

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Escola de Engenharia de Lorena

**THIAGO PEREIRA DA SILVA**

**ANÁLISE CRÍTICA DA UTILIZAÇÃO DO URÂNIO ENRIQUECIDO  
COMO COMBUSTÍVEL ENERGÉTICO EM REATORES NUCLEARES**

LORENA

2014

**THIAGO PEREIRA DA SILVA**

**Análise crítica da utilização do urânio enriquecido como combustível  
energético em reatores nucleares**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial para a  
obtenção do grau de Engenheiro  
Industrial Químico.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos de Queiroz

Lorena

2014

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha família que sempre acreditou em meu potencial e aos meus mestres que com seus conhecimentos aliados a minha capacidade tornam-me um homem de sucesso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que me ajudaram durante a trajetória da graduação. Desde meus pais que proporcionaram a educação necessária para entrar e concluir o curso de Engenharia, aos amigos que acompanhavam as noites intensas de estudo, aos professores que transmitiram além do conhecimento técnico, histórias e lições de vida, ao professor Luiz Carlos de Queiroz que orientou esse trabalho, aos professores Gerônimo Tagliaferro e Alexandre Visconti que alocaram um pouco de seus tempos valiosos participando da banca desse trabalho e a todos que de forma direta ou indireta tornaram esse trabalho possível.

## RESUMO

SILVA, T. P. **Análise crítica da utilização do urânio enriquecido como combustível energético em reatores nucleares.** 2014. 43f. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

Neste projeto de trabalho de conclusão de curso será realizada uma análise crítica, utilizando a metodologia SWOT (Potencialidades, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças), sobre a utilização de urânio enriquecido como combustível energético em reatores nucleares. Através de um levantamento bibliográfico busca-se levantar dados sobre a extração e processamento de urânio, os rejeitos produzidos, histórico do desenvolvimento energético nuclear em níveis mundiais e métodos de tratamento dos rejeitos. Com os dados levantados será construída uma matriz SWOT e realizada uma análise crítica sobre cada resultado obtido. Assim projeto tem como objetivo servir como base para a realização de um estudo mais aprofundado sobre o processamento e impactos ambientais deste processamento. Como objetivo específico, busca-se coletar dados sobre o processamento e tratamento do Urânio como combustível energético, a construção de uma matriz SWOT e a análise crítica sobre os dados obtidos fornecendo um diagnóstico do processamento desse combustível no Brasil

Palavras-chave: Urânio, Rejeitos Nucleares, Energia Nuclear, Processamento de urânio, Análise SWOT.

## ABSTRACT

SILVA , T. P. **Analysis critical use enriched uranium as fuel in nuclear power reactors**. 2014. 43f . Monograph (Undergraduate Industrial Chemical Engineering) - School of Engineering of Lorena , University of São Paulo , Lorena , 2014. In this project work completion of course a critical analysis will be performed using the methodology SWOT (Strengths , Weaknesses , Opportunities and Threats) on the use of enriched uranium as fuel in nuclear power reactors . Through a literature survey we seek to collect data on the extraction and processing of uranium tailings produced , history of nuclear energy development at global levels and methods of treatment of tailings . With the data collected will be built a SWOT matrix and performed a critical analysis of each outcome. So project aims to serve as a basis for conducting further study on the processing and environmental impacts of processing. How specific goal we seek to collect specific data on the processing and treatment of uranium as an energy fuel, the construction of a SWOT matrix and critical analysis of the results by providing a diagnostic processing of this fuel in Brazil

Keywords: Uranium, Nuclear Waste, Nuclear Power, Uranium Processing, SWOT Analysis.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais minérios de Urânio.....	11
--	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Funcionamento da Ultracentrífuga.....	13
Figura 2: Reconversão do Urânio.....	14
Figura 3 Construção das pastilhas de Urânio .....	15
Figura 4: Funcionamento de um reator nuclear PWR.....	16
Figura 5: Classificação dos rejeitos líquidos.....	18
Figura 6: Classificação dos rejeitos gasosos.....	18
Figura 7: Classificação dos rejeitos sólidos.....	18
Figura 8: Eixo excêntrico de trituradores de mandíbula.....	19
Figura 9: Fissão Nuclear.....	22
Figura 10: Reação em cadeia da fissão nuclear.....	23
Figura 11: Modelo da gota de Bohr.....	24
Figura 12: Isótopos de hidrogênio.....	24
Figura 13: Fusão de Isótopos de hidrogênio.....	25
Figura 14: Representação Atomística de Thomson.....	26
Figura 15: Órbita dos elétrons de Bohr.....	27
Figura 16: Evolução do uso de reatores nucleares no mundo.....	29
Figura 17: Matriz SWOT da energia nuclear no Brasil.....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIEN	Agência Internacional de Energia Nuclear
BEN	Balanco Energético Nacional
CMTSP	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
KWU	Kraftwerk Union
MW	Megawatts
RAP	Reator de Água Pressurizada
SWOT	Strenghts, Weaknesses, Opportunitties, Threats
TCAU	Tricarbonato de amônio e uranila

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	7
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	7
1.2 JUSTIFICATIVA .....	9
1.3 OBJETIVOS.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
2.1 EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO .....	11
2.2 CONVERSÃO EM HEXAFLUORETO DE URÂNIO (UF <sub>6</sub> ) .....	12
2.3 ENRIQUECIMENTO DO URÂNIO .....	13
2.4-RECONVERSÃO DO URÂNIO E PREPARAÇÃO DO COMBUSTÍVEL.....	14
2.5 FUNCIONAMENTO DO REATOR NUCLEAR .....	16
2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS REJEITOS RADIOATIVOS.....	17
2.7 PRINCIPAIS OPERAÇÕES QUE ENVOLVEM O PROCESSAMENTO DE URÂNIO .....	18
2.7.1 Trituração ou Moagem .....	19
2.7.2 Lixiviação.....	19
2.7.3 Extração com solvente.....	20
2.7.4 Calcinação .....	20
2.7.5 Centrifugação.....	21
2.7.6 Filtração .....	21
2.7.7 Secagem .....	21
2.8 CONCEITOS BÁSICOS DA ENERGIA NUCLEAR.....	21
2.9 DESENVOLVIMENTO NUCLEAR-BREVE HISTÓRICO .....	25
2.10 BREVE HISTÓRICO DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL.....	29
2.11 ANÁLISE SWOT .....	31

3 METODOLOGIA.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1 MATRIZ SWOT .....	33
4.2 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	34
4.2.1. Oportunidades .....	34
4.2.2 Ameaças.....	35
4.2.3 Forças.....	37
4.2.4 Fraquezas .....	38
5. CONCLUSÃO.....	40
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O elemento Urânio apresenta dureza pouco menor que o aço sendo o mais pesado dos elementos químicos. Com número atômico 92, foi descoberto no ano de 1789 pelo cientista alemão Martin Klaproth durante a dissolução de um mineral contendo pechblenda ( $U_3O_8$ ) em ácido nítrico ( $HNO_3$ ). Foi isolado pela primeira vez no ano de 1841 através do aquecimento do dióxido de urânio com potássio pelo francês Eugene Peligot. Sempre teve muitas aplicações práticas, por suas propriedades radioativas.

Antigamente, os minérios de urânio foram empregados como matéria-prima do Ra, que foi usado no tratamento radioterápico do câncer. Pequenas quantidades de Urânio eram usadas (e ainda o são) para a obtenção de vidros amarelo pálidos ou verdes. Esses vidros fluorescem quando expostos à luz ultravioleta. Pequenas quantidades de óxido de urânio são usadas para colorir cerâmicas (J.D.LEE,1999)

Apesar de ter importantes aplicações na medicina e na agricultura seu principal uso é como combustível em reatores nucleares visando à produção de energia elétrica. Sua importância está ligada ao desenvolvimento nuclear e, com a descoberta da radioatividade, produção de bombas nucleares e energia nuclear, passou a ser visto como um elemento químico estratégico e fundamental para o desenvolvimento das nações. Presente em mais de 100 diferentes minerais conhecidos, é encontrado em toda a crosta terrestre, porém somente em alguns pontos específicos há urânio em concentrações suficientes para exploração. Os maiores produtores são: Canadá, Austrália e Cazaquistão. O Brasil, apesar de não estar entre os maiores produtores, possui a sétima maior reserva mundial de urânio. A exploração desse elemento em território brasileiro se iniciou no ano de 1982 em Minas Gerais através da INB, única empresa autorizada para realizar essa exploração. Hoje a INB conta com três grandes unidades de extração, a unidade de Caetité (BA), Santa Quitéria (CE) e uma unidade de tratamento de minérios em Caldas (MG).

Esse importante elemento existe na natureza sob a forma de dois isótopos predominantes, o  $U^{238}$ (99,3%) e  $U^{235}$ (0,7%), porém para ser utilizado como

combustível nuclear ele deve estar na forma de  $U^{235}$ , exigindo um processo de purificação chamado de enriquecimento. A Fábrica de Combustível Nuclear da INB é a responsável pela realização do enriquecimento do Urânio brasileiro, sendo tal processo complexo e de elevado custo. O desenvolvimento da tecnologia nacional de enriquecimento foi realizado pelo Centro Tecnológico da Marinha e a separação é realizada pelo método de ultracentrífugas.

O destino do urânio extraído e enriquecido no Brasil são as Usinas Nucleares do Complexo Energético de Angra. A Usina Angra I entrou em operação no ano de 1985, com 640 megawatts de potência e a Usina de Angra II no ano de 2001, com 1350 megawatts em sua capacidade.

Desde a etapa de extração do minério de urânio até a produção de energia elétrica através dos reatores do complexo de Angra há uma grande produção de resíduos. Tais resíduos apresentam um agravante em relação aos resíduos comuns, pois podem possuir altos índices de radioatividade. Assim seu tratamento e armazenamento são fundamentais para a redução dos impactos ambientais. No Brasil, o CONAMA é o órgão regulamentador dos impactos ambientais e, em seu artigo primeiro, de 1986, está descrita a definição de impacto ambiental:

Art. 1º Para efeito desta Resolução, considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetam:

- I – a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II- as atividades sociais e econômicas;
- III- a biota;
- IV- as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V- a qualidade dos recursos ambientais.

A supervisão e controle dos rejeitos nucleares no Brasil são realizados pela CNEM e o licenciamento de novas unidades é realizado pelo IBAMA. O

trabalho dos engenheiros no que diz respeito ao urânio envolve seu processamento com a menor produção de rejeitos possível.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A análise crítica do processamento e dos rejeitos oriundos da utilização do urânio como fonte energética irá fornecer informações importantes de como está sendo realizado o processamento do urânio no Brasil. Sabe-se que a questão energética ocupa lugar estratégico na Sociedade, questões como crise energética e impactos ambientais estão sempre na mídia e tem grande importância. A construção do cenário nuclear brasileiro dará uma visão sobre essa fonte energética em nosso país e suas perspectivas para o futuro. O tema escolhido deve-se ao fato de que o processamento de urânio como fonte energética envolve diversas operações unitárias fundamentais na engenharia química, além da expansão do uso da energia nuclear no Brasil. O desenvolvimento dessa importante área é assegurado pela Secretaria de Desenvolvimento Econômico, que mantém o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares com mais de 13 áreas de pesquisas e 50 pesquisadores, visando melhorias na área nuclear. Entre as áreas presentes no instituto, há o Centro de Rejeitos Radioativos e o Centro de Química e Meio Ambiente, que contam com diversos Engenheiros Químicos em seu quadro de pesquisadores. A formação do Engenheiro moderno deve ser cada vez mais interdisciplinar e crítica, e ampla capacidade técnica oriunda da sua formação, o Engenheiro moderno deve saber lidar com diversas situações e tomar decisões que, além de serem tecnicamente viáveis, sejam economicamente e ambientalmente viáveis além de corroborar com a ética, e a análise crítica desse trabalho irá contribuir com isso. Assim, esse trabalho justifica-se pela importância do tema em questão, pelos pontos relevantes na Engenharia Química, pela relevância da análise crítica da energia nuclear na atual conjectura e por estar de acordo com as exigências aos engenheiros dos dias atuais.

### 1.3 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo geral servir como base de estudo para trabalhos mais complexos e específicos na utilização Urânio como combustível nuclear, pelo fato de trazer uma análise crítica atual, completa e com dados relevantes. Como objetivos específicos, o levantamento desses dados através de uma profunda pesquisa bibliográfica, a Construção de uma matriz SWOT, com os dados obtidos, e a realização de uma análise crítica sobre cada item da matriz, fornecendo, assim, uma visão crítica da maneira que está sendo conduzida a Energia Nuclear no Brasil.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO

Essa etapa do processamento de urânio envolve desde a pesquisa e prospecção de uma área até a completa extração do minério do solo. A extração pode ser realizada a céu aberto (mais simples e envolve grandes escavações) ou de maneira subterrânea (SANTOS,1979). O urânio é encontrado em mais de 100 diferentes minerais conhecidos em duas formas de oxidação  $U^{+4}$  e  $U^{+6}$ . No Brasil a maior unidade produtora localizada em Caetité, atingiu a produção de 389,61 toneladas de urânio. Abaixo temos a composição dos minerais mais conhecidos na exploração de urânio

Tabela 1: Principais Minérios de Urânio  
Fonte: Alvarenga, 2010

<i>Tipo</i>	<i>Nome</i>	<i>Composição</i>
Óxidos e Oxihidróxidos	<i>Uraninita</i>	$UO_2$
	<i>Pechblenda</i>	$U_3O_8$
	<i>Schoepita</i>	$(UO_2)_3O_2(OH)_{12}(H_2O)_{12}$
Carbonatos	<i>Rutherfordina</i>	$UO_2CO_3$
Sulfatos	<i>Uranopilita</i>	$(UO_2)_6SO_4(OH)_{10} \cdot xH_2O$
	<i>Zippeita</i>	$K_4(UO_2)_6(SO_4)_3(OH)_{10} \cdot xH_2O$
	<i>Johannita</i>	$Cu(UO_2)_2(SO_4)_2(OH)_2 \cdot xH_2O$
Fosfatos	<i>Autunita</i>	$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot xH_2O$
	<i>Tobemita</i>	$Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot xH_2O$
	<i>Saleeita</i>	$Mg(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot xH_2O$
	<i>Basseita</i>	$Fe(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot xH_2O$
Vanadatos	<i>Carnotita</i>	$K(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot xH_2O$
Arseniatos	<i>Matazeunarita</i>	$Cu(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot xH_2O$
Silicatos	<i>Coffinita</i>	$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$
	<i>Uranofana</i>	$Ca(UO_2)(SiO_3)_2(OH)_2 \cdot xH_2O$

Após a extração do minério o mesmo é transferido para a usina de beneficiamento. Essa usina tem como objetivo extrair o urânio do minério através da trituração e da lixiviação (ALVARENGA,2010). O produto final dessa etapa será um concentrado de urânio, de coloração amarela, como um teor aproximado de 90% de urânio.

Os rejeitos radioativos dessa etapa são classificados como rejeitos de baixo nível de radiação e não exigem condições especiais de tratamento. Os resíduos sólidos são oriundos principalmente a rocha estéril e a cobertura de solo assim como o minério lixiviado composto por materiais inertes como a sílica e alumina. Os rejeitos gasosos envolvem aerossóis do minério e Rn (MIERZWA, 1996). Os rejeitos líquidos da mineração consistem de água de drenagem da mina e contêm urânio dissolvido e outros em suspensão. Na etapa de beneficiamento os resíduos líquidos resultam do processo de extração com solventes, esses rejeitos são compostos de solventes orgânicos. Os rejeitos gasosos são aerossóis do minério e Rn e estão presentes durante toda essa etapa.

## 2.2 CONVERSÃO EM HEXAFLUORETO DE URÂNIO ( $UF_6$ )

Essa etapa ainda está em escala piloto no Brasil, e será realizada na Unidade Produtora de Hexafluoreto de Urânio (Usexu) inaugurada em 2012. A conversão tem como objetivo realizar a conversão do concentrado de urânio ( $U_3O_8$ ) no hexafluoreto de urânio ( $UF_6$ ). SANTOS(1979)..destaca dois tipos de conversão mais utilizados, o primeiro modelo de conversão segue as etapas: Pesagem e amostragem inicial, redução do  $U_3O_8$  com amônia, fluoração com HF, formação do  $UF_4$  e destilação fracionada e formação do  $UF_6$ . O segundo modelo de conversão possui as etapas: Pesagem e amostragem inicial, digestão em ácido nítrico, extração com tri-butil-fosfato (TBP), reextração do urânio na forma de nitrato de urânio, calcinação, redução a  $UO_2$  com amônia e fluoração para formar  $UF_6$  com flúor elementar.

As diferenças entre os dois processos refletem nos resíduos por eles gerados. No primeiro, os resíduos formados são sólidos e gasosos enquanto que, no segundo, são apenas líquidos. Os resíduos sólidos do primeiro processo apresentam baixo grau de radioatividade.

## 2.3 ENRIQUECIMENTO DO URÂNIO

Etapa complexa do processamento de Urânio tem como objetivo aumentar a concentração do isótopo físsil o  $U^{235}$ . A concentração do  $U^{235}$  na natureza é de apenas 0,7%, porém para ser usado como combustível nuclear a concentração deve ser de cerca de 4%. Três técnicas de enriquecimento são bem difundidas, a ultracentrifugação, a difusão gasosa e o jato centrífugo, porém a mais utilizada e com maior viabilidade econômica é a ultra-centrifugação que será detalhada a seguir:

Temos a descrição do processo realizada pela INB:

A ultracentrífuga a gás (no caso  $UF_6$ ) é um cilindro vertical fino que gira a uma velocidade extremamente alta dentro de uma carcaça com vácuo. Um campo de força ultracentrífuga gerado dentro do cilindro em rotação (rotor) separa os diferentes isótopos ao longo da direção radial. Um fluxo axial de contracorrente é estabelecido para aumentar a separação dos isótopos. Na prática, a eficiência de uma ultracentrífuga a gás depende da velocidade periférica e do comprimento do rotor, da taxa axial de recirculação e da taxa de alimentação da máquina (CNEN 2012).

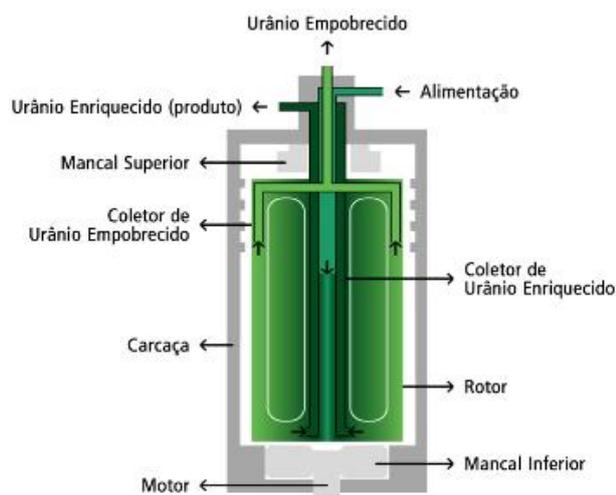


Figura 1: Funcionamento da Ultracentrífuga

Fonte: INB,2012

## 2.4 RECONVERSÃO DO URÂNIO E PREPARAÇÃO DO COMBUSTÍVEL

Após o enriquecimento do urânio o combustível deve ser preparado para entrar no reator, ou seja deve haver a reconversão para depois serem formadas as pastilhas que irão abastecer o reator.

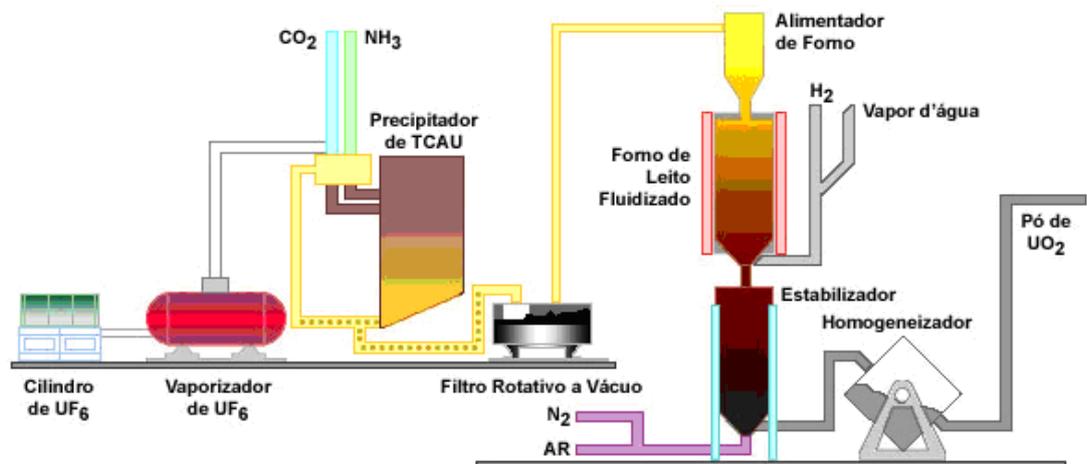


Figura 2: Reconversão do Urânio

Fonte: CNEN, 2012

Abaixo está descrito o processo de reconversão do Urânio enriquecido segundo a INB:

(INB,2012) No estado sólido, em recipientes cilíndricos, o urânio enriquecido, na forma de hexafluoreto de urânio ( $UF_6$ ) é levado para aquecimento no vaporizador . A  $100^\circ C$  o  $UF_6$ , já no estado gasoso, é misturado com outros dois gases: gás carbônico ( $CO_2$ ) e gás amoníaco ( $NH_3$ ), em um tanque precipitador, contendo água desmineralizada (pura). A reação química entre estes compostos produz o tricarbonato de amônio e uranila (TCAU), sólido amarelo insolúvel em água. 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  $600^\circ C$ , o TCAU é alimentado juntamente com gás hidrogênio ( $H_2$ ) e vapor d'água. O produto gerado- dióxido de urânio  $UO_2$ , ainda estável- é descarregado no estabilizador onde recebe a adição de gás nitrogênio ( $N_2$ ) e ar . Após a estabilização, o  $UO_2$  é transportado para grandes caixas giratórias misturadoras, os homogeneizadores , onde a este pó é adicionado outro composto de urânio ( $U_3O_8$ ), estando pronto e à disposição da FCN Pastilhas.

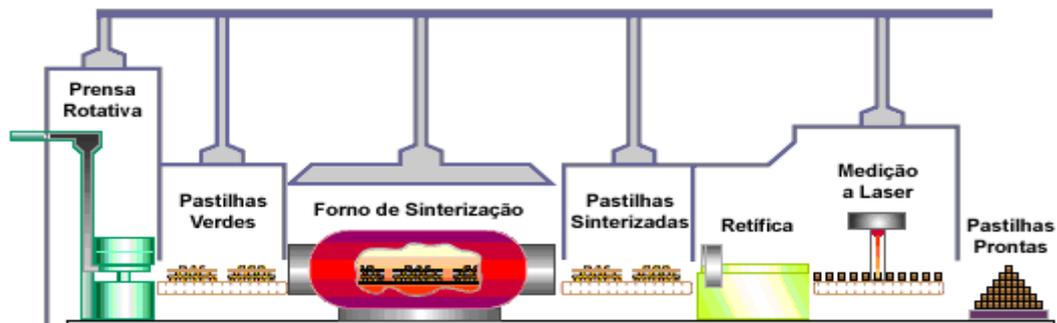


Figura 3: Construção das pastilhas de Urânio

Fonte: INB,2012

Após o processo de mistura (homogeneização) com  $U_3O_8$ , o pó de  $UO_2$  é transportada para uma prensa rotativa automática, onde são produzidas pastilhas. Nesta fase do processo são chamadas de “pastilhas verdes”. As “pastilhas verdes”, ainda relativamente frágeis, são encaminhados ao forno de sinterização, sob temperatura de  $1750^{\circ}C$ , 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 os padrões adequados. As pastilhas sinterizadas aprovadas são acondicionadas em caixas e armazenadas adequadamente num depósito existente dentro da FCN pastilhas. Os equipamentos são mantidos sob ventilação/exaustão controladas, visando a manutenção da boa qualidade do ar no interior da fábrica.

Após essa etapa, ocorre a formação do elemento combustível através da inserção das pastilhas dentro de varetas especialmente projetadas para esse fim. Abaixo está descrito o elemento combustível segundo a INB.

(INB,2012) O elemento combustível é um conjunto de 235 varetas combustíveis-fábricas em zircaloy- rigidamente posicionadas em uma estrutura metálica, formada por grandes espaçadores; 21 tubos-guias e dois bocais, um inferior e outro superior. Nos tubos-guias são inseridas as barras de controle da reação nuclear. Antes de serem unidas a estes tubos por solda eletrônica, as grades espaçadoras são alinhadas por equipamentos de alta precisão. A solda das extremidades das varetas se dá em atmosfera de gás inerte e sua

qualidade é verificada por raios-X. Um elemento combustível supre de energia 42.000 residências médias durante um mês.

## 2.5 FUNCIONAMENTO DO REATOR NUCLEAR

Pela definição de reator nuclear de (YOUNG,FREEDMAN,2009), um reator nuclear é um sistema no qual uma reação nuclear em cadeia mantida sob controle é usada para liberar energia. Na usina nuclear, essa energia gera vapor, que aciona uma turbina que movimenta um gerador elétrico

Figura 4: Funcionamento de um reator nuclear PWR

Fonte: Eletronuclear,2012

A figura acima demonstra o esquema de funcionamento de um reator nuclear do tipo PWR. A fissão do elemento combustível, que está dentro das varetas, libera uma grande quantidade de energia aumentando a temperatura do vaso de pressão para cerca de 320°C, aquecendo a água do circuito primário, que não entra em ebulição, sendo bombeada e trocando calor com a água do circuito secundário; esta sim, mantida a pressão ambiente, entra em ebulição e o vapor produzido move a turbina que gera energia elétrica em seguida o vapor passa pelo condensador se transformando em água novamente e reabastecendo o circuito secundário. A existência desses circuitos ocorre de modo a evitar o contato em os três tipos de água envolvidos no processo, uma vez que a água do circuito primário é altamente radioativa.

Os resíduos produzidos dentro do reator são os que exigem maior atenção e cautela. Apresentam alto índice de radioatividade e temperaturas elevadas. Os resíduos de Urânio ficam armazenados em grandes piscinas localizadas dentro do complexo de Angra, para baixar sua temperatura, e seu destino final ainda é incerto. Os reatores nucleares também possuem um tempo de vida útil até serem completamente desativados e ainda não há uma solução para o que fazer quando isso acontecer. A utilização cada vez mais crescente da Energia Nuclear traz um aumento proporcional de seus resíduos produzidos que são mais problemáticos do

que os resíduos comuns. Nota-se que até mesmo os países mais desenvolvidos e experientes nessa modalidade energética não possuem alternativas certas para solucionar esse problema e em países em desenvolvimento como o Brasil a situação torna-se ainda mais grave exigindo-se cada vez mais atenção e cuidado.

## 2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS REJEITOS RADIOATIVOS

As atividades que envolvem a extração, processamento e o enriquecimento do urânio visando à produção de energia nuclear geram resíduos indesejáveis ao processo<sup>3</sup> e estes são denominados rejeitos radioativos. A IAEA define rejeito radioativo como o material que contenha ou esteja contaminado com radionuclídeos em concentrações ou níveis de atividade maiores que os limites de isenção estabelecidos pela autoridade competente. A CNEN é a autoridade competente brasileira e para realizar esse monitoramento dos resíduos radioativos produziu algumas normas regulamentadoras. A norma 6.02 fornece algumas definições classificatórias sobre tipos de instalações, elementos radioativos manipulados, inspeções e obrigações. A norma 6.05 recebe o nome de “Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas”, fornecendo as informações para o gerenciamento dos rejeitos, envolvendo a segregação, recipientes adequados, transporte, armazenamento provisório, tratamento e transferência.

CATEGORIA	CONCENTRAÇÃO (c)	
	(Bq/m <sup>3</sup> )	(Ci/m <sup>3</sup> )
Baixo Nível de Radiação (LBN)	$c \leq 3,7 \times 10^{10}$	$c \leq 1$
Médio Nível de Radiação (LMN)	$3,7 \times 10^{10} < c \leq 3,7 \times 10^{13}$	$1 > c \leq 10^3$
Alto Nível de Radiação (LAN)	$c > 3,7 \times 10^{13}$	$c > 10^3$

Figura 5 : Classificação dos rejeitos líquidos

Fonte: CNEN,2012

CATEGORIA	CONCENTRAÇÃO (c)	
	(Bq/m <sup>3</sup> )	(Ci/m <sup>3</sup> )
Baixo Nível de Radiação (GBN)	$c \leq 3,7$	$c \leq 10^{-10}$
Médio Nível de Radiação (GMN)	$3,7 < c \leq 3,7 \times 10^4$	$10^{-10} > c \leq 10^{-6}$
Alto Nível de Radiação (GAN)	$c > 3,7 \times 10^4$	$c > 10^{-6}$

Figura 6: Classificação dos rejeitos gasosos

Fonte: CNEN,2012

CATEGORIA	TAXA DE EXPOSIÇÃO (X) NA SUPERFÍCIE	
	$\mu\text{C/kg.h}$	R/h
Baixo Nível de Radiação (SBN)	$X \leq 50$	$X \leq 0,2$
Médio Nível de Radiação (SMN)	$50 < X \leq 500$	$0,2 < X \leq 2$
Alto Nível de Radiação (SAN)	$X > 500$	$X > 2$

Figura 7: Classificação dos rejeitos sólidos

Fonte: CNEN,2012

Desta maneira a classificação dos rejeitos resumem-se a três categorias:

- .Rejeitos de Nível Baixo- Não requerem blindagem para manuseio e transporte.
  - .Rejeitos de Nível Médio- Requerem blindagem para manuseio e transporte e não são geradores de calor.
  - .Rejeitos de Nível Alto- Requerem blindagem e também resfriamento.
- (ENOKIHARA,1983).

## 2.7 PRINCIPAIS OPERAÇÕES QUE ENVOLVEM O PROCESSAMENTO DE URÂNIO

### 2.7.1 Trituração ou Moagem

Importante operação unitária que tem como objetivo a redução de tamanho na qual todas as partículas sólidas são rompidas em outras menores. A moagem é o último estágio do processo de fragmentação de partículas. Neste estágio as partículas são reduzidas, pela combinação de impacto, compressão, abrasão ou atrito, a um tamanho adequado à liberação do material para a próxima operação unitária ou processo de transformação (FIGUEIRA et al, 2004).

É conclusivo que a moagem deve ser muito bem estudada na etapa de dimensionamento e escolha de equipamento e muito bem controlada na etapa de operação da industrial, pois o bom desempenho de uma instalação industrial depende em muito da operação de moagem (FIGUEIRA et al, 2004).

Na mineração do Urânio os principais equipamentos utilizados na trituração são os britadores de mandíbulas esse é um equipamento de britagem primária que visa a redução de blocos de elevadas dimensões com elevada dureza.

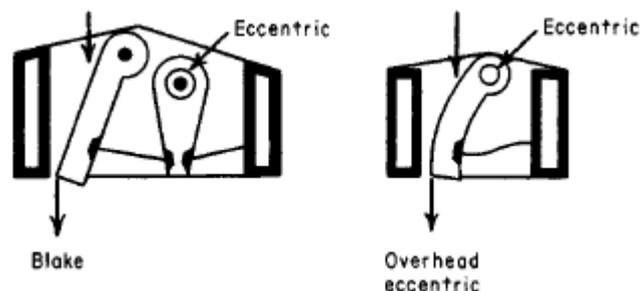


Figura 8. Eixo excêntrico de trituradores de mandíbula (ICTA-UFRGS, 2010).

### 2.7.2 Lixiviação

Presente na etapa de beneficiamento do Urânio ainda presente no minério extraído e triturado. Tem como objetivo a dissolução do mineral do metal de valor pela água ou por uma solução aquosa do agente lixiviante. Normalmente é utilizada em minérios com baixos teores, caso do urânio. No processamento do Urânio o

agente lixiviante utilizado é o ácido sulfúrico porém carbonatos também podem ser utilizados. A concentração do agente na água varia muito, podendo ir de 1g/L até a concentração de 50g/L, de acordo com o método de lixiviação utilizado. As técnicas mais utilizadas de lixiviação são:

- .Tanques agitados a pressão atmosférica.
- .Sob pressão
- .Percolação em tanques
- .Em pilhas
- .In situ

### 2.7.3 Extração com solvente

É a transferência de uma espécie de soluto para um solvente conhecido, chamado solvente de extração. Quando o soluto estiver em solução, o processo de extração será chamado extração líquido-líquido, e o solvente de extração deverá ser substancialmente imiscível com o solvente original. Mas se o soluto constituir parte de um sólido, o processo será chamado de extração sólido-líquido. A extração do urânio é da categoria líquido-líquido e tem como principal ponto a ser destacado a afinidade adequadamente seletiva pelo soluto apropriado. Podemos dividir a extração em quatro etapas básicas, extração, lavagem/remoção de impurezas, reextração e regeneração da fase orgânica. A etapa de extração resume-se na passagem da espécie a ser recuperada da fase aquosas para a fase orgânica. A etapa de lavagem tem como objetivo a remoção das espécies co-extraídas para a fase orgânica durante a etapa de extração. Na etapa de re-extração ocorre a transferência da espécie de interesse da fase orgânica para uma fase aquosa adequada. E por último a regeneração é a recuperação da fase orgânica através de uma fase aquosa capaz de restaurar as propriedades necessárias para a extração da espécie de interesse (BLACKADDER,NEDDERMAN,2011)

### 2.7.4 Calcinação

É a remoção da água, CO<sub>2</sub> e de outros gases fortemente ligados quimicamente a uma substância. Tem como objetivo eliminar gases, diminuir o volume da carga ou para evitar o consumo de um combustível caro, sendo então realizada à parte do processo principal.

#### 2.7.5 Centrifugação

Operação unitária utilizada para a separação de duas fases. Atua mediante a força centrífuga quando iniciado o movimento de rotação. Realizada em aparelhos denominados centrífugas, no caso do enriquecimento de Urânio recebem o nome de ultracentrífugas.

#### 2.7.6 Filtração

Envolve a separação de um sólido de um líquido no qual está suspenso, através da passagem do líquido por um meio poroso com poros pequenos demais para permitirem a passagem de partículas sólidas.

#### 2.7.7 Secagem

É a remoção de um líquido volátil, de um sólido poroso como madeira ou massa de pó. O projeto dos secadores varia consideravelmente devido à grande variedade de materiais que devem ser secados (BLACKADDER,NEDDERMAN,2011)

## 2.8 CONCEITOS BÁSICOS DA ENERGIA NUCLEAR

O princípio básico que regula a produção da energia nuclear é a transformação da massa em energia, teorizada por Einstein em 1905 (THORNTON, REX,2006). Para realizar isso foram estudadas duas técnicas distintas, a fissão

nuclear e a fusão nuclear, ambas com grande desprendimento de energia. HALLIDAY e RESNICK (2012) mostram que a fissão nuclear surgiu a partir de um dúvida levantada por Hahn e Strassamn em 1939. Durante seus experimentos eles observaram que a reação do urânio ( $Z=92$ ) com um nêutron produziu um elemento de massa moderada, o bário ( $Z=56$ ) e se questionaram sobre como isso ocorreu. Esse enigma perdurou até o momento em que Meitner e Otto Frisch levantaram a ideia de que o núcleo de urânio, depois de absorver um nêutron, se dividia resultando na liberação de energia acompanhada por dois fragmentos iguais, um dos quais era o bário, nascendo então o processo de fissão nuclear (SERWAY JEWETT,2005)

Em um evento típico de fissão do  $^{235}\text{U}$ , um núcleo de  $^{235}\text{U}$  absorve um nêutron térmico, o que resulta em núcleo composto,  $^{236}\text{U}$ , em um estado altamente excitado. É esse núcleo que sofre o processo de fissão, dividindo-se em dois fragmentos. Os fragmentos imediatamente emitem dois ou mais nêutrons, dando origem a fragmentos de fissão como o  $^{140}\text{Xe}$  ( $Z=54$ ) e o  $^{94}\text{Sr}$  ( $Z=38$ ). A Equação completa para esse evento de fissão é  $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow ^{140}\text{Xe} + ^{94}\text{Sr} + 2n$  HALLIDAY,RESNICK (pg.328,2012).

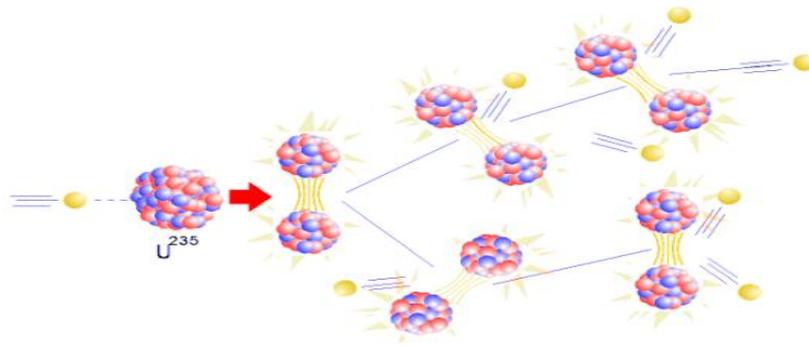
Observamos que durante a formação e fissão do núcleo composto são conservados o número de prótons e o número de nêutrons.



Figura 9:Fissão Nuclear

Fonte: CNEN,2012

Um dos cuidados que se deve ter na realização de uma fissão nuclear é o fato de que esta é uma reação em cadeia na qual os núcleos recém-formados da colisão anterior são atingidos por nêutrons gerando mais núcleos que são novamente colididos e assim, sucessivamente, exigindo uma forma de controle. Este fato foi utilizado na fabricação de bombas atômicas pois o potencial destrutivo da reação em cadeia é praticamente sem precedentes.



Figura

Figura 10: Reação em cadeia da fissão Nuclear

Fonte: CNEN,2012

Depois da descoberta da fissão, Niels Bohr e John Wheeler fizeram uma analogia entre o núcleo e uma gota de líquido carregada eletricamente para explicar os aspectos do fenômeno. Halliday e Resnick (2012) destacaram esses pontos tomando novamente o exemplo do urânio 235. O primeiro evento é a absorção do nêutron de baixa energia cinética, então o  $^{235}\text{U}$  se transforma no  $^{236}\text{U}$ . Após a absorção do nêutron, parte da massa se transforma em energia (transformação da massa em energia, segundo Einstein) fazendo o núcleo oscilar; tais oscilações fazem com que as cargas positivas (prótons) se repilam mutuamente ao mesmo instante que prótons e nêutrons são atraídos (pela interação nuclear), porém, essa interação diminui rapidamente com a distância, a repulsão elétrica torna-se muito mais forte e o núcleo divide-se em duas partes, porém a massa das partes é menor que a massa inicial e por isso ocorre a liberação de energia, os fragmentos liberam seus excessos de nêutrons (possibilitando a reação em cadeia).

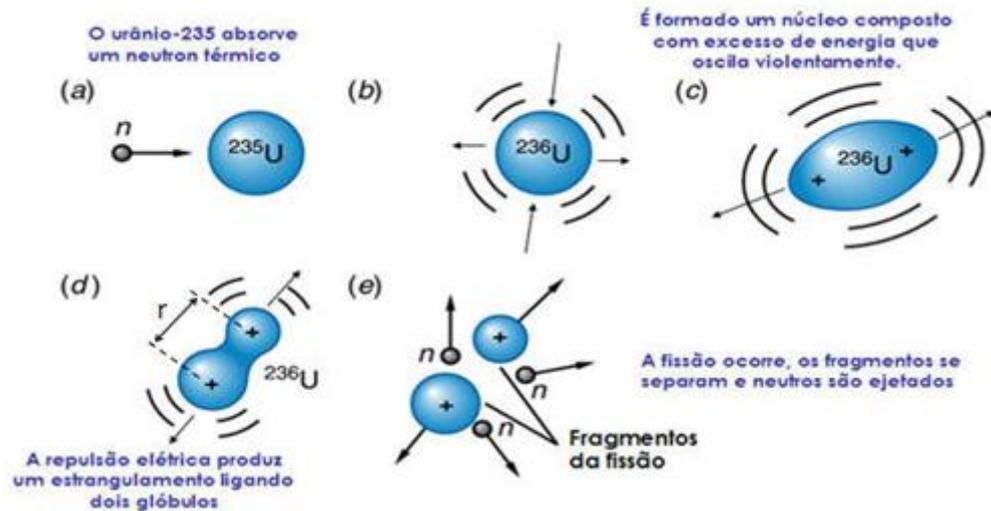


Figura 11: Modelo da gota de Bohr

Fonte: Disponível em <objetoseducacionais2.mec.gov.br>. Acesso em 05/09/2013

A fusão nuclear, por sua vez, é a união de dois átomos para formar um terceiro de massa maior e ocorre uma grande liberação de energia.

Em condições normais, o processo é impedido pela repulsão de Coulomb entre duas partículas de mesma carga, que impede que dois núcleos se aproximem o suficiente para que a interação forte predomine, promovendo a fusão. A altura dessa barreira de Coulomb depende da carga e do raio dos núcleos. No caso de dois prótons ( $Z=1$ ), a altura da barreira é 400keV. Se os núcleos tiverem um número maior de prótons, a barreira, naturalmente, será maior HALLIDAY, RESNICK, 2012 (pg. 339, 2012).

A fusão exige uma alta energia inicial para produzir um grande número de fusões em um curto período de tempo exigindo assim uma alta temperatura que fornecerá energia para os núcleos.



Figura 12: Isótopos de hidrogênio

Fonte: CNEN, 2012

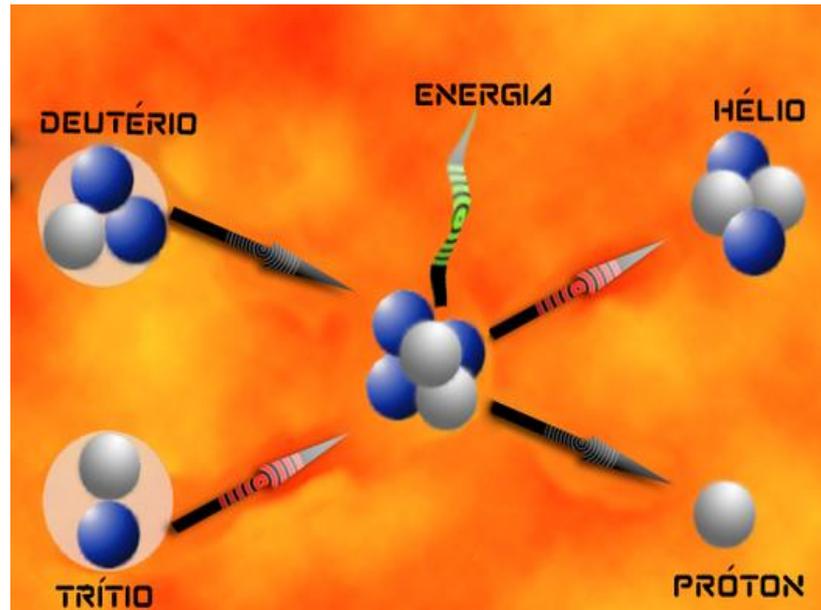


Figura 13: Fusão de Isótopos de Hidrogênio

Fonte: Disponível em <physicsact.wordpress.com>. Acesso em 06/09/2013.

Em um primeiro instante, a reação de fusão nuclear não parece ser mais interessante em níveis energéticos do que a fissão, já que é necessário um elevado gasto energético para unir esses dois átomos, enquanto isso não é necessário na fissão, assim como descreve Galetti (, pg.15,1990): “ Em primeiro lugar, vê-se que é necessário um excedente de energia para se fundir os dois núcleos (hidrogênio, deutério ou trítio), já que, como ambos são sistemas eletricamente carregados (têm prótons), apresentam uma repulsão coulombiana”. A fusão nuclear exige uma alta temperatura para se iniciar, tanto que, em projetos de bombas atômicas de fusão, considerava-se necessário haver primeiro a explosão de uma bomba de fissão para que a energia por esta liberada alimentasse a reação em uma bomba de fusão. Apesar desse alto gasto energético inicial, ao final da fusão há um ganho energético positivo, ou seja, a energia liberada ao final da fusão é maior do que a energia gasta para unir os dois átomos.

## 2.9 Desenvolvimento Nuclear-Breve histórico

Não poderíamos utilizar o urânio como fonte energética se não fossem realizados os valiosos estudos em ciências básicas. Cientistas ao longo da história deram suas contribuições, que juntas resultaram em diversas aplicações práticas de grande

importância. No antigo centro cultural do mundo, a Grécia, filósofos gregos já pensavam na existência de uma partícula única que formaria toda a matéria do universo. Porém, apenas no século XIX, mais precisamente no ano de 1803, o professor inglês John Dalton deu os primeiros passos para a formulação da atomística estabelecendo a Teoria de Dalton. Essa teoria pregava que essa partícula universal presente em toda a matéria do universo, já denominada átomo, tinha características de uma esfera maciça. “Os átomos então seriam indivisíveis e indestrutíveis, sua forma física era idêntica à de uma esfera maciça e eles não apresentavam carga elétrica”. Pela teoria de Dalton, como poderíamos diferenciar os elementos se todos seriam compostos por átomos? Ele respondeu essa pergunta assumindo o fato de que os átomos de diferentes elementos apresentariam características distintas e que os mesmos seriam arranjados em proporções fixas para compor os elementos (Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2010). Apesar de apresentar vários pontos diferentes da realidade a teoria de Dalton apresentou alguns pontos aceitos até hoje, como a conservação da massa em reações químicas e a composição dos elementos por átomos. A existência da carga elétrica foi realizada mais tarde no importante experimento de Faraday.

O modelo atômico de J.J Thomson, formulado em 1898, nos forneceu mais conhecimento sobre os átomos. Em sua teoria, Thomson sugeriu que os átomos possuíam carga elétrica e também propôs o modelo físico do arranjo destas cargas, assim o núcleo do átomo era composto de carga positiva incrustado de cargas negativas (YOUNG, FREEDMAN, 2009).

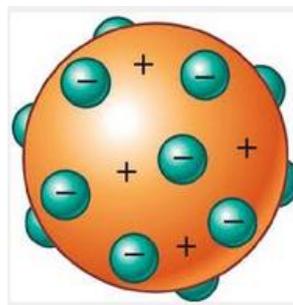


Figura 14: Representação Atomística de Thomson

Fonte: Disponível em <[estudosgerais2012.blogspot.com](http://estudosgerais2012.blogspot.com)>. Acesso em 10/08/2013.

A descoberta da radiação X foi um marco para o desenvolvimento dos estudos radioativos. Hoje sabemos que graças a isso, importantes aplicações foram possíveis, muitas relacionadas a área médica. Roentgen, em 1895, publicou resultados de experimentos que mostravam a existência de um tipo de radiação capaz de atravessar corpos opacos. A capacidade radioativa do urânio foi demonstrada por Henri Becquerel, através da emissão de radiação similar ao Raio X por esse elemento. Becquerel abriu novos precedentes com sua descoberta motivando importantes cientistas (como Kelvin, Smoluchwski, Elster e o conceituado casal Curie) a pesquisarem os seus raios. A descoberta sobre a polaridade das partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  viria à tona no início do século XX. Rutherford em 1903 utilizando experimentos em campo magnético atribuiu polaridade positiva para as partículas  $\alpha$ . Diversos cientistas como Giesel, Meyer, Bragg e Becquerel atribuíram polaridade negativa para as partículas  $\beta$ . Thomson já reconhecia a existência de um núcleo positivo cercada de cargas negativas, porém essa descrição ainda era muito rudimentar. Niels Bohr estabeleceu um postulado relacionado com as orbitas dos elétrons. Seu postulado dizia que os elétrons (elementos com carga negativa) não estavam incrustados no núcleo positivo, como disse Thomson, e sim, estavam, em órbita em volta do núcleo, porém não existia apenas uma órbita e sim, muitas, que diferenciavam-se entre si pelo nível de energia quantizado (STEPHEN, ANDREW 2006). Sendo assim, a energia total do elétron apresenta diversos valores de um quantum de energia e para um elétron mudar de órbita a diferença de energia entre as orbitas é emitida por um quantum (fóton).

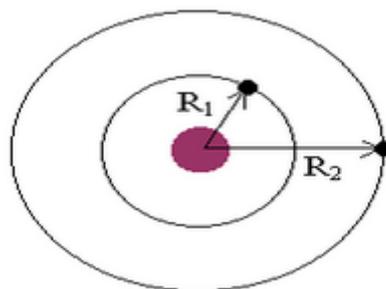


Figura 15: Órbita dos elétrons de Bohr

Fonte: Disponível em <if.ufrgs.com>. Acesso em 11/09/2013

Com os conhecimentos da mecânica quântica e dos postulados de Einstein, Fermi realizou experimentos que tentavam explicar as reações de choque com nêutrons, um conhecimento fundamental para a energia nuclear.

Em 1935, Enrico Fermi começou uma série de experiências em que foram produzidos artificialmente núcleos radioativos, pelo bombardeamento com nêutrons de vários elementos. Alguns dos seus resultados sugeriam a formação de elementos transurânicos. O que eles observaram foi a fissão nuclear, mais tarde comprovado por Otto Hahn. GUASS(pg.48,2007)

Fermi, utilizando parafina, conseguiu multiplicar o efeito dos nêutrons, e essa descoberta rendeu uma importante patente italiana em 1935. A fissão nuclear, comprovada por Otto Hahn e Fritz Strassman em 22 de dezembro de 1938, fechou um importante ciclo de descobertas teóricas para o campo de aplicações práticas. A segunda guerra e os estudos com fins bélicos acompanharam o desenvolvimento dessa nova fase nuclear e o primeiro reator nuclear, construído ainda em escala piloto, aconteceu em 1942 em Chicago dentro de um campus universitário. O desenvolvimento continuava intenso.

Em 1951, entrou em operação um pequeno reator em Idaho Falls, para pesquisar as propriedades regeneradoras de um reator rápido. Até 1963 ele sempre forneceu energia elétrica para o seu próprio edifício. Esse reator construído pelo Laboratório Nacional de Argonne da Universidade de Chicago e em 1955-1956 manteve a primeira cidade da história totalmente iluminada com energia elétrica proveniente de uma central nuclear. Era a cidade de Arco, em Idaho Kuramoto. APPOLONI (pg.30,2002).

Com a entrada do primeiro reator europeu em operação, no ano de 1946 em Moscou, e com a explosão da primeira bomba atômica não americana, o presidente americano, no ano de 1953, lançou um programa que buscou unir o conhecimento de diversos países. Com isso houve uma grande evolução no uso de reatores comerciais a partir de 1960 (PRASS,2007).

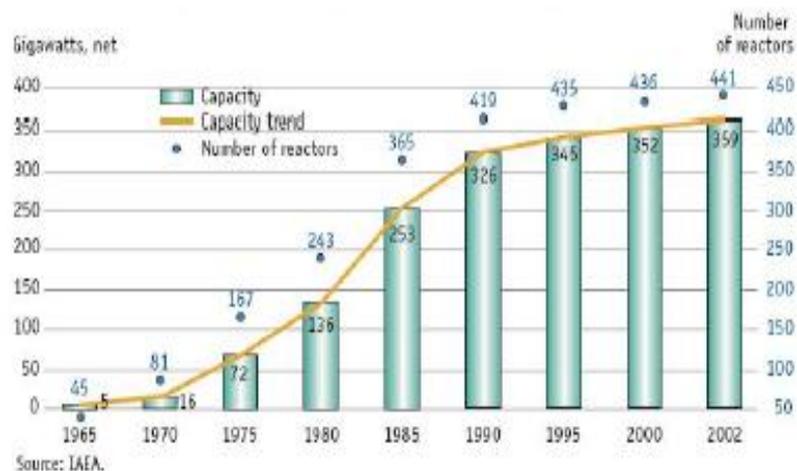


Figura 16: Evolução do uso de reatores nucleares no mundo

Fonte: IAEA

## 2.10 BREVE HISTÓRICO DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL

O primeiro passo para o desenvolvimento da energia nuclear no Brasil começou no ano de 1930.

A história da energia nuclear no Brasil começa em meados da década de 1930, quando, visando consolidar em alto nível os padrões de ensino e pesquisa da então recém-criada Universidade de São Paulo, o governo do Estado contratou professores e pesquisadores europeus de diversas especialidades e criou a Faculdade de Filosofia, Ciências da Terra, Química e Biologia. Mais tarde, em 1956, criou-se o Instituto de Energia Atômica (IEA), para onde foram transferidos alguns físicos da seção de Física da Faculdade de Filosofia e engenheiros da Escola Politécnica. CARVALHO (pg.25, 2012).

As pesquisas na área nuclear estruturaram-se mesmo apenas depois de 1945 (KURAMOTO,2012). Fermi tentava explicar a eficiência dos nêutrons para produzir novos núcleos e esteve no Brasil em 1934 juntamente com o Físico Gleb Wataghin e o matemático Luigi Fantappie. Juntos fundaram uma escola de física que ajudou no desenvolvimento da ciência nacional. Durante a década de 40, o Brasil assinou um contrato nuclear com os EUA envolvendo a venda de areia monazítica para os EUA, a areia contém o elemento Tório, utilizado em processos nucleares. A participação do brasileiro Cezar Lattes na descoberta do méson em 1948 possibilitou a criação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Sob o período de Jânio Quadros, em 1959, o Brasil tentou

viabilizar a instalação do primeiro reator nuclear no Rio de Janeiro, porém a falta de domínio de técnicas de enriquecimento de Urânio acabou inviabilizando o processo. A comissão nacional de energia nuclear (CNEN), criada por Juscelino Kubitschek em 1956, assinou um acordo para a construção de uma usina em Angra dos Reis, no ano de 1968. A construção do primeiro reator brasileiro aconteceu em 1971, através da empresa americana Westinghouse, sem nenhuma transferência de tecnologia. Utilizando um reator do tipo PWR, Angra I entrou em operação em 1985, com capacidade de produzir 657MW (energia suficiente para atender uma capital como Vitória). A Eletrobrás Eletronuclear (criada em 1997 com a finalidade de operar e construir usinas termonucleares no Brasil) hoje consegue manter e realizar grandes manutenções no reator de maneira autônoma. O maior desenvolvimento de enriquecimento de Urânio nacional aconteceu em 1982, quando o Brasil conseguiu desenvolver suas próprias ultracentrífugas com capacidade de enriquecimento de 1,2% do material. O País evoluiu e aumentou a porcentagem de enriquecimento e o então presidente José Sarney anunciou através de decreto o domínio da técnica pelos brasileiros assim como a construção de Angra II e Angra III. O programa nuclear da Marinha, que tinha como objetivo a construção de um submarino movido a combustível nuclear, acabou mudando seu foco com a inviabilidade da construção do mesmo e transferiu seu conhecimento para a fábrica de pastilhas de combustível que abastecem Angra I e Angra II. A usina de Angra II entrou em operação em julho de 2000 e possui praticamente o dobro da capacidade energética de Angra I, porém custa quatro vezes mais (US\$10 bilhões ante US\$ 2,5 bilhões de Angra I). Angra II utiliza o mesmo modelo de reator de Angra I (PWR), porém com tecnologia alemã da Siemens/KWU e apresenta a capacidade de 1350MW. Sua construção se iniciou em 1981 e somente foi concluída em 2000. Alcançou números expressivos em produtividade sendo a 33<sup>o</sup> terceira em produção de energia entre as 436 usinas em operação no mundo, Angra III segue o mesmo modelo da Angra II e terá capacidade prevista de 1405MW e com previsão para entrar em operação em julho de 2016, fazendo o Brasil entrar em definitivo no ramo da energia nuclear de primeiro mundo.

## 2.11 ANÁLISE SWOT

O termo SWOT é um acrônimo das palavras *Strengths* (forças), *Weaknesses* (fraquezas), *Opportunities* (oportunidades) e *Threats* (ameaças). Criada por Kenneth Andrews e Roland Christensen, dois professores da Harvard Business School, a análise SWOT é uma matriz de informações gerais, de alta importância, amplamente utilizada em meios acadêmicos e corporativos. As informações são classificadas em quatro categorias: Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças, fornecendo uma visão geral do ambiente analisado. As forças seriam os pontos fortes apresentados pelo cenário, as fraquezas os pontos mais fracos e possíveis de serem melhorados, as oportunidades são novas possibilidades e potenciais a serem exploradas e as ameaças são fatores externos ou que podem comprometer o processo analisado. O objetivo da SWOT é definir estratégias para manter os pontos fortes, reduzir a intensidade de pontos fracos, aproveitando oportunidades e protegendo-se de ameaças,

### 3 METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica será a metodologia utilizada no trabalho. Para isso serão utilizados os principais bancos de artigos científicos, bem como bibliotecas especializadas. Destaca-se a ampla biblioteca do IPEN, localizado na cidade universitária-USP, que conta com grande acervo na área nuclear, a rede biblioteca digital da CNEN que reúne os principais artigos da área nuclear e possui acervo com acesso online e universal, o banco de dados corporativo da ALEN também com acervo online e universal e o portal do conhecimento nuclear, que lista os principais acervos online ligados a área nuclear em nível mundial. Destaca-se o modelo de pesquisa exploratória que o trabalho utilizará e que, segundo Oliveira (1999), tem a seguinte característica “[...] os estudos exploratórios podem ter outros aspectos, tais como o de possibilitar ao pesquisador fazer um levantamento provisório do fenômeno que deseja estudar de forma mais detalhada e estruturada posteriormente”.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MATRIZ SWOT

Através do dados obtidos da bibliografia e de acordo com os objetivos do trabalho construiu-se a matriz SWOT abaixo:

Pontos	OPORTUNIDADES	FORÇAS
pontos fortes	<ul style="list-style-type: none"> <li>.Suprir a demanda energética nacional;</li> <li>.Acrescentar desenvolvimento tecnológico para o país</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>.Utilizar Urânio como combustível energético;</li> <li>.Evita problemas ambientais de outras fontes energéticas</li> </ul>
pontos fracos	AMEAÇAS	FRAQUEZAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>.Fortalecimento de outras fontes energéticas</li> <li>.Acidentes</li> <li>.Painel Internacional</li> <li>.Atuação de Orgãos Ambientais</li> <li>.Vulnerabilidade Militar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>.Dependência de tecnologia externa para implantação;</li> <li>.Resíduos Nuclear e futuro da usina;</li> <li>.Uso Militar;</li> </ul>

Figura 17:Matriz SWOT da energia nuclear no Brasil

## 4.2 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos dados obtidos da Tabela SWOT realizou-se a análise crítica destacada abaixo.

### 4.2.1.OPORTUNIDADES

#### *. Suprir a crescente demanda energética nacional*

O grande crescimento econômico brasileiro a partir do ano 2000 trouxe algumas exigências para a sua manutenção. Entre essas exigências, destacamos a demanda energética. Fatos como o racionamento energético, ainda, assustam a sociedade brasileira e os grandes investidores internacionais, ressaltando a importância da questão. Na discussão entre qual fonte energética seria a mais adequada para esse momento, a Energia Nuclear encontra uma grande oportunidade de se expandir.

Valendo-se do sucesso de implantação e de operação de Angra I e Angra II, das críticas aos impactos causados pelas hidrelétricas e termoeletricas, a Energia Nuclear encontra uma grande oportunidade de se tornar uma matriz significativa no território brasileiro através da necessidade, cada vez mais crescente, de energia para a manutenção do crescimento econômico nacional.

#### *Acrescentar desenvolvimento tecnológico para o País*

A energia Nuclear exige conhecimentos de diversas áreas. A engenharia química está envolvida no processamento do combustível nuclear, a física envolve a construção e funcionamento do reator nuclear e enriquecimento de urânio e a mineração preocupa-se na captação do minério de urânio; as ciências ambientais preocupam-se com os resíduos produzidos e ainda há outras áreas envolvidas. Os grandes centros de pesquisa brasileiros contam com pesquisadores possuidores do título de doutorado e amplamente capacitados, agregando desenvolvimento tecnológico para o país através de suas pesquisas. Além de reunir conhecimento de diversas áreas, o desenvolvimento nuclear exige constante evolução delas. E isso acaba beneficiando outras áreas do conhecimento, como a medicina (descoberta

dos raios x). O desenvolvimento das ultracentrífugas para o enriquecimento de urânio por cientistas brasileiros mostra que além de fornecer energia, pode-se obter desenvolvimento tecnológico através do processamento nuclear.

O desenvolvimento de um país está diretamente ligado à sua evolução tecnológica, assim é possível a produção de produtos com alto valor agregado além de mitigar a dependência internacional. Desta maneira, o desenvolvimento nuclear contribui para o crescimento da ciência brasileira gerando pesquisadores capacitados, indústrias geradoras de empregos, como a INB, e desenvolvendo grandes centros de pesquisa.

#### **4.2.2. AMEAÇAS**

##### ***Fortalecimento de outras fontes energéticas***

Historicamente o Brasil pautou-se em concentrar seus esforços no desenvolvimento da energia hidrelétrica e ter as termoelétricas como reservas para necessidades emergenciais. O desenvolvimento nuclear é recente perto do desenvolvimento de outras fontes energéticas além de que ainda é pouco representativo na matriz energética nacional. O relevo brasileiro favorece a criação de hidrelétricas e a facilidade para obtenção de carvão é um chamariz para a construção de termoelétricas.

Assim o fortalecimento de fontes energéticas “concorrentes” ameaçam a expansão nuclear.

##### ***Acidentes***

O desenvolvimento nuclear sempre esteve ligado a grandes acidentes. Chernobyl em 1986, o acidente em Three Mile Island em 1979 e mais recentemente a usina de Fukushima, mostram que as consequências de um acidente nuclear atingem grandes proporções e as consequências podem ser irreversíveis. Se grandes acidentes acontecerem em países pioneiros no desenvolvimento nuclear e considerados de primeiro mundo, as chances de acontecer no Brasil são reais, tendo em vista que ele é considerado subdesenvolvido e apresenta desenvolvimento nuclear recente. O complexo de Angra conta com um forte projeto de segurança

contra acidentes e vazamentos, porém sempre há risco de acidentes. Tais fatores vão contra a expansão nuclear brasileira.

### ***Painel Internacional***

Investir na expansão nuclear é contradizer as tendências do primeiro mundo. Nota-se, hoje, que os países de primeiro mundo estão investindo na desativação de suas usinas nucleares buscando a substituição integral sua energia oriunda da fissão do urânio. A Alemanha, uma das líderes em pesquisa nuclear e possuidora da tecnologia que possibilitou a construção de Angra II e grande parceira na construção de Angra III no Brasil, planeja não ter mais nenhum reator nuclear em funcionamento até 2022 desativando seus 17 reatores atualmente em funcionamento. Os EUA não aprovam a construção de reatores nucleares há 30 anos e também adotam uma política de substituição da energia nuclear. O Japão sofre com grandes protestos da população contra as usinas nucleares, intensificados após o acidente de Fukushima, e prometeu desativar suas usinas nucleares até 2030.

A construção de Angra III vai contra as políticas internacionais dos principais países detentores da energia nuclear representando uma forte ameaça a expansão nuclear brasileira.

### ***Atuação de Órgãos Ambientais***

Um dos fatos, que levam as grandes potências a deixarem de utilizar as fontes energéticas de origem nuclear deve-se à forte atuação de organizações ambientais como Greenpeace e a protestos da população. Isso apresenta uma forte ameaça, pois os investimentos para a construção de usinas nucleares são demasiadamente elevados e a desativação das mesmas por questões não técnicas representa forte prejuízo. Além do fato de que nenhum governo democrático almeja ir contra grandes pressões populares, por motivos políticos, econômicos e de segurança.

### ***Vulnerabilidade Militar***

O circuito primário das usinas termonucleares possuem níveis de radiação elevadíssimos e um vazamento traz consequências irreversíveis para aquela região. No caso de uma guerra ou ataque terrorista, onde se busca atingir os alvos mais frágeis e causar os maiores danos possíveis as usinas seriam grandes alvos em potencial. Sendo assim trata-se de uma fraqueza, pois apesar de possuir proteções reforçadas ainda é vulnerável a ataques externos.

#### **4.2.3 FORÇAS**

##### **.Utilizar Urânio como combustível energético**

A utilização do urânio como combustível energético é uma grande força para a energia de origem nuclear, citamos algumas de suas principais vantagens:

##### **.Alto Rendimento do Urânio**

Comparando com o Carvão, 10g de urânio produzem a mesma energia que 1200kg de carvão e necessitariam da área de 05 piscinas olímpicas de uma usina hidrelétrica. Isso representa uma menor valor por energia produzida, economia de espaço e compensa o alto na construção da usina.

##### **. Grande Reserva**

A reserva de urânio brasileira é a sétima maior do mundo garantindo combustível nuclear por um longo tempo e ainda possibilitando a venda do excedente. Com isso o Brasil é auto-suficiente e está isento de políticas econômicas energéticas internacionais como a elevação do preço do Petróleo pela OPEP que trouxe graves consequências econômicas a diversos países.

### ***Não apresenta problemas ambientais de outras fontes energéticas***

Um dos maiores problemas das usinas hidrelétricas é o fato de necessitarem de grandes áreas de implantação alagando grandes áreas. Tais áreas alagadas muitas vezes contam com populações indígenas, cidades e são o habitat natural de diversas plantas e animais. Com a implantação de hidrelétricas o ecossistema daquela região fica alterado além da vida das pessoas que ali viviam.

A possibilidade da implantação de uma termoelétrica na cidade de CANAS-SP movimentou a opinião de especialistas e moradores da região. Essa discussão concentrou-se na preocupação dos impactos ambientais gerados, com a emissão de grandes quantidades de gases poluentes contribuintes com o aquecimento global e o efeito estufa.

A vantagem das usinas nucleares sobre suas concorrentes é que ela não apresenta nenhum dos dois problemas, pois não precisa de grandes áreas para sua implantação e também não contribui com o aquecimento global e efeito estufa.

#### **4.2.4 FRAQUEZAS**

##### ***Dependência de tecnologia externa para implantação***

Apesar de todo desenvolvimento tecnológico nacional no campo nuclear, o Brasil ainda depende de tecnologia estrangeira para construir novas usinas nucleares. Angra I contou com tecnologia norte-americana enquanto que Angra II e futuramente Angra III denotam de tecnologia alemã. Isso encarece muito o processo e deixa parte do ramo estratégico de energia com dependência internacional, uma grande fraqueza.

##### ***Resíduo Nuclear e o futuro da Usinas***

Apesar dos constantes avanços quanto ao armazenamento dos resíduos produzidos nas termonucleares, eles ainda não possuem um destino definitivo.

Dependendo do grau radiológico contido os resíduos devem ser armazenados por anos em condições de total isolamento, correndo o risco de causarem uma catástrofe tão grande quanto a usina que os produziu. Assim, as usinas deixam rastros negativos que irão acompanhar a Sociedade por um bom tempo. Além desses resíduos de menor volume ,dentro de alguns anos as Usinas se tornarão resíduos. Acontece que as Usinas possuem uma espécie de “data de validade”, após essa data ela deverá ser desativada. O que fazer com as usinas desativadas ainda é dúvida, mesmo nos países desenvolvidos. Criar um “sarcófago” como aconteceu em Chernobyll talvez não seja a solução mais sensata e a solução para isso desafia muitos pesquisadores.

### ***Uso Militar***

O desenvolvimento energético nuclear andou de mãos dadas com o desenvolvimento energético militar. O avanço das técnicas de enriquecimento de urânio além de proporcionar a construção de reatores de fissão, possibilitou o desenvolvimento de bombas atômicas. Durante a segunda guerra o mundo conheceu as consequências das bombas nucleares, capazes de dizimar milhares de pessoas de forma instantânea, porém o mundo ainda não conheceu as consequências das bombas nucleares nas mãos de terroristas, religiosos extremistas ou ditadores de extrema direita. O aumento da energia nuclear difunde mais conhecimentos sobre enriquecimento de urânio e torna maiores as chances do conhecimento energético ser utilizado de maneira inadequada.

## 5 CONCLUSÃO

A produção desse trabalho forneceu um panorama geral da energia nuclear no Brasil. Através do histórico pesquisado nota-se que os estudos da área nuclear foram extremamente importantes, pois além de possibilitar conhecimentos na área energética, trouxe ferramentas para outras áreas como medicina e engenharia. O histórico em território brasileiro mostrou que o desenvolvimento nuclear trouxe consigo avanços acadêmicos e tecnológicos que foram utilizados estrategicamente pelos governantes da época. Os acidentes e o uso militar mostraram as graves consequências do uso incorreto do poder nuclear e fizeram muitas potências desistirem de seu uso.

A análise SWOT mostrou que o Brasil apresenta grande potencial para utilizar esse tipo de energia graças as grandes reservas de Urânio nele presente evitando problemas ambientais oriundos de outras fontes energéticas. Porém ainda é muito dependente de tecnologia internacional para a construção de novas usinas e que por mais seguras que sejam, estão suscetíveis a acidentes com danos irreversíveis. Além disso, o acúmulo de resíduos nucleares trazem graves consequências em longo prazo e podem comprometer futuras gerações.

Assim, conclui-se que os pontos negativos ganham dos pontos positivos e que o risco de acidentes nucleares não é necessário ao Brasil tendo em vista que o país apresenta outras opções energéticas. O investimento em energia limpa e estudos para a diminuição de impactos ambientais das hidrelétricas e termoelétricas seriam direcionamentos mais corretos para suprir a crescente demanda energética. Países com menores opções energéticas do que o Brasil e com muito mais conhecimento em energia nuclear estão desativando suas usinas mostrando que apesar de nova essa fonte energética está em franca extinção.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTO PRASS. **A Energia Nuclear hoje: Uma análise exploratória**. 2007. Monografia em Ciências Radiológicas. UFRGS: Rio Grande do Sul, 2007.

ALVARENGA. **Estudo da extração líquido-líquido de urânio com alamine 336 a partir de meio sulfúrico na ausência e na presença de íons cloreto**. 2010. Belo Horizonte. Monografia para o grau de mestre em ciência e tecnologia das Radiações, Minerais e Materias. CDTN, 2010.

Balanço Energético Nacional. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em 10/09/2013

BLACKADDER, NEDDERMAN. **Manual de Operações Unitárias**. 1ª Ed. São Paulo: Editora Hemus, 2011.

CARVALHO. **O espaço da energia nuclear no Brasil**. 2012. São Paulo: Estudos Avançados, vol.16, pág. 74, 2012.

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. **Gerência de rejeitos do centro de desenvolvimento da tecnologia nuclear**. São Paulo, 2000.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **História da Energia Nuclear**. Rio de Janeiro, 2010.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Reprocessamento e gerência de rejeitos radioativos-relatório técnico 01/82**. Rio de Janeiro, 1982.

Eletronuclear. Disponível em <<http://www.eletronuclear.gov.br>>. Acesso em 02/09/2013.

ENOKIHARA. **O armazenamento de rejeitos radioativos no Brasil com ênfase especial em rochas**. 1983. São Paulo. Dissertação para obtenção do grau de

mestre na área de concentração em reatores nucleares de potência e tecnologia do combustível nuclear. IPEN, 1983.

FACHIN. Fundamentos de Metodologia. 5ªed. São Paulo: Editora Saraiva, 2005.

FIGUEIRA, H.V.O: ALMEIRA; In: **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral, 2004.

FOUST,WENZEL,CLUMP. **Princípios das Operações Unitárias**. 2ªEd. Rio de Janeiro: (LTC) Livros Técnicos e Científicos, 2012.

GALETTI. **Fusão Nuclear com muons**. São Paulo: Caderno de Ensino de Física, vol.7, pág.3, 1990.

HALLIDAY, RESNICK. **Fundamentos de Física. vol. IV Óptica e Física Moderna**. 9ªed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2012.

IAEA. Disponível em <<http://www.iaea.com>>. Acesso em 05/09/2013

ICTA-UFRGS. **Operações Unitárias/Moagem**. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/alimentus/feira/afeira.htm>. Acesso em 07 de outubro de 2013.

Indústrias Nucleares do Brasil. 2012. Disponível em <<http://www.inb.gov.br>>. Acesso em 01/09/2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Tratamento de rejeitos radioativos sólidos e líquidos**. Rio de Janeiro, 1989.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Introdução à gerência de rejeitos radioativos**. São Paulo, 1999.

J.D.LEE. **Química Inorgânica Concisa**. 5ªEd.São Paulo:Editora Blucher, 1999.

KURAMOTO, APPOLONI. **Uma Breve História da Política Nuclear Brasileira**. 2002. São Paulo: Caderno Brasileiro de Ensino de Física, vol.19, pág.379-392, 2002.

MIERZWA. **Estudo sobre tratamento integrado de efluentes químicos e radioativos, introduzindo-se o conceito de descarga zero**. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Ciências na área de reatores nucleares de potência e tecnologia do combustível nuclear. IPEN, 1996.

OLIVEIRA, ANDRADE. **Materiais utilizados no gerenciamento de rejeitos radioativos**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2001.

OLIVEIRA. **Tratado de Metodologia Científica**. 2ªEd. São Paulo: Pioneira, 1999.

PERES, ROCHEDO. **Metodologia para a avaliação de impacto ambiental de sistemas de armazenamento de rejeitos radioativos**. Instituto de Radioproteção e dosimetria. Rio de Janeiro, 2005.

SANTOS. **Análise quantitativa dos rejeitos radioativos a serem gerados no programa nuclear brasileiro**. 1979. São Paulo. Dissertação para obtenção do grau de mestre na área de reatores nucleares de potência. IEA, 1979.

SERWAY, JEWETT. **Princípios de Física vol. IV-Óptica e Física Moderna**. 3ª ed. São Paulo: Thomson, 2005.

THORNTON, REX. **Modern Physics for scientists and Engineers**. 3ª ed. Belmont: Brooks/Cole Cengage Learning, 2006.

TONINI, SPÍNOLA. A análise SWOT: **Uma nova perspectiva para a aplicação do seis sigma no desenvolvimento de software**. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu, 2007.

YOUNG, FREEDMAN. **Física IV- Óptica e Física Moderna**. 12ªed. São Paulo: Pearson, 2009.