS. Dorival Roberto Rodrigues, que me proporcionou total apoio. E todos os colegas e professores que fizeram parte dessa jornada.

RESUMO

O presente trabalho descreve o processo de obtenção de energia através do mecanismo de fissão nuclear, o processo de enriquecimento de urânio por ultracentrifugação, que visa elevar a concentração do isótopo U^{235} de 0,71% a cerca de 3,2%, necessária para manter uma reação em cadeia auto-sustentada, necessária para o funcionamento de uma usina nuclear. Descreve o processo de reconversão de UF_6 em UO_2 que é empregado na fabricação das pastilhas de UO_2 utilizadas como ‘combustível’ na maioria dos reatores, também é abordado as instalações físicas de usinas nucleares, principalmente as usinas do tipo PWR (Reatores de água pressurizada), modelo utilizado no Brasil, nas usinas de Angra 1 e Angra 2. Descreve os tipos de usinas mais utilizados, e suas principais diferenças, dando um panorama mundial sobre a distribuição de reatores em uso atualmente, por tecnologia utilizada, por país e a sua representatividade no setor energético. Descreve o funcionamento de uma usina nuclear, as barreiras de contenção utilizadas no processo ou em caso de acidentes. Cita também alguns dos princípios de segurança que visam garantir o funcionamento seguro desses estabelecimentos, e o fator humano, que através da cultura de segurança, e ações positivas atuam na detecção e prevenção de acidentes.

Palavras-chave: Usina nuclear. Fissão nuclear. Segurança.

ABSTRACT

This paper describes the process of obtaining energy through the mechanism of nuclear fission. The process of uranium enrichment by ultracentrifugation which aims to raise the concentration of the isotope U235 from 0.71% to about 3.2%, in which is required to keep the chain reaction self-sustaining. This is necessary for the operation of a nuclear power plant. It describes the conversion process of UF₆ to UO₂, which is used in the manufacturing of UO₂ pellets – used as ‘fuel’ in most reactors. Also discussed are physical nuclear power plant facilities; especially PWR (Pressurized Water Reactors) type models used in Brazil – Angra 1 and Angra 2. Also described are the types of plants mostly used and their main differences, painting a global picture of the distribution of reactors in use today, their technology, country, and its representative in the energy sector. It later describes the operation of a nuclear power plant, the containment barriers used in the process and in the event of an accident. He (The author), also mentions some of the security principles that ensure safe operation of such establishments, and the human factor; in which safety is the culture, and positive actions work in the detection and prevention of accidents.

Keywords: Nuclear power plant. Nuclear fission. Safety.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	JUSTIFICATIVA.....	9
3	OBJETIVOS.....	10
3.1	OBJETIVOS GERAIS.....	10
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
4	HISTÓRICO.....	11
5	ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO.....	12
5.1	PROCESSOS DE ENRIQUECIMENTO.....	12
5.2	ULTRACENTRIFUGAÇÃO.....	14
5.3	RECONVERSÃO DO UF ₆ EM UO ₂	16
5.4	FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS DE UO ₂	17
6	INSTALAÇÕES FÍSICAS DE UMA USINA NUCLEAR.....	19
6.1	PANORAMA MUNDIAL DA ENERGIA NUCLEAR NO MUNDO.....	19
6.2	TIPOS DE USINAS NUCLEARES.....	19
6.3	REATORES TIPO PWR.....	21
6.4	REATORES BWR.....	25
6.5	REATORES RBKM 1000.....	26
7	FUNCIONAMENTO E SEGURANÇA.....	28
7.1	MECANISMO DE FISSÃO NUCLEAR.....	28
7.2	CONTROLE DA REAÇÃO EM CADEIA.....	29
7.3	O ELEMENTO COMBUSTÍVEL.....	30
7.4	FUNCIONAMENTO DE UM REATOR.....	31
7.5	BARREIRAS DE CONTENÇÃO.....	33
7.6	SISTEMAS DE SEGURANÇA ATIVOS.....	35
7.7	FATORES HUMANOS.....	35
8	DESTINAÇÕES DE RESÍDUOS.....	38
9	CONCLUSÃO	40
	REFERENCIAS.....	

1 INTRODUÇÃO

A utilização de energia nuclear sempre foi um tema polêmico, principalmente depois dos eventos ocorridos no final da Segunda Guerra Mundial, com a detonação de duas bombas atômicas no Japão, em Hiroshima e Nagasaki.

Esse fato é, em grande parte, a principal causa de rejeição à utilização da energia nuclear em suas várias aplicações, seja para gerar energia elétrica através do calor gerado pela fissão de núcleos atômicos, ou em aplicações em projetos científicos.

Desde o início, as pesquisas na área nuclear se canalizaram rapidamente para fins bélicos. Somente depois da Segunda Guerra Mundial é que se combinou essa tendência com aproveitamento pacífico, como o uso em usinas termonucleares, medicina, etc. Porém grandes investimentos na área militar, a Guerra Fria entre EUA e a extinta União Soviética, com uma grande corrida armamentista nuclear e as demonstrações de avanço tecnológico a cada episódio militar mostram que a orientação mestra não fora abandonada (GIROTTI, 1984).

Com a demanda crescente de energia mundial e sendo esse um fato crucial para o desenvolvimento sustentado, buscam-se cada vez mais formas de suprir essa demanda com fontes renováveis, ou mais eficazes que a matriz petrolífera. E, sem dúvida, a energia nuclear é uma delas, possivelmente utilizada na forma de usinas termonucleares para geração de energia elétrica.

2 JUSTIFICATIVA

As usinas nucleares constituem a forma mais eficiente de se gerar energia elétrica, empregada em residências e indústrias, principalmente na Europa e Ásia, sendo em alguns países a principal matriz energética. Apesar do risco de um acidente envolvendo usinas nucleares ser remoto, quando existe a ocorrência, sua consequência é grande por conta da radiação liberada e as contaminações geradas, além disso, existe o problema dos resíduos gerados (lixo atômico), que ainda não possuem uma destinação considerada adequada.

Muitas são as tentativas de redução da utilização desse tipo de energia principalmente por pressões de ambientalistas e catástrofes ocorridas na história, como recentemente no Japão, em 11 de março de 2011, quando um terremoto de 8,9 pontos na Escala Richter causou um Tsunami, e o tremor danificou o prédio da usina de Fukushima causando um acidente considerado grave.

Porém a demanda crescente por energia e a necessidade da redução da queima de combustíveis fósseis impede que isso seja realizado.

Por essa razão esse estudo mostra-se relevante diante da necessidade de conhecimento sobre o funcionamento de uma usina nuclear, os níveis de segurança e as pesquisas sobre a destinação dos resíduos. Essa pesquisa bibliográfica pretende mostrar um panorama sobre o presente e perspectivas futuras sobre o uso e a geração de energia através desse método.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem por objetivo principal descrever o processo de obtenção de energia a partir do mecanismo de fissão utilizado em usinas nucleares, relacionando esse processo com as normas regulamentadoras que visam garantir o funcionamento seguro desses estabelecimentos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Descrever as instalações físicas, diferentes tipos de usinas, as mais modernas, as mais amplamente difundidas no mundo, suas localizações e o percentual de importância em relação às outras formas de obtenção de energia.

Apresentar e discutir as principais normas de segurança e legislações para o funcionamento de uma usina nuclear, o tempo de vida útil de uma usina nuclear, o armazenamento dos resíduos (lixo atômico), os perigos de um acidente, e suas prováveis causas, tendo por base o histórico dos principais acidentes ocorridos na história, e o alerta de especialistas.

4 HISTÓRICO

Em 1896, o cientista francês Henri Becquerel, percebeu a ação de algum tipo de radiação emitida por uma amostra de óxido urânio que fora guardada em uma gaveta que continha placas fotográficas. Ficou surpreso ao notar que o composto de urânio havia escurecido as placas, apesar das mesmas estarem cobertas por um material opaco. Foi no início de 1898, que Marie Sklodowska Curie em um trabalho de doutorado mostrou que a radiação a qual chamou de radioatividade era emitida pelo urânio independentemente do tipo de composto. E juntamente com seu marido Pierre Curie, continuou os trabalhos e mostraram que o rádio, tório e polônio também eram radioativos. (ATKINS; JONES, 2007).

O método de estudo utilizado foi uma câmara de ionização, observando-se a corrente elétrica produzida, no ar, entre duas placas eletrizadas, quando se colocava um material que emitia radiações entre as placas, dando assim mais confiabilidade ao método de estudo. Pois o método que utilizava placas fotográficas poderia sofrer alteração por outras influências, como a luz por exemplo (FÍSICA MODERNA 2011).

Segundo Atkins e Jones (2007), até aquele momento a origem dos raios era desconhecida assim como a existência dos núcleos atômicos, e foi Ernest Rutherford, que em 1898 deu os primeiros passos para a descoberta de sua existência, ao identificar três tipos de radioatividade observando a influência de campos elétricos sobre emissões radioativas. E denominou-as como radiação alfa α , radiação beta β e radiação gama γ . Após essas descobertas, mostrou-se que a radioatividade era produzida por decaimento nuclear, a decomposição parcial do núcleo, que causa uma mudança de composição no núcleo, a chamada reação nuclear.

5 ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO

O urânio é o último elemento natural da classificação periódica, de símbolo U, com número atômico 92, densidade 19,7 g/cm³ e massa atômica 238,03 Dalton é encontrado na natureza na proporção de duas partes por milhão, com concentrações de 99,28% do isótopo U²³⁸ e 0,71% do isótopo U²³⁵ utilizado como combustível (ATKINS; JONES, 2007).

O isótopo utilizado como combustível em reatores nucleares para gerar energia é o U²³⁵, pois é capaz de sofrer o processo de fissão nuclear. Para que haja uma reação de fissão nuclear em cadeia é necessário elevar a concentração do isótopo U²³⁵ a cerca de 3,2% através de um processo conhecido como enriquecimento de urânio (ATKINS; JONES, 2007).

5.1 PROCESSOS DE ENRIQUECIMENTO

A rocha que contém urânio é extraída do solo e em seguida submetida a um processo industrial chamado lixiviação, para retirada do urânio. Do processo resulta um licor, que é levado à usina de beneficiamento, onde é clarificado e filtrado, passando então por um processo químico até se transformar num sal de cor amarela, o concentrado de urânio, cuja composição química é o di-uranato de amônio [(NH₄)₂U₂O₇] conhecido como *yellowcake* ou “bolo amarelo” que será convertido em UO₂ por uma reação de redução com H₂. A partir disso, UO₂ é convertido então em UF₄ (tetrafluoreto de urânio) pela adição do ácido fluorídrico (HF), e então a UF₆ (hexafluoreto de urânio) usando o flúor. O UF₆ é convertido para o estado gasoso e segue para a etapa de enriquecimento isotópico (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2010).

As equações abaixo mostram as etapas para a conversão do (NH₄)₂U₂O₇ em UF₆:

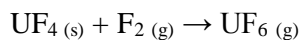
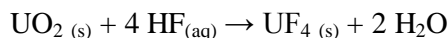
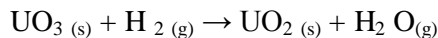
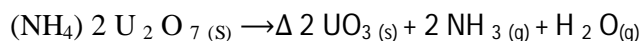




Figura 1- Yellowcake (concentrado de Urânio).

Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud Relatório...2010).

Existem alguns métodos de separação de isótopos que são utilizados para o enriquecimento, um dos mais difundidos é a ultracentrifugação, que já é utilizada há vários anos por alguns países, inclusive o Brasil. Há também a difusão gasosa, utilizada pelos EUA, França e Rússia, que se caracteriza pelo alto consumo de energia durante a operação.

Segundo Atkins e Jones (2007) no processo de difusão gasosa, a diferença nas velocidades de efusão dos fluoretos isotópicos $^{235}\text{UF}_6$ e $^{238}\text{UF}_6$ é utilizada para separá-los, onde o vapor efunde milhares de vezes por barreiras porosas, num processo muito complexo e que utiliza grandes quantidades de energia. Já no processo de ultracentrifugação, é a diferença de massa entre os isótopos que permite a separação, utilizam-se centrifugas que giram a velocidades muito altas e são capazes de separar os isótopos apesar da pouca diferença de massa $^{235}\text{UF}_6$ (massa molar, $349,0 \text{ g.mol}^{-1}$) e $^{238}\text{UF}_6$ (massa molar, $352,1 \text{ g.mol}^{-1}$), com uma relação muito próxima de 1: (1,004).

5.2 ULTRACENTRIFUGAÇÃO

Em linhas gerais a ultracentrifugação é um processo de enriquecimento isotópico que segue o mesmo princípio das centrífugas convencionais.

Nesse processo utiliza-se uma velocidade muito alta. O U^{235} é ligeiramente mais leve que o U^{238} . Dentro da centrífuga o isótopo U^{235} tende a concentrar-se mais no centro e o U^{238} mais pesado é jogado pra fora mais próximo das paredes do cilindro. Duas tubulações de saída recolhem o urânio, sendo que em uma delas segue o urânio com maior concentração de isótopos U^{235} (urânio enriquecido), e na outra, o que tiver mais isótopos U^{238} (urânio empobrecido) (ATKINS; JONES, 2007).

Abaixo está uma representação do esquema de uma ultracentrífuga com a entrada do UF_6 , e as saídas, do isótopo U^{238} urânio empobrecido, e U^{235} urânio enriquecido (produto).

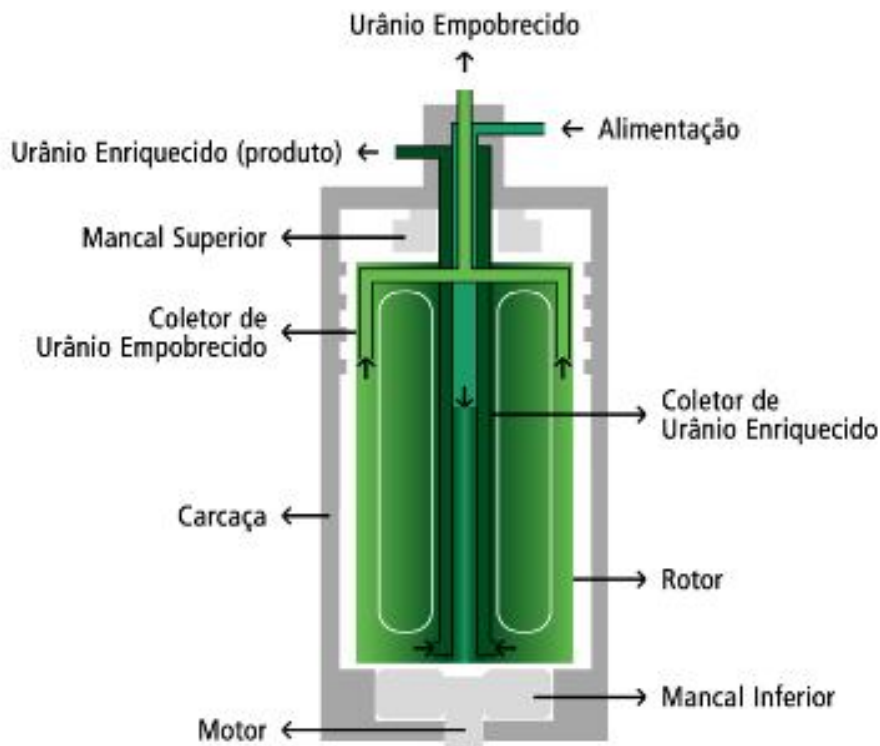


Figura 2 – Esquema de Ultracentrífuga.

Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud Brasil...2010).

Para se obter urânio com os teores de concentração necessários para a sua utilização como combustível em usinas nucleares em escala industrial, é utilizada uma cadeia de elementos de separação isotópica interligados em série e paralelo, por meio de tubulações

referentes aos fluxos de urânio de alimentação e retirada de urânio enriquecido e empobrecido. Esse mecanismo denomina-se cascata.

Desta forma o urânio enriquecido é repassado de uma centrífuga para outra, até que se obtenha o nível de enriquecimento desejado, com concentração de 3,2% de U^{235} , para a utilização como combustível físsil (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2010).

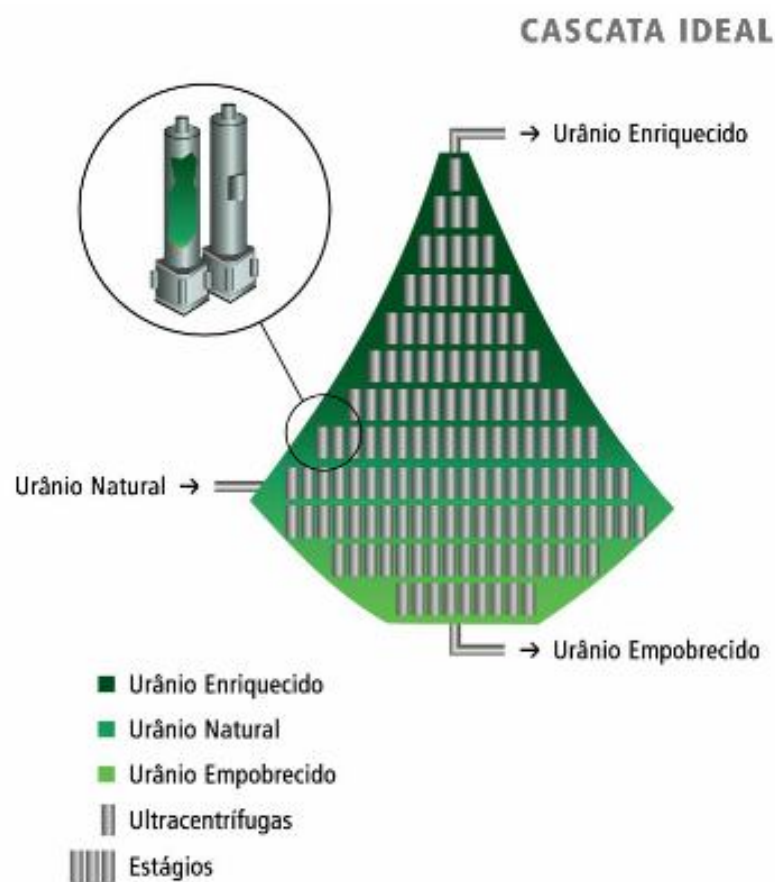


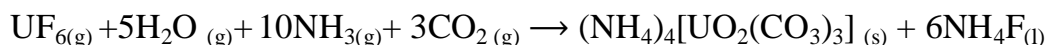
Figura 3- Esquema de Cascata ideal.

Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud Brasil...2010).

5.3 - RECONVERSÃO DO UF₆ EM UO₂

É o processo pelo qual o hexafluoreto de urânio (UF₆) é transformado em dióxido de urânio (UO₂). A reconversão é o retorno do gás UF₆ ao estado sólido, sob a forma de pó de dióxido de urânio (UO₂). O hexafluoreto de urânio (UF₆), é levado para aquecimento no vaporizador. A 100°C o UF₆ é misturado com gás carbônico (CO₂) e gás amoníaco (NH₃), em um tanque precipitador, contendo água desmineralizada. A reação química entre estes compostos produz o tricarbonato de amônio e uranila (TCAU), sólido amarelo insolúvel em água (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2010).

A reação de precipitação do (TCAU), ocorre segundo a equação abaixo:



Em seguida, o conteúdo do precipitador é bombeado para filtros rotativos a vácuo, onde o pó de TCAU é seco e transportado para o alimentador do forno. No forno de leito fluidizado, à temperatura de 600°C, o TCAU é alimentado juntamente com gás hidrogênio (H₂) e vapor d'água. O produto gerado, o dióxido de urânio (UO₂), ainda instável, é descarregado no estabilizador, onde recebe a adição de gás nitrogênio (N₂) e ar. Após a estabilização, o UO₂ é transportado para os homogeneizadores, onde este pó é estabilizado com ar seco, estando pronto para a fabricação das pastilhas de UO₂ (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2010).

A reação de obtenção do UO₂ a partir do (TCAU) ocorre segundo a equação abaixo:



A figura 4 mostra uma representação do processo de reconversão do UF_6 em UO_2 .

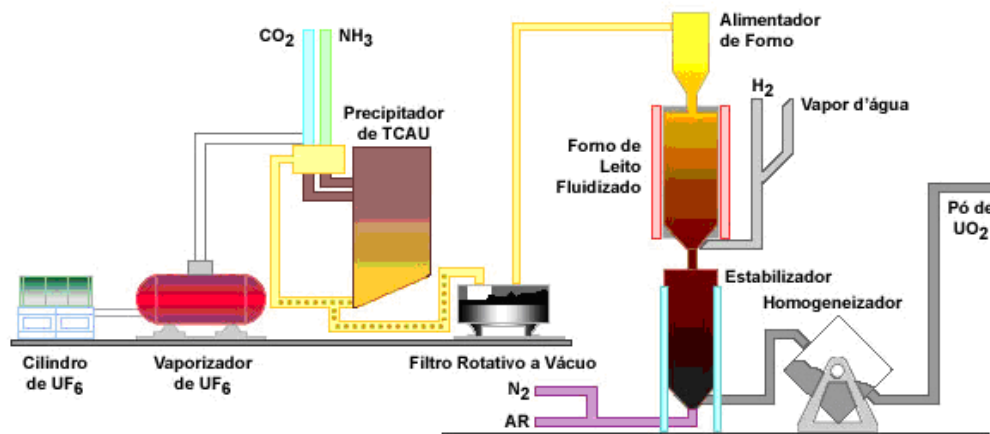


Figura 4 - Reconversão do UF_6 em Pó de UO_2 .
 Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud Brasil...2010).

5.4 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS DE UO_2

Após o processo de mistura (homogeneização), o pó de UO_2 é transportado para uma prensa rotativa automática, onde são produzidas as pastilhas. Nesta fase do processo são chamadas de "pastilhas verdes" que, ainda relativamente frágeis, são encaminhadas ao forno de sinterização, sob temperatura de 1750°C , em processo semelhante ao da fabricação de cerâmicas, onde adquirem resistência (ou endurecimento) necessária às condições de operação a que serão submetidas dentro de um reator de uma usina nuclear. As pastilhas sinterizadas passam, ainda, por uma etapa de retificação para ajuste fino das dimensões. Após a retificação todas as pastilhas sinterizadas são verificadas através de medição a laser, que rejeita aquelas cuja circunferência estiver fora dos padrões adequados (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2010).



Figura 5 – Pastilhas de UO_2 .

Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud Brasil...2010).

Segundo Atkins e Jones (2007), a energia liberada quando um grama de urânio sofre a reação de fissão, é cerca de 1,3 milhões de vezes a energia produzida pela queima de um grama de metano, o principal componente do gás natural.

As pastilhas de urânio têm aproximadamente um centímetro de comprimento por um centímetro de diâmetro, duas pastilhas de urânio, produzem energia suficiente para atender, por um mês, uma residência média em que vivam quatro pessoas (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2010).

6 INSTALAÇÕES FÍSICAS DE UMA USINA NUCLEAR

6.1 PANORAMA MUNDIAL DA ENERGIA NUCLEAR NO MUNDO

Existe hoje, cerca de 440 usinas nucleares em operação no mundo. Os países que mais fazem uso desse tipo de tecnologia são os Estados Unidos com 104 unidades, a França com 59 reatores e o Japão com 55, o Brasil possui atualmente 2 reatores em operação e um em construção (Fonte: - Agência Internacional de Energia Atômica (2008 apud Indústrias Nucleares do Brasil, c2011).

A figura abaixo mostra o numero de reatores em operação no mundo atualmente.



Figura 6 - Reatores em operação no mundo em 2008.

Nota: Ao total de Reatores em Operação foram somadas seis unidades referentes a Taiwan

Fonte: - Agência Internacional de Energia Atômica (2008 apud Indústrias Nucleares do Brasil, c2011)

A demanda crescente de energia mundial é um fato que implica na procura de formas alternativas de produção, sobretudo de energia elétrica. Após a crise do setor petrolífero em 1979, o consumo de energia elétrica é o que apresenta o maior crescimento, com 2,9% anual, contra 2,5% do gás natural, 0,9% do petróleo, 0,7% do carvão. No cenário mundial a energia de elétrica de origem nuclear já é a quarta maior fonte, embora seja utilizada há aproximadamente 50 anos, com participação de 14,8% segundo dados da IEA (International

Energy Agency) semelhante a fonte hidroelétrica que vem sendo utilizada há mais de um século. A figura tabela abaixo mostra esse percentual.

Tabela 1 - Energia elétrica no mundo (2006).

País	%	TWh*
Carvão	41,0	7.761,3
Petróleo	5,8	1.097,94
Gás Natural	20,1	3.804,93
Nuclear	14,8	2.801,64
Hidrelétrica	16,0	3.028,8
Outras	2,3	435,39
Total	100,0	18.930

Fonte - Agência Internacional de Energia Atômica (2008 apud Indústrias Nucleares do Brasil, c2011). Adaptado pelo autor.

Nota: ((*) Um terawatt-hora equivale a um milhão de gigawatts-hora).

6.2 TIPOS DE USINAS NUCLEARES

Aproximadamente de 65% das usinas em funcionamento atualmente, contam com reatores à água pressurizada PWR (Pressurized Water Reactor = Reator à Água Pressurizada), o mesmo modelo utilizado no Brasil, nas usinas de Angra 1 e Angra 2. Aproximadamente, 25% são reatores à água fervente (BWR), como os da central de Fukushima, no Japão onde ocorreu um grave acidente em 11 de março de 2010. Outros 10% equivalem a outras tecnologias, algumas em implantação e outras que estão se tornando obsoletas e irão desaparecer da matriz nuclear mundial na medida em que estas unidades chegarem ao fim de suas vidas úteis. Essas são usinas que possuem reatores do tipo (RBMK1000), semelhante ao utilizado na central de Chernobyl na Ucrânia onde ocorreu um grave acidente em 1986 (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2011).

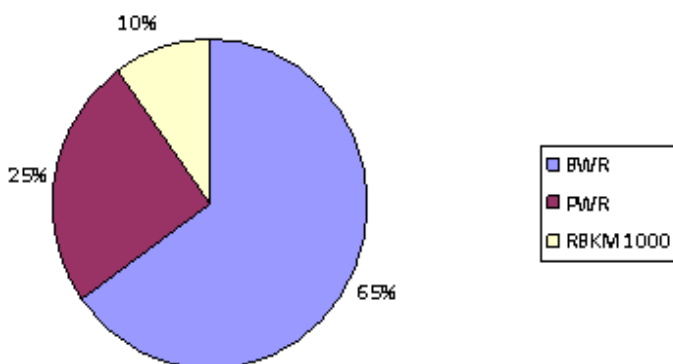


Figura 7 - Distribuição dos tipos de reatores utilizados atualmente no cenário mundial, segundo dados da Eletrobrás: (BWR) 65%, (PWR) 25% e (RBKM 1000, e outros) 10%.
Fonte: Elaborado pelo autor

Os percentuais acima demonstram a preferência da indústria nuclear mundial por reatores PWR, mesmo tendo em seu histórico um acidente em Three Mile Island nos EUA em 1979.

6.3 REATORES TIPO PWR

Os reatores de água pressurizada (PWR) são os mais utilizados para geração de energia elétrica e principalmente na propulsão naval. O projeto desse tipo de reator como numa usina de energia para submarinos e utiliza água como moderante e refrigerador.

Os reatores (PWR) possuem um circuito de refrigeração primário e um secundário.

No circuito primário a água passa pelo núcleo do reator e atinge uma temperatura de aproximadamente 325 °C. Para que isso ocorra, a água permanece submetida a uma pressão muito elevada, cerca de 150 atmosferas para evitar que se transforme em vapor. No circuito primário a água age também como agente moderador, nas reações de fissão. No circuito secundário a água está sob pressão menor e troca calor com o circuito primário, sendo vaporizada. O vapor produzido movimentava as turbinas gerando energia elétrica, passa por um condensador e retorna para os trocadores de calor em contato com o circuito primário, em um ciclo contínuo (WORD NUCLEAR ASSOCIATION 2011).

Abaixo a representação do esquema de funcionamento de uma usina (PWR).

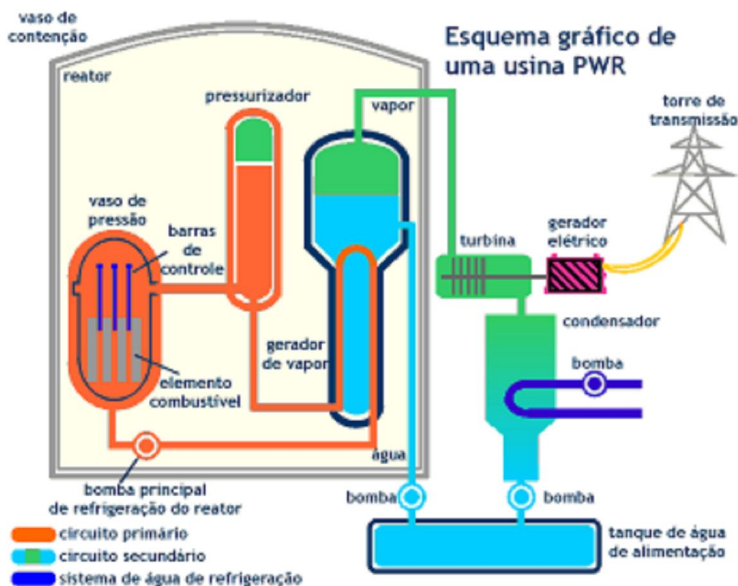


Figura 8 - Esquema gráfico de uma usina PRW.

Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud Brasil...2010).

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto situada no município de Angra dos Reis conta com duas unidades em operação, usinas de Angra 1 e 2, e uma unidade em fase de construção, Angra 3. Todas são do tipo PWR.

Dados da Eletrobrás Nuclear, mostram que, Angra 1 tem capacidade de produzir 657 megawatts e Angra 2 1350 megawatts, e a unidade de Angra 3 terá capacidade de 1400 megawatts.

As duas unidades em operação são responsáveis por 3% da energia produzida no Brasil e atualmente fornecem 50% da demanda de energia do estado do Rio de Janeiro. Porém no cenário mundial representa apenas 0,52% da produção de energia de origem nuclear (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2011).

Abaixo a figura mostra a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.



Figura 9 - Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.
Fonte: Plano Brasil, c2011.

Um acidente envolvendo uma usina (PWR) ocorreu nos EUA, em Three Mile Island, (mostrada na figura 10) na ilha no Rio Susquehanna no condado de Dauphin, Pensilvânia em 28 de Março de 1979.

Havia dois reatores, denominados TMI-1 e TMI-2 e o núcleo do reator (TMI-2) sofreu uma fusão parcial, havendo vazamento de radioatividade para a atmosfera.

O acidente foi causado por falha do equipamento, devido ao mau estado do sistema técnico seguido de erro operacional. O sistema de refrigeração do circuito secundário do reator TMI-2 teve uma pequena avaria, causando o desligamento automático do reator, porém uma válvula de alívio do circuito primário não fechou, e os instrumentos não apontaram a falha. O núcleo sofreu vários danos, pois perdeu água de resfriamento, houve superaquecimento e as hastes de combustível foram danificadas. Os operadores foram incapazes de resolver o desligamento inadequado, com uma sucessão de erros de leitura e ações referentes ao processo em colapso (WORD NUCLEAR ASSOCIATION 2011).

A figura abaixo mostra a central nuclear de Three Mile Island, onde ocorreu um acidente em 28 de Março de 1979.



Figura 10 - Central nuclear de Three Mile Island
Fonte: Plano Brasil, c2011.

6.4 REATORES BWR

No projeto de um reator BWR (Boiling Water Reactors), reatores de água fervente, existe apenas um circuito, em que a pressão é bastante inferior à pressão utilizada no circuito primário do reator PWR. A pressão nesse tipo de reator é de aproximadamente 75 atmosferas, e sob essa pressão a água em seu interior entra em ebulição a 285 °C. O vapor produzido na parte superior do vaso passa por pratos de separação e é direcionado para a turbina, e após a transferência de energia passa por um condensador e retorna para o núcleo do reator.

Esse projeto é mais simplificado, por conter apenas um circuito. Em contrapartida, a água passa diretamente pelo núcleo do reator e absorve radionuclídeos. Por conta disso, a turbina deve ter blindagem e proteção, mas, segundo especialistas ainda assim, a vida útil dos componentes é comprometida por corrosão e fissuras de stress nas tubulações. Outro fato é que não conta com um sistema de refrigeração que pode atuar por gravidade como nos PWR, que possuem os circuitos primários e secundários independentes (WORD NUCLEAR ASSOCIATION 2011).

Em Fukushima no Japão em março 2011, os três reatores em operação eram do tipo BWR, e no evento do Tsunami deveriam ser desligados automaticamente, porém o sistema de refrigeração falhou, a partir daí, foram muitas semanas de trabalho para restaurar a refrigeração dos reatores, trabalho este realizado por centenas de funcionários, apoiados por bombeiros e militares.

Abaixo a representação do esquema de funcionamento de uma usina BWR:

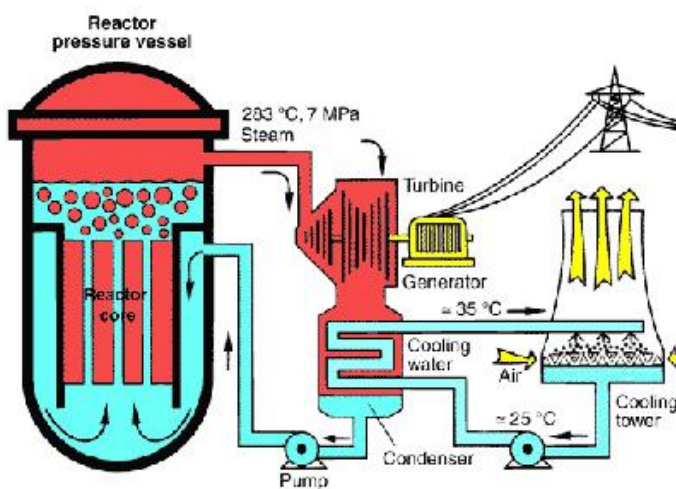


Figura 11 - Esquema gráfico de uma usina BWR.
Fonte: Euronuclear, c2011.

6.5 REATORES RBKM 1000

O reator que era utilizado na Usina de Chernobyl era do tipo RBKM 1000. Nesse tipo de reator as varetas de combustível nuclear são colocadas dentro de blocos de grafite usado como moderador (sem contenção de aço), a água passa pelos tubos onde é vaporizada e segue para turbina, sem que haja a necessidade de um gerador de vapor. Conforme ilustra a figura abaixo:

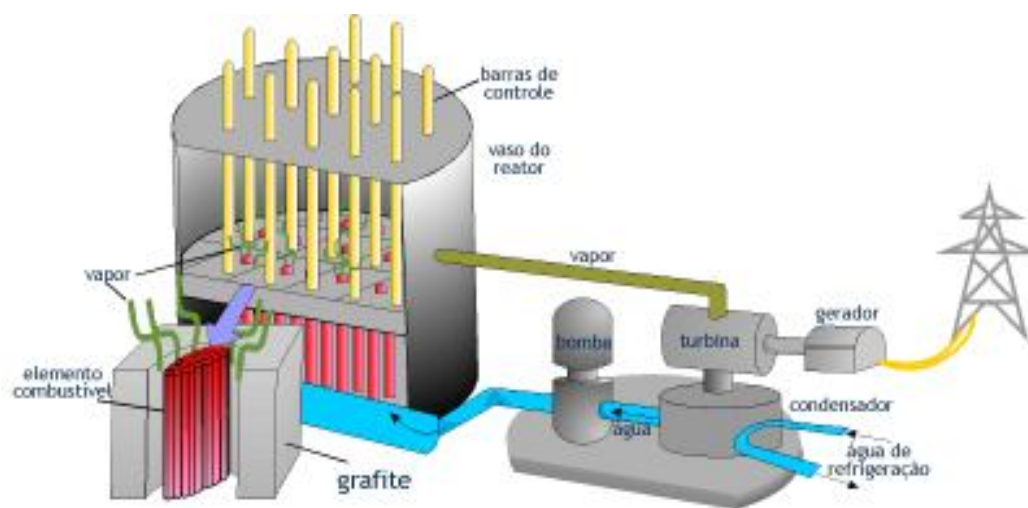


Figura 12 - Esquema gráfico do reator de Chernobyl.
Fonte Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud Brasil...2010).

O reator soviético acidentado difere dos que usam água leve como moderador, utilizava grafite que se incendiou causando o derretimento das barras de combustível, com liberação do material radioativo. A dispersão para o meio ambiente foi facilitada pela ausência do prédio de contenção.

Já num acidente com uma usina PRW ou BRW a presença do prédio de contenção favorece a segurança como em Three Mile Island (ROSA et al., 1988)

O acidente nuclear de Chernobyl ocorreu dia 26 de abril de 1986, na Usina Nuclear de Chernobyl na Ucrânia (então parte da União Soviética). É considerado o pior acidente nuclear da história da energia nuclear, produzindo uma nuvem de radioatividade que atingiu a

União Soviética, Europa Oriental, Escandinávia e Reino Unido, com a liberação de 400 vezes mais contaminação que a bomba que foi lançada sobre Hiroshima (WORD NUCLEAR ASSOCIATION 2011).



Figura13 - Usina nuclear de Chernobyl : palco do pior acidente nuclear da história.
Fonte: Plano Brasil c2011.

7 FUNCIONAMENTO E SEGURANÇA

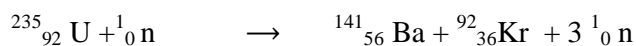
7.1 MECANISMO DE FISSÃO NUCLEAR

Segundo Atkins e Jones (2007), em 1938 os cientistas Otto Hahn, Lisa Meitner e Fritz Strassman perceberam que ao bombardear átomos de urânio com nêutrons podiam quebrá-los em fragmentos menores e liberar energia. Ao bombardear átomos pesados como os do urânio-235 com nêutrons, pode-se quebrá-los em fragmentos menores, essas são as chamadas reações de fissão nuclear. Quando os átomos de urânio-235 sofrem fissão uma quantidade enorme de energia é liberada.

Os valores de energia liberada no processo de fissão podem ser considerados através da famosa equação de Einstein sobre a relação entre massa e energia $E=mc^2$. Onde E é a energia, m a massa e c a velocidade da luz, $3,00 \times 10^8$ m/s. Segundo a equação de Einstein massa e energia são diretamente proporcionais. Se o sistema perde massa libera energia (exotérmico). Como a constante de proporcionalidade $c^2 = (3,00 \times 10^8 \text{ m/s})^2$ é um número muito grande, pequenas variações de massa ou perdas liberam uma quantidade enorme de energia.

As variações de massa em reações químicas são muito menores que as variações em reações nucleares. A variação de massa no processo de combustão de um mol de metano CH_4 (processo exotérmico) é $-9,9 \times 10^{-9}$ g. Já na fissão de um mol de urânio-238 são 50 mil vezes maiores (BROWN et al., 2007).

Segundo Atkins e Jones (2007), núcleos de urânio-235 quando bombardeados por nêutrons podem quebrar-se de várias formas, em um desses processos de fissão forma bário-142 e criptônio-92.



Segundo Brown et al (2007), uma reação de fissão produz dois nêutrons, esses dois nêutrons podem provocar duas fissões, liberando quatro nêutrons que podem provocar quatro fissões e assim por diante. Essas reações que se multiplicam dessa forma são chamadas reações em cadeia. Para que a fissão nuclear auto-sustentada possa ocorrer é necessária uma

massa mínima, para que os nêutrons não escapem da amostra sem atingir outros núcleos. Essa massa mínima é denominada massa crítica, que no caso do urânio-235 é de 1 kg.

Nesse processo altamente exotérmico há uma aceleração na velocidade de fissão, dobrando o número de fissões a cada etapa (BROWN et al., 2007).

A figura abaixo mostra uma representação do mecanismo de fissão em cadeia do urânio-235.

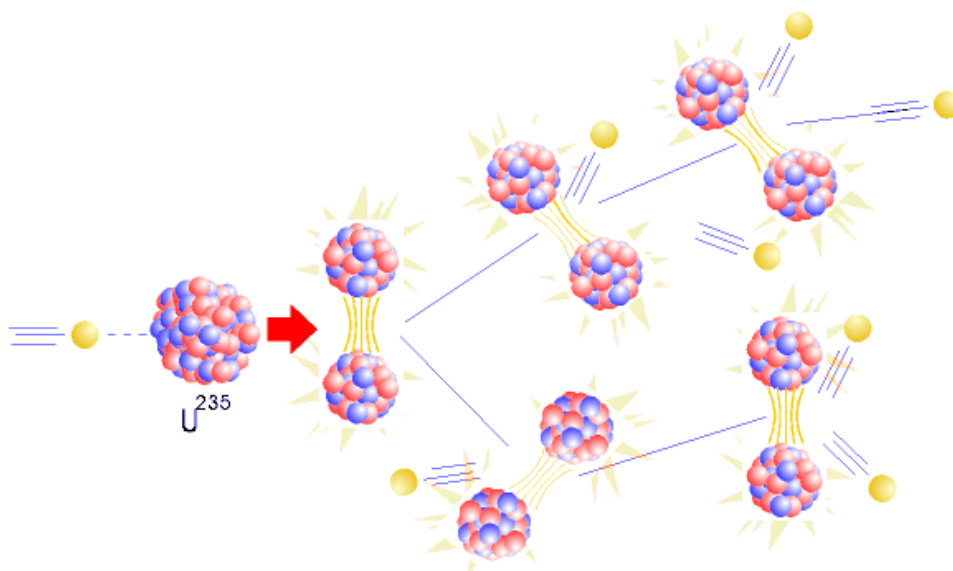


Figura 14 - Mecanismo de reação em cadeia do urânio-235.
Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud Brasil...2010).

7.2 CONTROLE DA REAÇÃO EM CADEIA

A aplicação do controle de reação em cadeia é amplamente utilizado para a geração de energia em reatores nucleares. O combustível de um reator nuclear normalmente é urânio-235 enriquecido a uma concentração de 3,2% , usado na forma de grânulos de UO_2 . São revestidos por tubos de zircônio ou aço inoxidável. Outros bastões compostos por cádmio ou boro são utilizados para controlar o processo de fissão, pois são absorvedores de nêutrons. O reator tem o processo de fissão iniciado por um emissor de nêutrons e é controlado ou até mesmo paralisado inserindo bastões de controle no núcleo do reator (BROWN et al., 2007).

A ilustração abaixo mostra o núcleo do reator com o elemento físsil, o líquido refrigerante e as barras de controle, que ao descerem diminuem a atividade do reator, pois absorvem nêutrons, diminuindo a reação em cadeia, ou paralisando-a.

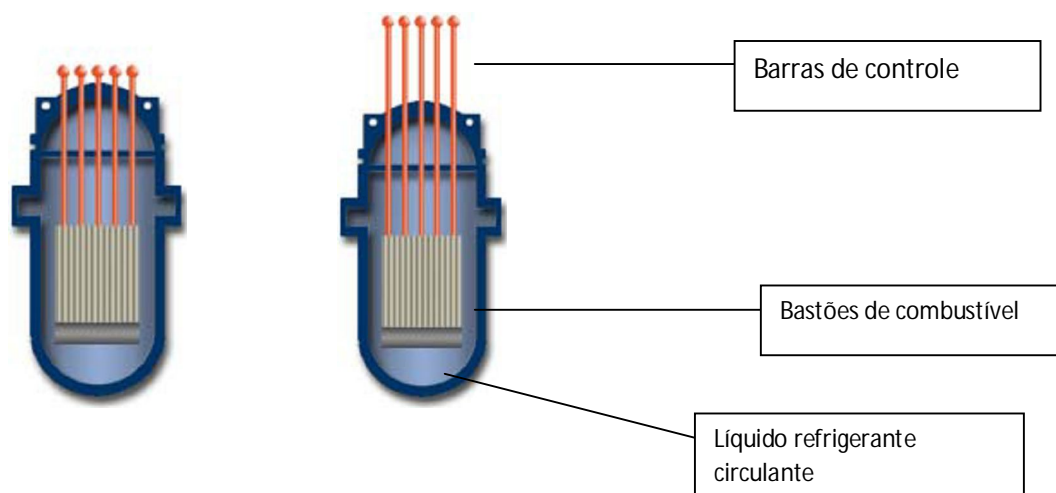


Figura 15 - Vaso de pressão de um reator, barras de material físsil e de controle.
Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud Brasil...2010).

7.3 O ELEMENTO COMBUSTÍVEL

O elemento combustível nuclear é um arranjo de varetas, produzido em uma liga metálica à base de zircônio chamada de **Zircalloy**. No interior dessas varetas são colocadas as pastilhas de UO_2 .



Figura 16 - Pastilha de UO_2 .
Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud Brasil...2010.)

O reator nuclear de Angra 2 possui 193 desses conjuntos contendo cada um 236 varetas, perfazendo um total de 45.548 varetas (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2010).



Figura 17 - Elemento combustível nuclear composto de 236 varetas de Zircalloy.

Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil.

Cortesia das Indústrias Nucleares do Brasil S.A. – INB Imagem cedida pela Assessoria de Comunicação Institucional e Corporativa. Foto: Marcelo Correa

7.4 FUNCIONAMENTO DE UM REATOR

No projeto básico de uma usina nuclear o calor produzido no núcleo do reator através do mecanismo de fissão atômica é carregado por um líquido refrigerante, como água ou sódio líquido, num circuito primário, para gerar vapor num circuito secundário e movimentar uma turbina acoplada a um gerador elétrico. O núcleo do reator e o circuito primário ficam acondicionados num vaso de contenção (BROWN et al., 2007).

Um reator nuclear tem o funcionamento semelhante a qualquer usina termelétrica, em que se utiliza uma caldeira onde há produção de calor, gerando vapor de água e elevando a pressão e temperatura. Esse vapor, ao se expandir movimenta uma turbina acoplada a um gerador de eletricidade (WORD NUCLEAR ASSOCIATION 2011).

A figura abaixo representa o esquema de um reator PWR, com o vaso de contenção, dentro dele o vaso de pressão com o reator e o elemento combustível e as barras de controle, o pressurizador e o circuito gerador de vapor que alimenta a turbina.

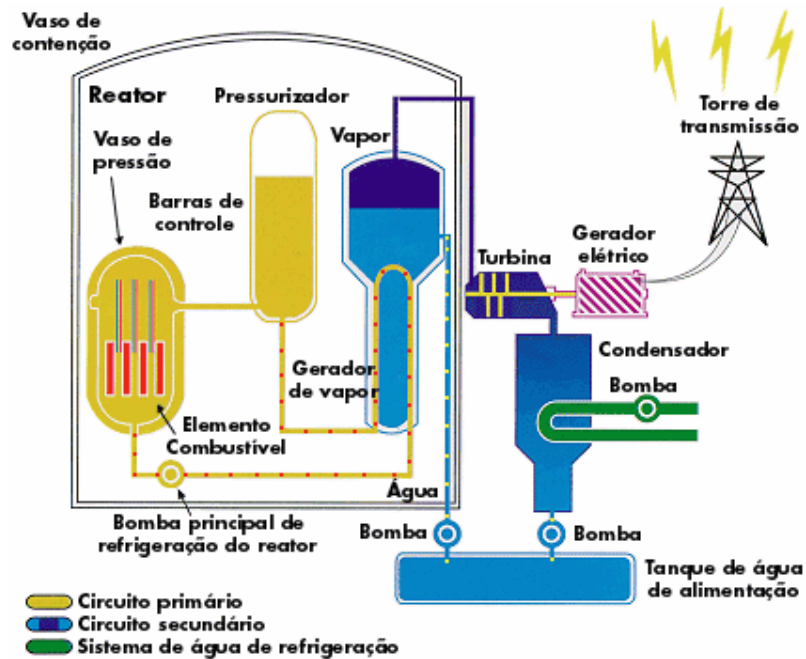


Figura 18 - Esquema de funcionamento de um reator nuclear tipo PWR.
 Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil.

A tabela abaixo mostra algumas das características de uma unidade PWR de produção de energia.

Tipo de Reator:	PWR - Pressurized Water Reactor
Fabricante / fornecedor:	GHH gmbh - Gütehoffnungshütte (Firma alemã) / KWU (atual Framatome - ANP)
Características do Combustível:	Urânio enriquecido
Procedência:	Alemanha
Potência Térmica do Reator:	3.765 MWt
Potência Elétrica da Usina:	1.350 MWe
Eficiência Térmica da Usina:	Aprox. 34%
Vida Útil da Usina:	40 anos, prorrogáveis para mais 10 anos

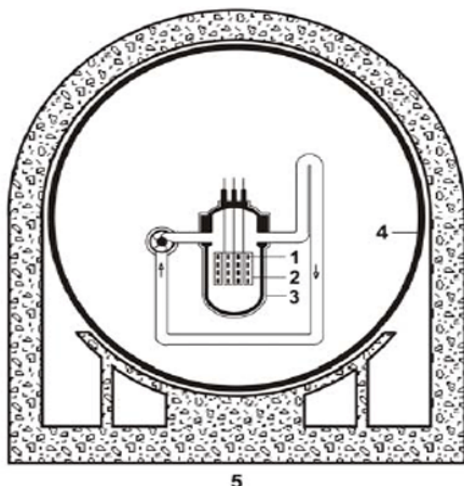
Tabela 2 - Características do reator de Angra 2.

Fonte: Brasil, c2010.

7.5 BARREIRAS DE CONTENÇÃO

Em um reator nuclear de potência do tipo PWR como os de Angra 1 e Angra 2, existe uma sequência de barreiras de contenção, a fim de que os produtos da fissão do urânio não atinjam o meio ambiente. As pastilhas de UO_2 são a primeira dessas barreiras, as varetas de combustível são consideradas a segunda barreira, caso algumas dessas varetas apresente vazamento de material radioativo, a terceira barreira é o próprio sistema de refrigeração do reator, o quarto é o vaso de pressão onde ocorre a fissão dos núcleos, e contém o líquido refrigerante do circuito primário, e por fim o vaso de contenção.

Numa usina do tipo PWR, ou BWR o vaso de contenção é o próprio prédio do reator, onde estão abrigados o vaso de pressão, o pressurizador e o gerador de vapor. O vaso de contenção é a última barreira física construído em concreto armado, projetado para resistir a terremotos e ondas de pressão (ENGENHARIA NUCLEAR UFRJ, 2010).



- 5
- 1 - Absorção dos produtos de fissão pelo próprio combustível
 - 2 - Revestimento da vareta de combustível
 - 3 - Circuito primário selado
 - 4 - Esfera de contenção de aço
 - 5 - Prédio do reator

Figura 20 - Barreiras que impedem a liberação de produtos radioativos.
 Fonte: NATRONTEC (1999 apud CARACTERIZAÇÃO...[2010]).

Em caso de um acidente o vaso de contenção minimiza em muito a liberação de material radioativo para o meio ambiente. A ausência dessa estrutura nos reatores soviéticos, tipo RBKM1000 foi, segundo especialistas o que contribuiu para a maior extensão do acidente em Chernobyl na Ucrânia. A pressão interna do prédio do reator é inferior a uma atmosfera, isso visa impedir que substâncias gasosas radioativas (em sua grande maioria, isótopos de gases nobres, como: xenônio (Xe) e criptônio (Kr), de iodo e trítio (^3H)) escapem para fora do prédio do reator. O ar no interior do prédio é recirculado e tratado constantemente, esse tratamento retém grande parte das partículas em suspensão e o iodo. O trítio (^3H) em particular é liberado para a atmosfera, devendo permanecer dentro dos limites.

Esses limites, no caso do Brasil são parte da legislação e que constam no processo de licenciamento de reatores nucleares, e são regidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA) (ENGENHARIA NUCLEAR UFRJ, 2010).

7.6 SISTEMAS DE SEGURANÇA ATIVOS

Além dos sistemas de segurança passivos, como o prédio de contenção, existem no projeto de uma usina vários princípios de segurança ativos. No caso das usinas de Angra aplicam-se os seguintes princípios:

- Redundância, esse princípio implica na instalação de componentes e sistemas em número maior que o necessário para o funcionamento da usina; por exemplo, o sistema de resfriamento possui quatro unidades, e apenas duas já seriam suficientes para garantir 100% de sua eficiência.

- Diversidade, esse princípio visa a utilização de vários fabricantes de equipamentos, várias áreas envolvidas no projeto e diferentes formas de análise de uma mesma falha, a fim de eliminar falhas comuns, erros de projeto ou de análise que possam comprometer a segurança e o funcionamento.

- Separação Física, proteção contra falhas que possam afetar os sistemas vizinhos, uma proteção estrutural adequada é feita para que a falha de um componente não afete outro.

- Princípio de Falha no Sentido Seguro, a aplicação desse princípio pode proporcionar proteção adicional em alguns casos. Como por exemplo, as barras de controle são mantidas fora do reator por eletroímãs. Caso ocorra a falta de energia elétrica, as bobinas de acionamento dos eletroímãs serão desligadas, isto provoca a inserção das barras de controle no núcleo sob ação da gravidade, propiciando o desligamento rápido do reator.

- Princípio da Automação, as ações de desligamento e controle são iniciadas automaticamente, independentes da decisão dos operadores. Isso visa evitar acidentes por falhas humanas, como erros de avaliação ou desatenção, pois estatísticas mostram que na indústria nuclear a contribuição do erro humano para a falha de sistemas durante a sequência do acidente é de 50 a 85% (ENGENHARIA NUCLEAR UFRJ, 2010).

7.7 FATORES HUMANOS

Com base em estudos estatísticos, que apontam o erro humano como um dos principais fatores, na segurança de uma usina nuclear. Várias ações e técnicas são adotadas, a fim de cumprir normas e garantir a segurança.

Todos os técnicos e operadores são submetidos a treinamentos e testes diversos, que, na maioria dos casos, acontece por meio de um simulador, com todas as condições reais de funcionamento de uma unidade de produção de energia. Isso se faz necessário pela

impossibilidade de ações como, por exemplo, paradas, partidas e variações de carga por conta de fatores de segurança e econômicos, sendo ainda utilizado o treinamento em usinas semelhantes por meio de intercâmbio.

As usinas seguem procedimentos rígidos, que devem ser revisados e aprovados periodicamente, para atender as normas, no caso do Brasil, controladas pela CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear).

Os operadores de reatores em os supervisores de proteção radiológica devem ser licenciados pela CNEN, mediante treinamentos específicos, com exames práticos e orais, sendo realizados nos simuladores da usina. A licença tem validade de dois anos, porém há a obrigatoriedade de treinamentos anuais, com simulações de operação em condições anormais e situações de emergência, com o intuito de manter ativo o conhecimento e a capacidade de gerenciar condições adversas. As três normas a serem atendidas nesses casos são CNEN-NE 1.01 “Licenciamento de operadores de Reatores Nucleares”, CNEN-EM 1.06 “Requisitos de saúde para Operadores de Reatores Nucleares”, CNEN-NE 3.03 “Certificação da Qualificação de Supervisores de Radioproteção”.



Figura 21 - Sala de controle - Central de operação.
Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil (2010 apud BANCO...2010.)

A alta importância da segurança das usinas nucleares ficou mais evidente após os acidentes em Three Miles Island, e Chernobyl. No relatório feito pela INSAG/AIEA sobre o acidente de Chernobyl, foi utilizado o termo “Cultura de Segurança”. A “Cultura de Segurança” leva em consideração que qualquer falha no sistema de segurança de uma instalação nuclear envolve as chamadas falhas humanas, e a “Cultura de Segurança” deve ser

implantada e mantida a fim de se beneficiar dos aspectos positivos das ações humanas na detecção e eliminação de problemas, colaborando assim de maneira ampla na prevenção de acidentes (ENGENHARIA NUCLEAR UFRJ, 2010).

8 DESTINAÇÕES DE RESÍDUOS

Mesmo após o uso combustível nuclear ainda é radioativo, esse resíduo pode ser reprocessado e certa quantidade reutilizados, porém o custo é alto, e dependendo do preço do urânio no mercado esses resíduos são armazenados para posterior processamento. Esse reprocessamento é complexo, o plutônio deve ser extraído, e outros resíduos pouco utilizados devem ser armazenados com segurança. Os produtos de fissão que apresentam maior índice de radioatividade, como as varetas de combustível utilizadas devem ser estocadas com segurança e monitoradas, até que ocorra o decaimento, nesse caso (cerca de 10 meias-vidas), e seu nível de radioatividade atinja parâmetros aceitáveis. Esses resíduos podem ser armazenados de várias formas, a alternativa de incorporar esses resíduos a materiais cerâmicos, e armazenados no subsolo (ATKINS E JONES, 2007).

No caso das usinas BWR de Angra 1 e Angra 2, rejeitos líquidos produzidos na usina são coletados em tanques de armazenagem, antes de seu processamento, são classificados quanto sua origem e seu grau de contaminação. Os rejeitos líquidos contaminados são processados por evaporação e armazenados provisoriamente em tanques de monitoração até serem liberados para o mar. A unidade de evaporação garante um fator de descontaminação mínimo. Para que o conteúdo de um tanque de monitoração seja liberado, sua concentração de radioatividade não pode exceder 18,5 MBq/mg. Se a concentração estiver acima deste valor, o conteúdo do tanque será reprocessado (ENGENHARIA NUCLEAR UFRJ, 2010).

Segundo Atkins e Jones (2007), a atividade de uma amostra é relativa ao número de desintegrações que ocorrem em um intervalo de tempo, no sistema internacional é representada pela unidade Bq (Becquerel), 1 Bq é igual a uma desintegração por segundo.

Os rejeitos sólidos radioativos de média e baixa radioatividade recebem a seguinte classificação, com relação ao tipo/origem:

- Concentrado do evaporador - oriundo dos sistemas de tratamento de efluentes líquidos radioativos das usinas.
- Resinas do circuito primário - utilizadas na purificação do sistema de refrigeração do reator. Este tipo de rejeito é incorporado em cimento (Angra 1) e em betume (Angra 2 e Angra 3) para solidificação do conteúdo.

➤ Resinas do circuito secundário - utilizadas na purificação da purga do gerador de vapor. Este tipo de rejeito em Angra 1 é acondicionado diretamente em tambores. Em Angra 2 e 3 não é prevista a geração deste rejeito, pois as resinas são regeneradas para serem reutilizadas. Os filtros que são usados nos sistemas de purificação e tratamento do refrigerante do reator. São acondicionados em tambores de 200 litros e imobilizados em cimento (Angra 1) e betume (Angra 2 e Angra 3).

➤ Rejeitos compactáveis - são materiais triturados e compactados por prensa hidráulica para redução do volume, materiais plásticos, papéis, luvas, sapatilhas, roupas etc. São acondicionados em tambores de 200 litros

➤ Rejeitos não compactáveis - são peças, tubos, materiais metálicos, que, além do processo de segregação normal, sofrem processo de corte para otimização do volume de armazenamento. Para garantir a estabilidade do conteúdo, estes materiais são imobilizados em cimento (Angra 1), e em betume, (Angra 2 e Angra 3) (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2010).

9 CONCLUSÃO

Diante dos dados e fatos apresentados nesse trabalho, é possível dizer que a Energia Nuclear é uma fonte de fundamental importância para o desenvolvimento mundial. Tendo em vista a demanda crescente por energia e as limitações de outras fontes, sejam elas, geográficas, tecnológicas ou por limitações na cadeia de suprimentos. Pois em muitos casos não há recursos hídricos, a geração de energia solar e eólica, dependem de períodos de insolação e incidência de ventos, e as reservas petrolíferas estão se esgotando. Uma vez que as reservas de urânio são bem extensas, e o aproveitamento do combustível tende a ser mais eficiente à medida que essa tecnologia se desenvolver, e o fato de que usinas nucleares podem ser implantadas em vários pontos, necessitando apenas de combustível e sistema de refrigeração é favorável.

Apesar de usinas nucleares causarem poucos impactos durante a sua operação, existe o perigo de um acidente, e a questão dos resíduos provenientes do seu funcionamento (lixo atômico), que ainda não possuem uma destinação correta. Esses resíduos vão sendo armazenados e monitorados, e ainda assim representam um grande perigo para a sociedade.

No caso do Brasil, a energia nuclear representa pouco mais de 3% do total da geração de energia elétrica, e poderia ser suprida por outras fontes, pois há nesse caso condições favoráveis como recursos hídricos, incidência de ventos e grande período de insolação, fato este que não ocorre em muitos países, que necessitam de usinas nucleares como principal fonte energética. O domínio da tecnologia se faz necessário, até mesmo por questões estratégicas e políticas, porém ampliar sua utilização sem que haja real necessidade, e ainda mais com uma destinação incerta dos resíduos pode não ser a decisão mais plausível.

Sugere-se para um trabalho futuro um estudo do funcionamento, e as perspectivas de implantação de Usinas do tipo (PHWR ou CANDU), que utilizam urânio natural (0,7% de U-235) como combustível, e inclusive o material reciclado dos reatores PWR, que pode representar mais eficiência e menor geração de resíduos

REFERÊNCIAS

ATKINS, P.; JONES. L. **Princípios de química**: questionando a vida moderna e o meio Ambiente. Bookmam, 2007. P. 735-751.

BANCO de imagens, **Relatório parcial parte III** , 2010. Disponível em: <
<http://www.slideshare.net/FabrcioCortezi/atlas-par3-cap8>>. Acesso em: 6 out. 2011.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Estudo da Cadeia de Suprimento do Programa Nuclear Brasileiro** : relatório parcial. Brasília: CGEE, 2010. Disponível em: <
<http://www.cnen.gov.br/acnen/pnb/Rel-Parcial-CicloCombustivel.pdf> >. Acesso em: 5 nov. 2011.

BROWN, T. L et al. **Química**: a ciência central. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007. p 771-792.

CARACTERIZAÇÃO do empreendimento, **IEA Estudo de impacto ambiental da unidade 3 da central nuclear do Almirante Álvaro Alberto**, [2010]. Disponível em:
http://www.nuclear.ufrj.br/eia/v01_02_caracterizacao.html. Acesso em: 7 out. 2011.

ENGENHARIA nuclear ufrj, **IEA Estudo de impacto ambiental da unidade 3 da central nuclear do Almirante Álvaro Alberto**, [200-?]. Disponível em:
http://www.nuclear.ufrj.br/eia/v01_02_caracterizacao.html. Acesso em: 5 out. 2011.

EURONUCLEAR, **Enciclopédia**: bwr, 2010. Disponível em: <
<http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/bwr.htm> >. Acesso em: 23 out. 2011.

FÍSICA moderna, **A Descoberta da Radioatividade**: UFRGS, 2011. Disponível em: <
http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s02.html>. Acesso em: 18 nov. 2011.

GIROTTI, C. A. **Estado nuclear no Brasil** .São Paulo: Editora Brasiliense, 1984. p. 231.

INDUSTRIAS Nucleares do Brasil, **Energia elétrica no mundo (2008)**: Eletrobrás Nuclear, 2011. Disponível em: < <http://www.eletronuclear.gov.br/tecnologia/index.php?idSecao=2>>. Acesso em 10 de out. 2011.

INDUSTRIAS Nucleares do Brasil, **Numero de Reatores no Mundo** : Agência Internacional de Energia Atômica, 2011. Disponível em: < http://www.inb.gov.br/inb/webforms/Interna2.aspx?secao_id=76>. Acesso em: 11 nov. 2011.

PLANO Brasil, História da energia nuclear parte III: plano brasil.wordpress 2011. Disponível em: < <http://pbrasil.wordpress.com/2010/08/17/a-historia-da-energia-nuclear-parte-III>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

ROSA, L. P. et al. **Estado nuclear no Brasil**: impacto de grandes projetos hidroelétricos e nucleares: aspectos econômicos tecnológicos ambientais e sociais. São Paulo: Marco Zero p. 31-35.

WORD nuclear association, **Nuclear Power Reactors**: world-nuclear.org. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>>. Acesso em: 18 out. 2011.