

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
LEB0244 – Recursos Energéticos e Ambiente

Energia Nuclear

Piracicaba
2013

Sumário

Introdução.....	3
2. Energia Nuclear: Um Panorama Mundial.....	4
3. Energia Nuclear: Um Panorama Nacional	8
4. Processos para obtenção de energia nuclear.....	11
4.1 Enriquecimento de urânio do Brasil	13
4.2 Enriquecimento do Urânio e Métodos.....	14
4.3 Desenvolvimento da tecnologia da centrifugação.....	15
4.4 Meia-vida	17
5. Legislação.....	18
6. Acidentes Nucleares	20
6.1 Usina de Chernobyl	20
6.2 Usina de Fukushima	24
6.3. Outros Acidentes	26
7. Vantagens e Desvantagens da utilização da Energia Nuclear	26
7.1 Vantagens.....	27
7.2 Desvantagens	28
8. Armazenamento de resíduos oriundos das Usinas Nucleares	30
8.1. Via úmida.....	30
8.2. Via seca	30
9. Viabilidade Econômica.....	31
10. Considerações finais.....	32
Referências.....	34

Introdução

Após as evoluções crescentes oriundas da Revolução Industrial, a necessidade de disposição de Energia tornou-se latente, já que os processos vinculados à inovação científica e ao desenvolvimento tecnológico tornaram-se excessivamente dinâmicos e iminentes na utilização de energia.

Assim, a eficiência, durabilidade e segurança das matrizes energéticas utilizadas até os dias de hoje, entraram em colapso tanto pela excessiva necessidade de insumo, gerando gases nocivos ao ambiente, como pela disseminação da “Sociedade do Petróleo”, responsável pelo grande desenvolvimento do século XX e pela dependência mundial do produto. Nesse sentido, o custo dessa demanda é a escassez das fontes proeminentes, e logo, as crescentes necessidades de outras demandas por insumos energéticos.

Nesse sentido, no panorama mundial a utilização da Energia Nuclear será conhecida como uma alternativa pertinente; a mesma tem sua origem na rudimentar Teoria Atomística iniciada no quinto século antes de Cristo, pelos filósofos gregos Demócrito e Leucipo. A partir daí, inúmeros estudos foram concluídos desenvolvendo a utilização desse tipo de energia, transformando-a em um dos principais motores da Sociedade Contemporânea.

O presente trabalho torna-se importante no sentido de oferecer uma visão de uma fonte energética considerada por inúmeras pessoas “como solução para os problemas” de esgotamento dos combustíveis fósseis e para tantas outras, como ameaça constante de tragédias irreversíveis, tais quais os acontecimentos em Chernobyl (Ucrânia, 1986), Three Mile Island (EUA, 1979) e recentemente em Fukushima (Japão, 2011).

Devido, aos fatos ocorridos no Japão, o assunto tornou-se de enorme repercussão mundial, já que a Alemanha decidiu rediscutir suas regulamentações, a França redesenhar seu panorama energético e na América do Sul a população saiu às ruas para conter o planejamento de novas usinas.

As questões de segurança referentes a essas usinas, tão discutidas, são os sérios problemas em relação ao destino e armazenamento dos resíduos, estes, são extremamente danosos ao ambiente e aos seres vivos. Outro fator é gasto econômico para a construção de uma e assim, o também o grande montante utilizado para que seja operado o fechamento da mesma, já que essa tecnologia

possui prazo de validade.

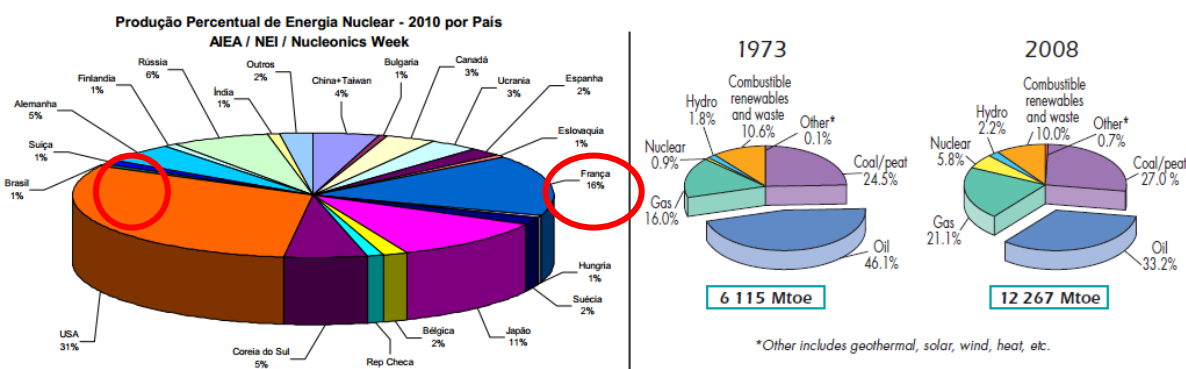
Por outro lado a utilização dessa fonte representa uma alternativa para a emissão de gases como CO₂ na atmosfera, já que esta é tida como uma fonte limpa nesse sentido.

Debates frequentes estão sendo estruturados, sobre as vantagens e desvantagens da Energia Nuclear. Contudo, é importante considerar que as necessidades energéticas existem e devem ser revistas e discutidas, considerando todos os entraves pertinentes à situação mundial e o panorama existente.

2. Energia Nuclear: Um Panorama Mundial

A Energia Nuclear, energia não renovável, tem sido utilizada na produção de energia elétrica para distribuição pública desde 1954. Os gráficos abaixo ilustram a evolução ao longo dos anos na oferta mundial total de energia primária por fonte, dentro deste contexto podemos verificar um aumento percentual significativo na participação da fonte nuclear.

Figura 1: Evolução da Oferta Mundial de Energia



Adaptado: Internacional Energy Agency (IEA), 2009 e Balanço energético Nacional, 2012.

Segundo o relatório da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) de 2010, desde o início da utilização de energia nuclear para produção de eletricidade 32 países já operaram plantas nucleares. No mesmo ano, 29 países operam 441 reatores de energia nuclear com uma capacidade total de 375 GW (e), estes reatores estão distribuídos de forma desigual ao longo dos continentes e países sendo que das 441 centrais, 129 estão na Europa Ocidental e 122 na América do Norte enquanto a África conta com apenas 2 reatores. Ainda de acordo com os dados da AIEA, os Estados Unidos são o país com o maior número de

reatores instalados (104), sendo seguido pela França (59), Japão (53) e Rússia (31).

Em 2009, a energia nuclear contribuiu com 14% da oferta mundial de energia elétrica, esta contribuição percentual varia consideravelmente de acordo com a região, seguindo o mesmo parâmetro da distribuição de reatores, por exemplo, na Europa Ocidental a fonte nuclear é responsável por cerca de 27% do total de eletricidade produzido, já na África e América Latina estes valores ficam em torno de 2,1% e 2,4% respectivamente.

Outro dado interessante está relacionado à instalação de novos reatores nucleares, no final de 2007 existiam 33 reatores em construção com geração prevista correspondente a 27.193 MW (e), em Agosto de 2010 o número de reatores em desenvolvimento subiu para 60, totalizando um valor de 58.584 MW (e). Além disso, dados do relatório demonstram que 22 reatores em construção, entre os anos de 2008 e 2009, estavam alocados em apenas 3 países: Rússia, China e Coreia.

As tabelas abaixo ilustram algumas das informações anteriormente descritas.

Tabela 1. Uso (em EJ) e porcentagem da contribuição (%) de diferentes tipos de fontes para a geração de eletricidade em 2008:

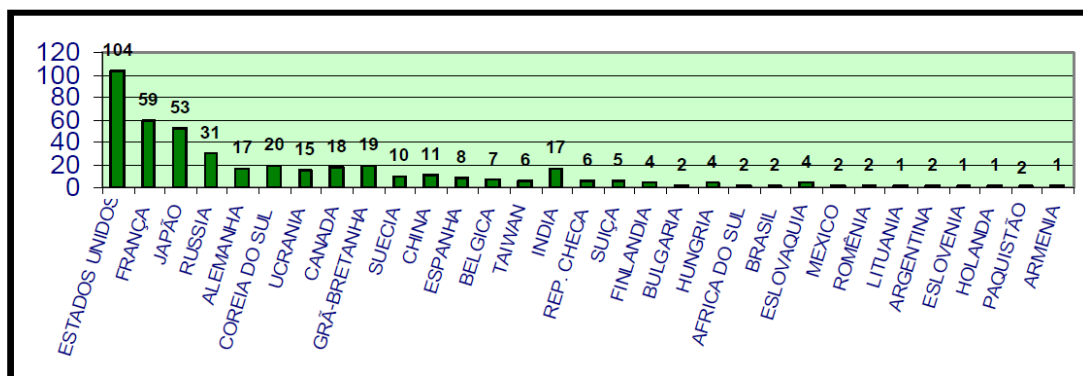
Region	Thermal (a)		Hydro		Nuclear		Renewables (b)		Total	
	Use (EJ)	%	Use (EJ)	%	Use (EJ)	%	Use (EJ)	%	Use (EJ)	%
North America	25.13	66.15	2.32	13.72	9.76	19.04	0.76	1.09	37.98	100
Latin America	5.14	39.15	2.66	57.54	0.32	2.38	0.39	0.93	8.41	100
Western Europe	16.06	52.45	1.89	17.06	8.97	26.68	0.72	3.81	27.64	100
Eastern Europe	18.18	64.69	1.12	17.04	3.64	18.30	0.03	0.07	22.96	100
Africa	5.73	80.51	0.37	16.95	0.14	2.11	0.05	0.43	6.29	100
Middle East and South Asia	19.09	87.54	0.62	11.47	0.16	0.99	0	0.00	19.87	100
Southeast Asia and the Pacific	6.78	88.92	0.25	9.29			0.39	1.79	7.41	100
Far East	43.46	74.27	2.65	15.23	5.35	10.15	0.49	0.35	51.95	100
World total	139.57	67.15	11.77	17.66	28.34	14.03	2.83	1.16	182.51	100

(a) The column headed 'Thermal' is the total for solids, liquids, gases, biomass and waste.

(b) The column headed 'Renewables' includes geothermal, wind, solar and tide energy.

Fonte: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2009.

Tabela 2. Reatores em Operação por País -2009



Fonte: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2009.

Tabela 3. Reatores de Energia Nuclear no Mundo – Agosto de 2010

Region	In operation	Net Capacity (MW(e))	Under construction		Electricity supplied in 2009 (TW·h)
	Number		Number	Net Capacity (MW(e))	
North America	122	113316	1	1165	882
Latin America	6	4119	2	1937	30
Western Europe	129	122956	2	3200	781
Central and Eastern Europe	67	47376	17	13741	326
Africa	2	1800	0		12
Middle East and South Asia	21	4614	6	3721	17
Far East	94	80516	32	34820	510
World	441	374697	60	58584	2558

Fonte: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2010.

Uma informação de grande relevância comunicada pela AIEA é a de que em 2009, 82,1% dos reatores em operação no mundo tinham mais de 20 anos de atividade e 51,15% tinham entre 20 e 30 anos de atividade. Portanto, seguindo as regras de depreciação e vida útil dos reatores visando à segurança de todo o processo, estas frotas terão que ser substituídas em breve por novos reatores ou por outra fonte de geração.

Com relação às tecnologias empregadas nos reatores, embora atualmente exista uma grande variedade de técnicas diferentes, cerca de 82% dos reatores que permanecem em operação utilizam o sistema de água leve (LWR). As tecnologias para construção de reatores hoje em dia são fundamentalmente baseadas em diversos aspectos, a seguir citamos alguns dos pontos considerados:

- Tempo de vida de 60 anos;
- Manutenção simplificada (online);

- Construções mais fáceis e menores;
- Inclusão de considerações sobre segurança nas etapas iniciais do projeto;
- Modernas tecnologias de controle digital;
- Aquisição de equipamentos de segurança e mitigação de acidentes.

As reservas de urânio representam componente importante do panorama mundial da energia nuclear. São consideradas reservas aquelas que possuem urânio dito recuperável com base num preço de mercado definido, independentemente do isótopo. Portanto, a quantidade de urânio, em última análise recuperável, depende do quando se está disposto a pagar pela sua utilização.

O urânio é um metal amplamente distribuído com grandes depósitos que não são considerados rentáveis atualmente, as reservas de até 260 USD por quilo de urânio fossem consideradas recuperáveis (rentáveis) haveria um aumento na quantidade de toneladas disponíveis.

Na tabela abaixo podemos verificar a localização das maiores reservas recuperáveis de urânio.

Tabela 4. Reservas Recuperáveis Conhecidas de Urânio – 2009:

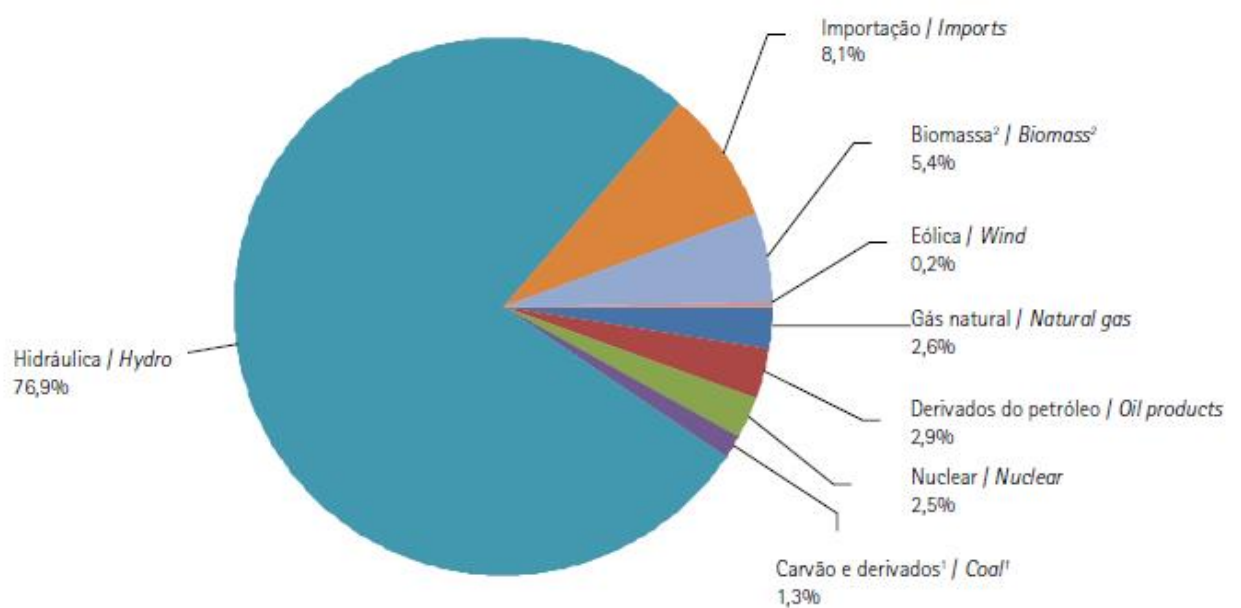
	tonnes U	percentage of world
Australia	1,673,000	31%
Kazakhstan	651,000	12%
Canada	485,000	9%
Russia	480,000	9%
South Africa	295,000	5%
Namibia	284,000	5%
Brazil	279,000	5%
Niger	272,000	5%
USA	207,000	4%
China	171,000	3%
Jordan	112,000	2%
Uzbekistan	111,000	2%
Ukraine	105,000	2%
India	80,000	1.5%
Mongolia	49,000	1%
other	150,000	3%
World total	5,404,000	

Fonte: World Nuclear Association

3. Energia Nuclear: Um Panorama Nacional

De acordo com dados do Balanço Energético Nacional de 2010, o Brasil apresenta uma matriz de produção elétrica de origem predominantemente renovável. Como podemos observar no gráfico e na tabela abaixo, a fonte nuclear contribui percentualmente com 2,5% do total ofertado, sendo que ao longo dos anos houve mudanças significativas, com aumentos e quedas, em variáveis relativas à oferta e demanda interna por urânio.

Figura 2: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte - 2009



Notas/ Notes:

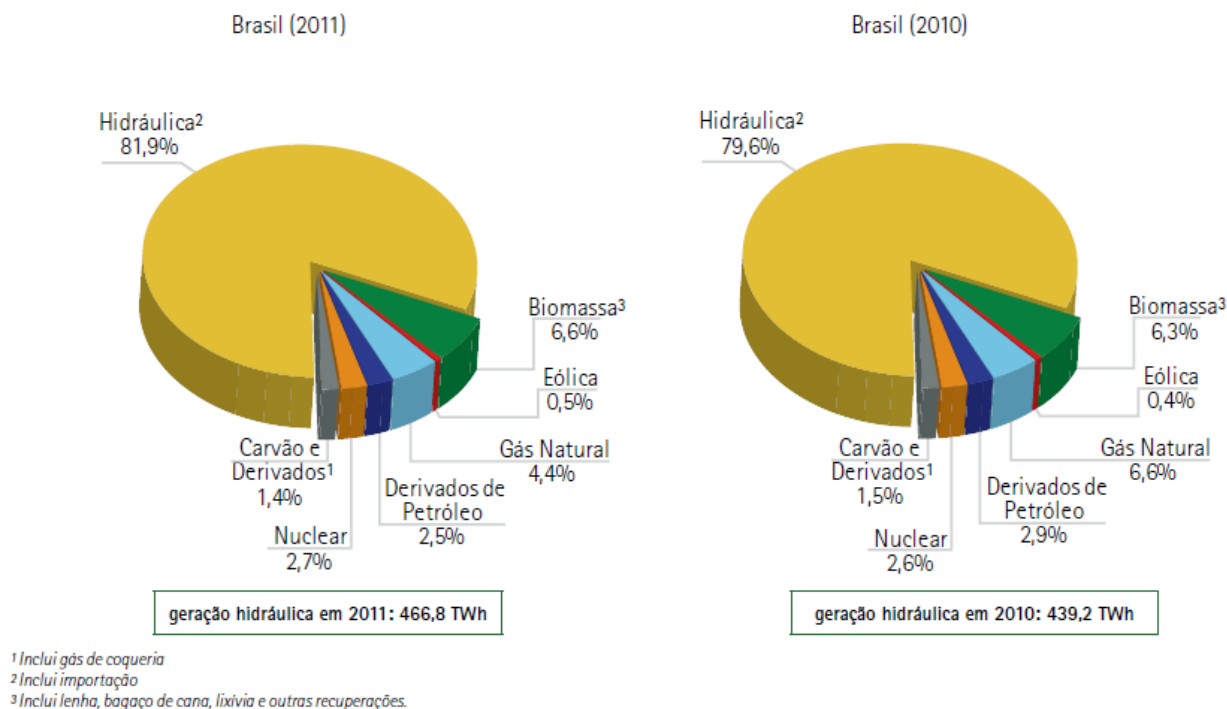
1 Inclui gás de coqueria / Includes coke gas.

2 Biomassa inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações / Biomass includes firewood, sugar cane bagasse, black liquor e other wastes.

Fonte: Balanço Energético Nacional 2010

Abaixo segue a Oferta Interna de energia segundo os dados de 2012, exibidos no relatório do Balanço Energético Nacional 2012:

Matriz Elétrica Brasileira



EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE | MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME

Fonte: Balanço Energético Nacional 2012

Tabela 5: Evolução da Oferta e Demanda por Urânio

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	t
FLUXO											FLOW
PRODUÇÃO	13,0	66,0	328,9	270,7	352,1	129,1	230,6	357,2	389,6	406,1	PRODUCTION
IMPORTAÇÃO	61,0	161,0	353,1	212,5	50,0	508,5	195,8	247,1	36,6	2,9	IMPORT
VAR. EST. PERDAS E AJUSTES	126,0	219,0	-94,8	-41,1	180,3	-182,7	113,5	-12,3	24,8	-27,3	VAR. INV. LOSSES AND ADJUSTMENTS
CONSUMO TOTAL	200,0	446,0	587,2	442,1	582,3	454,9	539,8	592,0	451,1	381,7	TOTAL CONSUMPTION
TRANSFORMAÇÃO ¹	200,0	446,0	587,2	442,1	582,3	454,9	539,8	592,0	451,1	381,7	TRANSFORMATION ¹

¹ Produção de urânio contido no UO2 dos elementos combustíveis / ¹ Input for production of uranium contained in UO2

Fonte: Balanço Energético Nacional 2010

Segundo o Balanço Energético Nacional publicado em 2012, tendo como ano base as ações realizadas durante o ano de 2011, a oferta interna de energia se desenvolveu a partir dos dados demonstrados na imagem abaixo:-.

Fonte: Balanço energético Nacional, 2012.

No Brasil a Eletrobrás Eletronuclear S/A foi criada em 1997 para operar e construir as usinas term nucleares do país.

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA), situada no município de Angra dos Reis no estado do Rio de Janeiro, é constituída atualmente por duas usinas em operação: Angra 1, com capacidade para geração de 657 megawatts elétricos, e Angra 2, com capacidade de 1350 megawatts. No site da Eletrobrás Eletronuclear é possível obter dados, em tempo real, da produção de eletricidade de Angra 1 e 2.

A construção de Angra 3 (deve contribuir com a geração de 1405 MWe) foi paralisada nos anos 80, sendo que a retomada de seu desenvolvimento ocorreu a partir de Setembro de 2008. As obras de conclusão da usina foram incluídas no Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), sendo que a construção recebeu a Licença de Instalação do IBAMA e a Licença de Construção Preliminar da CNEN. Em junho de 2010, a obra foi reiniciada com previsão inicial de entrar em operação no ano de 2015, entretanto a previsão atual de início das operações foi adiada para 2016.

O projeto de construção é polêmico, de acordo com valores disponibilizados no site da Eletronuclear a valoração dos equipamentos já adquiridos para Angra 3 monta a cerca de EUR 600 milhões e para a conclusão do empreendimento, são estimados investimentos adicionais da ordem de R\$ 8,4 bilhões (na base de preços de junho de 2009). Além disso, existem gastos com a manutenção da condição de obra paralisada, incluindo estocagem e preservação dos equipamentos, seguros, inspeções periódicas, manutenção do canteiro e estrutura empresarial voltada para essas atividades e perspectiva de retomada, que corresponde a aproximadamente US\$ 20 milhões/ano.

O Plano Nacional de Energia (PNE 2030) aponta para a necessidade de o sistema elétrico brasileiro ter mais 4.000 MWe de origem nuclear até 2025, com a construção de novas centrais nucleares na região Nordeste e Sudeste. No final de 2009, a Eletronuclear iniciou estudos de implantação inicial em quatro locais com o objetivo de apresentar uma lista de 40 possíveis locais de implantação das usinas para o Ministério de Minas e Energia até o final de 2011. Entretanto, os acidentes com as usinas japonesas em 2011 podem ter efeitos sobre a atual política nuclear brasileira, desta maneira como já foi afirmado por governantes nos últimos períodos

é necessário reavaliar todo o programa de energia atômica no Brasil.

4. Processos para obtenção de energia nuclear

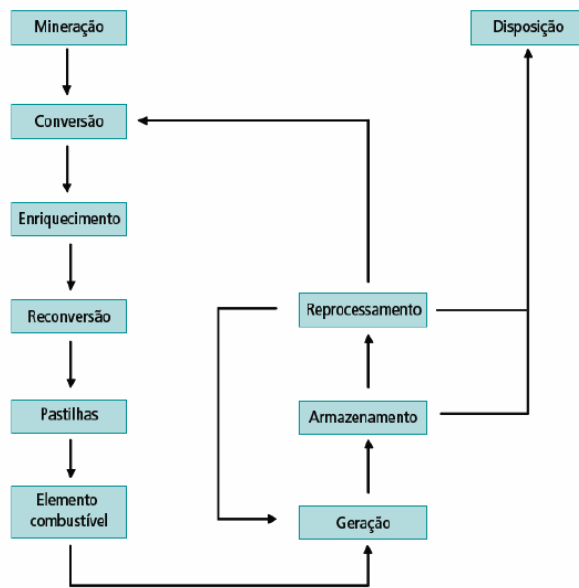
A energia nuclear provém da fissão nuclear do urânio, do plutônio ou do tório ou da fusão nuclear do hidrogênio. É a energia liberada dos núcleos atômicos, quando os mesmos são levados por processos artificiais, a condições instáveis.

Uma das principais utilizações da energia nuclear é a geração de energia elétrica. Conforme citada por Chayes & Lewis (1977) as usinas nucleares são usinas térmicas que usam calor produzido na fissão. Segundo Santos (1968), a fissão nuclear ocorre quando um nêutron é capturado pelo núcleo do átomo de urânio (235), provocando a cisão em dois fragmentos de massas aproximadamente iguais, com enorme energia cinética acompanhados da emissão de três nêutrons em cada processo o que resulta em uma reação em cadeia. Essa reação em cadeia precisa ser controlada, pois de acordo com Santos (1968) é necessário frear os nêutrons emitidos pelo núcleo de urânio – o que poderia ser realizado com a interposição de substâncias leves (grafite, berílio e água pesada) não absorventes de nêutrons ou por meio do controle do nível de energia liberada pela massa (boro, cádmio, etc.).

A implantação de usinas trata-se de um processo tecnológico complexo e caro, compreendendo etapas: desde a localização do minério e seu processamento à transformação em elemento combustível para suprir as centrais nucleoeletricas, encerrando-se com o reprocessamento, o reaproveitamento do combustível irradiado das usinas (CHAYES & LEWIS, 1977).

O processo de mineração evolve a extração do mineral da natureza, seu beneficiamento e transformação em composto yellowcake (U_3O_8). Para a formação em combustível esse é dissolvido e purificado na usina de conversão, sendo convertido para o estado gasoso (UF_6) para facilitar o seu enriquecimento. Nesta etapa o (UF_6) é enriquecimento em U^{235} , de 0,7% a valores acima de 3%. Após enriquecido o (UF_6) é reconvertido em óxido de urânio, formando um pó UO_2 é convertido em pastilhas e acondicionado.

Figura 3 – Ciclo do Combustível Nuclear

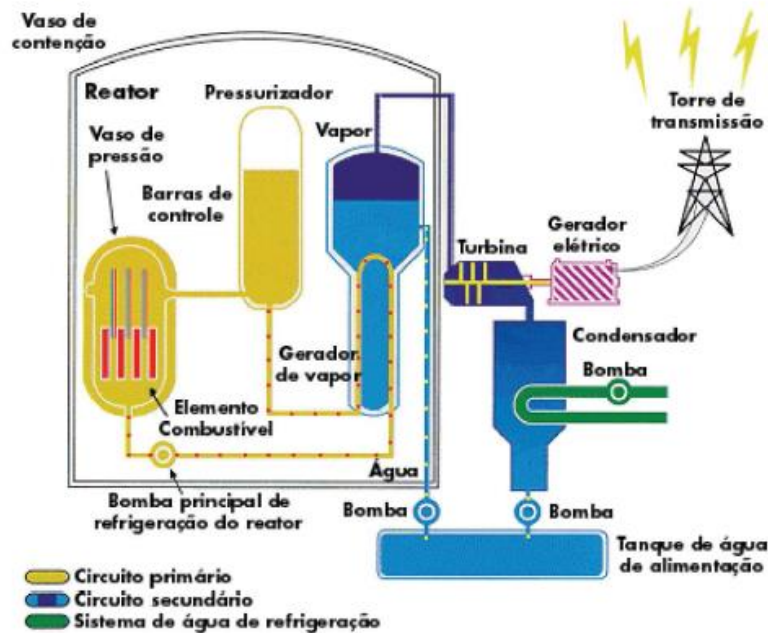


Fonte: UIC, 2006 apud MME, 2007

Uma usina nuclear é composta por três partes: circuito primário, circuito secundário e sistema de água de refrigeração. O circuito primário contém a água de refrigeração do núcleo do reator (os elementos combustíveis) que circula quente pelo Gerador de Vapor sem sair do sistema aquecendo uma outra corrente de água, que passa pelo Gerador. O circuito secundário recebe a água aquecida sem entrar em contato direto. A água transformada em vapor, passa pela turbina, acionando-a. Sendo em seguida condensada e bombeada de volta para o Gerador de Vapor, constituindo num Sistema de Refrigeração (MME, 2007). O circuito primário e secundário são independentes para se evitar a contaminação com radiação proveniente dos raios GAMA da fissão nuclear.

Figura 4 – Usina “Pressurized Water Reactor” (PWR)

Figura 2 – Usina "Pressurized Water Reactor" (PWR)



Fonte: Eletronuclear, 2006 apud MME, 2007.

Em uma reação de fusão, Santos (1968) cita que há a colisão nuclear de dois átomos o qual resulta no rearranjo mútuo dos seus núcleos e na formação de dois ou mais produtos, emitidos a alta temperatura e velocidade, sendo os isótopos de hidrogênio de massas 2 e 3 (deutério e trítio) os mais favoráveis ao aproveitamento da energia por esse processo. Embora essa reação seja altamente exotérmica, no mundo ainda não existe uma tecnologia para obtenção de energia elétrica a partir dela, devido à necessidade de alta temperatura exigida e falta de controle da reação. Sendo restringido esse processo ao meio físico natural como a formação de estrelas e a radiação solar.

4.1 Enriquecimento de urânio do Brasil

Após as iniciativas do Almirante Álvaro Alberto durante os anos 50 de realizar pesquisas científicas no Brasil, no setor nuclear, o governo brasileiro decidiu investir recursos, já no início dos anos 70, para dotar o país de capacitação plena no ciclo do combustível nuclear, produção de reatores de pesquisa e de potência e, finalmente, no reprocessamento de combustível nuclear utilizado nos reatores. Tal

linha de ação visava garantir os meios necessários para o fortalecimento de nossa matriz energética, com a utilização dos recursos naturais existentes (minas de urânio e tório, cujas reservas estão entre as maiores no mundo) para a produção de energia elétrica, dentro da visão particular dos programas de desenvolvimento em vigor à época (MARQUES E SILVA, 2006).

Segundo os autores, dentro deste contexto, previu-se a construção de diversas usinas nucleares, em torno de 56 unidades do tipo PWR (pressurized water reactor). Além desse motivo, havia a necessidade estratégica de se colocar o setor nuclear do Brasil em grau de desenvolvimento no mesmo patamar que outros países de mesmo porte estavam perseguindo. Assim, diversas medidas foram tomadas, como a capacitação de pessoal no exterior, formação de empresas estatais para executar as atividades industriais e a criação e o fortalecimento dos institutos de pesquisas. Neste cenário, em 1975, celebrou-se o Acordo Brasil-Alemanha de cooperação no setor nuclear, onde haveria a transferência alemã de tecnologia e alguns meios para os objetivos mencionados logo acima. Alguns itens derivados deste acordo são a fábrica de construção de reatores da NUCLEP (Nuclebrás Equipamentos Pesados, em Itaguaí) e a própria Usina Nuclear de Angra 2, ambos construídos no estado do Rio de Janeiro. No ciclo do combustível nuclear, a transferência tecnologia inicialmente prevista para o enriquecimento de urânio era a ultracentrifugação, a qual os alemães já dominavam há alguns anos. No entanto, por pressões internacionais, a transferência ao Brasil desta tecnologia foi vetada, oferecendo-se a alternativa do “jet-nozzle”, a qual ainda estava em fase de desenvolvimento laboratorial.

4.2 Enriquecimento do Urânio e Métodos

O motivo de se enriquecer o urânio (aumento do teor de U235 em relação ao que se dispõe naturalmente) deve-se ao fato de que a probabilidade de ocorrer à fissão neste elemento químico ser muito maior do que em outros elementos químicos (da ordem de mil vezes). Dentre os diversos métodos de enriquecimento de urânio (separação isotópica do U235 em razão maior do que 0,7%, que aquela que se encontra na Natureza), somente dois processos revelam-se atraentes para produção em escala industrial: a difusão gasosa e a ultracentrifugação (MARQUES E SILVA, 2006).

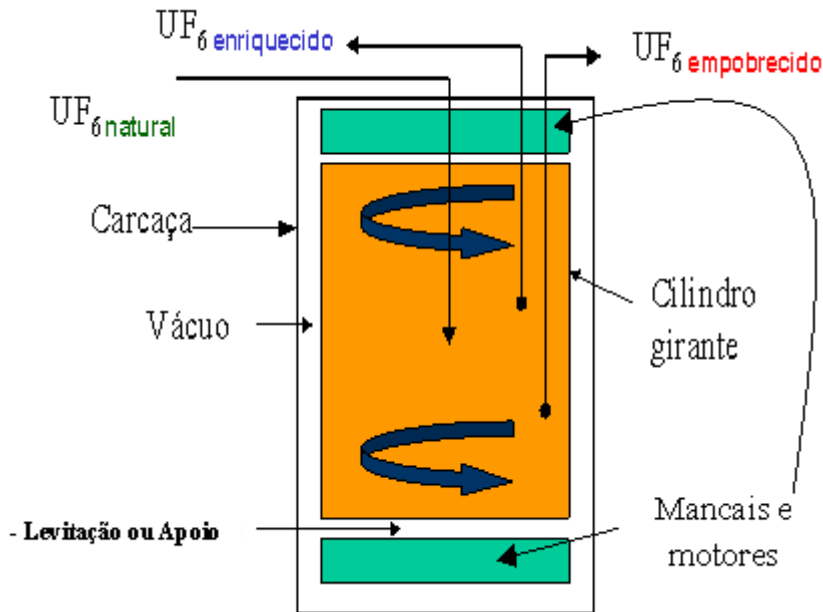
Segundo Marques e Silva (2006), No primeiro processo, comprime-se o gás hexafluoreto de urânio (UF₆) através de membranas microporosas, associadas em série, de forma a se separar o U²³⁸ do U²³⁵, sendo este último mais interessante para a fissão com nêutrons. Na ultracentrifugação, a separação é feita pela força centrífuga agindo nas partículas de UF₆, cujo princípio é idêntico àquele que conhecemos em nossa casa, concentrando-se o U²³⁸ em uma região mais externa do que o U²³⁵, porque o primeiro é mais pesado somente cerca de 1% em relação ao segundo. Daí aparecer o termo “ultra” centrifugação (operar em velocidades tangenciais muito altas), para separar dois elementos cujas massas são muito próximas. Todos os demais processos (e.g. eletromagnético, colunas térmicas) não se aproximam em termos de eficiência (da ordem de pelo menos 100 vezes) em relação à ultracentrifugação, seja pelo consumo elevado de energia e/ou pela geração de grande quantidade de efluentes químicos. Além disso, há processos que ainda não saíram da fase laboratorial, como é o enriquecimento a laser. O “jet-nozzle” seguiu o mesmo caminho, não sendo industrialmente eficaz.

Os mesmos autores discorrem que com a negativa de importação da tecnologia de ultracentrifugação e com a transferência alemã de um método não eficaz em escala industrial, decidiu-se pelo desenvolvimento nacional do enriquecimento de urânio por ultracentrifugação pela Marinha e por laser pela FAB, também no final dos anos 70. É importante mencionar que dentre as atividades do ciclo do combustível, o enriquecimento de urânio é a que reúne a maior complexidade tecnológica, por lidar com exigências técnicas muito estritas, em termos de seleção e desenvolvimento de materiais, em controle de qualidade dimensional, diversos métodos e etapas de fabricação eletromecânica, entre outros aspectos.

4.3 Desenvolvimento da tecnologia da centrifugação

A tecnologia de ultracentrifugação foi desenvolvida na Alemanha, durante a Segunda Guerra Mundial, pela equipe do Prof. Zippe. Posteriormente, os russos a aperfeiçoaram com o auxílio do próprio Zippe e alguns de seus cientistas. Atualmente, menos de 10 países no mundo dominam esta tecnologia, sendo o Brasil um deles (MARQUES E SILVA, 2006).

Figura 5 – Esquema de Ultracentrífuga



Na figura, baseando-se em fontes ostensivas e em linhas gerais, apresenta-se um esquema de uma ultracentrífuga, com as seguintes partes [1]:

- Carcaça
- Rotor
- Motor
- Distribuidor e coletores de hexafluoreto de Urânio
- Mancais

Para se obter a separação isotópica mencionada acima, deve-se operar com as maiores rotações possíveis, uma vez que a força centrífuga é proporcional ao quadrado da velocidade angular. No entanto, deve-se respeitar os limites de resistência dos materiais (devido às altas tensões mecânicas ou esforços solicitantes decorrentes) e diminuir o consumo de energia ao máximo. Nesta ótica, quanto menor for o atrito entre as diversas partes, melhor será o rendimento da ultracentrífuga.

Para a diminuição do atrito, opera-se sob vácuo entre a carcaça e o rotor, ao mesmo tempo em que se atenua o atrito nos mancais. Desenvolvido e homologado um modelo de ultracentrífuga, fabricam-se diversas delas para que sejam montadas em arranjos série e paralelo, os quais passam a se chamar “cascata de enriquecimento de urânio”, em função das condições de contorno do projeto (quantidade de massa e teor de enriquecimento). Para reatores do tipo de Angra 1 e

2, são necessárias toneladas de UF₆ enriquecido entre 3 e 5%.

Atividade de uma amostra, desintegração e meia vida, os núcleos instáveis de uma mesma espécie (mesmo elemento químico) e de massas diferentes, denominados radioisótopos, não realizam todas as mudanças ao mesmo tempo, as emissões de radiação são feitas de modo imprevisível e não se pode adivinhar o momento em que um determinado núcleo irá emitir radiação. Entretanto, para a grande quantidade de átomos existente em uma amostra é razoável esperar-se um certo número de emissões ou transformações em cada segundo. Essa “taxa” de transformações é denominada atividade da amostra.

Unidade de atividade

A atividade de uma amostra com átomos radioativos (ou fonte radioativa) é medida em:

Bq (Becquerel) = uma desintegração por segundo

Ci (Curie) = $3,7 \times 10^{10}$ Bq

Desintegração OU Transmutação Radioativa

Como foi visto um núcleo com excesso de energia tende a estabilizar-se, emitindo partículas alfa ou beta. Em cada emissão de uma dessas partículas, há uma variação do número de prótons no núcleo, isto é, o elemento se transforma ou se transmuta em outro, de comportamento químico diferente. Essa transmutação também é conhecida como desintegração radioativa, designação não muito adequada, porque dá a ideia de desagregação total do átomo e não apenas da perda de sua integridade. Um termo mais apropriado é decaimento radioativo, que sugere a diminuição gradual de massa e atividade (MARQUES E SILVA, 2006).

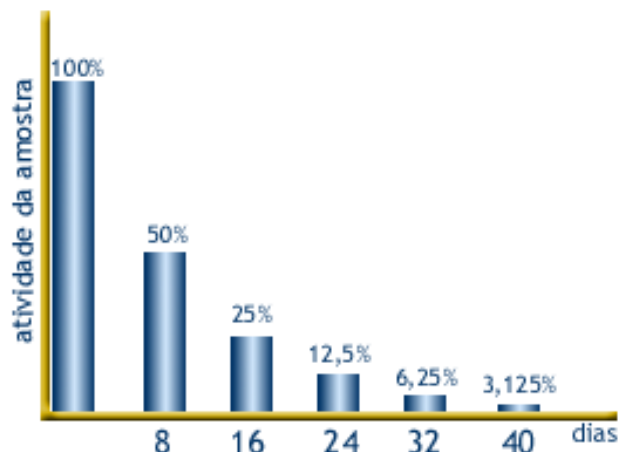
4.4 Meia-vida

Segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear, cada elemento radioativo, seja natural ou obtido artificialmente, se transmuta (se desintegra ou decai) a uma velocidade que lhe é característica.

Para se acompanhar a duração (ou a “vida”) de um elemento radioativo foi preciso estabelecer uma forma de comparação. Isso significa que, para cada meia-vida que passa, a atividade vai sendo reduzida à metade da anterior, até atingir um valor insignificante, que não permite mais distinguir suas radiações das do meio ambiente.

Meia-vida, portanto, é o tempo necessário para a atividade de um elemento radioativo ser reduzida à metade da atividade inicial. Sendo ilustrado o conceito através da figura 9:

Figura 6 – Ilustração do Conceito de Meia Vida



Fonte: Möller, S. V.

5. Legislação

A Carta Magna Nacional, isto é, o pilar da legislação do país delimita que a União detém o monopólio e a competência relativa à área de materiais radioativos, segundo os dizeres dos artigos 21 e 177. A União determina os pilares da exploração de serviços e instalações nucleares e o monopólio estatal sobre a pesquisa, o comércio e a industrialização de minérios nucleares. Sendo a atividade em território nacional para fins pacíficos.

Assim, a atividade nuclear é de competência da União, porém, se atividade nuclear não for de exploração, de serviços e instalações nucleares, mas sim científica, medicinal, agrícola ou industrial (radioisótopos), pode ser concedida ou permitida a particulares.

No Brasil o órgão licenciador, regulador e fiscalizador de toda atividade nuclear é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), vinculada ao Ministério de Ciência e Tecnologia, que é uma autarquia federal criada em 1956.

Há ainda outros dois importantes órgãos brasileiros que fiscalizam a atividade nuclear, caso esta se insira nos seus campos de atuação: o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) - quando a questão da Energia Nuclear causa danos ambientais, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente e a ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) com foco nos

riscos e danos a saúde pública ocasionados pela atividade nuclear, vinculado ao Ministério da Saúde.

As finalidades definidas da CNEN são:

a) executar ações de pesquisa, desenvolvimento e promoção da utilização da energia nuclear;

b) atuar como órgão regulador, regulamentando, concedendo licenças e autorizações, controlando e fiscalizando essa utilização.

Assim, ficam atribuídas a CNEN tarefas que a fazem fiscal de si mesma, sendo sua missão A missão da CNEN: "Garantir o uso seguro e pacífico da energia nuclear, desenvolver e disponibilizar tecnologias nuclear e correlatas, visando o bem estar da população".

Assim, outros diplomas nacionais também regulamentam a questão da energia nuclear no Brasil:

A Lei nº 6.453, de 17 de outubro de 1977 - Conceitua fatores relacionados à temática energia nuclear (quem é o operador, o que é reator, instalação nuclear e relacionados) e dispõe sobre a responsabilidade civil por danos nucleares e criminal por atos relacionados com atividades nucleares. Em seu artigo 8º determina que:

O operador (conceituado como pessoa jurídica autorizada a operar a usina) não responde pela reparação do dano resultante acidente causado diretamente por conflito armado, hostilidades, guerra civil, insurreição ou excepcional fato da natureza.

A Lei nº 6938/81 – Lei de Política Nacional do Meio Ambiente - Determina a responsabilidade do poluidor sem indagação de sua culpa, esta lei determina quais são os órgãos pertencentes à Política Nacional do meio ambiente e também sua estruturação.

A Lei nº 9605/98- Lei de Crimes Ambientais- Conceitua o que são crimes ambientais e também as sanções administrativas referentes. No caso discutido, caso a atividade nuclear apresente algum dano.

O decreto nº 93 de 1992 e nº911 de 1993 foram aprovados e promulgados, respectivamente sobre o texto da Convenção de Viena por Danos Nucleares, concluída em Viena em 1963, que discriminava sobre os riscos, as responsabilidades e montante do seguro por danos nucleares. Assim, fazem parte da legislação vigente no nosso país.








Além dos riscos ambientais, econômicos e sociais, portanto temos também um risco político, criminal quanto à lacuna em nossa legislação sobre a clareza quanto às responsabilidades em casos de acidentes.

6. Acidentes Nucleares

A energia nuclear é fonte de inúmeros benefícios à humanidade, porém houve diversos acidentes relacionados com esse tipo de energia. Nesse sentido, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) considerou acidente nuclear “quando envolve uma reação nuclear ou equipamento onde se processe uma reação nuclear”.

Assim, com o intuito de classificar as catástrofes foi criada uma escala mundial, que percorre do nível 1 ao 7, isto é, dos acidentes com menor gravidade, para os de maior gravidades, como ilustra a tabela abaixo.

Figura: Representação dos Níveis de Acidentes Nucleares.

ESCALA PARA AVALIAÇÃO DE ACIDENTES NUCLEARES	
Com o acidente de Chernobyl, o Comitê de Eventos e Emergências Nucleares criou uma escala para avaliar os acidentes nucleares	
	Nível 7 Grande contaminação e muitas mortes; área permanecerá contaminada por diversos anos
	Nível 6 Alto nível de radioatividade com muitas vítimas fatais
	Nível 5 Mais de uma morte por radiação; grande quantidade de material radioativo identificado na região
	Nível 4 Pelo menos uma morte causada pela radiação; forte possibilidade de afetar pessoas
	Nível 3 Contaminação significativa, com pouca possibilidade de atingir a população
	Nível 2 Índice de radioatividade passa a ser considerado preocupante
	Nível 1 Limite de exposição radioativa pouco acima do considerado normal pelos padrões internacionais

Esses níveis classificam acidentes como o Chernobyl, Three Miles Island e, mais recentemente, o da Usina de Fukushima.

6.1 Usina de Chernobyl

O maior acidente nuclear já registrado foi o ocorrido em Chernobyl, na Ucrânia, ainda membro da extinta União Soviética, em 26 de abril de 1986. O

referido acidente apresentou nível 7 na Escala Para Avaliação de Acidentes Nucleares, já que foi estimado como a maior acidente já ocorrido. Logo, os malefícios causados pela catástrofe permanecem até hoje. Imediatamente a explosão, dois operários morreram e 20 outras pessoas, durante a semana faleceram devido a Síndrome de Radiação Aguda (World Nuclear Association, 2011), havendo estimativa em relatórios locais de 4 mil mortos, porém houve a contaminação de inúmeras outras pessoas que se dispersaram pela União Soviética, devido à retirada dos cidadãos da cidade contaminada, fato que determina uma grande dificuldade de delimitar esse número. (Dupuy, 2007).

A usina de Chernobyl está situada no assentamento de Pripyat, Ucrânia, 18 km ao noroeste da cidade de Chernobyl. Sua capacidade de obtenção de energia era realizada a partir da utilização de quatro reatores, cada qual com capacidade de produzir 1 GW de energia elétrica (3,2 Gigawatts de energia térmica). (Portal da Radiologia, 2010).

Figura 8: Localização de Chernobyl e áreas onde se encontrou material radioativo oriundo da explosão do reator 4



Fonte: WNA

Logo, o desfecho trágico ocorreu, no dia 25 de abril de 1986, devido a uma parada rotineira para testar os equipamentos da usina, era uma manutenção periódica anual.

Assim, estavam sendo feitos testes na parte elétrica com o Reator à baixa potência, havendo necessidade de desligar o Sistema Automático de Segurança. Consta que reatores deste tipo não podem permanecer muito tempo com potência baixa (Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2011).

No teste, a potência do reator caiu drasticamente e na tentativa de manter a força necessária, algumas barras de controle foram retiradas do núcleo do reator.

Segundo as normas de segurança, o mínimo de barras que deveria ser mantido no reator eram 15, no entanto, na tentativa de recuperar a potência, os operadores deixaram somente 8 barras inseridas (WNA, 2009).

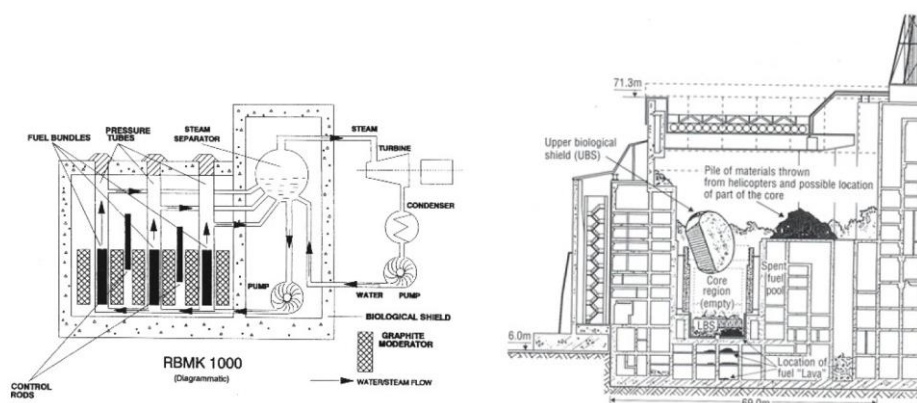
Os operadores da Sala de Controle do Reator não haviam sido treinados adequadamente para a situação, fato que resultou na perda do controle da operação realizada (Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2011).

Assim, a temperatura aumentou rapidamente, que aquecendo excessivamente a água existente, transformando-a em vapor. Houve então, uma explosão de vapor que arrebentou os tubos, os elementos combustíveis e os blocos de grafite, deslocando a tampa de concreto e destruindo o teto, o qual era aprovado contra esse tipo de explosão. Houve então o vazamento de partículas radioativas na atmosfera (Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2011).

A quantidade de combustível liberada no ambiente pela explosão foi de 50 toneladas, para se ter uma ideia, a bomba atômica de Hiroshima e Nagasaki possuía 4,5 toneladas. (Portal da Radiologia)

O reator em questão foi construído somente com uma contenção parcial para a redução de custos, isso facilitou com que o incêndio ocorresse e que as partículas radioativas fossem jogadas na atmosfera. (Portal da Radiologia, 2010).

Figura 9: Desenho do reator RBMK 1000, modelo do reator que explodiu em Chernobyl e situação do reator após a explosão e o lançamento de produtos para contenção do incêndio e da radioatividade.



Fonte: WNA, 2009

Após a explosão, que matou 2 operadores, bombeiros foram chamados para controlar os incêndios, esses homens receberam as doses mais altas de radiação e 6 deles, entre 28 outras pessoas que morreram por envenenamento por radiação,

morreram em julho de 1986. (WNA, 2009).

As ações seguintes eram a limpeza da área contaminada pela radiação e o selamento do núcleo do reator 4. Para isso foram recrutados voluntários chamados posteriormente de “liquidadores”, que se expuseram aos níveis altos de radiação para a limpeza da área, seu número é estimado em 700.000 (IAEA, 2005). Helicópteros sobrevoavam a área jogando elementos como areia e compostos para absorção de nêutrons. (Figura 11)

Entre os dias 2 e 4 de maio seguintes, as pessoas num raio de 30 km da usina foram evacuadas. Estima-se que 116.000 pessoas foram removidas das áreas mais contaminadas e posteriormente realocadas. O raio de 30 km (2800 Km²) foi posteriormente modificado, se estendendo a uma área de 4800Km² (WNA, 2009). Estima-se que atualmente 5 milhões de pessoas vivem em áreas ainda contaminadas pela radioatividade (Portal da Radiologia, 2010).

As causas do acidente não são muito claras, contudo existem teorias sobre a principal causa de tamanho desastre. Em 1986, foi publicada uma explicação do acidente pela Comissão do Governo que atribuía a culpa totalmente aos operadores, que teriam violado muitas regras de segurança por descuido e desconhecimento das falhas existentes no reator em questão, essas falhas não teriam sido comunicadas aos operadores que, por sua vez, não sabiam que tipo de ação iria desencadear o descontrole do reator. Em 1991, outra teoria surgiu, alegando que a culpa era dos equipamentos, mais precisamente as barras de controle, que deformaram e não conseguiram adentrar o núcleo do reator. Atualmente se atribui o acidente a um conjunto de eventos que incluem a falha humana e dos equipamentos. (Portal da Radiologia, 2010).

Em 2010, o reator 4 foi selado em uma estrutura de concreto chamada de ‘sarcófago’, e até 2065, pretende-se limpar o território e retirar todos os equipamentos da área. (Portal da Radiologia).

Chernobyl pode ter sido o maior, o pior acidente da história de energia nuclear civil, no entanto não é o único, vários acidentes ocorreram antes e depois de Chernobyl, mas nem todos são de conhecimento do público, ou somente vêm à tona depois de muito tempo de sua ocorrência. Segundo o portal Ambiente Brasil, cerca de 20 acidentes (incluindo Chernobyl) ocorreram no mundo desde o fim dos anos 50 até o final do século XX envolvendo componentes nucleares, incluindo navios com

armas atômicas e vazamentos em usinas, inclusive Angra 1 e 2 no Brasil. (Ambiente Brasil, 1998).

O que se nota é um grande confronto de teorias, ideologias e políticas por trás da tragédia de Chernobyl. Até hoje não se sabe exatamente quantos foram afetados pela radioatividade, por isso é quase impossível determinar com precisão suas vítimas, ou seja, os mortos variam desde aqueles que apresentaram a Síndrome da Radiação Aguda até aqueles que apresentaram algum tipo de câncer nos anos subsequentes.

6.2 Usina de Fukushima

Em 11 de março de 2011, um terremoto que totalizou 8,9 na escala Richter gerou um tsunami e muita destruição. Assim, como o epicentro do terremoto foi localizado no mar, a 130 km da costa da cidade de Sendai, em Miyagi, leste da ilha de Honshu (a maior parte do Japão), este desencadeou um tsunami ocasionando vazamentos e explosões em Fukushima Daiichi.

O tsunami inundou cerca de 560 km quadrados e resultou em um número de mortes de mais de 25.000. (World Nuclear Association, 2011).

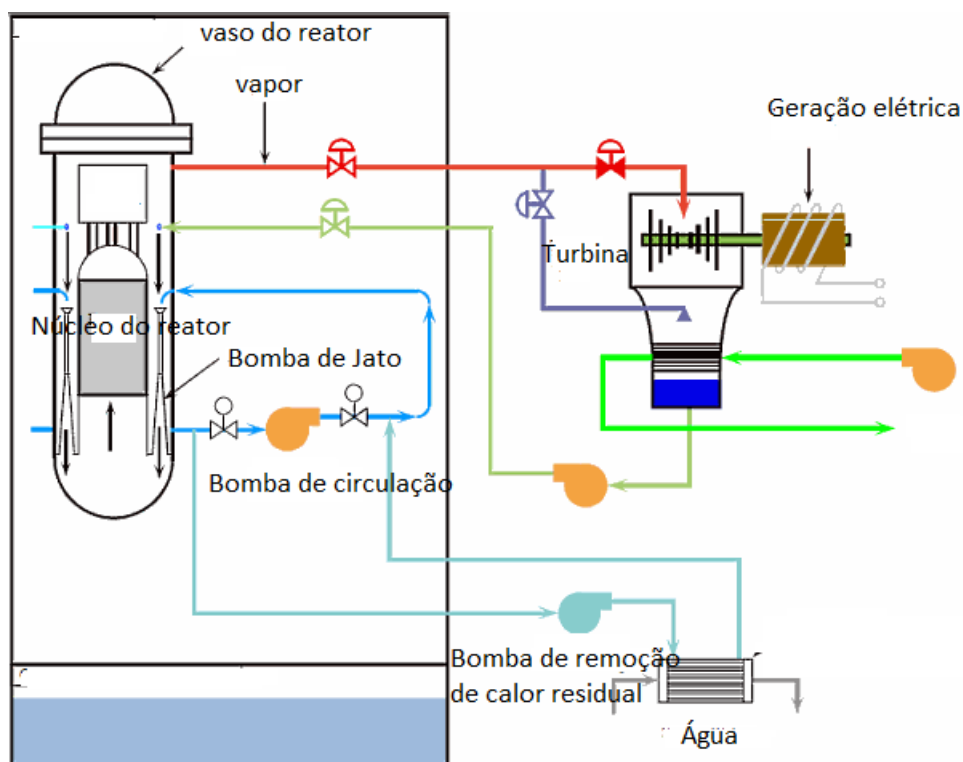
Pelo fato do Japão estar localizado entre placas tectônicas e por isso ser bastante sujeito a terremotos, as Usinas Nucleares construídas em seu território são projetadas para suportar grandes intensidades se houver movimento do solo. Assim, sistemas serão ativados automaticamente para um desligamento imediato seguro dos reatores das usinas. Porém, a intensidade do terremoto, a localização da usina (construídas em cima de rochas) e a alturas das ondas que chegaram a terra (ondas de 14 metros de altura. As salas da turbina de Daiichi estavam sob cerca de 5 metros de água do mar) foram fatores preponderantes aumentar a tragédia. (World Nuclear Association, 2011).

O Japão possui 54 reatores nucleares em seu território. Na área atingida estavam em operação 20 reatores nucleares: nove continuaram operando e onze foram desligados automaticamente pelos dispositivos de segurança, tudo isso devido à perda de energia elétrica externa (queda de força). Sistemas de refrigeração continuaram a funcionar com geradores movidos a diesel. (Comissão Nacional de Energia Nuclear- CNEN, 2011).

A Usina de Fukushima possui 6 reatores, três deles estavam em operação

(reator 1, 2 e 3) e três estavam desligados (reator 4, 5 e 6). Assim, os geradores movidos a diesel deveriam funcionar quando há falta de eletricidade, para poder resfriar os reatores, porém o equipamento falhou. (Comissão Nacional de Energia Nuclear- CNEN, 2011).

Figura 10: Esquema dos reatores da Usina de Fukushima



Fonte: World Nuclear Association, 2011.

Os reatores Fukushima Daiichi são reatores de água fervente GE (BWR) de um projeto (1960), entraram em operação comercial 1971-1975. Potência do reator é 460 MWe para a unidade 1, 784 MWe para unidades de 2-5, e 1100 MWe para a unidade 6. (World Nuclear Association, 2011).

Inicialmente resfriamento dos reatores teria sido mantido através do circuito de vapor principal ignorando a turbina e atravessando os condensadores. Após 41 minuto, uma enorme onda atingiu a Usina, seguida por outra oito minutos depois, danificando as bombas de água do mar para ambos os circuitos condensadores principais e os circuitos de resfriamento auxiliar, o sistema de arrefecimento. Também, atingiu-se os geradores e inundou a aparelhagem elétrica, ambos localizados nos prédios da turbina. O tsunami danificou muitas estruturas - Bombas de água do mar, as estruturas de entrada e vários tanques, dentro do edifício das turbinas, geradores a diesel e de manobra. Ele também danificou estradas

obstruídas, tornando o acesso difícil. (World Nuclear Association, 2011).

Figura 11: De acordo com o quadro, as primeiras condições dos reatores da Usina de Fukushima

Unidades	1	2	3	4	5	6
Situação durante o terremoto	Em operação - desligada apos o evento			desligada para manutenção		
Núcleo e combustível	Danificado			Sem combustível	Desligada fria	
Integridade da contenção	Sem danos	Suspeita de danos	Informação indisponível	Configuração de parada	Sem expectativa de danos	
Alimentação elétrica externa	Subestação restaurada	Central de energia restaurada	Informação indisponível		Informação indisponível	
Geradores diesel de energia elétrica	Informação indisponível				Dois geradores diesel de emergência alimentando as unidades 5 e 6	
Condição dos edifícios	Danos severos	Levemente danificado	Danos severos		Sem danos relatados	
Nível de água no vaso de pressão do reator	Metade dos elementos cobertos			Configuração de parada	Combustível coberto	
Pressão no vaso do reator	Estabilizada	Dados não confiáveis	Alta	Configuração de parada	Estabilizada	
Pressão no poço seco da contenção	Estável	Estável	Alta	Configuração de parada	Informação indisponível	
Injeção de água no vaso de pressão do reator	Água do mar	Água do mar	Água do mar	Configuração de parada	Injeção pelo sistema de incêndio	
Injeção de água no vaso de contenção	Informação indisponível			Desnecessária		
Temperatura da piscina de combustível usado	Sem informação	Alimentação externa	Alimentação externa	Alimentação externa	Resfriamento restaurado	

Não preocupante
Preocupante
Condição severa

Fonte: Informações reunidas pela Agência Internacional de Energia Atômica com base nas informações da NISA.

O acidente até o momento foi delimitado como de Nível 5 na Escala de Acidentes Nucleares, porém a discussão da intensidade da catástrofe está ainda sendo debatida e por ventura, sendo amenizada. Especialistas identificaram contaminação no ar, na água e nas plantas. Por precaução, as autoridades determinaram o esvaziamento das cidades localizadas ao redor da usina. Muitas pessoas ainda estão em abrigos provisórios

6.3. Outros Acidentes

Three Mile Island (EUA, Pensilvânia) (28 de março de 1979). - Acidente de Nível 5 na Escala Para a Avaliação de Acidentes Nucleares.

EUA, Tennessee (agosto de 1979).

Usina de Tsuruga, Japão (janeiro-março de 1981).

7. Vantagens e Desvantagens da utilização da Energia Nuclear

Para considerarmos se uma fonte de energia é viável considerando as esferas econômica, social e ambiental, é fundamental visualizar os aspectos positivos e negativos dentro dessas esferas.

Assim, buscou-se nesse trabalho levantar quais são esses aspectos, dando ênfase num deles, que é a armazenagem dos resíduos radioativos. Tal ênfase pode ser explicada pelo fato desse servir como um argumento comumente utilizado quando se discute energia nuclear. Assim, é necessário saber como se armazenam esses resíduos, onde até os dias presentes não há no Brasil um local de armazenamento definitivo (MONGELLI, 2006).

7.1 Vantagens

Segundo a ANEEL (2008), têm-se como vantagem da utilização das fontes de energia nuclear a seguinte característica:

Emissão de gases de efeito estufa insignificantes: devido o seu processo utilizar vapor d'água para movimentar as turbinas, suas emissões de Gases de Efeito Estufa podem ser consideradas nulas.

Já para o Ministério de Minas e Energia (2007), as vantagens são as seguintes:

- O fato de a energia nuclear ser uma fonte alternativa à matriz energética brasileira é aspecto positivo.
- Devido à alta concentração de energia existente no componente radioativo, a energia nuclear demanda um espaço físico relativamente pequeno quando comparado com a energia hidroelétrica.

Além dessas vantagens colocadas por fontes oficiais, podemos ainda citar outras:

- Os resíduos gerados num processo de disponibilização de energia nuclear, apesar de apresentarem alto grau de periculosidade, ainda são considerados compactos quando o comparamos, por exemplo, com os resíduos gerados na disponibilização de energia com a queima de carvão mineral.
- A energia nuclear, diferentemente das energias hidrelétrica, eólica e solar, é indiferente às alterações climáticas.

7.2 Desvantagens

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2007) e com a ANEEL (2008), as desvantagens observadas na utilização da energia nuclear são as seguintes:

- Risco de acidentes envolvendo um combustível altamente poluente.
- Aquecimento das águas da região onde se despeja a água do sistema de resfriamento da usina. Tal aquecimento favorece uma alteração na reprodução da biota local.
- Armazenamento dos resíduos oriundos da produção de energia nas usinas termonucleares. Como visto no processo de obtenção da energia, existe o combustível nuclear, que é o conjunto de pastilhas que contem urânio, ou outra substância radioativa, como constituinte. Esse material possui uma vida útil e depois deve ser substituído, assim, o descarte (reprocessamento ou armazenamento) deverá ser realizado.

Podemos citar ainda outras desvantagens observadas no processo de obtenção de energia nuclear:

- As reservas de urânio no mundo são finitas e concentradas em alguns países como o Canadá, Rússia e Brasil.
- Os funcionários que lidam com o processo de obtenção de energia nuclear, podem sofrer, a longo prazo, com impactos sobre a saúde oriundos da exposição à radioatividade. Além disso, sempre existe o risco de os mesmos serem afetados no caso de acidentes dentro das usinas.
- A disseminação da tecnologia necessária para disponibilização de energia nuclear aumenta a possibilidade de fabricação de armas nucleares ao redor do mundo, uma vez que mais nações e organizações passam a ter acesso a esse tipo de energia.

Na tabela abaixo estão, sistematizadamente, os impactos socioambientais decorrentes da construção e operação de usinas nucleares:

Tabela 6: Impactos socioambientais relacionados à construção e operação de usinas nucleares.

Causas	Impactos	Medidas/ações/projetos/programas
Área de ocupação do solo (Preparação, terraplenagem, etc.)	- interferência com população local - interferência com flora e fauna - ruído e poeira - erosão do solo - alteração do uso do solo - emissão de gases de efeito estufa e causadores de deposição ácida pelas máquinas e caminhões utilizando derivados de petróleo	Compensação monetária ou permuta de áreas Recuperação das áreas degradadas Arborização - criação de cinturões verdes Utilização de sistemas anti-poeiras Criação de parques ou áreas de conservação
Transporte de equipamento pesado	- poluição sonora - perturbação do trânsito local	Planejamento do sistema de tráfego de modo a se evitar os horários de pico
Movimentos migratórios causados pela construção da usina	- aumento da demanda por serviços públicos, habitação e infra-estrutura de transporte - alteração da organização sócio-cultural e política da região - aumento das atividades econômicas da região com possível posterior retração após o término do empreendimento.	Plano de desenvolvimento regional Apoio aos municípios afetados pelo empreendimento Adaptação das infra-estruturas de habitação e transporte Gerenciamento institucional Reorganização das atividades econômicas Organização das condições sanitárias e de saúde
Distorção estética	poluição visual	Projetos paisagísticos e arquitetônicos
Efluentes sanitários	- disseminação de doenças - diminuição de oxigênio solúvel nos corpos receptores - interferência com fauna e flora	Utilização de sistemas compactos para tratamento de esgotos (separado do tratamento de outros efluentes líquidos)
Ruído	- poluição sonora no interior e fora da usina	Projetos e programas específicos para redução de ruído
Emissões para a atmosfera de gases radioativos	- Doses internas e externas - (efeitos biológicos não detectáveis)	Filtros e decaimento radioativo Dispersão em condições atmosféricas favoráveis Dimensionamento ótimo da chaminé Implementação de projetos, procedimentos operacionais e programas para minimizar efluentes Sistemas de controle e monitoração contínuos das emissões
Efluentes radioativos líquidos	- Doses internas e externas (efeitos biológicos não detectáveis)	Filtragem. Decaimento radioativo Remoção por troca iônica: Evaporação/condensação Solidificação: Dispersão em ambiente aquático sob condições apropriadas. Implementação de medidas de projeto, procedimentos operacionais e programas para minimizar os efluentes. Controle contínuo e sistemas de monitoração das emissões
Sistema de água de refrigeração	Dependendo da tecnologia empregada: Sistema aberto: - aumento da temperatura da água no corpo receptor de água - redução de oxigênio dissolvido - interferência com fauna e flora aquáticas Sistema fechado/torre úmida de refrigeração: - névoa quimicamente ativa (biocidas e agentes anticorrosivos) - diminuição da visibilidade - interação da névoa úmida com a pluma da chaminé (causando acidificação da atmosfera) Sistema fechado/torre seca de refrigeração: - alguns (pequenos) impactos na atmosfera e recursos hídricos	Estudos de dispersão térmica no corpo receptor de água Avaliação dos impactos no ecossistema aquático Monitoração do eco-sistema Utilização de torres com sistemas de diminuição de névoa ("demisters") Localização das torres levando em conta os ventos predominantes na região Medidas para evitar a superposição da névoa com a pluma Verificação da interferência aerodinâmica da torre de refrigeração com as condições de dispersão da pluma da chaminé
Rejeitos radioativos sólidos com baixa e média atividades (armazenamento temporário para rejeitos radioativos sólidos)	- Doses externas (efeitos biológicos não detectáveis)	Solidificação, compactação e confinamento em contêineres especiais Armazenamento em repositórios licenciados Implementação de medidas de projetos, programas operacionais e procedimentos para minimização de rejeitos Monitoração ambiental e radiológica

Fonte: (MME,2007)

Ainda dentre as desvantagens, como citado anteriormente, está o armazenamento dos resíduos gerados no processo de obtenção de energia nas usinas term nucleares. Um reator de 1 GW gera anualmente 20 a 30 toneladas de combustível queimado (BUNN et al.,2001 apud ROMANATO, 2005).

Pode-se dividir o armazenamento em duas vias: úmida e seca. A úmida consiste em manter o Combustível Nuclear Queimado (CNQ) envolvido por água, e na via seca o CNQ é envolvido por gases.

8. Armazenamento de resíduos oriundos das Usinas Nucleares

8.1. Via úmida

Segundo Romanato (2005), a via úmida originada nos EUA em 1943, constitui a principal forma de armazenamento existente no mundo. O sistema consiste em uma piscina com um isolamento físico de concreto e aço inoxidável nas suas laterais e fundo para evitar possíveis vazamentos. A piscina é preenchida com água deionizada que apresenta como característica a ausência de íons, fato que favorece um controle da reação em cadeia, caso haja um acidente. No caso da usina de Angra dos Reis, a piscina possui mais de nove metros de altura, onde cinco metros da coluna de água servem para isolar o resíduo e os quatro metros restantes são utilizados para acondicionamento do CNQ. As varas de combustível queimado são colocadas em suportes de aço inoxidável e concreto que as mantêm fixadas.

Com a geração contínua de CNQ, é necessário gerenciar os resíduos de forma a maximizar os espaços a fim de que se aumente a longevidade dos reservatórios. Caso não seja possível maximizar o espaço, há possibilidades de deslocar os resíduos para um centro de armazenamento provisório. No que tange a maximização dos espaços, tem-se criado racks mais eficientes (com menores espaços entre as varas de combustível), além de desmontar parte do conjunto das varas, e aglomerando-as num só envoltório e depois fechando-o com aço inox e concreto (ROMANATO,2005).

8.2. Via seca

Como descrito anteriormente, a via seca utiliza gás (comumente Hélio ou Nitrogênio), ou ar como refrigerante do CNQ. O local de armazenamento deve ser revestido por alguns desses componentes: concreto, aço, ferro e chumbo (varia com o local), para que se evite saídas de elementos radioativos. Dependendo do CNQ, ele poderá ser armazenado direto, se for de média ou baixa atividade, e no caso de alta atividade ele deverá ficar armazenado previamente num sistema úmido até que decaia sua atividade, processo que varia de um a dez anos. A via seca divide-se em: silos, que são estruturas fixas feitas em concreto que revestem tambores metálicos; cascos, que são cilindros grossos de concreto ou metal; e poços que são edifícios de concreto que possuem perfurações no chão para inserção do combustível

queimado (ROMANATO, 2005).

A tabela a seguir lista as principais vantagens e desvantagens observadas nos sistemas de armazenamento úmido e seco de resíduos nucleares.

Tabela 7: Vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas de armazenamento de resíduos nucleares

Tipo	Vantagens	Desvantagens
Armazenagem úmida		
Piscinas	Inspeção Remanejamento do combustível	Controle de impurezas, resfriamento e nível H2O Corrosão
Modificação dos racks	Inspeção Remanejamento do combustível Mais espaço que nas piscinas	Controle de impurezas, resfriamento e nível H2O Corrosão
Agrupamento de varetas	Mais espaço que nas piscinas.	Controle de impurezas, resfriamento e nível de H2O
Piscinas centralizadas	Mobilidade dos cascos	Controle de impurezas, resfriamento e nível de água. Transporte
Armazenagem seca		
Poços	Não ocorrência de corrosão	Falta de inspeção Resfriamento forçado
Silos	Não ocorrência de corrosão Resfriamento passivo	Falta de inspeção
Cascos metálicos	Não ocorrência de corrosão Resfriamento passivo Casco de transporte é o mesmo da armazenagem Mobilidade dos cascos	Falta de inspeção
Cascos de concreto	Não ocorrência de corrosão Resfriamento passivo Casco de transporte é o mesmo da armazenagem Mobilidade dos cascos	Falta de inspeção

Romanato, 2005.

9. Viabilidade Econômica

A viabilidade econômica de uma fonte de energia não basta por si só, ou seja, para calcularmos o valor de um componente, por exemplo, linhas de transmissão de dados, fontes de energia etc., deve ser levado em consideração o aspecto estratégico envolvido no processo de tomada de decisão. Entretanto, para avaliar quais seriam os custos envolvidos num projeto que abrange o componente estratégico nacional, é demasiado complexo. Assim, o presente trabalho se restringe a demonstrar quais são os principais custos monetários diretos envolvidos na obtenção de energia nuclear.

No Brasil, o setor de energia nuclear conta com grande relevância econômica. Estima-se que, até o ano de 2030, o setor movimentará um montante de cinquenta e dois bilhões de reais e gerará cinquenta mil novos empregos.

Segundo o MME (2007), os custos de geração de uma usina termonuclear, incluem três componentes principais: investimento, operação e manutenção e combustível. Os custos seguem a seguinte proporção:

- Investimento (construção das usinas e sistemas de segurança) : 60%
- Operação, Manutenção e Combustível: 20%
- Descomissionamento (desmontagem definitiva e descontaminação das instalações das usinas): 10 a 20 %

Para ALVIM et al. (2007), os custos da energia nuclear nos Estados Unidos são inferiores ao óleo combustível, gás natural, carvão e diesel. Apesar disso, observou-se durante as últimas décadas que nos Estados Unidos grande parte das usinas nucleares em operação tiveram seus custos de construção e operação subestimados e superados ao longo do tempo. De acordo com um relatório encomendado pelo Greenpeace, a construção de setenta e cinco usinas nucleares nos Estados Unidos contavam com a estimativa de custar US\$ 50 bi e acabaram custando o triplo disso, US\$ 150 bi, o que reflete e muito na viabilidade econômica desse tipo de energia.

No Brasil, devido ao alto potencial hidroelétrico, os custos da energia nuclear ainda não se tornaram, somente sob a óptica econômica, competitivos. Estima-se que a energia gerada em Angra 2, por exemplo, tem um custo de R\$ 45,00 por MW/h em contraposição aos R\$ 35,00 por MW/h da energia fornecida por uma hidrelétrica

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2007), o Brasil possui vantagem competitiva no mercado de energia nuclear: reservas de mineral, domínio da tecnologia e enriquecimento e experiências no setor.

10. Considerações finais

Diante dos conceitos e dados apresentados nesse trabalho, é possível afirmar que a Energia Nuclear é uma fonte de energia que apresenta diversos impactos negativos, todavia, existem casos particulares, em que se pode pensar em utilizá-la, mesmo com o seu risco potencial de acidente. Diversos autores destacaram que a

produção em si não gera um impacto negativo significativo na sua operação cotidiana, entretanto no processo de obtenção do combustível utilizado há impactos que devem ser ponderados. As principais preocupações se referem aos resíduos do processo e o risco de acidente, pois este geraria um impacto elevado. Desta forma, diz-se que para se pensar em energia nuclear como uma alternativa energética deverá ser estudado toda a estrutura social, ambiental, econômica, político-estratégico e técnica que envolve a tomada de decisão sobre a matriz energética do país.

Referências

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; Parte III: Fontes Não renováveis – capítulo 8: Energia Nuclear. In: Atlas da Energia Elétrica no Brasil. Brasília, 2008. 3ª Ed.

Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA. A Country Profile In Sustainable Energy Development; 2008. Disponível em http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/BRAZIL_FINAL_24April06.pdf. Acesso em 19/06/09.

ALVIM, Carlos Feu; EIDELMAN, Frida; MAFRA, Olga and FERREIRA, Omar Campos.

Energia nuclear em um cenário de trinta anos. Estud. av. [online]. 2007, vol.21, n.59, pp. 197-220. ISSN 0103-4014. doi: 10.1590/S0103-40142007000100016.

Balanço Energético Nacional (2012). Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2012.aspx>. Acesso em 1 de Maio de 2013

BRASIL, Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília: Senado, 1988.

BRASIL. Decreto nº911, de 3 de Setembro de 1993. Promulga a Convenção de Viena sobre Responsabilidade Civil por Danos Nucleares, de 21. 5. 1963.

BRASIL. Lei nº 6.453, de 17 de Outubro de 1977. Dispõe sobre a responsabilidade civil por danos nucleares e a responsabilidade criminal por atos relacionados com atividades nucleares e dá outras providências.

CHAYES, A. & LEWIS W. B. O ciclo de combustível nuclear. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro. Atlântida,1978. 312 p.

DUPUY, JEAN-PIERRE. A catástrofe de Chernobyl vinte anos depois. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a18v2159.pdf>

Eletronuclear – Gerência de Planejamento Estratégico; Panorama da Energia Nuclear. 2008; disponível em www.eletronuclear.gov.br/downloads/41/287.pdf.

Eletronuclear; site oficial, disponível em <http://www.eletronuclear.gov.br/inicio/index.php>. Acesso em 19/06/09.

KURAMOTO, R. Y. R., APPOLONI, C. R. Uma Breve História da Política Nuclear Brasileira. In: Caderno Brasileiro de Ensino de Física, vol. 19, nº 3; 2002. Pág. 379, 392.

MME -Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. _ Brasília : MME : EPE, 2007. 12 v. : il.

MONGELLI, S. T. Geração Núcleo-Elétrica: retrospectiva, Situação Atual e Perspectivas Futuras. Dissertação. IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 2006.

OLIVEIRA, Odete Maria de. A integração bilateral Brasil-Argentina: tecnologia nuclear e MERCOSUL. Rev. bras. polít. int. [online]. 1998, vol.41, n.1, pp. 5-23. ISSN 0034-7329. doi: 10.1590/S0034-73291998000100001.

PALÁCIOS, M. P. Um Panorama da Energia Nuclear no Brasil. In Rumo Sustentável, disponível em <http://www.rumosustentavel.com.br/um-panorama-da-energia-nuclear-nobrasil/>. Publicado em 26 de março de 2009; acesso em 19/06/09.

ROMANATO, L.S. Armazenagem de Combustível Nuclear “Queimado”. Dissertação. IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 2005

SANTOS, M. D. S. As radiações como fonte de energia para o homem. Org.

Panorama da Energia Nuclear no Mundo, Eletrobrás 2011. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=GxTb5TAen5E%3D&tabid=>

[297](#). Acesso em 1 de Maio de 2013.

PAVAN, C. & CUNHA A. B. A energia atômica e o futuro do homem. São Paulo. Cia Editora Nacional. 1968. 245p.

Portal da Radiologia, O acidente em Chernobyl, 08/03/2010 (acesso em 13/05/2010)
Disponível em: <http://portaldaradiologia.com/?p=724#more-724>

World Nuclear Association (WNA), Chernobyl Accident, atualizado em Novembro de 2009, acesso em 10/05/2010 disponível em <http://www.world-nuclear.org/info/chernobyl/inf07.html>

United Nations Scientific Committee on the Effects of the Atomic Radiation, acesso em 17/05/2010, disponível em <http://www.unscear.org/unscear/en/index.html>

Portal Ambiente Brasil, Principais acidentes nucleares até 1998, acesso em 17/05/2010, disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/nuclear/index.html&conteudo=./energia/nuclear/acidentes.html>

GREENPEACE, The Economics of Nuclear Power: Research Report 2007. Nov. 2007. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/the-economics-of-nuclear-power.pdf>

Eletrobrás Eletronuclear. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/empresa/index.php?idSecao=1> > Acesso em 02 de Junho de 2011.

International Atomic Energy Agency (IAEA). International Status and Prospects of Nuclear Power. 2010

International Energy Agency (IEA). Key World Energy Statistics. 2010

World Nuclear Association. Supply of Uranium. 2009. Disponível em:
< <http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html> > Acesso em 02 de Junho de 2011.

Balanço Energético Nacional. 2010

CARDOSO, E. de M. Radioatividade. Apostila Educativa. Comissão Nacional de Energia Nuclear.

MARQUES, A. L. F.; SILVA da, O. L. P. Enriquecimento de Urânio no Brasil. Desenvolvimento da Tecnologia por Ultracentrifugação. Revista Economia & Energia, Ano X, nº 54, fevereiro-março, 2006.

MME -Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. _ Brasília : MME : EPE, 2007. 12 v. : il.

MÖLLER, S. V. Radioatividade. Aplicações Industriais das Radiações Ionizantes. Curso de Especialização em Ciências Radiológicas.

SANTOS, M. D. S. As radiações como fonte de energia para o homem. In A Energia Atômica e o homem do futuro. São Paulo. Companhia Editora Nacional, 1968.