**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**ESCOLA DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM CIÊNCIAS RADIOLÓGICAS**

# A ENERGIA NUCLEAR HOJE:
# UMA ANÁLISE EXPLORATÓRIA

***Alberto Ricardo Präss***

Porto Alegre
2007

**Alberto Ricardo Präss**

# A ENERGIA NUCLEAR HOJE:

# UMA ANÁLISE EXPLORATÓRIA

Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Especialista em Ciências Radiológicas.

Orientador: Prof. Dr. Volnei Borges

Porto Alegre
2007

***À Juliana***

# AGRADECIMENTOS

A Juliana Tonet, minha amada.

A Josefina Tonet, mãe da Juliana.

Ao Prof. Alfredo Castro pelo incentivo em prosseguir nos estudos.

Ao Grupo Universitário pelo emprego que me propiciou diversas conquistas.

A UFRGS por ser minha casa há mais de 15 anos.

Ao DENUC pelo curso que acabo de concluir.

Ao Instituto de Física da UFRGS pela bela formação que obtive.

Ao povo brasileiro, por ter pagado boa parte dos meus estudos até hoje.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES


| | REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA | Pg. |
|---|---|---|
| Figura 0.1 - Figura 0.1 – Senhor “Burns” | 4 | 1 |
| Figura 0.2 – Capa da Revista Super Interessante de Julho/07 | 4 | 1 |
| Figura 0.3 – Emissão de gases causadores do efeito estufa devido à geração de eletricidade | 18 | 1 |
| Figura 1.1 – Evolução histórica do número de reatores comerciais | 18 | 4 |
| Figura 3.1 – Uma típica fissão nuclear | 18 | 11 |
| Figura 3.2 – Reação em Cadeia | 4 | 14 |
| Figura 3.3 – Reator PWR | 6 | 20 |
| Figura 3.4 – Reator BWR | 6 | 21 |
| Figura 3.5 – Reator RBMK (reator pressurizado da água com canaletas individuais de combustível), utilizado em Chernobyl | 26 | 21 |
| Figura 3.6 – Tipos de reatores em uso no mundo | 18 | 22 |
| Figura 3.7 – Um exemplo de reator de quarta geração | 27 | 22 |
| Figura 4.1 – O ciclo do combustível nuclear | 19 | 24 |
| Figura 4.2 – Principais reservas de urânio no mundo | 28 | 27 |
| Figura 4.3 – Localização das reservas brasileiras de urânio | 28 | 29 |
| Figura 4.4 - Ultracentrífuga usada pelo Brasil | 3 | 32 |
| Figura 5.1 – Bloco de vidro rejeitos HLW | 18 | 35 |
| Figura 5.2 – Comparação entre várias fontes de rejeitos - Valores por ano a Europa | 18 | 37 |
| Figura 6.1 – Comparação de riscos a saúde para diversos sistemas energéticos | 18 | 44 |
| Figura 6.2 – O reator RBMK de Chernobyl | 4 | 47 |
| Figura 6.3 Contenção de Angra I e Angra II | 4 | 55 |
| Figura 6.4 - O Edifício do Reator, construído em concreto e envolvendo a Contenção de aço, é a quarta barreira física que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente e, além disso, protege contra impactos externos (queda de aviões e explosões) | 4 | 56 |
| Figura 7.1 – Participação percentual dos cursos | 11 | 62 |
| Figura 7.2 – Idade dos entrevistados | 11 | 63 |
| Figura 7.3 – Grau de instrução dos entrevistados | 21 | 69 |
| Figura 7.4 – Você moraria numa cidade que tenha uma usina nuclear? | 21 | 70 |
| Figura 7.5 – O Brasil deveria investir no desenvolvimento de energia nuclear mais limpa e segura para futuro uso em sua matriz energética? | 21 | 70 |
| Figura 7.6 - Existem mais de 400 usinas nucleares no Mundo. Nos próximos 10 anos como você avalia o risco de um acidente sério envolvendo alguma dessas usinas? | 21 | 72 |

# LISTA DE TABELAS


| | REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA | Pg. |
|---|---|---|
| Tabela 2.1 - Geração de energia elétrica mundial | 18 | 7 |
| Tabela 2.2 – Reatores nucleares no mundo (maio de 2007) | 24 | 8 |
| Tabela 2.3 - Geração de energia elétrica no Brasil | 3 | 9 |
| Tabela 3.1 - Energia de cada fissão do U-235 = 200MeV | 17 | 13 |
| Tabela 3.2 - Quantidade de combustível para manter uma família durante um mês | 5 | 13 |
| Tabela 3.3 – Combinações de Moderador e Refrigerante | 17 | 19 |
| Tabela 3.4 – Reatores de potência | 17 | 20 |
| Tabela 4.1 – Aplicações do urânio enriquecido | 17 | 25 |
| Tabela 4.2 – Reservas mundiais de urânio | 19 | 28 |
| Tabela 4.3 – Urânio comercial e capacidade de enriquecimento (tSWU/ano) | 18 | 31 |
| Tabela 5.1 – Principais HLW (resíduos de alto nível) | 18 | 36 |
| Tabela 5.2 – Produção anual de resíduos radioativos (m3 por ano) gerada por uma planta de 1.000MWe | 18 | 36 |
| Tabela 6.1 - Escala Internacional de Eventos Nucleares (INES) | 18 | 41 |
| Tabela 7.1 - Auto-avaliação sobre conceitos de energia nuclear | 15 | 60 |
| Tabela 7.2 - Expressões mais citadas | 15 | 60 |
| Tabela 7.3 - Vantagens citadas | 15 | 60 |
| Tabela 7.4 - Desvantagens citadas | 15 | 61 |
| Tabela 7.5 - Possibilidade de residir perto de usinas nucleares | 15 | 61 |
| Tabela 7.6 - Geração de energia elétrica | 15 | 61 |
| Tabela 7.7 – Primeiro sentimento relativo á radioatividade e percentual de rejeição | 11 | 63 |
| Tabela 7.8 – Definição de Radioatividade: número de respostas e percentuais | 11 | 63 |
| Tabela 7.9 – Conhecimento sobre a Radioatividade Natural | 11 | 64 |
| Tabela 7.10 - Das aplicações da radioatividade, valores numéricos de respostas afirmativas por orientação e percentuais por grupo. Os itens e valores em itálicos não são aplicações nucleares | 11 | 65 |
| Tabela 7.11 - Para termos mais eletricidade para suprir as necessidades do Brasil nos próximos 25 anos, novas usinas geradoras precisarão ser construídas. Empresas e agências governamentais precisam iniciar o planejamento hoje em dia. Como você deseja que seja a escolha da fonte de energia? | 21 | 71 |
| Tabela 7.12 – Termos mais citados | 21 | 72 |

# SUMÁRIO

**INTRODUÇÃO** 1

**CAPÍTULO 1 - BREVE REVISÃO HISTÓRICA** 3

**CAPÍTULO 2 - A ENERGIA NUCLEAR HOJE** 7
2.1 USINAS NUCLEARES EM CONSTRUÇÃO 9

**CAPÍTULO 3 - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE REATORES NUCLEARES** 11
3.1 O PROCESSO DE FISSÃO NUCLEAR 11
3.2 ENERGIA LIBERADA NA FISSÃO NUCLEAR 13
3.3 A MASSA CRÍTICA E A REAÇÃO EM CADEIA 14
3.4 CARACTERÍSTICAS DOS REATORES DE FISSÃO NUCLEAR 15
3.4.1 Tipos de reatores 17
3.4.2 Reatores nucleares de quarta geração 22

**CAPÍTULO 4 - O COMBUSTÍVEL NUCLEAR** 23
4.1 INTRODUÇÃO 23
4.2 O ENRIQUECIMENTO DO URÂNIO 25
4.3 OCORRÊNCIA DO URÂNIO NO MUNDO 27
4.4 O TÓRIO (Th-232) 29
4.5 PRINCIPAIS PAÍSES ENRIQUECEDORES 30
4.6 FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS 32
4.7 CUSTO DO CICLO DO COMBUSTÍVEL 33

**CAPÍTULO 5 - OS SUBPRODUTOS DA FISSÃO NUCLEAR: O LIXO** 34
5.1 ORIGENS DOS REJEITOS RADIOATIVOS 35
5.2 O DESTINO FINAL 37
5.2.1 Contaminação do ar 38
5.2.2 Contaminação da água 38
5.3 O DESCOMISSIONAMENTO 39

**CAPÍTULO 6 - SEGURANÇA NAS USINAS NUCLEARES** 40
6.1 INTRODUÇÃO 40
6.2 ESCALA INTERNACIONAL DE ACIDENTES NUCLEARES 41
6.3 ANÁLISES DE SEGURANÇA 42
6.4 AVALIAÇÕES DE RISCOS DAS USINAS NUCLEARES ORIENTADA PELO PRINCÍPIO DA PRECAUÇÃO 42
6.5 REATORES COMERCIAIS E SUAS DEFICIÊNCIAS 45
6.6 ACIDENTES IMPORTANTES 46
6.6.1 Chernobyl 46
6.6.2 Acidente em Three Mile Island 50
6.7 ATOS DE SABOTAGEM E TERRORISMO 52
6.8 RAZÃO E EMOÇÃO EM TORNO DA TECNOLOGIA NUCLEAR 57

**CAPÍTULO 7 - PERCEPÇÃO PÚBLICA SOBRE ENERGIA NUCLEAR** 58
7.1 PESQUISA NÚMERO UM 59

7.2 PESQUISA NÚMERO DOIS 62
7.3 AIEA REVELA MAIOR ACEITAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR 66
7.4 ENQUETE FEITA PARA O PRESENTE TRABALHO 68
7.5 ANÁLISE DAS PESQUISAS 73

**CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES** 74

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** 75

**APÊNDICE A – FORMULÁRIO DA ENQUETE ONLINE** 79

**ANEXO A - ENERGIA NUCLEAR VOLTA COMO OPÇÃO MAIS "LIMPA"** 82
**ANEXO B - NUCLEAR POWER IN BRAZIL** 90

# INTRODUÇÃO

Após um período de intenso desenvolvimento em escala internacional, a geração de energia elétrica a partir de fonte nuclear atravessou uma fase de baixo crescimento, em decorrência, principalmente, de dois acidentes com usinas nucleares: Three Mile Island (EUA, 1979) e Chernobyl (Ucrânia, 1986).

Figura 0.1 – Senhor "Burns", dono de uma usina nuclear no seriado Os Simpsons, da Fox. Sempre retratado como vilão.

Figura 0.2 – Capa da Revista Super Interessante de Julho de 2007, mostrando o "vilão que virou herói

Entretanto, as alterações climáticas do planeta, devido à emissão de gases causadores do efeito estufa produzidos, entre outros, pela operação de usinas termelétricas; a previsão de escassez de petróleo e a contínua elevação do seus preços; a necessidade de garantia de abastecimento de combustíveis; as instabilidades geopolíticas internacionais, e a necessidade de diversificação da matriz energética e de redução de fontes externas de abastecimento vêm motivando a reconsideração, em vários países, da viabilidade de incremento da utilização da energia nuclear.

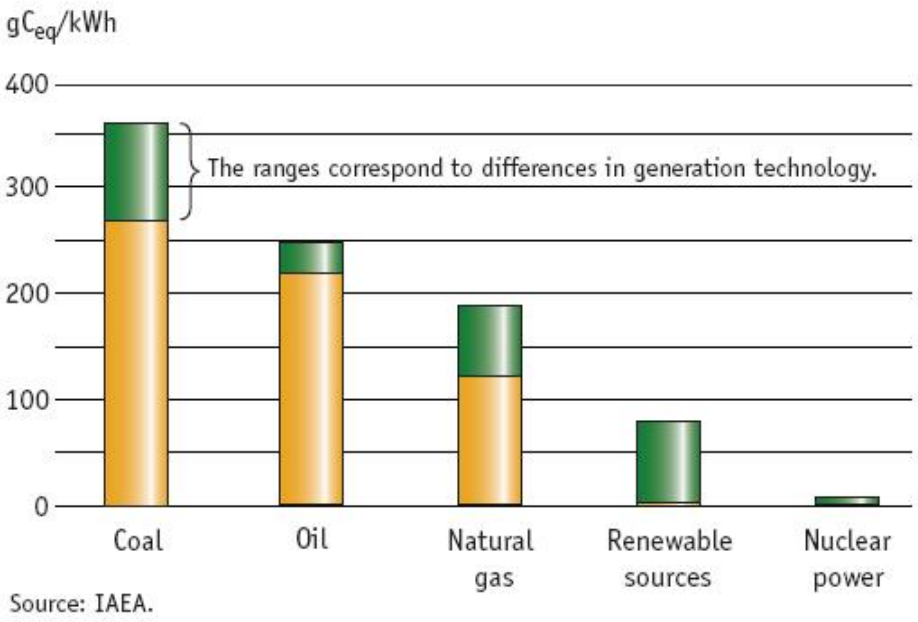



Figura 0.3 – Emissão de gases causadores do efeito estufa devido à geração de eletricidade

No presente trabalho, são feitas algumas análises genéricas da situação da energia nuclear no Brasil e no Mundo. Pela natureza do texto (monografia), não se pretendeu um grande aprofundamento (o que acarretaria em muito mais tempo de execução) e nem um ineditismo. A idéia foi apresentar elementos para que o leitor possa ter um quadro geral da energia nuclear em 2007. Muitos trechos são adaptações de fontes checadas e alguns são frutos de posicionamento do autor.

# CAPÍTULO 1
# BREVE REVISÃO HISTÓRICA

A radioatividade artificial foi obtida pela primeira vez em 1934, com os trabalhos de Frederick e Irene Joliot-Curie.

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 sugeriram a formação de elementos transurânicos. O que eles observaram foi a fissão nuclear, mais tarde comprovado por Otto Hahn.

Durante a Segunda Guerra Mundial, as pesquisas na Europa e nos EUA viraram assunto militar, culminando com as bombas nucleares de Hiroshima e Nagazaki.

Depois da guerra, os EUA procuraram desenvolver um programa que preservasse a supremacia americana na tecnologia militar com finalidades pacíficas.

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 foi 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.

Em 1953 o Presidente Eisenhower lançou o programa átomos para a Paz, propondo colaborações internacionais para desenvolver o uso pacífico da energia nuclear. Um pouco antes os soviéticos haviam explodido a primeira bomba atômica não-americana.

Em 1957 foi fundada em Viena a Agencia Internacional de Energia Atômica, para controlar o desenvolvimento mundial da energia atômica.

Em 1957 os primeiros submarinos nucleares entraram em operação.

Em 1956 a Westinghouse construiu o primeiro reator comercial dos EUA, em Shippingport, Pennsylvania. Ele operou até 1982.

O primeiro reator europeu entrou em operação em Moscou, no ano de 1946.

Em 1954 os soviéticos inauguraram a primeira planta nuclear de potencia.

Na década de 1960, tivemos o amadurecimento da tecnologia de reatores nucleares e diversos países entraram no chamado clube nuclear.

No Brasil, há 25 anos ocorreu o primeiro sincronismo ao sistema elétrico – produção de energia elétrica para abastecimento de uma rede – na usina de Angra 1, tornando a data um marco histórico da energia nuclear no país. Neste tempo, Angra 1 produziu 56.462.110 MWh, energia suficiente para abastecer uma cidade como o Rio de Janeiro por três anos e meio.

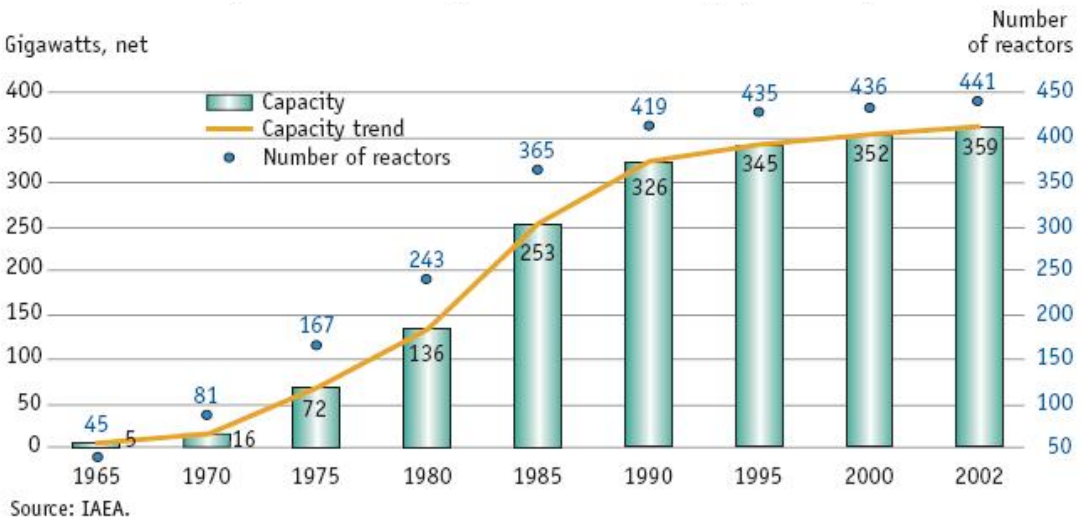



Figura 1.1 – Evolução histórica do número de reatores comerciais

A procura da tecnologia nuclear no Brasil começou na década de 50, com o pioneiro nesta área, Almirante Álvaro Alberto, que entre outros feitos criou o Conselho Nacional de Pesquisa, em 1951, e que importou duas ultra-centrifugadoras da Alemanha para o enriquecimento do urânio, em 1953.

Nas décadas seguintes o país não passou da instalação de alguns centros de pesquisas na área nuclear.

A decisão da implementação de uma usina termonuclear no Brasil aconteceu em 1969, quando foi delegado a Furnas Centrais Elétricas S.A. a incumbência de construir nossa primeira usina nuclear. É muito fácil concluir que em nenhum momento se pensou numa fonte para substituir a energia hidráulica, da mesma maneira que também após alguns anos, ficou bem claro que os objetivos não eram simplesmente o domínio

de uma nova tecnologia. Estávamos vivendo dentro de um regime de governo militar e o acesso ao conhecimento tecnológico no campo nuclear permitiria desenvolver submarinos e armas. O Programa Nuclear Paralelo, somente divulgado alguns anos mais tarde, deixou bem claro as intenções do país em dominar o ciclo do combustível nuclear, tecnologia esta somente do conhecimento de poucos países no mundo.

Em junho de 1974, as obras civis da Usina Nuclear de Angra 1 estavam em pleno andamento quando o Governo Federal decidiu ampliar o projeto, autorizando Furnas a construir a segunda usina.

Em 1975, com a justificativa de que o Brasil já apontava escassez de energia elétrica para breve, uma vez que o potencial hidroelétrico já se apresentava quase que totalmente instalado, foi assinado com a Alemanha o Acordo de Cooperação Nuclear, pelo qual o Brasil compraria oito usinas nucleares e obteria toda a tecnologia necessária ao seu desenvolvimento nesse setor.

Angra 1 encontra-se em operação desde 1982 e fornece ao sistema elétrico brasileiro uma potência de 657 MW. Angra 2, após longos períodos de paralização nas obras, iniciou sua geração entregando ao sistema elétrico mais 1300 MW, o dobro de Angra 1.

A Central Nuclear de Angra está pronta para receber sua terceira unidade. Em função do acordo firmado com a Alemanha, boa parte dos equipamentos desta usina já estão comprados e estocados no canteiro da Central, com as unidades 1 e 2 existentes, praticamente toda a infra-estrutura necessária para montar Angra 3 já existe, tais como pessoal treinado e qualificado para as áreas de engenharia, construção e operação, bem como toda a infra-estrutura de canteiro e sistemas auxiliares externos. Por isso, considera-se acertada a decisão de construção de Angra 3, conforme já exposto no CAPÍTULO 1.

Brasil e França assinaram, em 2002 , um acordo de cooperação para utilização da energia nuclear para fins pacíficos.

A França ira participar financeiramente do projeto de Angra 3 e poderá contribuir com a venda de equipamentos adicionais e, sobretudo em termos de cooperação técnica e treinamento de pessoal.

O interesse dos franceses nesse projeto nuclear pode ser explicado pelo fato de que a estatal francesa Framatom comprou 80% da Siemens, fabricante do reator comprado pelo Brasil.

# CAPÍTULO 2

# A ENERGIA NUCLEAR HOJE

As usinas nucleares participam com cerca de 16% do total da energia elétrica produzida no mundo, embora correspondam a apenas 12% da capacidade elétrica instalada. Isso indica que a maior parte das usinas nucleares opera com fatores de utilização superiores aos das usinas elétricas convencionais.

**Tabela 2.1 - Geração de energia elétrica mundial**

| Tipo de Usina | Participação |
|---|---|
| **Carvão** | **40,1** |
| **Gás** | **19,4** |
| **Hidrelétricas** | **15,9** |
| **Nuclear** | **15,8** |
| **Óleo** | **6,9** |
| **Outros** | **1,9** |
| **Total** | **100,0** |

**Fonte: Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA**

## Tabela 2.2 – Reatores nucleares no mundo (maio de 2007)

| | GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR USINAS NUCLEARES | | OPERAÇÃO | | CONSTRUÇÃO | | PLANEJADOS | | PROPOSTOS | | CONSUMO DE URÂNIO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | billion kWh | % e | No. | MWe | No. | MWe | No. | MWe | No. | MWe | t |
| **Argentina** | 7.2 | 6.9 | 2 | 935 | 1 | 692 | 0 | 0 | 1 | 700 | **135** |
| **Armenia** | 2.4 | 42 | 1 | 376 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1000 | **51** |
| **Belgium** | 44.3 | 54 | 7 | 5728 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **1079** |
| **Brazil** | **13.0** | **3.3** | **2** | **1901** | **0** | **0** | **1** | **1245** | **4** | **4000** | **338** |
| **Bulgaria** | 18.1 | 44 | 2 | 1906 | 0 | 0 | 2 | 1900 | 0 | 0 | **255** |
| **Canada*** | 92.4 | 16 | 18 | 12595 | 2 | 1540 | 4 | 4000 | 0 | 0 | **1836** |
| **China** | 51.8 | 1.9 | 11 | 8587 | 4 | 3170 | 23 | 24500 | 54 | 42000 | **1454** |
| **China: Taiwan** | 38.3 | 20 | 6 | 4884 | 2 | 2600 | 0 | 0 | 0 | 0 | **906** |
| **Czech Republic** | 24.5 | 31 | 6 | 3472 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1900 | **550** |
| **Egypt** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 600 | **0** |
| **Finland** | 22.0 | 28 | 4 | 2696 | 1 | 1600 | 0 | 0 | 0 | 0 | **472** |
| **France** | 428.7 | 78 | 59 | 63473 | 0 | 0 | 1 | 1630 | 1 | 1600 | **10368** |
| **Germany** | 158.7 | 32 | 17 | 20303 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **3486** |
| **Hungary** | 12.5 | 38 | 4 | 1773 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **254** |
| **India** | 15.6 | 2.6 | 17 | 3779 | 6 | 2976 | 4 | 2800 | 15 | 11100 | **491** |
| **Indonesia** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4000 | **0** |
| **Iran** | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 915 | 2 | 1900 | 3 | 2850 | **143** |
| **Israel** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1200 | **0** |
| **Japan** | 291.5 | 30 | 55 | 47577 | 2 | 2285 | 11 | 14945 | 1 | 1100 | **8872** |
| **Kazakhstan** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 300 | **0** |
| **Korea DPR (North)** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 950 | 0 | 0 | **0** |
| **Korea RO (South)** | 141.2 | 39 | 20 | 17533 | 1 | 950 | 7 | 8250 | 0 | 0 | **3037** |
| **Lithuania** | 8.0 | 69 | 1 | 1185 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1000 | **134** |
| **Mexico** | 10.4 | 4.9 | 2 | 1310 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2000 | **257** |
| **Netherlands** | 3.3 | 3.5 | 1 | 485 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **112** |
| **Pakistan** | 2.6 | 2.7 | 2 | 400 | 1 | 300 | 2 | 600 | 2 | 2000 | **64** |
| **Romania** | 5.2 | 9.0 | 1 | 655 | 1 | 655 | 0 | 0 | 3 | 1995 | **92** |
| **Russia** | 144.3 | 16 | 31 | 21743 | 5 | 2720 | 8 | 9600 | 18 | 21600 | **3777** |
| **Slovakia** | 16.6 | 57 | 5 | 2064 | 2 | 840 | 0 | 0 | 0 | 0 | **299** |
| **Slovenia** | 5.3 | 40 | 1 | 696 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1000 | **145** |
| **South Africa** | 10.1 | 4.4 | 2 | 1842 | 0 | 0 | 1 | 165 | 24 | 4000 | **332** |
| **Spain** | 57.4 | 20 | 8 | 7442 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **1473** |
| **Sweden** | 65.1 | 48 | 10 | 9076 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **1468** |
| **Switzerland** | 26.4 | 37 | 5 | 3220 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **575** |
| **Turkey** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 4500 | 0 | 0 | **0** |
| **Ukraine** | 84.8 | 48 | 15 | 13168 | 0 | 0 | 2 | 1900 | 20 | 21000 | **2003** |
| **United Kingdom** | 69.2 | 18 | 19 | 10982 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **2021** |
| **USA** | 787.2 | 19 | 103 | 98254 | 1 | 1155 | 2 | 2716 | 21 | 24000 | **20050** |
| **Vietnam** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2000 | **0** |
| **WORLD** | 2658 | 16 | 437 | 370,040 | 30 | 22,398 | 74 | 81,601 | 182 | 151,345 | **66,529** |

**FONTE: AIEA**

Operando = conectados a rede de distribuição
Construção = em fase real de construção
Planejados = aprovados e com fundos alocados, com definição de local, mas suspensos
Propostos = intenção de construir, mas sem recursos alocados e/ou aprovação

| Tabela 2.3 - Geração de energia elétrica no Brasil | | |
|---|---|---|
| **Tipo de Usina** | **Geração total (junho/2005 a maio/2006)** | |
| | (MW) | **%** |
| **Hidrelétricas** | 42.771,9 | **92,1** |
| **Gás** | 1.654,9 | **3,6** |
| **Nuclear** | 1.360,9 | **2,9** |
| **Carvão** | 482,2 | **1,0** |
| **Óleo** | 162,1 | **0,4** |
| **Totais** | 46.432,0 | **100,00** |
| **Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS** | | |

## *2.1 USINAS NUCLEARES EM CONSTRUÇÃO*

Previstas para serem retomadas no último trimestre de 2007, as obras de Angra 3 finalmente deixarão de ser apenas planos. Com a aprovação do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), na reunião do dia 25 de junho de 2007, a construção da terceira usina nuclear do Brasil se tornou uma realidade, com o seu término programado para 2013.

Nesta reunião, foram apresentados os estudos do Plano Nacional de Energia (PNE-2030), elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), sob a coordenação Ministério de Minas e Energia.

O plano indica que o país, possivelmente, precisará de quatro novas usinas nucleares até 2030, sem contar Angra 3, para atender a demanda de energia. Ele não determina o total de usinas a serem construídas, mas representa uma visão estratégia do Governo sobre as necessidades futuras do Brasil. De acordo com o plano, o país necessitará gerar mais 5.300 MWh de energia nuclear nos próximos 23 anos, incluindo os 1.350 MWh de Angra 3, e dos cerca de 2.000 MWh atualmente gerados por Angra 1 e Angra 2.

Até 2005, os Estados Unidos (com 104 usinas em operação e nenhuma em construção) ampliaram em 20 anos a vida útil de 39 dessas usinas (43.380 MW de

potência instalada), o que equivale, em termos de geração futura, à construção de 21 novas usinas de 1000 MW cada uma, sem os custos de projeto, construção, montagem e comissionamento.

Em 2005, oito novos reatores iniciaram sua operação comercial no Japão, Rússia, Ucrânia, Índia e Coréia do Sul; um foi religado no Canadá e dois foram fechados, um na Alemanha e outro na Suécia.

Pesquisas realizadas na Grã-Bretanha verificam que o público em geral aceitaria uma política energética que combinasse a energia renovável com construção de novas usinas nucleares.

Um relatório da Ontário Power Authority (órgão regulador do Canadá), a pedido do governo, propõe que a geração de energia elétrica de fonte nuclear seja mantida no mesmo patamar atual até 2025. Isso implica em construção de novas usinas, na ampliação de vida útil das existentes ou no religamento de unidades desativadas.

Foram publicados recentemente novos estudos sobre o custo da geração nuclear, entre eles o New Economics of Nuclear Power da World Nuclear Association (WNA), onde este valor é mais barato entre todos os outros combustíveis.

# CAPÍTULO 3

# CONCEITOS BÁSICOS SOBRE REATORES NUCLEARES

## *3.1 O PROCESSO DE FISSÃO NUCLEAR*

Somente se produz fissão nuclear em certos núcleos de numero atômico e mássico elevado, sendo um fator que contribui de modo importante o alto valor de Z (numero atômico) e, por conseguinte, o da força repulsiva existente no interior do núcleo. No processo de fissão, o núcleo composto excitado, que se forma após a absorção de um nêutron, se divide em dois núcleos mais rápidos, denominados fragmentos de fissão. Quando a energia cinética do nêutron incidente é pequena, ou seja, é um nêutron lento, os dois fragmentos geralmente possuem massas diferentes. Dito de outra forma, a fissão simétrica por nêutrons lentos é rara; na maioria das fissões provocadas por nêutrons lentos, a relação de massas dos fragmentos de fissão é aproximadamente de 2 a 3.

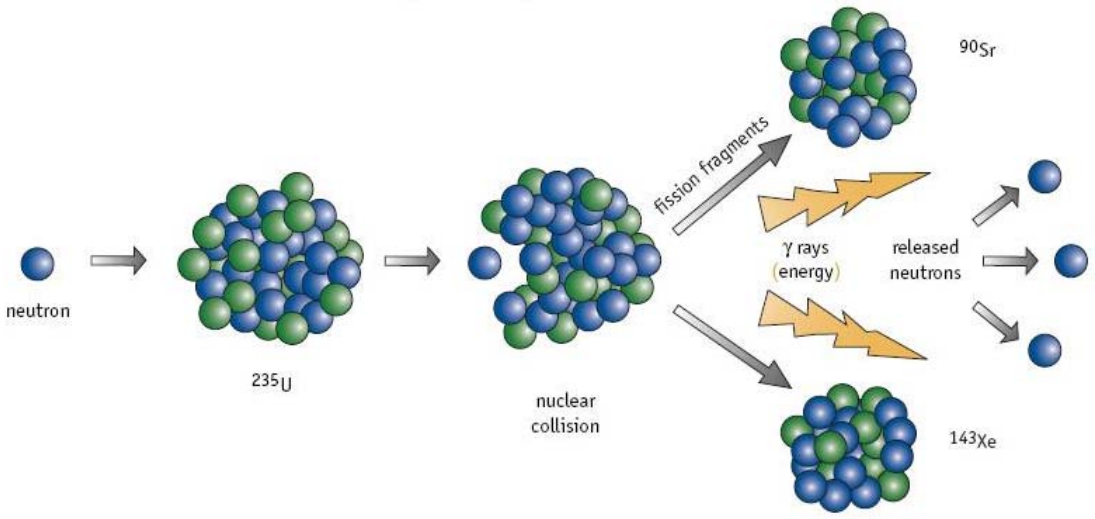



Figura 3.1 – Uma típica fissão nuclear

Somente três núcleos (U-233, U-235 e Pu-239), possuem estabilidade suficiente para poderem ser armazenados durante um longo tempo e são fissionáveis por

nêutrons de todas as energias, desde valores térmicos até milhões de eletro-volt. Dos três, unicamente o U-235 existe na Natureza; os outros dois são produzidos artificialmente a partir do U-238 e Th-232, por captura neutrônica seguida de duas desintegrações beta. São conhecidas algumas espécies mais capazes de experimentar a fissão de nêutrons de qualquer energia, porém são fortemente radioativas e se desintegram tão rapidamente que não oferecem valor prático para obtenção de energia nuclear.

Alem dos nuclídeos fissionáveis por nêutrons de qualquer energia, existem outros que requerem nêutrons rápidos para produzir fissão, destacando-se entre eles o Th-232 e o U-238.

Do ponto de vista da utilização da energia nuclear, a importância do processo de fissão se direciona em dois caminhos. O primeiro é que nesse processo se libera uma grande quantidade de energia por unidade de massa de combustível nuclear, e segundo é que a reação de fissão, iniciada por nêutrons, origina a liberação de mais nêutrons. Esta combinação é, justamente, o que faz possível o projeto de um reator nuclear, onde se estabelece a reação em cadeia, autossustentada, com produção contínua de energia. Uma vez iniciada a fissão de alguns núcleos, mediante uma fonte externa de nêutrons, os nêutrons produzidos na reação se propagam a outros núcleos. Deve-se notar, entretanto, que uma reação autossustentada somente é possível com certos núcleos fissionáveis. Nem o Th-232, nem o U-238 podem manter uma reação em cadeia, devido a baixa probabilidade de fissão.

A liberação de nêutrons no processo de fissão ocorre porque o núcleo composto U-236, que se forma quando o núcleo de U-235 captura um nêutron, a relação de nêutrons e prótons é da ordem de 1,57; em conseqüência, ao cindir-se esse núcleo em dois fragmentos com numero de massa compreendidos entre 95 e 140, a relação nêutron/próton deve ter o mesmo valor nos produtos. Se os núcleos produzidos por fissão dispõem de energia de excitação suficiente, podem emitir nêutrons, tendendo com isso a adquirir maior estabilidade.

## *3.2 ENERGIA LIBERADA NA FISSÃO NUCLEAR*

Para determinar a quantidade de energia liberada por fissão de um núcleo atômico, uma das formas é determinar a diminuição de massa, a partir das massas iniciais, e aplicar a relação massa-energia de Einstein $E=mc^2$, onde:

"E" é o equivalente energética da massa "m" e "c" é a rapidez da luz no vácuo.

**Tabela 3.1 - Energia de cada fissão do U-235 = 200MeV**

| | MeV |
|---|---|
| **Energia cinética do fragmento da fissão** | **166** |
| **Nêutrons** | **5** |
| **Raios gama imediatos** | **7** |
| **Raios gama dos produtos da fissão** | **7** |
| **Partículas beta** | **7** |
| **Neutrinos** | **10** |
| **Fonte: Murray, 2004** | |

Por comparação, vejamos a quantidade de energia liberada por outras fontes de energia:

**Tabela 3.2 - Quantidade de combustível para manter uma família durante um mês**

| FONTE | QUANTIDADE |
|---|---|
| **Nuclear** | **10g de urânio** |
| **Termoelétrica** | **1.200kg de carvão** |
| **Biomassa** | **75.000kg de bagaço de cana** |
| **Hidroelétrica** | **5 piscinas olímpicas** |
| **Eólica** | **1 dia de uma grande turbina** |
| **Solar** | **2 anos de sol** |
| **Fonte: Revista SUPERINTERESSANTE, 2007** | |

## *3.3 A MASSA CRÍTICA E A REAÇÃO EM CADEIA*

Como em cada ato de fissão se liberam dois ou três nêutrons e somente se necessita um para manter a fissão em cadeia, parece a primeira vista que, iniciada a reação em uma massa determinada de material físsil, esta se manterá por si mesma. Não é assim que acontece, pois nem todos os nêutrons de fissão são aproveitáveis para manter a reação em cadeia. Alguns nêutrons se perdem por outros tipos de reação, principalmente captura radioativa, com os diversos materiais estranhos existentes no sistema e inclusive com sua própria espécie físsil, além de que alguns nêutrons escapam definitivamente do sistema. A fração dos nêutrons que escapam, ou seja, que saem definitivamente dos limites geométricos do sistema pode reduzir-se convenientemente aumentando o tamanho – ou massa – do material físsil. A quantidade mínima de material capaz de manter a fissão em cadeia, uma vez que ela seja iniciada com uma fonte externa de nêutrons, recebe o nome de massa critica.

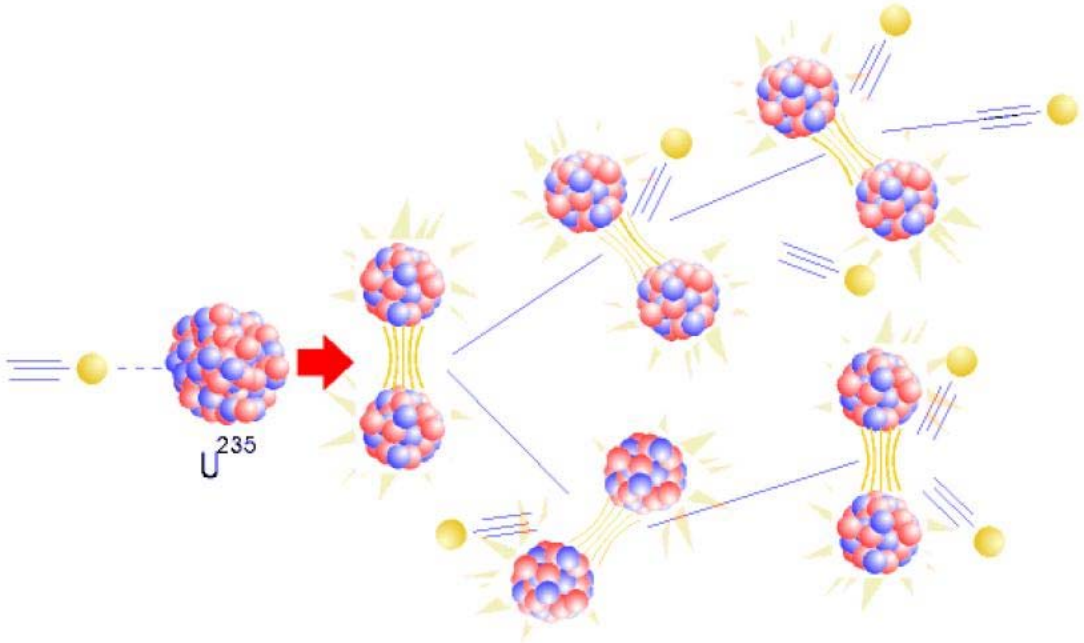



Figura 3.2 – Reação em Cadeia

A massa critica necessária para o funcionamento de um reator depende de um grande numero de fatores, porém para certo reator tem sempre um valor definido.

Assim, por exemplo, a massa critica de U-235 pode variar de menos de 1 kg, quando se trata de sistemas constituídos por soluções aquosas de um sal de urânio com 90% de isótopo físsil, até mais de 200 kg que conteriam 30 toneladas de urânio natural incrustadas em uma matriz de grafite. O urânio natural somente, com um conteúdo aproximado de 0,7% de U-235 não pode alcançar a criticidade, por maior que seja a sua massa, devido às perdas excessivamente grande de nêutrons por reações distintas da fissão.

## *3.4 CARACTERÍSTICAS DOS REATORES DE FISSÃO NUCLEAR*

Apesar das variedades de sistemas de reatores nucleares, tanto no que se refere ao desenho e componentes, existem certo numero de características gerais que todos esses sistemas possuem em comum, em maior ou menor grau. Um reator consta de um núcleo ativo, no qual se mantém a cadeia de fissões e onde se libera quase toda a energia de fissão na forma de calor. O núcleo de reator contem o combustível nuclear, constituído por um nuclídeo físsil. Na maioria das vezes queremos que a fissão seja feita por nêutrons lentos, o que necessita o uso de um moderador. A função do moderador é de frear os nêutrons de grande energia procedentes da reação de fissão, principalmente por meio de colisões de dispersão elástica. Os melhores moderadores são aqueles materiais que são formados por elementos de número de massa pequeno, com pouca probabilidade de capturar nêutrons; como exemplos desta classe têm a água comum, água pesada (óxido de deutério) e hidrocarbonetos. A natureza do combustível e do moderador, assim como as proporções relativas a ambos, determina as energias da maioria dos nêutrons que produzem fissão.

O núcleo do reator está cercado por um refletor de nêutrons, constituído por um material cuja natureza é determinada, em grande parte, pela distribuição energética dos nêutrons existentes no reator. A função do refletor é reduzir a perda de nêutrons por escape, contradispersando parte dos que conseguiram escapar. Por conseguinte, o uso de refletor ocasiona uma diminuição na massa critica do núcleo físsil. Se o núcleo possui um moderador de nêutrons, pode-se utilizar como refletor esse mesmo material

ou outro moderador. Se o reator for do tipo que exige nêutrons de alta energia, deve-se evitar a presença de materiais moderadores; nesse caso, o refletor deve ser feito de algum material denso, ou seja, com elevado número de massa.

O calor gerado no núcleo de um reator, como conseqüência das fissões que ali tem lugar, se elimina os excessos por meio de um refrigerante adequado. Entre os refrigerantes usados, temos a água líquida, o sódio líquido, certos compostos orgânicos, os gases do ar, dióxido de carbono e hélio. Quando desejamos converter em energia elétrica a energia térmica produzida no reator, o calor do refrigerante é geralmente transmitido a um fluido de trabalho, com o objetivo de produzir vapor de água ou um gás a temperatura elevada. Esse vapor é utilizado num sistema convencional de turbina-gerador. Em alguns reatores, faz-se que a água ferva dentro do próprio núcleo do reator, ou seja, o calor gerado pela fissão é utilizado diretamente para produzir vapor.

Quanto maior a temperatura do vapor ou do fluido de trabalho usado, maior será o rendimento de conversão em potência útil. Por conseguinte, num reator de potência, interessa operar a mais alta temperatura possível. Alem disso, sob o ponto de vista econômico, interessa que a potência específica do reator, ou seja, a taxa de geração de calor por unidade de massa de material físsil seja elevada. No que se refere a considerações nucleares, não existem limites a temperatura ou nível de potencia que um reator pode alcançar. Isso significa que as limitações de operação são determinadas, na pratica, por questões tecnológicas e econômicas. A extração de calor deve ser feita num ritmo que permita ao refrigerante alcançar temperaturas elevadas, porém sem que se criem tensões térmicas ou temperaturas internas perigosamente altas, que poderiam causar danos irreparáveis ao reator.

A geração de calor num reator é proporcional ao número de fissões e este vem determinado em cada sistema pela densidade neutrônica, ou seja, o número de nêutrons por unidade de volume. Por isso, as operações de controle se realizam variando a densidade neutrônica no núcleo do reator. Isso é feito principalmente pela inserção de barras móveis de um material que captura nêutrons com facilidade, como cádmio ou boro.

### 3.4.1 Tipos de reatores

Existem muitas combinações de materiais e disposições possíveis para se construir um reator nuclear operacional. Devido a isso, temos várias classificações para os tipos de reatores:

a) quanto a finalidade:

- reatores de pesquisa e desenvolvimento, destinados a pesquisa e não objetivam a produção de energia elétrica. São úteis na produção de radio-isótopos, utilizados em aplicações medicas, por exemplo.

- reatores de produção e reatores de potencia são usados para o aproveitamento dos materiais férteis (U-238 e Th-232), a partir dos quais são fabricados os elementos físseis. Existem poucos reatores desse tipo. Podem ser facilmente adaptados para produção de combustível nuclear para armas.

- reatores de potência são os utilizados para produção de energia elétrica. Existem reatores fixos (os das centrais nucleares) e os móveis, utilizados em navios e submarinos.

b) quanto a energia dos nêutrons

Ainda que os reatores nucleares possam ser classificados de vários modos, a distinção mais fundamental é a que se baseia na energia cinética dos nêutrons responsáveis pela fissão. Quase todos os nêutrons liberados por fissão possuem energias elevadas e, por tanto, caso não exista um moderador no núcleo ou um refletor, a maioria das fissões serão produzidas por nêutrons rápidos. O reator que utiliza esse tipo de situação é chamado de reator rápido. O combustível de tais reatores deve conter uma proporção considerável de – por volta de 10% ou mais – de material físsil. O restante deve ser de alguma substância de número de massa elevado, já que os elementos de número atômico baixo freariam os nêutrons. Também se devem evitar materiais cujos elementos possam provocar dispersão inelástica e, portanto, moderação, de nêutrons moderadamente altos.

Se no núcleo do reator rápido, ou no que se chama de capa fértil em torno do mesmo, existe uma espécie fértil, esta se converterá em físsil por captura neutrônica. O número de capturas inúteis – ou parasitas – de nêutrons rápidos é relativamente

pequeno, de modo que, se mantém mínima a perda de nêutrons por escape, cabe a possibilidade de que se disponha de mais de um nêutron, por fissão, para a conversão de núcleos férteis em físseis. Nessas condições, é possível que se produza mais material físsil, por captura neutrônica, do que se consume por fissão.

Quando o nuclídeo físsil produzido é idêntico ao empregado para produzir a fissão em cadeia, o reator se denomina reprodutor. Um reator rápido que utilize Pu-239 como combustível e U-238 como espécie fértil, pode atuar como reator de potência e reprodutor, gerando energia e, ao mesmo tempo, produzindo mais Pu-239 do que consome. Também é possível um reator rápido análogo, reprodutor e de potencia, que utilize U-233 e Th-232 como nuclídeos físseis e férteis, respectivamente. Parece, entretanto, que a reprodução nesse sistema pode lograr-se em reatores de outros tipos, com vantagens sobre os reatores rápidos.

As reservas de U-235, único material físsil existente na Natureza, são pequenas. Por conseguinte, chegará ao fim algum dia, com o esgotamento das reservas de todo U-235 aproveitável. O aproveitamento do U-238 e do Th-232 dependerá do emprego de U-239 e U-233 para manter a fissão em cadeia. Por esse motivo, são importantes os reatores reprodutores, que produzem e consomem nuclídeos físseis.

Quando o núcleo do reator contém uma proporção considerável de moderador, a elevada energia dos nêutrons de fissão cai rapidamente a região térmica. A maior parte das fissões em reatores desse tipo, que são chamados de reatores térmicos, será produzida por nêutrons térmicos ou lentos. Os reatores térmicos têm sobre os rápidos a vantagem de serem mais flexíveis em termos de desenho, podendo-se fazer escolhas entre diversos moderadores, refrigerantes e materiais combustíveis. Em contrapartida, os reatores rápidos são bem menores.

c) quanto à combinação moderador e refrigerante:

Existem diversas combinações possíveis de moderador e refrigerante, destacando-se:

| Tabela 3.3 – Combinações de Moderador e Refrigerante | |
|---|---|
| **Moderador** | **Refrigerante** |
| **Água leve** | **Água leve** |
| **Água pesada** | **Dióxido de carbono** |
| **Grafite** | **Hélio** |
| **Berílio** | **Sódio líquido** |

d) quanto ao combustível:

O urânio com teor de U-235 variando do urânio natural (0,7%) a levemente enriquecido (3%) a altamente enriquecido (90%) é empregado em vários reatores, com o enriquecimento dependendo do conjunto. Os nuclídeos físseis Pu-239 e U-233 são produzidos e consumidos em reatores contendo quantidades significativas de U-238 ou Th-232. O Pu-239 serve como combustível para reatores rápidos regeneradores e podem ser reciclados como combustível para reatores térmicos. O combustível pode ter várias apresentações físicas: metal ou liga, composto $UO_2$, UC, etc.

e) quanto à disposição:

Pode-se isolar o combustível do refrigerante, formando a chamada disposição heterogênea, que é a mais utilizada. Outras disposições são as chamadas homogêneas, onde se tem a mistura de combustível e moderador ou combustível e moderador-refrigerador.

f) quanto aos materiais estruturais

As várias funções num reator são usadas para dar nome a certo tipo de reator. Alguns dos reatores de potencia mais utilizados são:

| Tabela 3.4 – Reatores de potência | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Água Pressurizada (PWR) | Água em Ebulição (BWR) | Água pesada e urânio natural (CANDU) ou PHWR | Refrigerado a gás, alta Temperatura (HTGR) | Regenerador Rápido com Metal líquido (LMFBR) |
| Combustível | $UO_2$ | $UO_2$ | $UO_2$ | $UC_2$,$ThC_2$ | $PuO_2$, $UO_2$ |
| Enriquecimento | U-235 a 3% | U-235 a 2,5% | U-235 a 0,7% | U-235 a 93% | Pu-239 a 15% |
| Moderador | Água | Água | Água pesada | Grafite | Nenhum |
| Refrigerante | Água | Água | Água pesada | Hélio gasoso | Sólido líquido |
| Revestimento | Zircaloy | Zircaloy | Zircaloy | Grafite | Aço inoxidável |
| Controle | Hastes de $B_4C$ ou Ag-In-Cd | Cruzes de $B_4C$ | Nível do moderador | Hastes de $B_4C$ | Tântalo ou hastes de B4C |
| Vaso | Aço | Aço | Aço | Concreto protendido | Aço |
| **PWR – Pressurized Water Reactor**<br>**BWR – Boiling Water Reactor**<br>**CANDU – Canadianuranium-deuterium** | | | **HTGR - High Temperature gás-cooled Reactor**<br>**LMFBR – Liquid Metal Fast Breeder Reactor**<br>**PHWR – Pressurised Heavy Water Reactor** | | |
| Fonte: Murray, 2004 | | | | | |

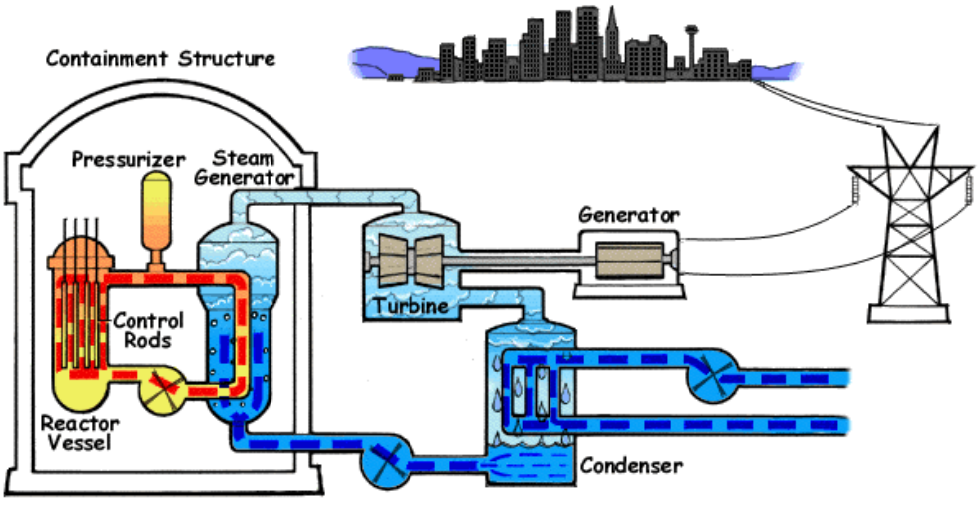



Figura 3.3 – Reator PWR

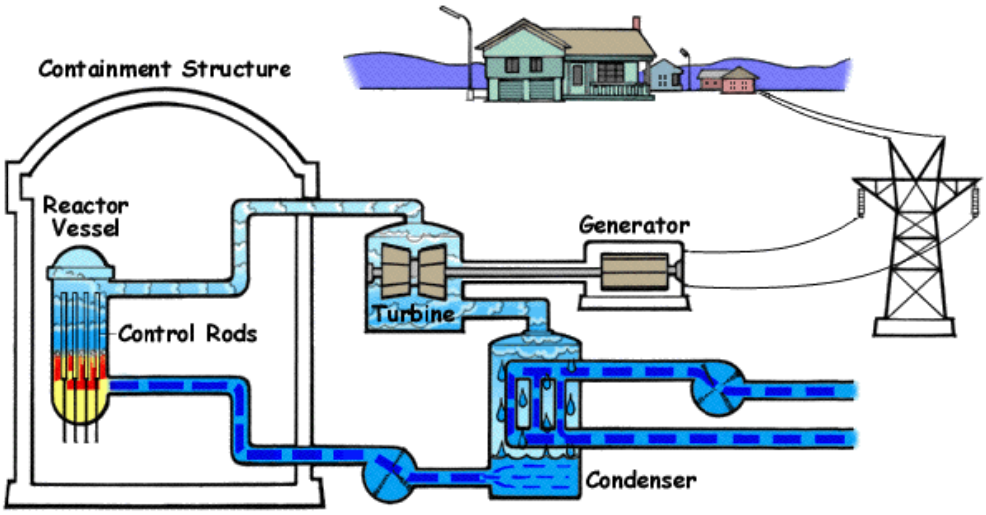



Figura 3.4 – Reator BWR

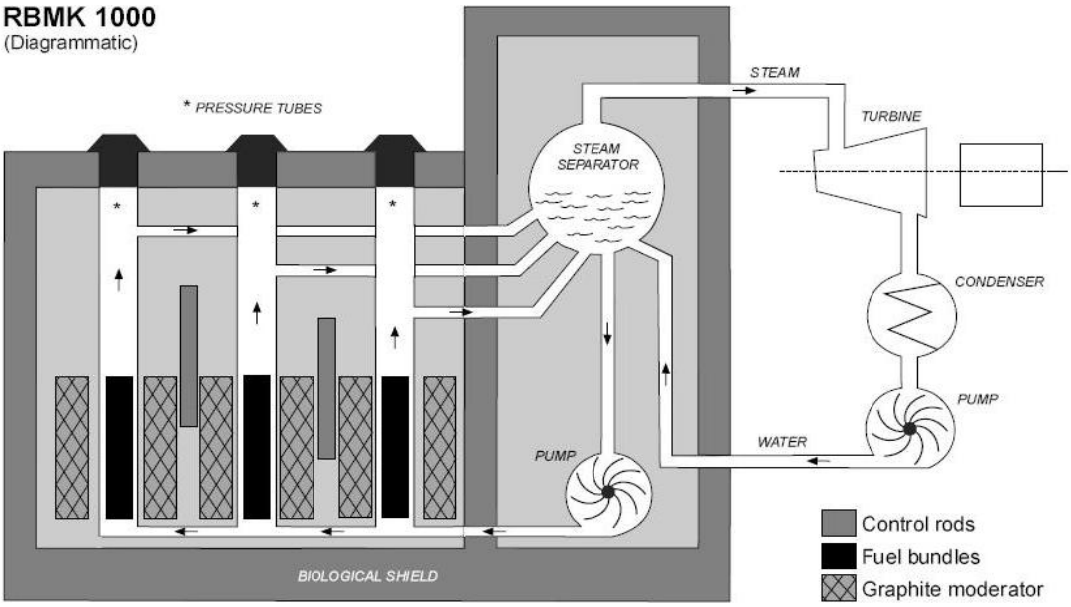



Figura 3.5 – Reator RBMK (reator pressurizado da água com canaletas individuais de combustível), utilizado em Chernobyl

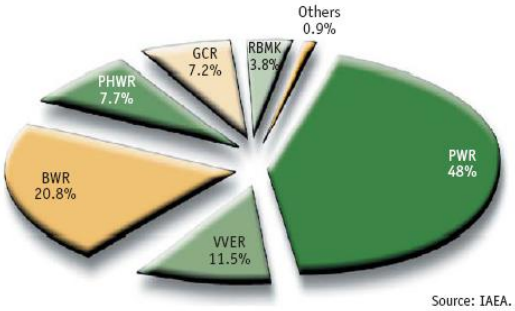



Figura 3.6 – Tipos de reatores em uso no mundo

### 3.4.2 Reatores nucleares de quarta geração

Reatores de Quarta geração (Gen IV) é um conjunto de projetos de reatores nucleares teóricos que estão atualmente sendo pesquisados. Em geral não se espera que estes projetos tenham aplicação comercial antes de 2030. Os reatores em operação atualmente no mundo são geralmente considerados sistemas de segunda ou terceira geração. As pesquisas deste tipo de reator começaram oficialmente no Fórum Internacional da Quarta Geração (Generation IV International Forum (GIF)) que propôs oito objetivos tecnológicos. Os objetivos primários são: melhorar a segurança nuclear, melhorar a resistência à proliferação, minimizar a produção de lixo nuclear e a utilização de recursos naturais e diminuir o custo da construção e operação das centrais nucleares.

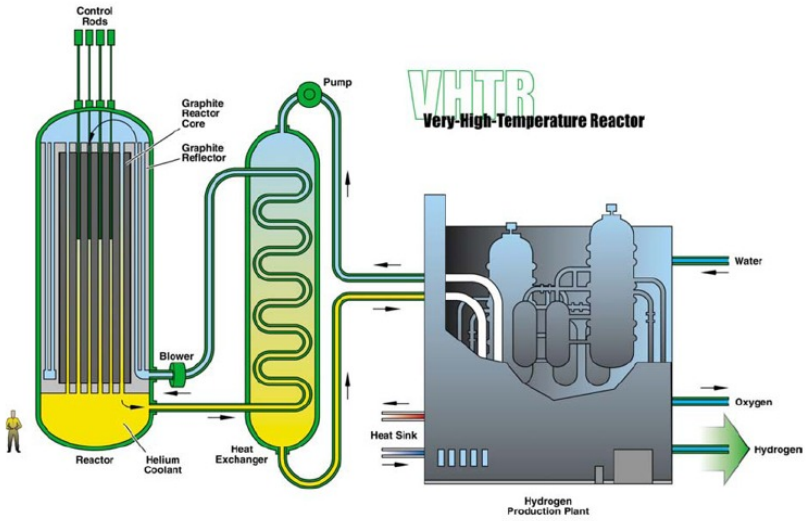



Figura 3.7 – Um exemplo de reator de quarta geração

# CAPÍTULO 4

# O COMBUSTÍVEL NUCLEAR

## *4.1 INTRODUÇÃO*

A produção de combustível nuclear, sua utilização no reator e a recuperação de materiais físseis e férteis, constituem o ciclo do combustível. Representa este ciclo um aspecto importante do projeto de um reator, devido principalmente a sua influência sobre a economia da energia nuclear. Em primeiro lugar, o processo de mineração do urânio para conversão em um material de grande pureza que possa ser utilizado como combustível exige um esforço considerável; o combustível pode ser urânio metálico, oxido de urânio ou até um sal solúvel em água como o sulfato de urânio. Más a maioria dos reatores utiliza urânio enriquecido com o isótopo físsil U-235, ou seja, numa proporção maior do que a encontrada em estado natural. Devido a isso, deve-se incluir na preparação dos materiais combustíveis, um processo de separação isotópica.

A vida do combustível de um reator depende de diversos fatores:

a) alterações dimensionais dos elementos combustíveis sólidos,

b) acumulação de produtos de fissão “venenosos”, especialmente em reatores térmicos,

c) esgotamento do material físsil.

Normalmente é preciso substituir o combustível quando apenas uma pequena percentagem do total de espécies físseis e férteis fora consumida. Os materiais não usados são reciclados para reutilização. Apesar da pequena utilização de material físsil, a radioatividade intensa dos produtos de fissão introduz um problema peculiar com relação ao tratamento de combustíveis usados.

Os processos de separação do urânio, plutônio e produtos de fissão, podem ser bastante complexos, dependendo da forma em que se encontram no reator. Em particular, os reatores térmicos requerem um alto grau de descontaminação, ou seja, de eliminação de produtos de fissão, com o objetivo de reduzir ao mínimo a quantidade de absorvedores neutrônicos. Esse problema é menos grave quando se trata de

combustível para reatores rápidos, devido a que, em geral, a probabilidade de captura sem fissão de nêutrons rápidos é pequena. Em qualquer caso, no entanto, a eliminação de produtos de fissão radioativos é sempre necessária, para que no final se possa fabricar-se o material recuperado até dar-lhe uma forma especifica, sem que exista um risco biológico.

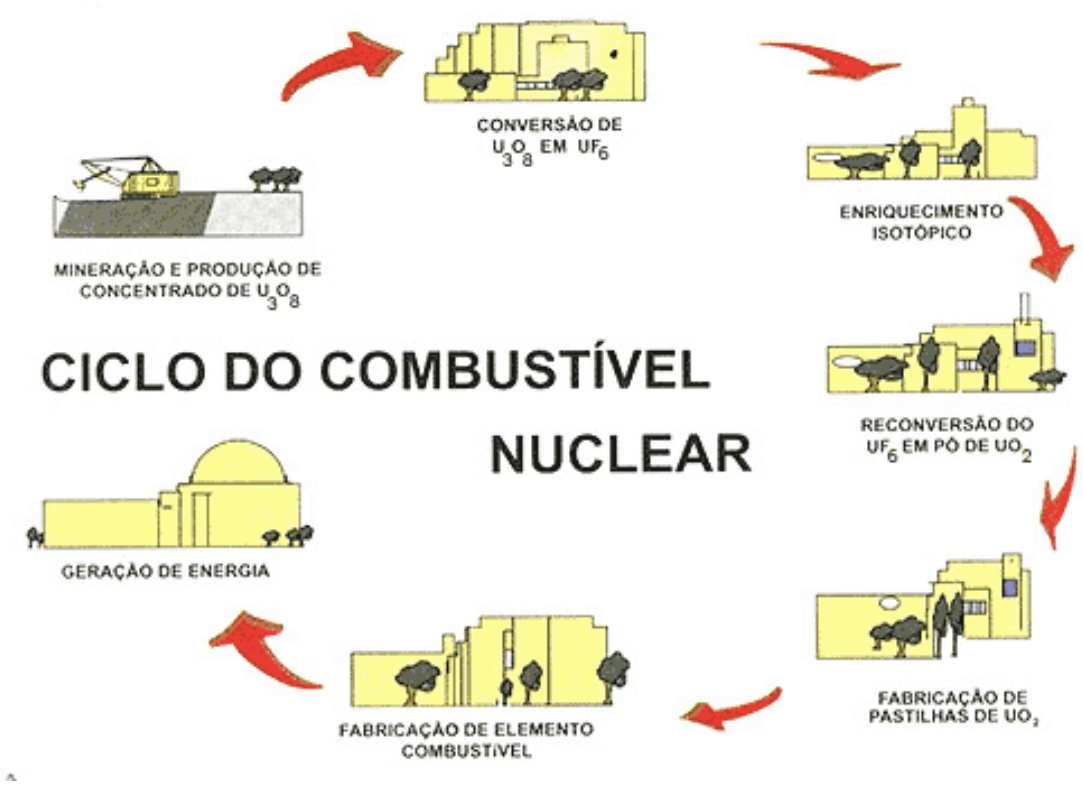



Figura 4.1 – O ciclo do combustível nuclear

## *4.2 O ENRIQUECIMENTO DO URÂNIO*

Do minério de urânio até a obtenção do metal urânio vai um longo trabalho. Foram desenvolvidos vários processos de enriquecimento de urânio, entre eles o da difusão gasosa e da ultracentrifugação (em escala industrial), o do jato centrífugo (em escala de demonstração industrial) e um processo a Laser (em fase de pesquisa). Por se tratarem de tecnologias sofisticadas, os países que as detêm oferecem empecilhos para que outras nações tenham acesso a elas.

O processo de coletar o urânio natural, contendo 0,7% de U-235, 99,3% de U-238 e traços de U-234, e retirar uma quantidade de U-238 para aumentar a concentração de U-235, é conhecido como enriquecimento. O melhor processo é aquele que envolve o menor custo de produção. Para a produção de 1 kg de U-235 enriquecido entre 3 e 3,5 % é necessário o consumo de cerca de 2.300 kWh.

**Tabela 4.1 – Aplicações do urânio enriquecido**

| Nível de pureza | Aplicação |
|---|---|
| **0,72%** | **Urânio natural** |
| **3-4%** | **Usinas nucleares** |
| **40%** | **Barcos e submarinos russos** |
| **80%** | **Barcos e submarinos americanos** |
| **90%** | **Bombas nucleares** |

Para separar o isótopo de U-235 do U-238, o método mecânico se mostrou eficiente, utilizando uma máquina centrífuga para separação. A taxa de conversão é da ordem de 500 partes de minério para se obter 1 parte de metal. Desta parte, mais de 99% é de U-238, sem finalidade na indústria nuclear.

Em termos simples, a ultracentrífuga segue o mesmo princípio das centrífugas domésticas, usadas para preparar alimentos: propicia a separação do material de maior peso, que é jogado para a parede do recipiente, daquele de menor peso, que fica mais concentrado no centro. No processo chamado de enriquecimento acontece algo

semelhante.

O U-235 é apenas ligeiramente mais leve que o U-238, adiciona-se flúor ao metal, formando o gás hexafluoreto de urânio. Para o combustível nuclear interessa apenas o isótopo U-235, que é físsil. E como no urânio natural há uma quantidade muito pequena de U-235, é preciso fazer essa separação, ou aumentar a concentração do urânio físsil.

Dentro da centrífuga, o isótopo de urânio U-235 tende a concentrar-se mais no centro, e o U-238 fica mais próximo à parede do cilindro. Duas tubulações de saída recolhem o urânio, sendo que numa delas segue o urânio que tiver maior concentração de isótopos U-235 (urânio enriquecido), e na outra, o que tiver mais U-238 (chamado de subproduto).

Dessa centrífuga o urânio é repassado para outra centrífuga e assim por diante, num processo em cascata. No final dessa cascata é recolhido o urânio com maior nível de enriquecimento, enquanto que na base permanece o subproduto. Através de uma tubulação, o hexafluoreto de urânio ($UF_6$) é aquecido em uma autoclave a 100°C, adicionam-se outras substâncias, dando origem ao tricarbonato de amônia uranila. Quando o gás passa por um filtro o pó de dióxido de urânio ($UO_2$) fica retido e é prensado e aquecido a 1.750°C.

O aproveitamento unitário das centrífugas é muito pequeno, sendo, portanto necessário uma bateria de máquinas para permitir a obtenção de maior quantidade de urânio enriquecido.

Enquanto não dominava o processo de enriquecimento, que aumenta a porcentagem do isótopo U-235, este era feito, na Alemanha e Holanda, pelo consórcio europeu URENCO.

A conversão de urânio é o processo que consiste na transformação de concentrados de urânio, o chamado "yellow cake". O material volta ao país como hexafluoreto de urânio ($UF_6$). Com ele, as Indústrias Nucleares do Brasil fabricam, em Resende (RJ), as pastilhas de dióxido de urânio ($UO_2$), que abastecem o reatores de Angra.

## *4.3 OCORRÊNCIA DO URÂNIO NO MUNDO*

Encontram-se vestígios de urânio em quase todas as rochas sedimentares da crosta terrestre, embora este não seja muito abundante em depósitos concentrados. O minério de urânio mais comum e importante é a uraninita, composta por uma mistura de $UO_2$ com $U_3O_8$. O maior depósito do mundo de uraninita situa-se nas minas de Leopoldville no Congo, na África. Outros minerais que contêm urânio são a euxenita, a carnotita, a branerita, a torbernite e a coffinita. Os principais depósitos destes minérios situam-se nos EUA, Canadá, Rússia e França.

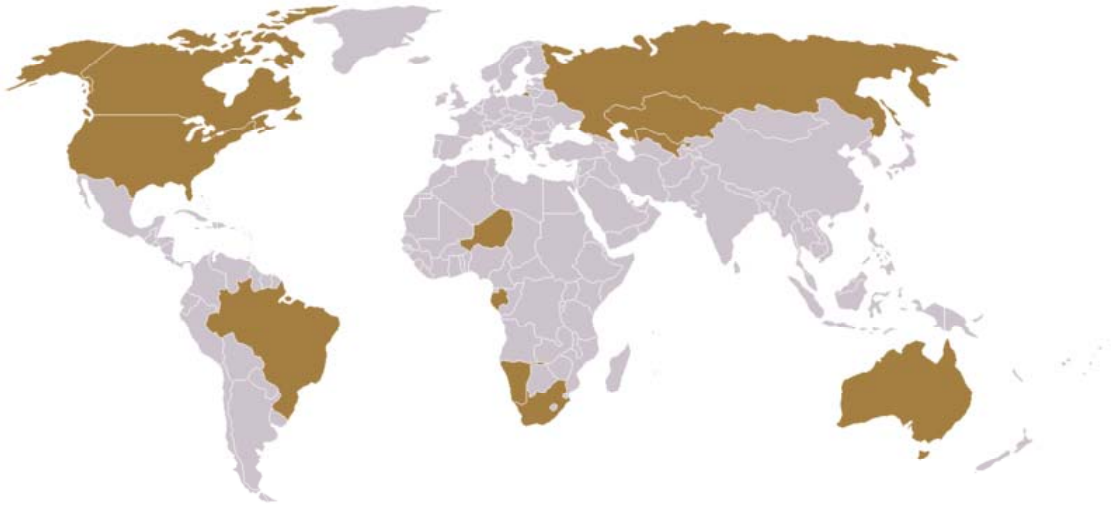


Figura 4.2 – Principais reservas de urânio no mundo

Embora exista urânio sobre toda a crosta terrestre, as reservas economicamente exploráveis são aquelas com custo de exploração inferior a US$ 130,00/kg. Segundo esse critério, temos a seguinte distribuição:

| Tabela 4.2 – Reservas mundiais de urânio | | |
|---|---|---|
| **País** | **Reservas** | |
| | Toneladas de urânio | **%** |
| **Cazaquistão** | 957.000 | **21,7** |
| **Austrália** | 910.000 | **20,6** |
| **África do Sul** | 369.000 | **8,4** |
| **Estados Unidos** | 355.000 | **8,0** |
| **Canadá** | 332.000 | **7,5** |
| **Brasil** | 309.000 | **7,0** |
| **Namíbia** | 287.000 | **6,5** |
| **Outros** | 897.000 | **20,3** |
| **Total** | 4.416.000 | **100,00** |
| **Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A. - INB** | | |

O Brasil, segundo dados oficiais (INB - Indústrias Nucleares do Brasil S.A.), ocupa a sexta posição no ranking mundial de reservas de urânio (por volta de 309.000t de $U_2O_8$). Segundo esta empresa, apenas 25% do território nacional foi objeto de prospecção, e as duas principais delas são a de Caetité (mina Lagoa Real), e Santa Quitéria (Ceará).

Figura 4.3 – Localização das reservas brasileiras de urânio

Descoberta em 1976, a mina de Caetité é feita a céu aberto, numa das 33 ocorrências localizadas numa faixa com cerca de 80 km de comprimento por 30 a 50 km de largura. Localizada a 20 km da sede do município, o complexo instalado produz um pó do mineral, conhecido por yellow cake. Esta reserva possui um teor médio de 3.000 ppm (partes por milhão), capaz de suprir dez reatores do porte de Angra 2 durante toda sua vida útil.

## *4.4 O TÓRIO (Th-232)*

O Th-232 é outro elemento, inclusive mais abundante que o urânio, que pode ser empregado como matéria prima para a produção de combustível nuclear.

Em estado puro, ele não entra em reação em cadeia, pois não se fissiona. Porém, se submetido a um intenso fluxo de nêutrons num reator, se converte no isótopo artificial U-233, que assim como o U-235 e o Pu-239.

## *4.5 PRINCIPAIS PAÍSES ENRIQUECEDORES*

No momento os serviços de enriquecimento estão sendo oferecidos por quatro supridores principais, USEC-"United States Enrichment Corp.", substituindo o DOE-"Department of Energy" dos Estados Unidos, COGEMA/EURODIF (França e associados), a TENEX/ MINATOM (Ministério de Energia Atômica da Rússia ) e URENCO (Reino Unido, Holanda e Alemanha) e por dois outros supridores de menor porte, a CNEIC-"Chinese Nuclear Energy Industry Co." e JNFL-"Japan Nuclear Fuels Ltd".

Os processos industriais empregados são a difusão gasosa, empregado pela USEC, EURODIF e CNEIC. A centrifugação é empregada pela URENCO, MINATOM, JNFL e CNEIC. Os outros métodos (Laser, CRISLA, etc.), ainda se encontram no estágio de pesquisa e desenvolvimento.

A URENCO possui a mais avançada tecnologia em operação comercial, suprindo serviços de enriquecimento para 15 países. A URENCO movimentou em 2003 US$ 18 bilhões e está em franco crescimento.

No Brasil, a INB (Indústrias Nucleares Brasileiras) é uma empresa de economia mista, vinculada à Comissão Nacional de Energia Nuclear - (CNEN) e subordinada ao Ministério da Ciência e Tecnologia. Está presente nos estados da Bahia, Ceará, Minas Gerais e Rio de Janeiro, participando ativamente, junto à sociedade brasileira, com o desenvolvimento de importantes projetos tecnológicos para geração de energia nucleoelétrica.

Responde pela exploração do urânio, desde a mineração e o beneficiamento primário até a produção e montagem dos elementos combustíveis que acionam os reatores de usinas nucleares. O conjunto dessas atividades constitui o Ciclo do Combustível Nuclear. Atua também na área de tratamento físico dos minerais pesados com a prospecção e pesquisa, lavra, industrialização e comercialização das areias monazíticas e obtenção de terras-raras.

| Tabela 4.3 – Urânio comercial e capacidade de enriquecimento (tSWU/ano) | | |
|---|---|---|
| **País** | Método | |
| | Difusão gasosa | Centrifugação |
| **Brasil** | - | 120 |
| **China** | 900 | 1.000 |
| **França** | 10.800 | - |
| **Alemanha** | - | 1.800 |
| **Índia** | - | 5 |
| **Irã** | - | 250 |
| **Japão** | - | 1.250 |
| **Holanda** | - | 2.900 |
| **Paquistão** | - | 5 |
| **Rússia** | - | 15.000 |
| **Reino Unido** | - | 3.400 |
| **Estados Unidos** | 11.300 | - |
| | 23.000 | 22.730 |
| | | 48.730 |

**Notas:**

**a) As capacidades de Israel e da Coréia do Norte não são conhecidas**

**b)Existem diversas plantas militares e de pesquisa, que não estão contabilizadas**

**c) Fonte: AIEA**

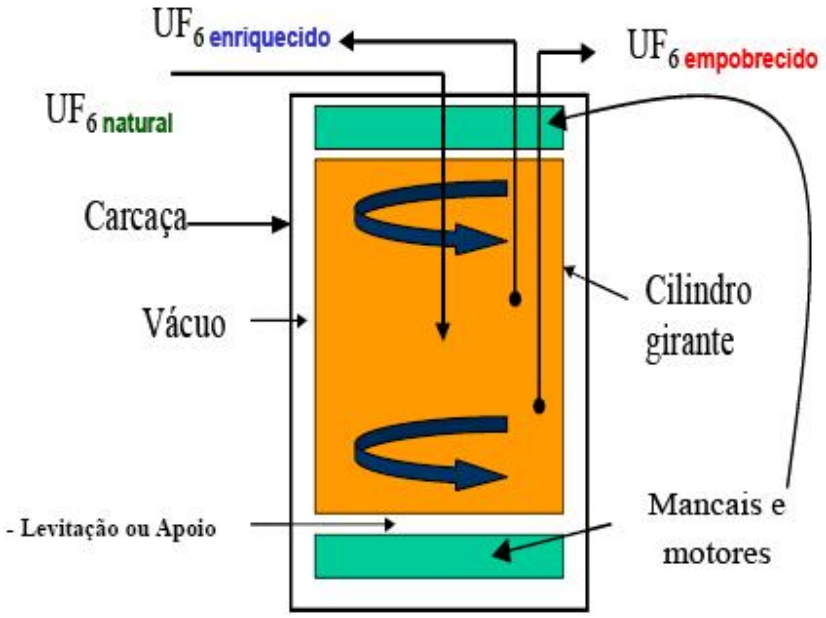



Figura 4.4 - Ultracentrífuga usada pelo Brasil

## *4.6 FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS*

Os reatores a água (PWR, BWR, PHWR e LWGR) estão sendo empregados comercialmente há mais de 30 anos. Aproximadamente 96% da capacidade mundial instalada em centrais nucleares são com estes tipos de reatores e 88% é com centrais nucleares com reatores a água leve do tipo PWR e BWR. Os combustíveis para todas estas centrais são hoje fabricados em 21 países.

A demanda de combustível para todos os tipos de usinas, com exceção de combustível MOx e FBR, foi de cerca de 60% da capacidade total instalada. No momento a capacidade instalada de fabricação de combustível do tipo LWR, a demanda em pelo menos 70%.

Uma série de países está considerando a construção/expansão de fábricas de elementos combustíveis. Estes países ou já tem um programa de centrais nucleares estabelecidos (Ucrânia, China, República da Coréia, México e Romênia) ou estão na fase inicial de implantação de um programa (Indonésia, Egito e Turquia). Por outro lado um grupo de países com programas de centrais nucleares já estabelecidos (Finlândia, Suíça, etc.) não possuem fábricas de elementos combustíveis e não tem planos para

implantá-las.

O preço do elemento combustível depende de uma série de fatores como tipo de combustível utilizado, inclusão ou não de esquemas de gestão do combustível no núcleo, treinamento, etc.

O reprocessamento dos elementos combustíveis descarregados dos reatores visa a separação do material físsil e fértil, principalmente plutônio e urânio, dos produtos de fissão, para eventual uso posterior como combustível. O reprocessamento constitui-se em uma tecnologia comprovada e os seus serviços estão disponíveis em nível comercial para todas as empresas de energia elétrica do mundo.

O reprocessamento só se aplica naqueles casos em que se considera o fechamento do ciclo, com extração do urânio residual e plutônio para serem reciclados no reator. Naqueles casos em que o reprocessamento não é utilizado há os custos para a estocagem do combustível descarregado.

## *4.7 CUSTO DO CICLO DO COMBUSTÍVEL*

No caso da geração nuclelétrica o custo do combustível incide sobre o custo final de geração em cerca de 20-25%. Considerando-se as condições atuais de mercado para os diferentes serviços e materiais do ciclo do combustível, um fator de capacidade de 70% da usina nuclear, o custo do combustível,incluindo a primeira carga, varia de US$ 4 a 12/MWh para um ciclo fechado e de US$ 3,5 a 11/MWh para um ciclo aberto com previsão para estocagem definitiva do combustível irradiado.

No caso brasileiro a INB está fornecendo combustível a ELETRONUCLEAR que leva a um custo do ciclo de cerca de US$ 8,5/MWh, ciclo aberto, indicando que seus custos estão dentro da gama dos custos internacionais.

# CAPÍTULO 5

# OS SUBPRODUTOS DA FISSÃO NUCLEAR: O LIXO

O lixo radioativo é produzido em todos os estágios do ciclo do combustível nuclear- desde a mineração do urânio até o reprocessamento de combustível nuclear irradiado. Grande parte desse lixo permanecerá radioativo por milhares de anos, deixando uma herança mortal para as futuras gerações. Portanto, o grande desafio é como mantê-lo em condições seguras e invioláveis por tanto tempo. Mas, embora tudo isto seja aterrorizante, a Agência Internacional de Energia Atômica informa que o que há de lixo radioativo, depois de 50 anos de uso comercial da energia nuclear, não enche um estádio de futebol.

Durante o funcionamento de um reator nuclear são criados isótopos radioativos extremamente perigosos - como césio, estrôncio, iodo, criptônio e plutônio. O plutônio é particularmente perigoso, já que pode ser usado em armas nucleares se for separado do combustível nuclear irradiado por meio de um tratamento químico chamado reprocessamento.

Como parte da operação de rotina de toda usina nuclear alguns materiais residuais são despejados diretamente no meio ambiente. O resíduo líquido é descarregado junto com a "água de resfriamento da turbina" no mar ou em rio próximo à usina e os resíduos gasosos vão para a atmosfera. Em ambos os casos, a vazão destes efluentes é controlada para que não altere a radioatividade natural (background) do meio ambiente.

Mundialmente são gerados 10.000 t/ano de resíduos radioativos. Os EUA dispõem de Yucca Mountain, local capaz de estocar 70.000 t ao custo de 15 bilhões de dólares.

Para que a energia nuclear substituísse o petróleo como combustível para geração elétrica seria necessária que sua participação aumentasse até 30% em meados de 2020, com isto a geração de resíduos chegaria a 40.000 t/ano.

## *5.1 ORIGENS DOS REJEITOS RADIOATIVOS*

Há três categorias de lixo radioativo:

a) resíduo de alto nível (HLW, de high level waste);

Dentro da categoria HLW existe a subcategoria SNF (spend nuclear fuel), que é formada por isótopos que NÃO PODEM se reciclados).

b) rejeito de nível intermediário (ILW, intermediate level waste);

c) rejeito de baixo nível (LLW, de low level waste).

O HLW consiste principalmente de combustível irradiado proveniente dos núcleos de reatores nucleares e de rejeitos líquidos de alta atividade produzidos durante o reprocessamento. A remoção de plutônio pelo reprocessamento resulta num imenso volume de rejeito líquido radioativo. Parte desse rejeito de reprocessamento, armazenado em grandes tanques, é misturado com material vitrificante quente. Novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas, como os ADS - Accelerator Driven Systems, que podem usar o lixo como combustível e assim reduzem o tempo de armazenamento em centenas de anos.

Os blocos de vidro resultantes também são classificados como HLW e ainda que o processo de vitrificação possa tornar mais fácil o transporte e o armazenamento, de forma alguma diminuem as emissões radioativas.

Figura 5.1 – Bloco de vidro rejeitos HLW

O ILW consiste principalmente de "latas" metálicas de combustível que originalmente continham urânio combustível para usinas nucleares, peças de metal do reator e rejeitos químicos. Têm de ser blindadas para proteger operários e outras

pessoas contra a exposição durante o transporte e a destinação final. O ILW, de maneira geral, é muito mais radioativo que o LLW.

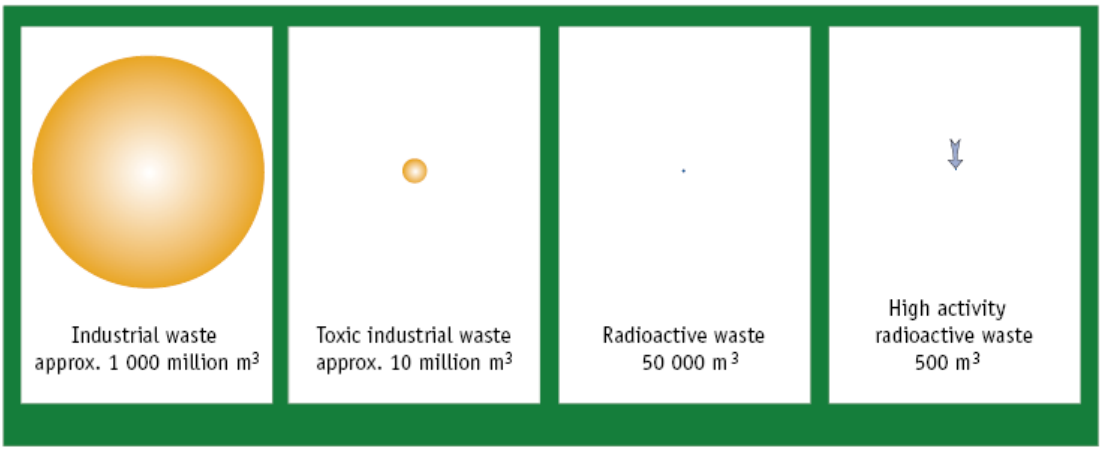
O LLW pode ser definido como o rejeito que não requer blindagem durante o manuseio normal e o transporte. O LLW consiste principalmente de itens como roupas de proteção e equipamentos de laboratório que possam ter entrado em contato com material radioativo.

**Tabela 5.1 – Principais HLW (resíduos de alto nível)**

| Isótopo | Meia-vida aproximada (anos) |
|---|---|
| **Estrôncio-90** | **29** |
| **Césio-137** | **30** |
| **Amerício-241** | **430** |
| **Amerício-243** | **7.400** |
| **Plutônio-239** | **24.000** |
| **Tecnécio-99** | **213.000** |
| **Fonte: http://www.nea.fr/html/pub/nuclearenergytoday/welcome.html** | |

**Tabela 5.2 – Produção anual de resíduos radioativos ($m^3$ por ano) gerada por uma planta de 1.000MWe**

| Tipo de resíduo | Após uma passagem pelo ciclo | Reciclando o combustível |
|---|---|---|
| **LLW/ILW** | 50-100 | **70-190** |
| **HLW** | 0 | **15-35** |
| **SNF** | 45-55 | **0** |
| **Fonte: http://www.nea.fr/html/pub/nuclearenergytoday/welcome.html** | | |




Source: *Nuclear and Renewable Energies* (Rome: Accademia Nazionale dei Lincei, 2000), updated with data from the European Commission, *Radioactive Waste Management in the European Union* (Brussels: EC, 1998).

Figura 5.2 – Comparação entre várias fontes de rejeitos
Valores por ano a Europa

## *5.2 O DESTINO FINAL*

O combustível nuclear altamente radioativo é retirado do reator e armazenado em piscinas de resfriamento no interior da própria usina. De acordo com estimativas da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), a quantidade total de combustível usado era de 125.000 t em 1992 e 200.000 t no ano 2000. Contudo, embora diversos métodos de destinação tenham sido discutidos durante décadas — incluindo o envio para o espaço — ainda não há solução para o lixo radioativo.

Já surgiram propostas para se dispor de tais resíduos, inclusive colocá-los em foguetes e dispará-los para o sol. A maioria das "soluções" atualmente propostas para a disposição final do lixo radioativo envolve seu enterro no subsolo numa embalagem especial com proteção forte o bastante para impedir que sua radioatividade escape.

Não bastam perfurações de teste ou levantamentos geológicos para o manejo do lixo radioativo. Os testes adequados demandariam dezenas de milhares de anos

Há dois riscos principais no enterro de lixo radioativo: a contaminação do ar e a da água.

### 5.2.1 Contaminação do ar

As liberações explosivas ou lentas de gases de um sítio de destinação final subterrâneo são possíveis teoricamente. Infelizmente, não há forma confiável de estimar esse risco - há incógnitas demais relativas aos atuais métodos de deposição e às interações químicas possíveis num ambiente real.

### 5.2.2 Contaminação da água

Geralmente este é considerado o mecanismo de poluição mais provável ligado à disposição final de rejeitos em rochas. Elementos radioativos podem vazar do invólucro e entrar em contato com o lençol freático, contaminando a água potável de comunidades locais e distantes.

Além do enterro dos rejeitos, vários esquemas de armazenamento no local de uso estão sendo investigados. Nisso, o armazenamento de combustível usado em grandes recipientes de aço ou concreto é de interesse primordial. Ainda que esse tipo de armazenamento conserve o material no ponto em que foi criado e reduza os custos de transporte, centenas de comunidades de todo o mundo estão ameaçadas de fato por depósitos de alto nível às suas portas. Também há planos para consolidar o combustível usado e colocá-lo em contêineres em algumas poucas instalações regionais de superfícies, o que resulta num número imenso de viagens em recipientes não destinados a resistir a possíveis acidentes.

## *5.3 O DESCOMISSIONAMENTO*

Grande quantidade de lixo radioativo também é produzida quando um reator nuclear é desativado. Isso porque muitas das peças que o compõem, incluindo o combustível, tornam-se radioativas. O processo de tratamento de uma usina nuclear nesse ponto é chamado "descomissionamento". Entretanto, além da remoção do combustível usado, não há consenso sobre o que deve acontecer a seguir. Nenhum reator de dimensões normais foi desmontado em lugar algum do mundo. Ainda que alguns países planejem retirar toda a estrutura, até mesmo as partes radioativas, restando um espaço plano desocupado; outros sugerem deixar a edificação onde está, cobrindo-a com concreto ou, possivelmente, enterrando-a sob um monte de terra.

O custo do descomissionamento dos reatores nucleares é objeto de muita especulação. As estimativas de custo originam-se de estudos genéricos, a partir da projeção dos custos de descomissionamento de pequenas instalações de pesquisa. O detalhamento e a sofisticação empregados no desenvolvimento dessas estimativas variam muito; a falta de padronização torna difíceis as comparações. Além disso, a limitada experiência de descomissionamento — nenhuma, se considerados reatores de grande porte — torna impossível saber se as estimativas são razoáveis, mas já se sugeriu que os custos de descomissionamento poderiam ser de até 100% do custo de construção inicial.

Nas próximas três décadas, mais de 350 reatores nucleares serão desativados. Quarenta anos depois de a primeira usina nuclear começar a produzir eletricidade, a indústria nuclear ainda não tem respostas sobre como desmantelar, de forma segura e economicamente eficiente, um reator.

# CAPÍTULO 6

# SEGURANÇA NAS USINAS NUCLEARES

## *6.1 INTRODUÇÃO*

Em geral, os três objetivos primários da segurança das usinas nucleares são:

a) Controle da reatividade, ou seja, a possibilidade de apagar a reação nuclear em cadeia de fissão. Esse controle deve ser intrínseco ao projeto.

Em Chernobyl não havia algo assim, deixando a interrupção da reação em cadeia nas mãos dos operadores.

b) Remoção do calor de decaimento.

Em Three Mile Island a falha nesse sistema contribuiu para o acidente.

c) Barreiras múltiplas para confinamento da radioatividade.

Os sistemas de segurança de um reator nuclear são de três tipos:

a) Sistemas ativos, que são sistemas baseados no controle ativo, elétrico ou mecânico, de equipamentos como válvulas, bombas, trocadores de calor, etc. e são projetados de forma redundante. Esta redundância ocasiona uma elevação enorme dos custos da planta nuclear.

b) Sistemas passivos, que independem de mecanismos complexos ou interferência humana para funcionarem, dependendo exclusivamente de fenômenos físicos, como a convecção, a gravidade, a resistência a altas temperaturas.

c) Sistemas inerentes são baseados na eliminação de um dado risco através da utilização de materiais específicos ou conceitos de projeto.

Os reatores de primeira e segunda geração confiavam exclusivamente em sistemas de segurança ativos e em características inerentes de segurança.

Com os reatores de terceira geração foram introduzidos os conceitos de segurança passiva e de diversificação e redundância dos sistemas de segurança.

Os reatores de quarta geração obedecerão a uma combinação de sistemas de segurança ativos, passivos e inerentes.

## *6.2 ESCALA INTERNACIONAL DE ACIDENTES NUCLEARES*

Em 1990 a AIEA e outros órgãos internacionais definiram a Escala Internacional para Eventos Nucleares (INES) como padrão internacional para definição dos acidentes nucleares no mundo todo. .

**Tabela 6.1 - Escala Internacional de Eventos Nucleares (INES)**

| | Nível<br>Descrição | Impacto fora da área da instalação | Impacto na área da instalação | Degradação da defesa em profundidade | Exemplos |
|---|---|---|---|---|---|
| **ACIDENTES** | 7<br>Acidente grave | Liberação grave - múltiplos efeitos para a saúde e o meio ambiente | | | Central nuclear de Chernobyl, Ucrânia, 1986 |
| | 6<br>Acidente sério | Liberação importante - possibilidade de exigência de aplicação integral das contramedidas previstas | | | Usina de reprocessamento de Kyshtym, Rússia, 1957 |
| | 5<br>Acidente com risco fora da área da instalação | Liberação limitada - possibilidade de exigência de aplicação parcial das contramedidas previstas | Danos graves no núcleo do reator/barreiras radiológicas | | Reator de Windscale, UK, 1957<br>Three Mile Island, EUA, 1979 |
| | 4<br>Acidente sem risco importante fora da área da instalação | Liberação pequena - exposição do público entorno dos limites prescritos | Danos importantes no núcleo do reator, barreiras radiológicas, exposição fatal de um trabalhador | | Central de Saint-Laurent, France, 1980<br>Takai-mura, Japão, 1999 |
| **INCIDENTES** | 3<br>Incidente sério | Liberação muito pequena - exposição do público a uma fração dos limites prescritos | Dispersão grave da contaminação, efeitos agudos sobre a saúde de um trabalhador | Quase acidente – perda total das barreiras de segurança | Central de Vandellos, Espanha, 1989 |
| | 2<br>Incidente | | Dispersão importante da contaminação, superexposição de um trabalhador | Incidente com falhas importantes nos dispositivos de segurança | |
| | 1<br>Anomalia | | | Anomalia além do regime de operação autorizado | |
| | 0<br>Abaixo da escala | Nenhuma importância com relação | | | |
| | Evento fora da escala | | | | |

**Fonte: Mongelli, 2006**

## *6.3 ANÁLISES DE SEGURANÇA*

O relatório de segurança de uma instalação nuclear é um documento extremamente importante e uma exigência normativa para o licenciamento e o exercício de uma planta nuclear.

No relatório de segurança a avaliação e a análise dos incidentes ocupam um papel fundamental e o objetivo de demonstrar que a planta é construída de maneira tal que:

a) A probabilidade de acontecimento de qualquer incidente seja pequena;

b) o acontecimento de um incidente de pequeno porte não cause danos a instalação;

c) As conseqüências de um incidente de grande porte sejam contidas sem arrecadar danos a população das redondezas.

O tema da análise de segurança pode ser enfrentado de um ponto de vista determinístico ou probabilístico.

Estes dois métodos não são alternativos, mas complementares. O método probabilístico introduz o conceito de risco aceitável e permite a identificação das possíveis seqüências de eventos indesejáveis e os possíveis pontos fracos de uma planta. O método determinístico atribui um limite concreto de gravidade de um incidente, sendo de grande utilidade para as autoridade supervisoras e para a opinião pública.

## *6.4 AVALIAÇÕES DE RISCOS DAS USINAS NUCLEARES ORIENTADA PELO PRINCÍPIO DA PRECAUÇÃO*

Alguns críticos dos métodos adotados para analisar os riscos das usinas nucleares afirmam que:

a) as avaliações são limitadas a uma avaliação caso a caso, de modo que cada situação é examinada separadamente, tendo como preposição que os efeitos que forem sendo identificados serão adicionados aos outros, sendo o efeito total o resultado da soma dos diversos efeitos individuais identificados. Os efeitos interativos são

desconsiderados.

b) as avaliações consideram apenas os perigos para os quais existem provas, de modo que, somente efeitos adversos para os quais existe relação causal e que tenham sido cientificamente aceitos pela comunidade científica são considerados.

c) as avaliações de risco são expressas de modo unidimensional e em termos de quantitativos, centrando o debate sobre a probabilidade de ocorrências ou de exposições, expressa em numero de óbitos, perdas financeiras, etc. Essa quantificação pressupõe que os parâmetros do comportamento nas pessoas e no meio ambiente em questão, podem ser conhecidos, testados e relativamente controlados, de modo que as chances de diferentes resultados podem ser definidas e quantificadas através de análises estruturadas de mecanismos probabilísticos.

d) as avaliações cabem somente aos especialistas, não cabendo ao cidadão comum participar do processo.

A concepção elitista de democracia que orienta as avaliações de riscos tem como maior preocupação manter a estabilidade de um determinado sistema ético, moral, social, cultural e político, em que são qualificados como racionais aqueles cujas ações se encontram em consonância com o sistema. Nessa concepção, apenas os “especialistas” podem são capazes de julgar e decidir pela coletividade.

Os interesses dos cidadãos são atendidos quando os processos decisórios de escolhas de tecnologias estão de acordo com os modelos técnicos de avaliações de riscos e consenso das elites.

As implicações disso são que as avaliações de riscos acabam sendo realizadas de modo descontextualizado com as circunstâncias praticas das atividades humanas e pouca atenção é dada ao impacto dos aspectos sistêmicos e interativos.

Podem-se identificar as seguintes limitações:

a) sabe-se que a maioria dos sistemas físicos possui uma dinâmica não-linear, o que significa que mudanças de longo prazo são muito difíceis de prever e que pequenas mudanças nas condições iniciais podem mudar a situação final radicalmente (Teoria do Caos);

b) por não serem fenômenos lineares, não podem ser antecipados com o uso de variáveis estatísticas simples.

c) todas as análises são baseadas em poucos casos e são extrapoladas.

Devemos levar em conta que muitos problemas envolvem eventos ou situações de riscos muito complexos, pois envolvem simultaneamente, fenômenos naturais e humanos, que se relacionam de forma muito elaborada.

Não podemos mais aceitar processos decisórios que são baseados em decisões que não levam em conta as atividades humanas. Temos que reconhecer os limites de nossas avaliações baseadas apenas em sistemas lineares.

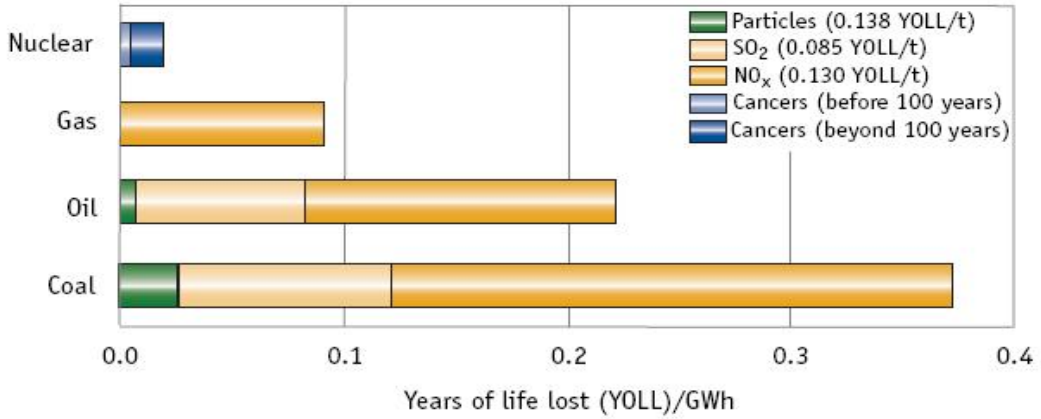



Figura 6.1 – Comparação de riscos a saúde para diversos sistemas energéticos

Devemos, pois, adotar o Princípio da Precaução, que é a garantia contra os riscos potenciais que, de acordo com o estado atual do conhecimento, não podem ser ainda identificados. Este Princípio afirma que a ausência da certeza científica formal, a existência de um risco de um dano sério ou irreversível requer a implementação de medidas que possam prever este dano.

O Princípio da Precaução não deve ser encarado como um obstáculo às atividades assistências e principalmente de pesquisa. É uma proposta atual e necessária como forma de resguardar os legítimos interesses de cada pessoa em particular e da sociedade como um todo. O Princípio da Precaução é fundamental para a abordagem de questões tão atuais e importantes como a produção de alimentos transgênicos e a clonagem de seres humanos. Reconhecer a existência da possibilidade da ocorrência de danos e a necessidade de sua avaliação com base nos conhecimentos já disponíveis é o grande desafio que está sendo feito a toda comunidade científica mundial.

Devemos sempre lembrar que risco baixo não significa ausência de risco.

## *6.5 REATORES COMERCIAIS E SUAS DEFICIÊNCIAS*

No início de 2005, havia 441 reatores nucleares, operando em 31 países. A idade, o tamanho e o tipo de projeto de todos esses reatores variam consideravelmente.

O projeto predominante é o Reator de Água Pressurizada (PWR), com 215 deles em operação. O projeto do PWR foi originalmente concebido para a propulsão de submarinos nucleares. Portanto, esses reatores são pequenos se comparados a outros modelos, mas possuem uma elevada potência energética. Trata-se de um modelo muito suscetível a corrosão dos componentes, já que a água atinge altíssimas temperaturas e pressões (aproximadamente 320$^{o}$C e 135 atm).

Vários defeitos foram encontrados nos PWR ao longo dos anos e mesmo assim, problemas novos foram encontrados há pouco tempo.

O mesmo ocorre com os outros reatores. Problemas novos aparecem, sem que possamos evitá-los.

Vale lembra o acidente que afundou a maior plataforma de petróleo da PETROBRAS e os resultados da análise do acidente:

"A Comissão de Sindicância que apurou o acidente da P-36 concluiu que foi uma seqüência de eventos que se alinharam de forma única e que, isoladamente, não teriam provocado seu afundamento. A Comissão fez recomendações para melhorar os processos internos, como os de emergência e de operação." - PETROBRAS em Ações/Julho de 2001

## *6.6 ACIDENTES IMPORTANTES*

Diversos acidentes e incidentes ocorreram em usinas nucleares. A seguir analisaremos os dois mais importantes.

### 6.6.1 Chernobyl

O acidente nuclear de Chernobyl ocorreu dia 26 de abril de 1986, na Usina Nuclear de Chernobyl (originalmente chamada Vladimir Lenin) na Ucrânia (então parte da União Soviética). É considerado o pior acidente nuclear da história da energia nuclear, produzindo uma nuvem de radioatividade que atingiu a União Soviética, Europa Oriental, Escandinávia e Reino Unido.

Grandes áreas da Ucrânia, Bielorrússia (Belarus) e Rússia foram muito contaminadas, resultando na evacuação e reassentamento de aproximadamente 200 mil pessoas. Cerca de 60% de radioatividade caiu em território bielorrusso.

O acidente fez crescer preocupações sobre a segurança da indústria nuclear soviética, diminuindo sua expansão por muitos anos, e forçando o governo soviético a ser menos secreto. Os agora separados países de Rússia, Ucrânia e Bielorrússia (Belarus) têm suportado um contínuo e substancial custo de descontaminação e cuidados de saúde devida ao acidente de Chernobyl. É difícil dizer com precisão o número de mortos causados pelos eventos de Chernobyl, devido às mortes esperadas por câncer, que ainda não ocorreram e são difíceis de atribuir especificamente ao acidente. Um relatório da ONU de 2005 atribuiu 56 mortes até aquela data – 47 trabalhadores acidentados e 9 crianças com câncer de tireóide – e estimou que cerca de 4000 pessoas morrerão de doenças relacionadas ao acidente. O Greenpeace, entre outros, contesta as conclusões do estudo.

O governo soviético procurou esconder o ocorrido da comunidade mundial, até que a radiação em altos níveis foi detectada em outros países. Segue um trecho do pronunciamento do líder da União Soviética, na época do acidente, Mikhail Gorbachev, quando o governo admitiu a ocorrência:

"Boa tarde, meus camaradas. Todos vocês sabem que houve um inacreditável erro – o acidente na usina nuclear de Chernobyl. Ele afetou duramente o povo

soviético, e chocou a comunidade internacional. Pela primeira vez, nós confrontamos a força real da energia nuclear, fora de controle."

A usina de Chernobyl está situada no assentamento de Pripyat, Ucrânia, 18 km a noroeste da cidade de Chernobyl, 16 km da fronteira com Belarus, e cerca de 110 km ao norte de Kiev. A usina era composta por quatro reatores, cada um capaz de produzir 1 GW de energia elétrica (3.2 GW de energia térmica). Em conjunto, os quatro reatores produziam cerca de 10% da energia elétrica utilizada pela Ucrânia na época do acidente. A construção da instalação começou na década de 1970, com o reator No. 1 comissionado em 1977, seguido pelo No. 2 (1978), No. 3 (1981), e No. 4 (1983). Dois reatores adicionais estavam em construção na época do acidente.

As quatro instalações eram projetadas com um tipo de reator chamado RBMK-1000.

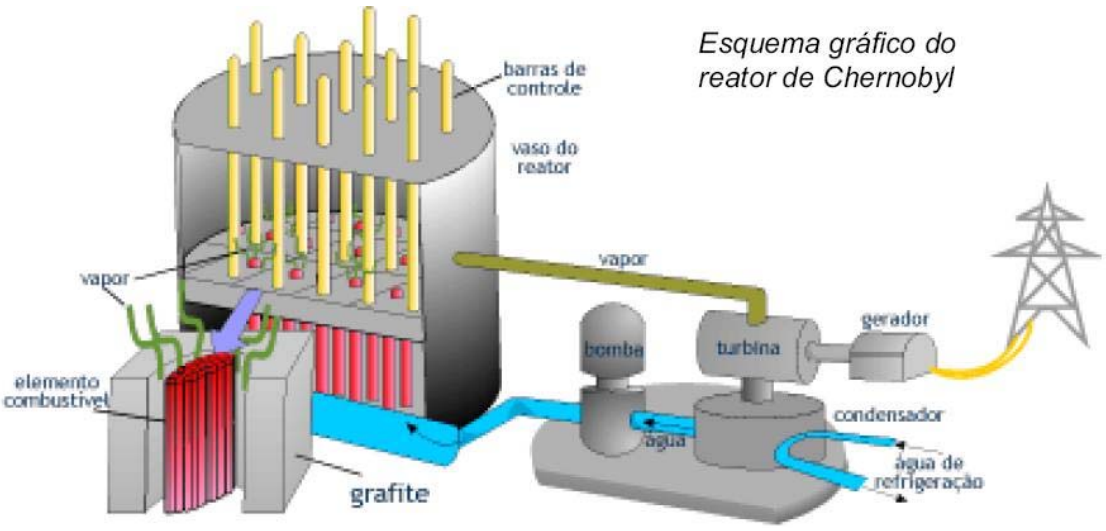



Figura 6.2 – O reator RBMK de Chernobyl

Sábado, 26 de abril de 1986, à 01h23min hora local, o quarto reator da usina de Chernobyl - conhecido como Chernobyl - 4 - sofreu uma catastrófica explosão de vapor que resultou em incêndio, uma série de explosões adicionais, e um derretimento nuclear.

Há duas teorias oficiais, mas contraditórias, sobre a causa do acidente. A primeira foi publicada em agosto de 1986, e atribuiu a culpa, exclusivamente, aos operadores da usina. A segunda teoria foi publicada em 1991 e atribuiu o acidente a

defeitos no projeto do reator RBMK, especificamente nas hastes de controle. Ambas as teorias foram fortemente apoiadas por diferentes grupos, inclusive os projetistas dos reatores, pessoal da usina de Chernobyl, e o governo. Alguns especialistas independentes agora acreditam que nenhuma teoria estava completamente certa.

Outro importante fator que contribuiu com o acidente foi o fato que os operadores não estavam informados sobre certos problemas do reator. De acordo com um deles, Anatoli Dyatlov, o projetista sabia que o reator era perigoso em algumas condições, mas intencionalmente omitiu esta informação. Isto contribuiu para o acidente, uma vez que a gerência da instalação era composta em grande parte de pessoal não qualificado em RBMK: o diretor, V.P. Bryukhanov tinha experiência e treinamento em usina termoelétrica a carvão. Seu engenheiro chefe, Nikolai Fomin, também veio de uma usina convencional. O próprio Anatoli Dyatlov, ex-engenheiro chefe dos Reatores 3 e 4, somente tinha "alguma experiência com pequenos reatores nucleares".

Algumas ressalvas são importantes:

a) O reator tinha um coeficiente a vazio positivo perigosamente alto. Dito de forma simples, isto significa que se bolhas de vapor se formam na água de resfriamento, a reação nuclear se acelera, levando à sobrevelocidade se não houver intervenção. Pior, com carga baixa, este coeficiente a vazio não era compensado por outros fatores, os quais tornavam o reator instável e perigoso. Os operadores não tinham conhecimento deste perigo e isto não era intuitivo para um operador não treinado.

b) Um defeito mais significativo do reator era o projeto das hastes de controle. Num reator nuclear, hastes de controle são inseridas no reator para diminuir a reação. No projeto do reator RBMK, as pontas das hastes de controle eram feitas de grafite e os extensores (as áreas finais das hastes de controle acima das pontas) eram ocas e cheias de água, enquanto o resto da haste - a parte realmente funcional que absorve os nêutrons e, portanto pára a reação - era feita de carbono-boro. Com este projeto, quando as hastes eram inseridas no reator, as pontas de grafite deslocavam uma quantidade do resfriador (água). Isto aumenta a taxa de fissão nuclear, uma vez que o grafite é um moderador de nêutrons mais potente. Então nos primeiros segundos após a ativação das hastes de controle, a potência do reator aumenta, em vez de diminuir, como desejado. Este comportamento do equipamento não é intuitivo (ao contrário, o

esperado seria que a potência começasse a baixar imediatamente), e, principalmente, não era de conhecimento dos operadores.

c) Os operadores violaram procedimentos, possivelmente porque eles ignoravam os defeitos de projeto do reator. Também muitos procedimentos irregulares contribuíram para causar o acidente. Um deles foi a comunicação ineficiente entre os escritórios de segurança (na capital, Kiev) e os operadores encarregados do experimento conduzido naquela noite.

É importante notar que os operadores desligaram muitos dos sistemas de proteção do reator, o que era proibido pelos guias técnicos publicados, a menos que houvesse mau funcionamento.

De acordo com o relatório da Comissão do Governo, publicado em agosto de 1986, os operadores removeram pelo menos 204 hastes de controle do núcleo do reator (de um total de 211 deste modelo de reator). O mesmo guia (citado acima) proibia a operação do RBMK-1000 com menos de 15 hastes dentro da zona do núcleo.

Seqüência de Eventos

A equipe operacional planejou testar se as turbinas poderiam produzir energia suficiente para manter as bombas do líquido de refrigeração funcionando, no caso de uma perda de potência, até que o gerador de emergência, a diesel, fosse ativado. Para prevenir o bom andamento do teste do reator, foram desligados os sistemas de segurança. Para o teste, o reator teve que ter sua capacidade operacional reduzida para 25%. Este procedimento não saiu de acordo com planejado. Por razões desconhecidas, o nível de potência de reator caiu para menos de 1% e por isso a potência teve que ser aumentada. Mas 30 segundos depois do começo do teste, houve um aumento de potência repentina e inesperada. O sistema de segurança do reator, que deveria ter parado a reação de cadeia, falhou. Em frações de segundo, o nível de potência e temperatura subiu em demasia. O reator ficou descontrolado. Houve uma explosão violenta.

A cobertura de proteção, de 1000 t, não resistiu. A temperatura de mais de 2000°C, derreteu as hastes de controle. A grafite que cobria o reator pegou fogo. Material radiativo começou a ser lançado na atmosfera.

Para reduzir custos, e devido a seu grande tamanho, o reator foi construído com

somente contenção parcial. Isto permitiu que os contaminantes radioativos escapassem para a atmosfera depois que a explosão de vapor queimou os vasos de pressão primários. Depois que parte do teto explodiu, a entrada de oxigênio – combinada com a temperatura extremamente alta do combustível do reator e do grafite moderador – produziu um incêndio da grafite. O incêndio contribuiu para espalhar o material radioativo e contaminar as áreas vizinhas.

Segundo a CNEN, acidentes como o da usina de Chernobyl, por exemplo, não podem ocorrer em usinas como a de Angra, que utiliza reator a água pressurizada (PWR), em que os elementos combustíveis estão dentro de um grande e resistente vaso de pressão de aço, circundados por contenção que impede quaisquer emissões em caso de acidente. Nos reatores do tipo PWR o sistema automático de segurança não pode ser bloqueado; usa-se água que, diferentemente do grafite, não entra em combustão quando aquecida.

Além disso, o edifício do reator é uma estrutura de segurança, construída para suportar impactos, e não simplesmente um prédio industrial convencional, como o de Chernobyl. Os elementos combustíveis em reatores do tipo de Chernobyl ficam contidos em canais dentro de uma matriz de grafite. O conjunto não possui envoltório, obrigatório nos reatores utilizados no Ocidente. As análises do acidente apontaram para um sistema deficiente de desligamento de emergência, além de violações de procedimentos por parte do pessoal de operação. Reatores como o da usina de Chernobyl só se construíam dentro da antiga URSS e só eram exportados para países ligados ao bloco soviético.

### 6.6.2 Acidente em Three Mile Island

Em 28 de Março de 1979, próximo a Harrisburg, na Pensilvânia, aconteceu o pior acidente nuclear dos Estados Unidos com o reator da unidade 2 de 900 MW PWR da Usina Nuclear de Three Mile Island, meses após o começo de sua operação comercial que se deu em 30.10.1978. O acidente foi causado por falha de equipamento e erro operacional em avaliarem-se as condições do reator. A falha de equipamento causou uma perda gradual de água de resfriamento no núcleo do reator, o que resultou em

fusão parcial das varetas de elemento-combustível urânio e na liberação de material radioativo. Não houve vítimas, nem mortes.

Devido a este acontecimento foi criado o Institute of Nuclear Power Operations destinado a promover a excelência no treinamento, gerenciamento e operação.

O acidente começou às 4 h do dia 28 de Março, quando as bombas de água de alimentação do gerador de vapor (circuito secundário) sofreram uma falha tanto mecânica e elétrica. Neste momento, aconteceu o desarme da turbina e do gerador. Isto fez com que a temperatura e pressão do reator (circuito primário) aumentassem. Antes que o sistema de proteção entrasse em funcionamento, desarmando o reator, uma válvula de segurança localizada no pressurizador do sistema primário entrou em operação.

Após a atuação desta válvula de segurança é que o reator foi desligado. O reator começou a perder pressão com a abertura da válvula. No entanto, a válvula de segurança não fechou totalmente, e a pressão continuava a baixar provocando mais perda de água de resfriamento. Esta perda excessiva de água de resfriamento fez com que a temperatura no núcleo do reator aumentasse acima da temperatura normal de operação.

Neste ponto, os operadores avaliaram incorretamente o problema. Concluíram que a válvula de segurança estava fechada, devido a erro na sinalização no painel de operação e que o reator estava em sobrepressão.

Uma manutenção ocorrida 48 horas antes neste sistema havia deixado uma válvula incorretamente fechada, impedindo o sistema de funcionar e manter um fluxo de água no sistema secundário. Sendo que isto só foi desfeito 8 minutos depois de acontecido o acidente.

A água evaporada no circuito primário com a abertura da válvula de segurança não foi reposta no sistema e com a queda de pressão a água que havia no sistema começou também a vaporizar.

A pressão continuou a cair e grandes bolhas de vapor se formaram e impediram a eficiência do resfriamento com a água remanescente no sistema. Estas bolhas no sistema mantiveram o pressurizador cheio de água. O indicador de nível do pressurizador na sala de controle indicava ao operador que o sistema estava cheio de

água. Assim, o operador desligou a bomba que adicionava água neste sistema.

A temperatura no núcleo do reator ultrapassou o ponto de fusão do urânio e do material onde estavam as varetas. Os elementos começaram a oxidar-se liberando hidrogênio e acentuando o aquecimento. A tubulação do sistema primário se rompeu e aproximadamente 2,5ML de água radioativa vazaram dentro do prédio do reator.

Para controlar a quantidade excessiva de água que vazou do sistema de resfriamento do reator, 1,5 ML de água foram lançados no rio Susquehanna. Além disto, gases radioativos liberados através da válvula de segurança atingiram a atmosfera e alguns elementos radioativos passaram através das paredes de mais de 1 m de espessura da usina.

Uma grande bolha de hidrogênio se formou no núcleo do reator. Caso explodisse, toda a usina seria completamente destruída e grande quantidades de materiais radioativos seriam liberadas para o meio ambiente.

Apesar disto, o presidente Carter visitou o reator e declarou que o acidente estava sob controle em 1° de abril. Em 3 de abril, conseguiu-se desfazer esta bolha de hidrogênio e o reator começou a resfriar.

Para assegurar a segurança da população mais suscetível à radiação, o governador recomendou a evacuação de todas as mulheres grávidas e crianças com idade pré-escolar em 30 de março. Os demais deveriam permanecer no interior de suas casas.

A limpeza da área do acidente durou até 1993. Em 28 de dezembro de 1993 foi colocada sob armazenagem monitorada. Enquanto isto, a unidade 1 permanece em operação e ambos os reatores serão descomissionados a partir de maio de 2008.

## *6.7 ATOS DE SABOTAGEM E TERRORISMO*

A destruição do World Trade Center em 11 de Setembro de 2001, trouxe à tona preocupações com possíveis ataques de terroristas às centrais nucleares. A Nuclear Regulatory Commission dos Estados Unidos recomendou às usinas nucleares americanas que voltassem a adotar todas as medidas requeridas para garantir o mais alto nível de segurança. No mesmo momento, o Departamento de Energia enquadrou

os laboratórios de armas nucleares dentro do mesmo nível de vigilância. Veja onde se concentram alvos onde há fabricação de armas nucleares nos Estados Unidos.

Para produzir uma bomba nuclear, o material deve ser enriquecido a uma faixa de 90%, o combustível comercial de usinas nucleares está na faixa de 3%, porém terroristas independentes trabalham com material contrabandeado e bastaria uma carga de qualquer elemento radioativo (de uso médico, industrial, rejeitos) para uma bomba nuclear suja, conhecida tecnicamente como dispositivo de dispersão radiológica (RDD), onde o objetivo é contaminar áreas e população, produzindo pânico e matar a longo prazo.

Sabe-se que as centrais nucleares continuam sendo um alvo dos terroristas: em 03.07.2001, Ahmed Ressam, um argelino preso em Los Angeles e que pertence, segundo as autoridades, à organização de Osama Bin Laden, revelou à Justiça que as centrais nucleares fazem parte dos alvos potenciais do grupo. Com o colapso das duas torres atingidas por Boeings, N. York parece incendiar-se.

Em 1993, quatro dias após o atentado contra o World Trade Center, que resultara em seis mortes, em 26 de fevereiro, uma carta de reivindicação considerada de fonte verossímil foi enviada às autoridades e ao "New York Times".

Nela, o "quinto batalhão do exército de libertação" incluía os "alvos nucleares" entre seus objetivos de ações futuras. Em junho de 1993, o FBI desmantelou um campo de treinamento de ativistas situado a 30 km da central de Three Mile Island.

Essas ameaças devem ser levadas tanto mais a sério, pois os reatores nucleares não resistem ao impacto de um avião de linha do tipo dos que percutiram contra o WTC. Os prédios de reatores foram dimensionados para suportar choques causados por aviões tais como o Cessna ou o Lear Jet, muito mais leves que as aeronaves de linha.

O problema é que não existem meios efetivos de se proteger contra tais ataques. A única hipótese aventada é a instalação de baterias de mísseis antiaéreos em volta das centrais.

Os Estados Unidos estudam checar todos os funcionários para evitar sabotagem no interior das mesmas e montar baterias antiaéreas em torno das usinas nucleares existentes; a aproximação aérea de tais instalações é relativamente fácil, como

demonstrou tanto o atentado maciço contra as torres de Manhattan como a maneira com a qual posou um planador motorizado sobre o teto do reator suíço de Mühleberg, em 20.09.2000, com toda tranqüilidade. O objetivo, naquela ocasião, era apenas fincar uma bandeira do Greenpeace contra a energia nuclear.

Multiplicando a massa do avião pela sua velocidade ao quadrado permite calcular a energia cinética de tais choques. Um Lear Jet de 5,7 t lançado na velocidade de 200 m/s produziria assim ao colidir contra o edifício uma energia de 240 MJ, o suficiente para perfurar o recinto. Em comparação, a colisão das torres de Manhattan pelos Boeing 767 - que deslocaram, cada um, uma massa de cerca de 150 t à velocidade de 250 nós, ou seja, 125 m/s - representou uma energia superior a 1.000 MJ, ou seja, uma energia comparável a de uma massa de 1.000 t caindo de 100 m de altura.

"Não se pode garantir que a estrutura de um reator resistiria ao choque de um avião de linha", reconhece Philippe Jamet, do Instituto de Proteção e de Segurança Nuclear.

A questão é saber se a aeronave, após ter danificado as barreiras ambientais do edifício do reator, conservaria bastante energia para conseguir destruir o circuito primário do reator, liberando material radioativo para a atmosfera. A fuselagem poderia ser contida pela estrutura do edifício, mas as turbinas são feitas de aço e muito mais perfurantes.

Essa hipótese nunca foi estudada por não levarem em conta nos cálculos a hipótese de seqüestros de aviões por terroristas. Enquanto os especialistas consideram que a queda de um avião de turismo poderia se produzir com uma probabilidade de um milionésimo (isto é, um acidente por reator a cada milhão de anos), eles julga que a queda de um avião de linha sobre um reator apresenta uma probabilidade 100 vezes menor, e, portanto, desprezível.

Relatórios garantem que Angra I suporta o impacto de um Boeing. Em audiência pública na Câmara dos Deputados em 26.09.2001, os diretores de Angra explicaram que foram feitos testes na Alemanha utilizando aviões contra estruturas nucleares desativadas. Os resultados comprovaram que paredes com 70 cm de espessura são capazes de agüentar o impacto de um Boeing de 180 t numa velocidade de 800 km/h.

As paredes de aço de Angra I têm 75 cm de espessura, o que coloca a unidade

fora do risco de eventual dano nuclear em razão de ataques terroristas. Já a parede de Angra II tem apenas 60 cm, ou seja, abaixo das especificações do teste. Mesmo assim, os reatores das duas usinas nucleares estariam protegidos ainda por outras paredes de concreto que circundam as usinas com 1,20 m de espessura. Caso haja necessidade de reforço na estrutura das usinas, a ELETRONUCLEAR estaria disposta a fazê-lo, conforme declarado na Comissão de Minas e Energia da Câmara Federal. Se houver um ataque por aeronave, os aviões Mirage da Base Aérea de Santa Cruz, na cidade do Rio de Janeiro, estão incumbidos de interceptar o agressor.

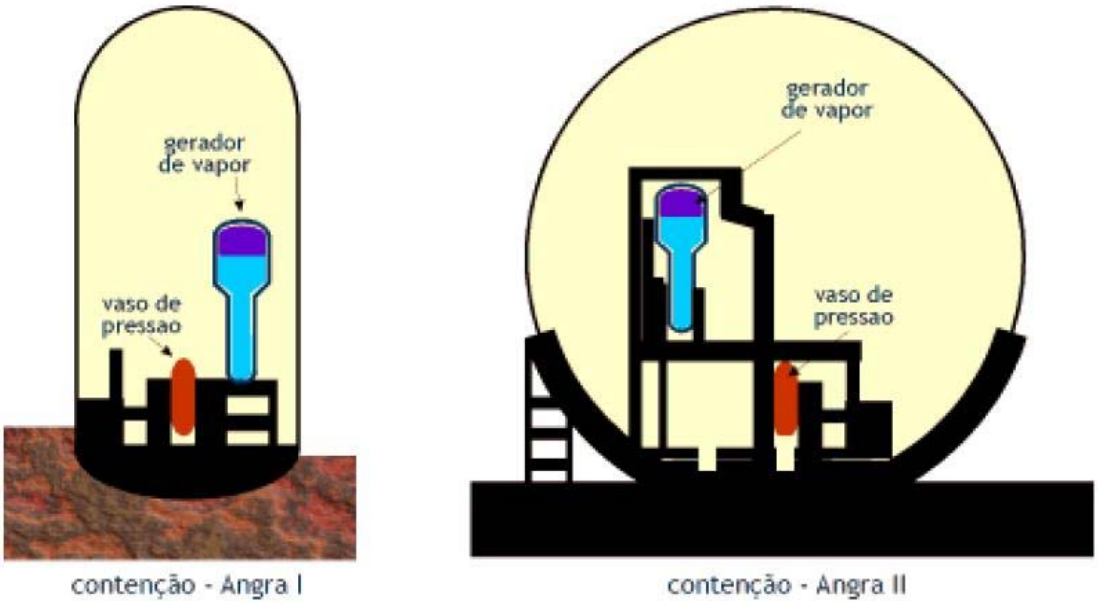



Figura 6.3 Contenção de Angra I e Angra II

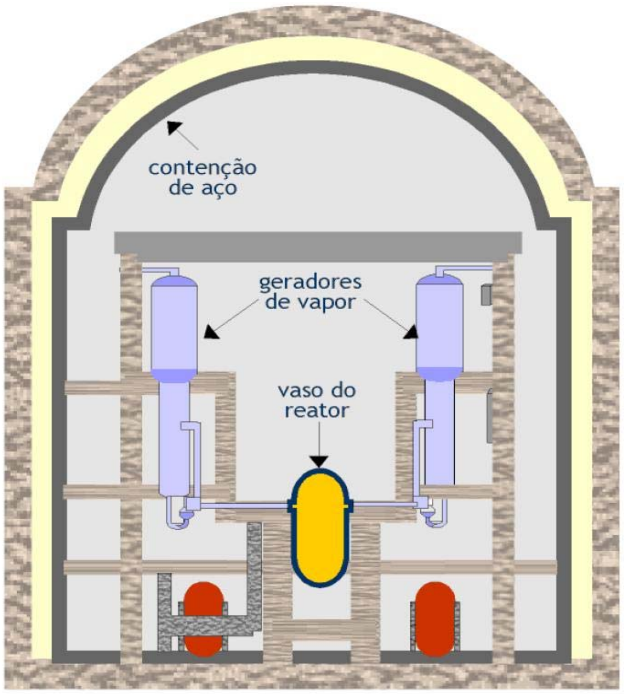



Figura 6.4 - O Edifício do Reator, construído em concreto e envolvendo a Contenção de aço, é a quarta barreira física que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente e, além disso, protege contra impactos externos (queda de aviões e explosões).

## *6.8 RAZÃO E EMOÇÃO EM TORNO DA TECNOLOGIA NUCLEAR*

Segundo P. P. Layrargues, a cruzada nacional que os especialistas fazem para convencer os leigos que a energia nuclear tem inúmeras vantagens e é segura, é legítima, pois é inegável a importância do acesso a informação quando se deseja tomar decisões, mas este procedimento não é de forma alguma neutro. A defesa incondicional de um ponto de vista, mesmo que oriunda da Ciência, que tem por princípio a neutralidade, a isenção e a imparcialidade a respeito dos debates, comporta um determinado interesse e um juízo de valor.

Em geral os técnicos não levam em consideração a teoria cultural do risco e a sociologia do risco ao apresentarem seus argumentos.

Segundo a teoria cultural do risco, este é culturalmente construído. Diante de uma situação de “perigo”, diferentes pessoas terão reações distintas. Mesmo que existam normas e padrões, culturas distintas frustram a tentativa de tornar os estudos do risco uma ciência objetiva com instrumentos de mensuração quantitativos.

Numa sociedade democrática, não se pode inibir o debate sob o pretexto de que os opositores são desqualificados, e é isso que ocorre em debates de natureza tecnológica.

O debate acerca da energia nuclear não deve se limitar aos aspectos técnicos, pois o processo como um todo não será gerido apenas por técnicos, mas também por pessoas que estão sujeitas a emocionais que não podem ser previstos pela análise puramente técnica, mas que no final, serão decisivos.

# CAPÍTULO 7

# PERCEPÇÃO PÚBLICA SOBRE ENERGIA NUCLEAR

Numa sociedade democrática, as decisões não podem depender apenas da opinião dos técnicos e o debate deve envolver toda sociedade.

Os últimos 100 anos apresentaram um aumento substancial da emissão de gases à atmosfera, levando a sociedade e governos a iniciativas como o protocolo de Kyoto. Entretanto, as demandas econômicas têm dificultado a implementação do acordo.

Os especialistas afirmam que a energia nuclear pode contribuir muito para a redução das emissões de gases causadores do efeito estufa.

No debate que a sociedade deve fazer, é importante saber o que a sociedade pensa sobre o tema energia nuclear.

A percepção da energia nuclear pela população é muito superficial. As informações provêm da imprensa, raramente de estudos, fazendo com que ela seja desconhecida, temida e rejeitada. Em geral, as pessoas não sabem defini-la, sequer parcialmente, nem conhecem a maioria das suas aplicações.

Desde o início, a energia nuclear tem suscitado as mais diversas reações junto a população em geral. Reações de incredubilidade, admiração, desconfiança, rejeição e ódio.

Com as bombas atômicas de Hiroshima e Nagazaki e os acidentes e incidentes nucleares, a energia nuclear e tudo que a ela esteja relacionado, passou a ser questionado e, logo após, houve intensas campanhas de combate ao seu uso.

A imprensa certamente foi a maior responsável pelo preconceito em relação à energia nuclear. As notícias de caráter sensacionalista geraram por anos uma imagem negativa de tudo que tenha o termo nuclear associado.

Em geral, a fonte de informações invariavelmente citada, o ponto de referencia do saber, é a imprensa: jornais, televisão, revistas. Nunca uma aula, um livro ou uma revista de divulgação científica! Considerando que os jornalistas, incluindo os de colunas científicas, não costumam ter uma boa formação em ciências, o valor científico e a credibilidade das informações veiculadas na imprensa são no mínimo

questionáveis, principalmente pela falta de comprovação nas matérias publicadas. Mesmo as pessoas que tiveram acesso a informações nos seus cursos superiores, se questionadas, pouco se lembram do que aprenderam na escola ou universidade, mas assumem o que leram ou ouviram falar pela mídia.

Vamos analisar algumas pesquisas de percepção feitas por alguns pesquisadores e uma feita especialmente para o presente trabalho.

## *7.1 PESQUISA NÚMERO UM*

Segundo pesquisa feita por Milanez, Almeida e do Carmo (Milanez, 2006), “Energia nuclear socialmente aceitável como solução Possível para a demanda energética brasileira”, disponível em

http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/include/getdoc.php?id=118&article=46&mode=pdf

que entrevistou 144 estudantes das áreas de ciência exatas da Unicamp e 226 pessoas e, locais de grande circulação de Campinas e pela Internet, temos os resultados nas tabelas a seguir:

| Tabela 7.1 - Auto-avaliação sobre conceitos de energia nuclear | | |
|---|---|---|
| | **Tipo de Público** | |
| | Universitário | Geral |
| **Avançado** | 10% | 4% |
| **Médio** | 29% | 21% |
| **Básico** | 57% | 56% |
| **Nenhum** | 4% | 17% |
| **Respostas Inválidas** | - | 2% |

| Tabela 7.2 - Expressões mais citadas | |
|---|---|
| **Público Universitário** | **Público em Geral** |
| **Usinas Nucleares 10%** | **Bomba 15%** |
| **Bomba 9%** | **Perigo 12%** |
| **Perigo 9%** | **Radioatividade 9%** |
| **Radioatividade 9%** | **Lixo Atômico 7%** |
| **Lixo Atômico 8%** | **Destruição 5%** |
| **Angra dos Reis 7%** | **Chernobyl 5%** |

| Tabela 7.3 - Vantagens citadas | |
|---|---|
| **Público Universitário** | **Público em Geral** |
| **Baixo Impacto 25%** | **Não sabe 25%** |
| **Capacidade 18%** | **Capacidade 14%** |
| **Eficiência 16%** | **Baixo Impacto 13%** |
| **Alternativa 16%** | **Eficiência 9%** |
| **Custo 6%** | **Poder 6%** |
| **Não sabe 5%** | **Tecnologia 6%** |

| Tabela 7.4 - Desvantagens citadas | |
|---|---|
| **Público Universitário** | **Público em Geral** |
| **Riscos 33%** | **Riscos 23%** |
| **Resíduos 25%** | **Não sabe 21%** |
| **Radiação 14%** | **Resíduos 18%** |
| **Custo 9%** | **Poluição 8%** |
| **Poluição 5%** | **Radiação 8%** |
| **Não sabe 3%** | **Custo 6%** |

| Tabela 7.5 - Possibilidade de residir perto de usinas nucleares | |
|---|---|
| **Público Universitário** | **Público em Geral** |
| **Não 63%** | **Não 70%** |
| **Sim 20%** | **Sim 14%** |
| **Depende 17%** | **Depende 16%** |

| Tabela 7.6 - Geração de energia elétrica | | |
|---|---|---|
| **Fonte** | **Público Universitário** | **Público em Geral** |
| **Hidroelétrica** | **47%** | **52%** |
| **Termoelétrica** | **7%** | **12%** |
| **Nuclear** | **18%** | **9%** |
| **Alternativas** | 30% | **26%** |

Segundo os autores, embora apontem deficiências na energia nuclear, não há entre as pessoas exatamente preconceito, embora pela mídia se tenha às vezes impressão diferente; mais de 60% são favoráveis a investimento nacional em pesquisa de geração nuclear mais limpa e segura.

## *7.2 PESQUISA NÚMERO DOIS*

Segundo pesquisa feita por Alphonse Kelecom & Rita de Cássia dos Santos Gouvea (Kelecom,2006), “A Percepção da Radioatividade por Estudantes de Nível Superior” , disponível em
www.uff.br/cienciaambiental/mv/mv3/MV3(2)78-89.pdf ,
com alunos da Universidade Federal Fluminense (UFF) da disciplina de Radiobiologia, sendo 9 cursos de graduação e 2 de pós-graduação, temos os resultados nas tabelas a seguir:

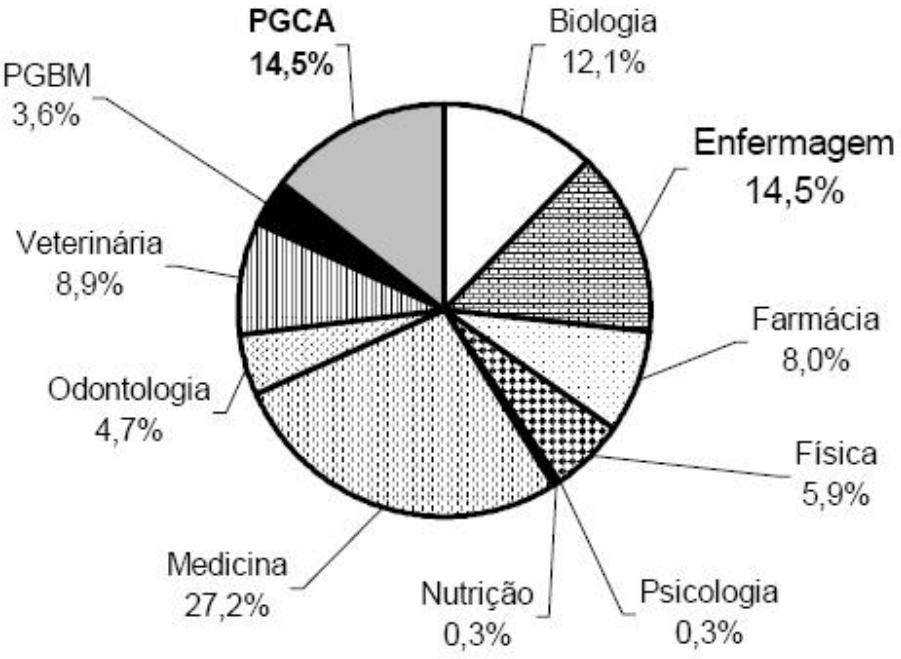



Figura 7.1 – Participação percentual dos cursos

Tabela 7.7 – Primeiro sentimento relativo á radioatividade e percentual de rejeição

| Cursos | alunos nº (%) | negativo | negativo MAS | dividido | positivo | total da rejeição (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Graduações da área da *Saúde*** | | | | | | |
| Enfermagem | 49 (14,5) | 55,1 | 14,3 | 18,4 | 12,2 | 69,4 |
| Medicina | 92 (27,2) | 58,7 | 7,6 | 19,6 | 14,1 | 66,3 |
| Odontologia | 16 (4,7) | 37,5 | 0 | 56,3 | 6,3 | 37,5 |
| Veterinária | 30 (8,9) | 40,0 | 6,7 | 30,0 | 23,3 | 46,7 |
| Psicologia | 1 (0,3) | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| Nutrição | 1 (0,3) | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| **Graduações da área das *Exatas*** | | | | | | |
| Biologia | 41 (12,1) | 56,1 | 7,3 | 26,8 | 9,8 | 63,4 |
| Farmácia (ciclo básico) | 27 (8,0) | 51,9 | 11,1 | 22,2 | 14,8 | 63,0 |
| Física | 20 (5,9) | 35,0 | 10,0 | 15,0 | 40,0 | 45,0 |
| **Pós-Graduações** | | | | | | |
| Biologia Marinha PGBM | 12 (3,6) | 50,0 | 8,3 | 8,3 | 33,3 | 58,3 |
| Ciência Ambiental PGCA | 49 (14,5) | 57,1 | 10,2 | 22,4 | 10,2 | 67,3 |
| **Total Área Saúde (Graduações)** | **189 (56,0)** | **53,4** | **8,5** | **23,8** | **14,3** | **61,9** |
| **Total Área Exatas (Graduações)** | **88 (26,0)** | **50,0** | **9,1** | **22,7** | **18,2** | **59,1** |
| **Total Graduações** | **277 (82,0)** | **52,3** | **8,7** | **23,5** | **15,5** | **61,0** |
| **Total Pós-Graduações** | **61 (18,0)** | **55,7** | **9,8** | **19,7** | **14,8** | **65,6** |
| **TOTAL GERAL** | **338 (100)** | **53,0** | **8,9** | **22,8** | **15,4** | **61,8** |

Tabela 7.8 – Definição de Radioatividade: número de respostas e percentuais

| Cursos | alunos | Sabe definir? | | | Definição | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | nº | sim | não | não sei | certa | ½ certa | errada | sem |
| **Graduações área da *Saúde*** | | | | | | | | |
| Enfermagem | 49 | 13 | 33 | 3 | 0 | 7 | 22 | 20 |
| Medicina | 92 | 20 | 66 | 6 | 8 | 23 | 34 | 27 |
| Odontologia | 16 | 7 | 9 | 0 | 3 | 1 | 8 | 4 |
| Veterinária | 30 | 5 | 21 | 4 | 1 | 7 | 12 | 10 |
| Psicologia | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Nutrição | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **Graduações área das *Exatas*** | | | | | | | | |
| Biologia | 41 | 8 | 30 | 3 | 1 | 10 | 15 | 15 |
| Farmácia (ciclo básico) | 27 | 8 | 16 | 3 | 4 | 9 | 10 | 4 |
| Física | 20 | 8 | 11 | 1 | 1 | 9 | 4 | 6 |
| **Pós-Graduações** | | | | | | | | |
| Biologia Marinha PGBM | 12 | 4 | 8 | 0 | 2 | 2 | 2 | 6 |
| Ciência Ambiental PGCA | 49 | 17 | 23 | 9 | 4 | 15 | 22 | 8 |
| **Total Área da *Saúde* (Graduações)** | **189** (100%) | **46** **(24,3%)** | **130** **(68,8%)** | **13** **(6,9%)** | **13** **(6,9%)** | **38** **(20,1%)** | **76** **(40,2%)** | **62** **(32,8%)** |
| **Total Área das *Exatas* (Graduações)** | **88** (100%) | **24** **(27,3%)** | **57** **(64,7%)** | **7** **(8,0%)** | **6** **(6,8%)** | **28** **(31,8%)** | **29** **(33,0%)** | **25** **(28,4%)** |
| **Total Graduações** | **277** (100%) | **70** **(25,3%)** | **187** **(67,5%)** | **20** **(7,2%)** | **19** **(6,9%)** | **66** **(23,8%)** | **105** **(37,9%)** | **87** **(31,4%)** |
| **Total Pós-Graduações** | **61** (100%) | **21** **(34,4%)** | **31** **50,8%)** | **9** **14,8%)** | **6** **(9,8%)** | **17** **(27,9%)** | **24** **(39,3%)** | **14** **(23,0%)** |
| **TOTAL GERAL** | **338** (100%) | **91** **(26,9%)** | **218** **(64,5%)** | **29** **(8,6%)** | **25** **(7,4%)** | **83** **(24,6%)** | **129** **(38,1%)** | **101** **(29,9%)** |

Tabela 7.9 – Conhecimento sobre a Radioatividade Natural

| item | Bio | Enf | Far | Fís | Med | Nut | Odo | Psi | Vet | BM | CA | Totais percentuais | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 41 | 49 | 27 | 20 | 92 | 1 | 16 | 1 | 30 | 12 | 49 | Saú | Exa | Grad | PG | Geral |
| **na Terra?** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| sim | 39 | 43 | 27 | 18 | 82 | 0 | 14 | 1 | 27 | 11 | 45 | 88 | 96 | 91 | 92 | 91 |
| não | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| não sei | 2 | 6 | 0 | 0 | 7 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 3 | 9 | 2 | 6 | 6 | 6 |
| ***caso afirmativo*** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| no solo | 26 | 39 | 21 | 17 | 73 | 0 | 13 | 1 | 21 | 7 | 38 | 78 | 73 | 76 | 74 | 76 |
| no ar | 23 | 16 | 6 | 6 | 44 | 0 | 7 | 1 | 12 | 7 | 26 | 42 | 40 | 42 | 54 | 44 |
| nas águas | 24 | 12 | 7 | 6 | 30 | 0 | 4 | 0 | 14 | 7 | 23 | 32 | 42 | 35 | 49 | 38 |
| no mar | 21 | 11 | 2 | 6 | 32 | 0 | 3 | 0 | 11 | 8 | 24 | 30 | 33 | 31 | 52 | 35 |
| sem resposta | 3 | 8 | 1 | 1 | 6 | 1 | 3 | 0 | 3 | 2 | 9 | 11 | 6 | 9 | 18 | 11 |
| **no sistema Solar?** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| sim | 35 | 42 | 22 | 18 | 85 | 0 | 15 | 1 | 27 | 11 | 43 | 91 | 85 | 89 | 89 | 89 |
| não | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| não sei | 6 | 6 | 4 | 2 | 6 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 5 | 7 | 14 | 9 | 9 | 9 |
| ***caso afirmativo*** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| nos planetas | 32 | 35 | 16 | 13 | 76 | 0 | 12 | 0 | 19 | 8 | 28 | 75 | 69 | 73 | 59 | 71 |
| no espaço | 23 | 24 | 11 | 9 | 51 | 0 | 7 | 1 | 17 | 5 | 25 | 53 | 49 | 52 | 49 | 51 |
| sem resposta | 7 | 10 | 6 | 2 | 7 | 1 | 2 | 0 | 4 | 3 | 14 | 13 | 17 | 14 | 28 | 17 |
| **no Cosmos?** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| sim | 31 | 28 | 22 | 19 | 71 | 0 | 15 | 1 | 29 | 10 | 39 | 76 | 82 | 78 | 80 | 78 |
| não | 1 | 8 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 6 | 1 | 5 | 2 | 4 |
| não sei | 9 | 13 | 5 | 1 | 17 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 9 | 18 | 17 | 17 | 18 | 17 |
| ***caso afirmativo*** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| na nossa galáxia | 31 | 27 | 20 | 18 | 69 | 0 | 14 | 1 | 25 | 5 | 32 | 72 | 78 | 74 | 61 | 72 |
| nas outras galáxias | 27 | 18 | 11 | 11 | 58 | 0 | 12 | 1 | 22 | 3 | 25 | 59 | 56 | 58 | 46 | 56 |
| sem resposta | 9 | 21 | 3 | 2 | 17 | 1 | 1 | 0 | 4 | 3 | 16 | 23 | 16 | 21 | 31 | 23 |

Bio: Ciências Biológicas, Enf: Enfermagem, Far: Farmácia, Fís: Física, Méd: Medicina, Nut: Nutrição, Odo: Odontologia, Psi: Psicologia, Vet: Medicina Veterinária; BM: Mestrado em Biologia Marinha (PGBM) e CA: Mestrado em Ciência Ambiental (PGCA); Saú: área da Saúde (graduação); Exa: área das Exatas (graduação); Geral: Total Geral

Tabela 7.10 - Das aplicações da radioatividade, valores numéricos de respostas afirmativas por orientação e percentuais por grupo. Os itens e valores em itálicos não são aplicações nucleares.

| item | Bio | Enf | Far | Fís | Med | Nut | Odo | Psi | Vet | BM | CA | Totais percentuais | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 41 | 49 | 27 | 20 | 92 | 1 | 16 | 1 | 30 | 12 | 49 | Saú | Exa | Grad | PG | Geral |
| Energia | 39 | 43 | 22 | 19 | 91 | 1 | 16 | 1 | 29 | 10 | 48 | 95,8 | 90,9 | 94,2 | 95,1 | 94,4 |
| *RX* | *36* | *47* | *25* | *18* | *88* | *1* | *15* | *1* | *30* | *12* | *44* | *96,3* | *89,8* | *94,2* | *91,8* | *93,8* |
| Tratamento doenças | 37 | 42 | 25 | 18 | 88 | 1 | 16 | 1 | 29 | 12 | 45 | 93,6 | 90,9 | 92,8 | 93,4 | 92,9 |
| Diagnóstico doenças | 35 | 42 | 26 | 17 | 87 | 1 | 15 | 1 | 29 | 11 | 42 | 92,6 | 88,6 | 91,3 | 86,9 | 90,5 |
| Armamento | 34 | 41 | 21 | 18 | 84 | 1 | 14 | 1 | 29 | 12 | 46 | 89,9 | 83,0 | 87,7 | 95,1 | 89,1 |
| Física | 38 | 39 | 24 | 19 | 86 | 1 | 13 | 1 | 26 | 11 | 39 | 87,8 | 92,0 | 89,2 | 82,0 | 87,9 |
| Química | 37 | 37 | 24 | 19 | 82 | 1 | 10 | 1 | 23 | 12 | 40 | 81,5 | 90,9 | 84,5 | 85,2 | 84,6 |
| *Tomografia* | *34* | *37* | *18* | *14* | *74* | *1* | *14* | *0* | *26* | *6* | *39* | *80,4* | *75,0* | *78,7* | *73,8* | *77,8* |
| Análise laboratorial | 33 | 37 | 21 | 13 | 72 | 1 | 12 | 1 | 22 | 7 | 32 | 76,7 | 76,1 | 76,5 | 63,9 | 74,3 |
| Bioquímica | 34 | 32 | 23 | 12 | 71 | 1 | 1 | 1 | 25 | 9 | 33 | 74,1 | 78,4 | 75,5 | 68,9 | 74,3 |
| Biologia | 38 | 27 | 19 | 14 | 64 | 1 | 11 | 1 | 21 | 11 | 33 | 66,1 | 80,7 | 70,8 | 72,1 | 71,0 |
| Imunologia | 34 | 25 | 17 | 5 | 68 | 1 | 10 | 0 | 24 | 8 | 30 | 67,7 | 63,6 | 66,4 | 62,3 | 65,7 |
| *Telecomunicações* | *32* | *38* | *16* | *10* | *59* | *0* | *9* | *0* | *21* | *5* | *27* | *67,2* | *65,9* | *66,8* | *52,5* | *64,2* |
| Navegação espacial | 23 | 33 | 10 | 11 | 62 | 0 | 13 | 1 | 20 | 6 | 23 | 68,3 | 50,0 | 62,5 | 47,5 | 59,8 |
| *Forno micro-ondas* | *34* | *30* | *19* | *7* | *47* | *1* | *10* | *0* | *15* | *5* | *20* | *54,5* | *68,2* | *58,8* | *41,0* | *55,6* |
| Navegação submarina | 19 | 17 | 7 | 10 | 49 | 0 | 7 | 1 | 19 | 5 | 23 | 49,2 | 40,9 | 46,6 | 45,9 | 46,4 |
| *Telefonia Celular* | *35* | *22* | *16* | *7* | *35* | *1* | *12* | *0* | *3* | *4* | *17* | *38,6* | *65,9* | *47,3* | *34,4* | *45,0* |
| Conservação alimentos | 36 | 13 | 9 | 8 | 23 | 1 | 4 | 0 | 21 | 4 | 25 | 32,8 | 60,2 | 41,5 | 47,5 | 42,6 |
| Fisiologia | 35 | 13 | 10 | 5 | 33 | 1 | 6 | 0 | 11 | 7 | 16 | 33,9 | 56,8 | 41,2 | 37,7 | 40,5 |
| Metalurgia | 17 | 25 | 13 | 5 | 33 | 1 | 5 | 0 | 14 | 5 | 15 | 41,3 | 39,8 | 40,8 | 32,8 | 39,3 |
| Navegação marítima | 17 | 14 | 5 | 5 | 43 | 0 | 7 | 0 | 11 | 4 | 20 | 39,7 | 30,7 | 22,4 | 39,3 | 37,3 |
| *Envelh. objetos de arte* | *11* | *15* | *3* | *2* | *22* | *0* | *0* | *0* | *7* | *2* | *10* | *23,2* | *18,2* | *21,7* | *19,7* | *21,3* |
| Pára-raios | 9 | 11 | 6 | 3 | 14 | 0 | 2 | 0 | 8 | 2 | 10 | 18,5 | 20,5 | 19,1 | 19,7 | 19,2 |
| Benef. pedras preciosas | 10 | 5 | 3 | 3 | 11 | 0 | 2 | 0 | 6 | 3 | 9 | 12,7 | 18,2 | 14,4 | 19,7 | 15,4 |
| Relojoaria | 2 | 6 | 2 | 5 | 14 | 0 | 3 | 0 | 6 | 1 | 9 | 15,3 | 10,2 | 13,7 | 16,4 | 14,2 |
| Outros | 2 | 1 | 2 | 2 | 6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 | 4,2 | 6,8 | 5,1 | 8,2 | 5,6 |
| *Benef. de vinho* | *2* | *3* | *0* | *1* | *2* | *0* | *0* | *0* | *1* | *1* | *5* | *3,2* | *3,4* | *3,2* | *9,8* | *4,4* |

Bio: Ciências Biológicas, Enf: Enfermagem, Far: Farmácia, Fís: Física, Méd: Medicina, Nut: Nutrição, Odo: Odontologia, Psi: Psicologia, Vet: Medicina Veterinária; BM: Mestrado em Biologia Marinha (PGBM) e CA: Mestrado em Ciência Ambiental (PGCA); Saú: área da Saúde (graduação); Exa: área das Exatas (graduação); Geral: Total Geral; Benef.: beneficiamento; Envelh.: envelhecimento.

Segundo os autores da pesquisa, o público de estudantes de nível superior, escolhido como público mais esclarecido, não se distingue muito do público leigo quando o assunto é radioatividade, com muitos alunos, se consideram absolutamente leigos na matéria.

Daí os 62% de rejeição à radioatividade apurados nesta pesquisa. Contudo, só 7% dos alunos de graduação e 10% de PG sabem definir o tema, embora 27% declarem saber a definição. Tem-se uma idéia tão errada da radioatividade que 94% dos alunos consideram os RX como aplicação nuclear! Idem para tomografia, telecomunicações, telefonia celular e até forno microondas, mas o armamento nuclear é citado por apenas 89% dos estudantes, embora seja um dos maiores

Em geral, os alunos da área das Exatas fornecem respostas mais corretas e/ou menos emotivas que os alunos da área da Saúde.

## *7.3 AIEA REVELA MAIOR ACEITAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR*

A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) divulgou recentemente os resultados da pesquisa "Opinião Pública Global Sobre Assuntos Nucleares e a AIEA", feita em 18 países de todos os continentes, que aponta para uma aprovação do uso continuado da energia nuclear, pela maior parte das respectivas populações.

A pesquisa buscou aferir o nível de conhecimento destas populações sobre o funcionamento da AIEA, suas inspeções em instalações nucleares, as aplicações pacíficas da energia nuclear e os riscos inerentes a estes processos. Também foram avaliados os grupos que já têm posições antinucleares definidas e a possibilidade de mudança desta opinião a partir de uma argumentação convincente.

De acordo com os resultados da pesquisa, 62% dos entrevistados são favoráveis à continuidade da operação das usinas atualmente em atividade; 28% acreditam que a energia nuclear é segura e, também, que novas usinas deveriam ser construídas. O apoio à construção de novas centrais foi maior na Coréia do Sul (52%) - o que pode ser explicado pela indisponibilidade de recursos combustíveis no país - e nos Estados Unidos (40%), pela necessidade de aproveitamento de qualquer fonte de energia disponível. Estes dados, certamente, balizarão as decisões destes e de outros governos de países com programas nucleares em andamento.

Por outro lado, a desativação das usinas nucleares em funcionamento encontrou maior apoio junto às populações do Marrocos, Jordânia, Arábia Saudita e Camarões, países que não têm programas nucleares e enfrentam sérios problemas de ordem geopolítica, agravados pelo terrorismo. Esse fator que provavelmente explica o baixo índice de confiança da população nos sistemas de segurança dos reatores.

Fato marcante é que a maioria dos entrevistados (65%) não conhece a Agência, tendo ouvido ou lido pouca coisa sobre ela. O maior nível de conhecimento está no Oriente Médio e na Ásia, em especial na Coréia do Sul, Japão e Arábia Saudita. Já alguns países do G7, como França, Canadá, Estados Unidos, Alemanha e Grã-Bretanha detêm o menor nível de conhecimento sobre a AIEA.

Quanto aos usos pacíficos da tecnologia nuclear, a preferência é para o tratamento de doenças, como o câncer (39%), e a geração de energia elétrica (26%).

Outras finalidades, como a segurança alimentar (irradiação, eliminação de pragas e aumento na produção) e as aplicações industriais, obtiveram índices menores que 10%.

A redução na emissão dos gases causadores do efeito estufa e o aquecimento global não foram argumentos capazes de tornar favorável a opinião da maioria quanto à expansão do parque nuclear - 47% contra 38% -, embora tenham alterado a posição de mais de 10% dos entrevistados.

## *7.4 ENQUETE FEITA PARA O PRESENTE TRABALHO*

Durante o período 01/07/2007 a 27/07/2007 esteve a disposição dos internautas o formulário (ver APÊNDICE A) com uma série de perguntas sobre o tema energia nuclear. A URL do formulário é

http://www.fisica.net/radiacoes/formulario_nuclear.php

Embora não tenha validade científica, a idéia era aferir as opiniões dos visitantes do site www.fisica.net, que está no ar há 10 anos e é acessado por cerca de 10.000 pessoas por dia.

Evidentemente que o perfil dos visitantes é especial, por tratar-se de um site sobre Física. Entretanto, é aí que reside a relevância da enquete, pois se pode ter uma idéia das concepções que um público teoricamente informado, tem sobre o tema energia nuclear.

O perfil dos entrevistados está mostrado nas tabelas a seguir:

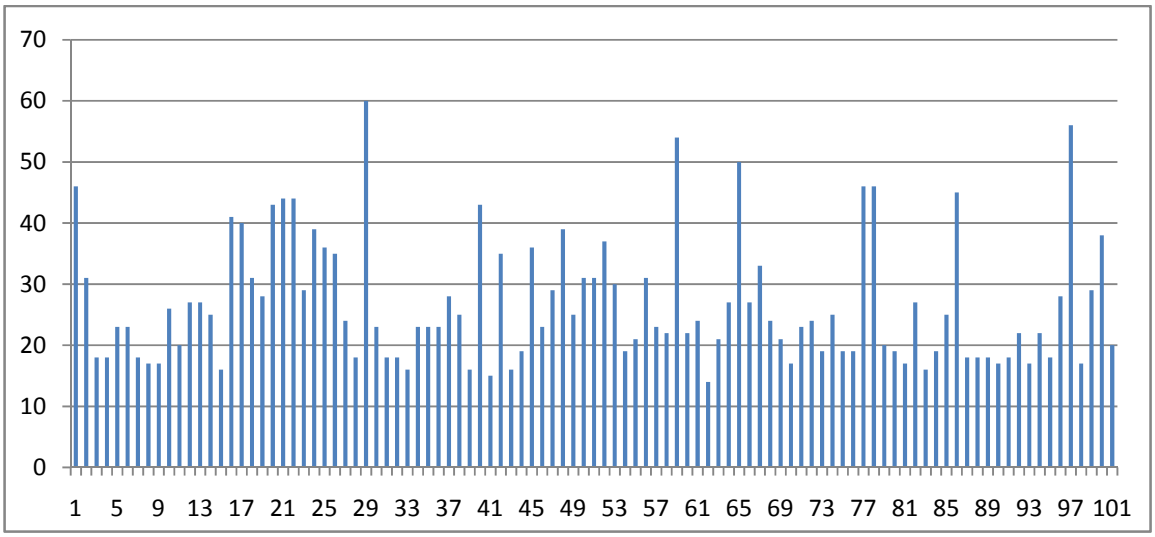



Figura 7.2 – Idade dos entrevistados

Idade máxima: 60 anos
Idade mínima: 14 anos
Idade média: 26,74±10,24 anos
Observação:
Sexo: Masculino=74,41% Feminino=25,29%

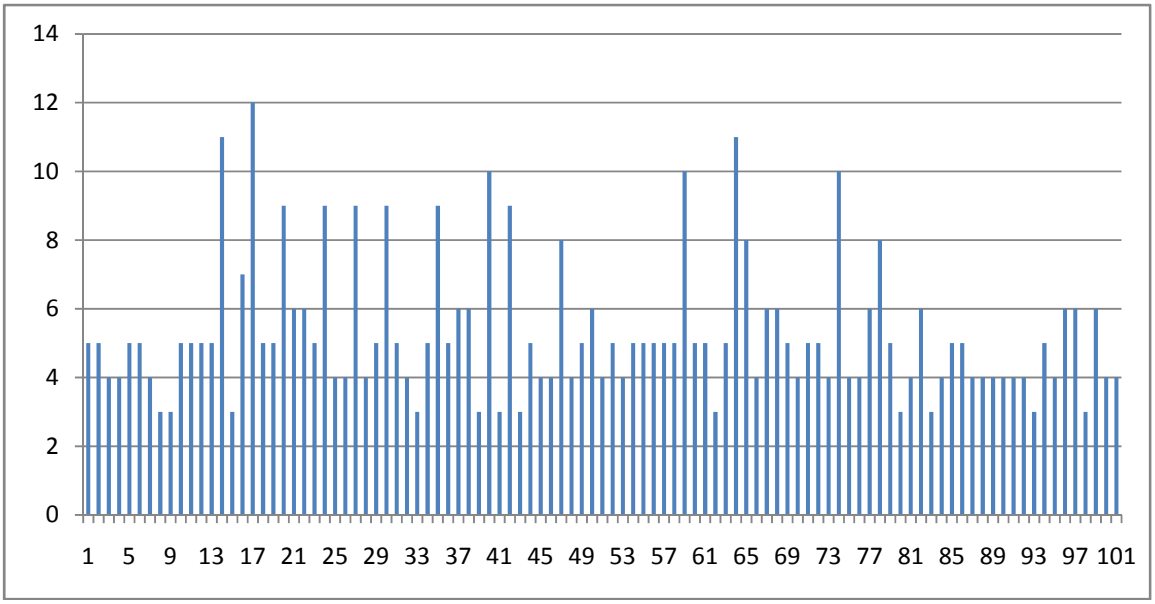



Figura 7.3 – Grau de instrução dos entrevistados

Grau de instrução Médio: 5,28±2,00

**Convenção de valores:**
01 - Ensino Fundamental Incompleto
02 - Ensino Fundamental Completo
03 - Ensino Médio Incompleto
04 - Ensino Médio Completo
05 - Ensino Superior Incompleto
06 - Ensino Superior Completo
07 - Especialização Incompleta
08 - Especialização Completa
09 - Mestrado Incompleto
10 - Mestrado Completo
11 - Doutorado Incompleto
12 - Doutorado Completo
13 - Pós-Doutorado

Uma pergunta direta e que demonstra a confiança dos entrevistados é a que se refere a morar perto de uma usina nuclear. Percebe-se que a rejeição é baixa (NÃO), tendo um número elevado de pessoas que aceitam (TALVEZ) e com leve tendência a aceitar (SIM).

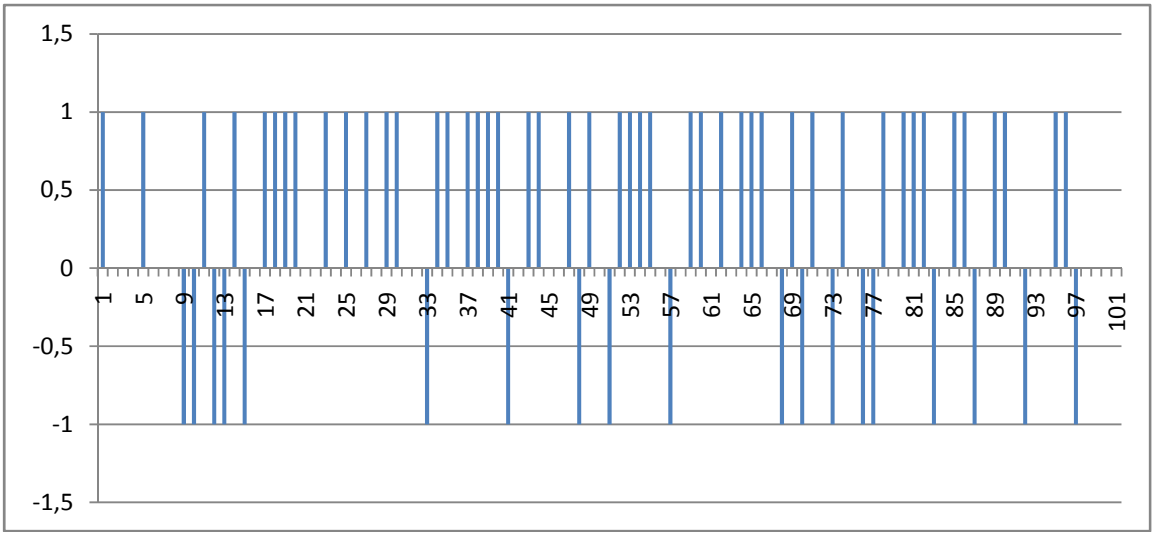



Figura 7.4 – Você moraria numa cidade que tenha uma usina nuclear?

Média das respostas: 0,27±0,76

**Convenção de valores:**
Não (-1); Talvez (0); Sim (+1)

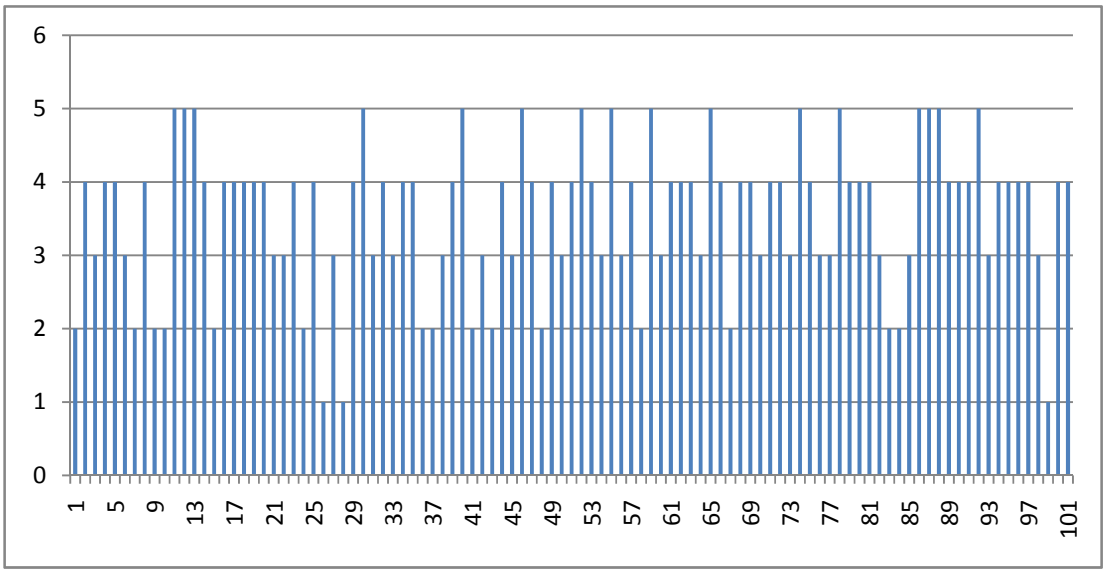



Figura 7.5 – O Brasil deveria investir no desenvolvimento de energia nuclear mais limpa e segura para futuro uso em sua matriz energética?

Média das Respostas: 3,54±1,02

**Convenção de valores:**
5: Prioridade 4: Forte opção 3: Opção 2: Última Opção 1: Não deve Investir

Na tabela baixo, percebe-se que os entrevistados rejeitam fortemente o uso de

carvão e aplaudem o uso de fontes como a Solar e a Eólica. A Nuclear foi muito bem aceita, pois uma média de 4,72 indica que os entrevistados ficaram no meio caminho entre manter o uso atual e aumentar um pouco.

**Tabela 7.11 - Para termos mais eletricidade para suprir as necessidades do Brasil nos próximos 25 anos, novas usinas geradoras precisarão ser construídas. Empresas e agências governamentais precisam iniciar o planejamento hoje em dia. Como você deseja que seja a escolha da fonte de energia?**

| | Carvão | Gás | Nuclear | Óleo | Solar | Hidroelétrica | Eólica |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Média** | 1,84 | 3,64 | 4,72 | 2,77 | 5,73 | 4,31 | 5,65 |
| **Desvio** | 1,05 | 1,51 | 1,56 | 1,64 | 1,04 | 1,03 | 0,96 |

**Convenção de valores:**
**1:Não Usar 2:Reduzir bastante 3:Reduzir um pouco 4:Manter o uso atual 5:Aumentar um pouco 6:Aumentar muito**

Em relação a percepção de acontecer algum acidente sério, a grande maioria dos entrevistados não acredita que isso ocorrerá nos próximos 10 anos. Na tabela a seguir temos o resultado da pergunta relacionada ao risco de acidentes.

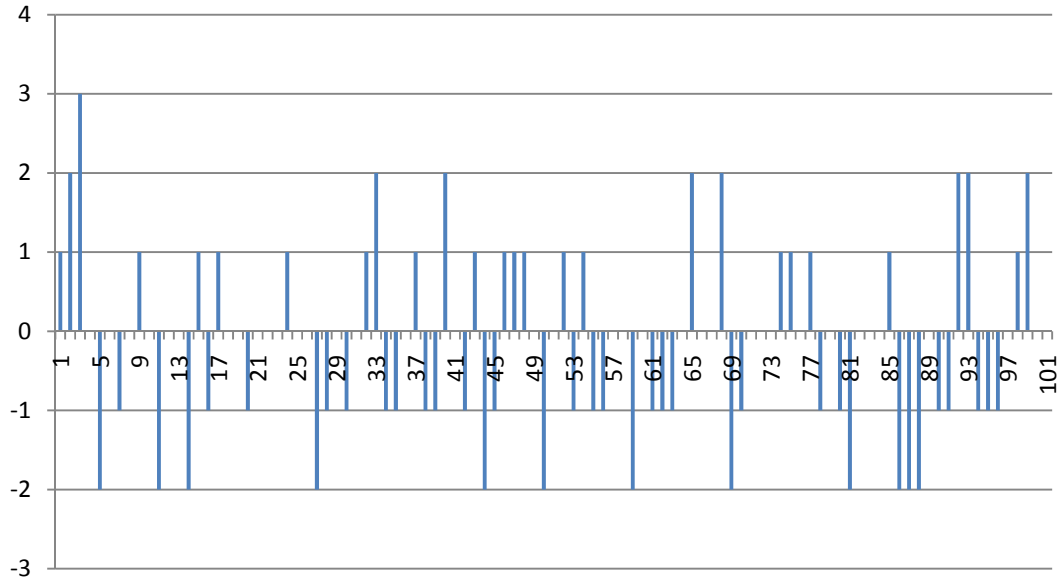



Figura 7.6 - Existem mais de 400 usinas nucleares no Mundo. Nos próximos 10 anos como você avalia o risco de um acidente sério envolvendo alguma dessas usinas?

Média das respostas: -0,12 ±1,14

Convenção de valores:

2: Com certeza acontecerá 1: Muito provavelmente acontecerá.

0 Talvez aconteça.

-1: Muito pouco provável que aconteça. -2 : É pouco provável que aconteça.

Em relação aos termos mais citados, houve uma certa uniformidade, destacando-se:

**Tabela 7.12 – Termos mais citados**

| ASPECTOS POSITIVOS | ASPECTOS NEGATIVOS |
|---|---|
| **Pequeno impacto ambiental** | **Risco de acidentes graves** |
| **Não contribui para o efeito estufa** | **Lixo atômico** |
| **Muita energia com pouco combustível** | **Produção de armas** |
| **Impulsiona desenvolvimento tecnológico** | **Gasto com armazenagem do lixo** |
| **Aplicações médicas** | |

### *7.5 ANÁLISE DAS PESQUISAS*

Analisando as pesquisas, percebe-se que existe uma boa aceitação quanto ao uso da energia nuclear. Acredita-se que a tendência seja um aumento dessa aceitação, sobretudo aqui no Brasil.

Entretanto, é fundamental que seja uma aceitação consciente, baseada em reflexão e conhecimento, e não em engajamento de massa, fruto de influência direta da mídia.

# CAPÍTULO 8

# CONCLUSÕES

A energia nuclear é uma forma tecnicamente complexa de se obter energia elétrica, devido a uma grande quantidade de fatores críticos.

Merecem destaque os seguintes pontos:

a) a energia nuclear já uma fonte importante de energia elétrica, sendo responsável por 17% da geração mundial;

b) a grande maioria dos reatores usa água ordinária como refrigerador e moderador e como combustível, urânio levemente enriquecido;

c) os rejeitos de baixo e médio nível já possuem tratamentos aceitáveis, mas o de alto nível, não;

d) a oposição pública tem sido contra a energia nuclear, mas aos poucos esse quadro tem mudado;

e) devem-se manter os níveis de segurança em altíssimo nível, mas certamente algum risco sempre existirá;

f) as usinas existentes são economicamente viáveis, mas em mercados desregulamentados (privatizados), as decisões de novas construções dependerão de políticas públicas, não são economicamente viáveis sem subsídios;

g) leis nacionais e acordos internacionais devem regular o uso da energia nuclear em consonância com as demais fontes energéticas;

h) existem muitas vantagens da energia nuclear sobre as fontes emissoras de gases causadores do efeito-estufa;

i) importantes pesquisas estão sendo feitas para elevar a energia nuclear a uma classe mais segura de energia;

j) a questão da proliferação e do terrorismo deve ser encarada como o maior problema do uso da energia nuclear.

É bom lembrar que as decisões que tomarmos em relação a escolha da matriz energética, deve levar em conta que os efeitos dessas decisões nas gerações futuras.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


1. ANDRADE, Alexandre. Monitor Nuclear. Website. Disponível em: <http://www.energiatomica.hpg.ig.com.br> Acesso em: 27 jul. 2007.

2. BARNABY, Frank; KEMP, James.Secure Energy? **Civil Nuclear Power, Security and Global Warming**. London: Oxford Research Group, 2007. Disponível em: <http://www.oxfordresearchgroup.org.uk/publications/briefing_papers/pdf/secureenergy.pdf > Acesso em: 27 jul. 2007.

3. Câmara De Comércio França-Brasil. **Perspectivas Da Energia Nuclear E A Viabilidade De Angra 3**. Disponível em: <http://www.ccfb.com.br/_pdfs/nuclear.pdf>

4. CARDOSO, Eliezer. **Apostila Educativa Energia Nuclear**. Rio de Janeiro: CNEN, 2005. Disponível em: < http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf>.

5. CAVALCANTE, Rodrigo. **O Vilão Virou Herói**. Revista Super Interessante, Edição 241, Julho/2007.

6. Clean Safe Energy. **How a Nuclear Power Plant Works?** Disponível em: < http://www.cleansafeenergy.org/CASEnergyClassroom/HowaNuclearPowerPlantWorks/tabid/170/Default.aspx>.

7. EIDINOFF, Maxwell; RUCHLIS, Hyman. **O que é a Energia Atômica**. Porto Alegre: Globo, 1964.

8. FREITAS, C. M.. **Avaliação de Riscos dos Transgênicos Orientada pelo Princípio da Precaução**. In: Silvio Valle; José Luiz Telles. (Org.). Bioética & Biorrisco - Abordagem Transdisciplinar. Rio de Janeiro: Interciência, 2003, v. , p. 113-142.

9. GLADKOV, K. **The Powerhouse of the Atom**. Moscou: MIR, 1977.

10. GLASSTONE, Samuel; SESONSKE, Alexander. **Ingenieria de Reactores Nucleares**. Barcelona: Editorial Reverté, 1975.

11. KELECOM, Alphonse; GOUVEA, Rita. **A percepção da Radioatividade por Estudantes de Nível Superior**. Mundo & Vida vol 3(2) 2002. Disponível em: <http:// www.uff.br/cienciaambiental/mv/mv3/MV3(2)78-89.pdf>

12. LAYRARGUES, Philipe. **Razão e Emoção em Torno da Tecnologia Nuclear**. Ciência Hoje, 30(175):65-67.2001. Disponível em: < material.nerea-investiga.org/publicacoes/user_35/FICH_PT_33.pdf> Acesso em: 27 jul. 2007.

13. MEDEIROS, Tharsila. **Entraves ao Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear no Brasil: Dos Primórdios da Era Atômica ao Acordo Nuclear Brasil-Alemanha**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. Disponível em: <http:// www.cedeplar.ufmg.br/economia/dissertacoes/2005/Tharsila_Reis_de_Medeiros.pdf> Acesso em: 27 jul. 2007.

14. MENASCHE, Renata . **Frankenfoods e representações sociais: percepções contemporâneas sobre biotecnologia, natureza e alimentação**. Revista theomai, Buenos Aires, v. nºesp., 2003. Disponível em: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/124/12499404.pdf> Acesso em: 27 jul. 2007.

15. MILANEZ, Jimes; ALMEIDA, Ricardo; DO CARMO, Fausto. **Energia Nuclear Socialmente Aceitável como Solução Possível para a Demanda Energética Brasileira**. Revista Ciências do Ambiente On-Line, Fevereiro, 2006 Volume 2, Número 1. Disponível em: <http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/include/getdoc.php?id=118&article=46&mode=pdf> Acesso em: 27 jul. 2007.

16. MONGELLI, Sara. **Geração Núcleo-elétrica: Retrospectiva, Situação Atual e Perspectivas Futuras**. São Paulo: IPEN/USP, 2006. Disponível em: < http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-08062007-151208> Acesso em: 27 jul. 2007.

17. MURRAY, Raymond. **Energia Nuclear**. São Paulo: Hemus, 2004.

18. **Nuclear Energy Today**. Paris: The Nuclear Energy Agency (NEA), 2003.Disponível em: < http://www.nea.fr/html/pub/nuclearenergytoday/welcome.html> Acesso em: 27 jul. 2007.

19. **NUTEC - Nuclear Tecnologia e Consultoria.** Disponível em: <http://www.nuctec.com.br/educacional/enbrasil.html>

20. PEGOLLO, Carlos. **A Utilização da Energia Nuclear na Geração de Energia Elétrica**. São Paulo: Universidade São Judas, 2006. Disponível em: <ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/357_47.pdf> Acesso em: 27 jul. 2007.

21. PRÄSS, Alberto. **Representações Sociais da Energia Nuclear**. Disponível em < http://www.fisica.net/radiacoes/formulario_nuclear.php>

22. Revista Átomo, Número 86, Janeiro/2006. Disponível em: < http://www.eletronuclear.gov.br/atomo/index.php?id_atomo=26> Acesso em: 27 jul. 2007.

23. Uranium Information Centre Ltd. **Nuclear Power in Brazil**.Disponível em< http://www.uic.com.au/nip95.htm>.

24. Uranium Information Centre Ltd. **World Nuclear Power Reactors 2006-07**.Disponível em< http://www.uic.com.au/reactors.htm>.

25. WIKIPÉDIA A ENCICLOPÉDIA LIVRE. **Acidente nuclear de Chernobyl**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Acidente_nuclear_de_Chernobil> Acesso em: 27 jul. 2007.

26. WIKIPÉDIA A ENCICLOPÉDIA LIVRE. **RBMK**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/RBMK> Acesso em: 27 jul. 2007.

27. WIKIPÉDIA A ENCICLOPÉDIA LIVRE. VHTR. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/VHTR> Acesso em: 27 jul. 2007.

28. WIKIPÉDIA A ENCICLOPÉDIA LIVRE. **Urânio**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Uranio> Acesso em: 27 jul. 2007.

29. **The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study**. Cambridge,MA: MIT, 2003. Disponível em: < http://web.mit.edu/nuclearpower> Acesso em: 27 jul. 2007.

APÊNDICE A – FORMULÁRIO DA ENQUETE ONLINE

| **DADOS DO PARTICIPANTE** | |
|---|---|
| Ano de Nascimento: | |
| Sexo: | |
| Estado onde você reside: | |
| Grau de instrução: | |
| Renda familiar **per capita** (considere a cotação de 1US$ = R$2,00): | |

**RESPONDA ÀS QUESTÕES ABAIXO**

1. Como você julga seu conhecimento sobre energia nuclear?

☐ Muito Bom ☐ Bom ☐ Razoável ☐ Básico ☐ Nenhum

2. Liste, em ordem decrescente de relevância, aspectos **positivos** da energia nuclear na sua opinião:

| | ASPECTOS POSITIVOS |
|---|---|
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |

3. Liste , em ordem decrescente de relevância, aspectos **negativos** da energia nuclear na sua opinião:

| | ASPECTOS NEGATIVOS |
|---|---|
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |

4. Você moraria numa cidade que tenha uma usina nuclear?

☐ Não ☐ Talvez ☐ Sim

5. O Brasil deveria investir no desenvolvimento de energia nuclear mais limpa e segura para futuro uso em sua matriz energética? Como...

☐ Prioridade

☐ Forte opção

- [ ] Opção
- [ ] Última Opção
- [ ] Não deve Investir

6. Para termos mais eletricidade para suprir as necessidades do Brasil nos próximos 25 anos, novas usinas geradoras precisarão ser construídas. Empresas e agências governamentais precisam iniciar o planejamento hoje em dia. Como você deseja que seja a escolha da fonte de energia?

| | |
|---|---|
| Carvão | [ ] Não Usar |
| Gás | [ ] Reduzir bastante |
| Nuclear | [ ] Reduzir um pouco |
| Óleo | [ ] Manter o uso atual |
| Solar | [ ] Aumentar um pouco |
| Hidroelétrica | [ ] Aumentar muito |
| Eólica | |
| Solar | |

7. Quão caro você acha que é produzir eletricidade a partir dos seguintes combustíveis?

| | |
|---|---|
| Carvão | [ ] Muito caro |
| Gás | [ ] Bem caro |
| Nuclear | [ ] Caro |
| Óleo | [ ] Custo aceitável |
| Solar | [ ] Custo baixo |
| Hidroelétrica | [ ] Custo muito baixo |
| Eólica | |
| Solar | |

8. Algumas formas de gerar eletricidade podem ser prejudiciais ao meio-ambiente que vivemos, pois emitem poluentes ao ar, água ou produzem lixo tóxico. Qual o perigo você imagina que tem cada uma dessas formas de gerar energia elétrica?

| | |
|---|---|
| Carvão | [ ] Muito perigosa |
| Gás | [ ] Bem perigosa |
| Nuclear | [ ] Um pouco perigosa |
| Óleo | [ ] Perigo aceitável |
| Solar (conversão térmica) | [ ] Perigo baixo |
| Hidroelétrica | [ ] Sem perigo |
| Eólica | |
| Solar (conversão fotovoltáica) | |

9. Existem mais de 400 usinas nucleares no Mundo. Nos próximos 10 anos como você avalia o risco de um acidente sério envolvendo alguma dessas usinas?

- [ ] Com certeza acontecerá

- [ ] Muito provavelmente acontecerá.
- [ ] Talvez aconteça.
- [ ] Muito pouco provável que aconteça.
- [ ] É pouco provável que aconteça.

10. Você concorda ou discorda da seguinte afirmação: LIXO NUCLEAR PODE SER ARMAZENADO DE FORMA SEGURA POR MUITOS ANOS.

Concordo completamente.

- [ ] Concordo
- [ ] Não tenho opinião
- [ ] Discordo.
- [ ] Discordo completamente.

# ANEXO A

# ENERGIA NUCLEAR VOLTA COMO OPÇÃO MAIS "LIMPA"

O seguinte artigo foi publicado no Jornal Valor Econômico, n.1.300, 12 de julho de 2005. Trata-se de uma tradução do artigo original intitulado: The shape of things to come? (Plublicado na revista The Economist, Jul 7th 2005)

As coisas não correram bem para a indústria nuclear no último quarto de século. Primeiro foi o acidente na usina de Three Mile Island nos Estados Unidos, em 1979, e depois o desastre de Chernobyl na Ucrânia, em 1986. No Japão, a Tokyo Electric Power, a maior companhia de eletricidade privada do mundo, fechou seus 17 reatores nucleares depois que foi pega falsificando registros de segurança para ocultar rachaduras em algumas usinas em 2002. E os atentados terroristas aos EUA em 11 de setembro de 2001 serviram de lembrete de que os riscos da geração de energia nuclear não são apenas aqueles inerentes à tecnologia.

E a segurança não foi a única preocupação: também houve problemas financeiros. A British Energy, a operadora britânica de energia nuclear, exigiu sucessivos socorros do governo. O Reino Unido concluiu recentemente um plano de 50 bilhões de libras (US$ 90 bilhões) para lidar com o lixo nuclear da British Nuclear Fuels (BNFL), uma processadora de lixo nuclear inepta que implodiu.

Mas recentemente as coisas deram uma clareada para a indústria nuclear. Na Ásia, que nunca se voltou contra ela da maneira como o Ocidente, as perspectivas são excelentes. A China possui nove reatores nucleares e pretende ter outros 30. Nova capacidade está sendo criada ou considerada na Índia, Japão, Taiwan e Coréia do Sul. A Rússia está construindo várias usinas.

Agora, governos ocidentais voltam cada vez mais suas atenções para a energia nuclear. Poucas semanas atrás a TVO, um consórcio da Finlândia, começou a trabalhar sobre a primeira usina nuclear a ser construída nos dois lados do Atlântico em uma década. Pertti Simola, principal executivo da TVO, diz: "a Finlândia abriu as portas para a nova era nuclear! Muitos países do Ocidente nos seguirão".

O parlamento da França recentemente deu sua aprovação a uma nova usina

nuclear. Guillaume Dureau, da Areva, a maior distribuidora de energia nuclear do mundo, resume o clima frenético que tomou conta dos distribuidores: "Estamos bastante convencidos de um renascimento nuclear e precisamos nos preparar para ele. Precisamos contratar mil engenheiros".

Apesar dos infortúnios anteriores, a indústria nuclear ainda é um negócio considerável. Em 2004 a Areva teve um faturamento de 6,6 bilhões de euros (US$ 8,2 bilhões). Esse número inclui a mineração de urânio, projetos de usinas e reprocessamento de lixo nuclear. A divisão nuclear da General Electric, que projeta e constrói usinas, mas não maneja combustível ou lixo nuclear, teve uma receita de cerca de US$ 1,1 bilhão no ano passado (que passa a ser o dobro quando se inclui as vendas de pedaços não-nucleares de usinas, como geradores e turbinas). A Westinghouse, controlada pela BNFL, que recentemente a colocou à venda, teve receita de aproximadamente 1,1 bilhão de libras (US$ 2 bilhões).

A principal razão dessa mudança é a alteração no clima do planeta. Na medida que isso ganha importância, cresce o ímpeto para uma revitalização nuclear.

Mais vozes afirmam que a energia nuclear é essencial se quisermos reduzir o ritmo das mudanças climáticas. Como resultado, há uma improvável aliança entre a indústria nuclear e muitos ambientalistas, na medida que um número crescente de "verdes" começam a acreditar que a energia nuclear é a melhor maneira de reduzir as emissões de carbono. Lobistas do setor estão encontrando apoio em áreas inesperadas. Keith Parker, da Nuclear Industry Association, um grupo comercial britânico, aponta para uma observação feita recentemente por James Lovelock, um dos fundadores do Greenpeace: "Apenas a energia nuclear pode conter o aquecimento global".

Os cientistas também estão dando seu apoio. Sir David King, principal cientista de Tony Blair, recentemente afirmou que uma nova geração de usinas nucleares é necessária (pelo menos no Reino Unido), para se ganhar tempo e manter em baixa as emissões de dióxido de carbono, o principal gás causador do efeito estufa, enquanto novas tecnologias não-nucleares e não emissoras de carbono são desenvolvidas. Outros concordam. A World Nuclear Association, um órgão do setor, repudia seus rivais ambientalistas em um relatório recente: "o alcance potencial da contribuição das fontes

de energia renováveis para o fornecimento de eletricidade é pequeno porque essas fontes, especialmente as de energia solar e eólica, são difusas, intermitentes e não confiáveis."

Está havendo uma improvável aliança entre a indústria nuclear e muitos ambientalistas

Essas opiniões vêm provocando consternação entre os oponentes de longa data da energia nuclear, especialmente o movimento verde da Europa. O sentimento anti-nuclear era tão forte na Alemanha no fim da década de 90 que a aliança socialista-verde que estava no poder baniu a construção de novas usinas. A Suécia foi o primeiro país a se voltar contra as usinas nucleares, em um referendo realizado em 1980; no fim de maio ela fechou sua segunda usina nuclear. Mesmo assim, pesquisas de opinião sugerem que nos dois países diminui a resistência da população à opção nuclear. De fato, os Democratas Cristãos da Alemanha agora afirmam que poderão reverter a proibição de construção de usinas.

Nos Estados Unidos, embora a administração Bush continue hostil a qualquer ação visando a redução do aquecimento global, ela está ansiosa para dar um maior ímpeto à energia nuclear. Isso tem levado alguns verdes a adotarem uma postura de que é melhor uma revitalização nuclear do que não se fazer nada em relação às mudanças climáticas. Líderes de organizações ambientais respeitadas, como a Enviromental Defence e o World Resources Institute, emitiram sinais favoráveis à energia nuclear como parte de uma resposta ao aquecimento global.

É claro que a energia nuclear não é a única opção livre da emissão de carbono. Tornar a produção de energia existente mais eficiente e reduzir o desperdício no uso da energia pelos consumidores são medidas que teriam um grande impacto econômico e ambiental. As fontes de energia renováveis, como a eólica e a energia das marés, possuem muitos defensores.

Há também rivais diretos às novas usinas nucleares, como as usinas que consomem combustíveis fósseis com captura de carbono, que podem fornecer energia

básica. Uma onda de experiências que vai da Algéria à China e EUA já estão sendo feitas nessa área.

A melhor administração permite às empresas tornarem as usinas existentes mais eficientes. "A consolidação nuclear é a chave", afirma Michael Wallace, da Constellation Energy, uma usina que controla várias unidades e pode, desse modo, manter bons administradores, dividir melhores práticas, ganhar economias na manutenção de peças e estoques e assim por diante. As dez maiores empresas nucleares controlam hoje 61% do setor. A Exelon, a maior delas, tem uma participação de 15%. A capacidade de utilização das usinas nucleares americanas cresceu de 56% em 1984 para mais de 90%, hoje.

A consultoria CERA calcula que 31 países possuem hoje reatores de energia nuclear comercial. Juntos, esses 439 reatores produzem cerca de 16% da eletricidade consumida no mundo, avaliada anualmente em algo entre US$ 100 bilhões e US$ 125 bilhões. E o bolo está crescendo.

Somente a expansão da China deverá envolver cerca de US$ 50 bilhões ou mais em investimentos. Isso é considerável - embora seja importante colocar em perspectiva o interesse da China na energia nuclear. Mesmo que ela construa todas as 30 usinas que estão em discussão, a energia nuclear vai representar apenas 5% de seu mix de eletricidade em 2030. Enquanto isso, o gás natural deverá crescer de uma participação de 1% hoje para mais de 6%, segundo a International Energy Agency (IEA).

Hoje, em muitos mercados energéticos, a eletricidade nuclear é a mais barata que se pode comprar. As usinas nucleares desregulamentadas da Entergy produziram 13% de suas receitas e um quarto de seus lucros no ano passado. Vincent Gilles, do banco de investimento UBS, estima que as usinas alemãs têm um custo de 1,5 centavo de dólar por kWh para produzir energia nuclear, mas elas podem vender essa energia por três vezes mais quando se inclui os créditos do programa de negociação de carbono da Europa.

Em contraste, o gasto para a produção de energia a partir do gás natural na Alemanha é de 3,1 centavos a 3,8 centavos de dólar por kWh, e de 3,8 centavos a 4,4 centavos para a produção de energia a partir do carvão. Nos Estados Unidos, onde não há uma regulamentação obrigatória envolvendo as emissões de carbono, a energia

nuclear vem tendo uma vantagem menor: a energia produzida a partir do carvão custa em média cerca de 2 centavos por kW-hora, a energia do gás natural custa 5,7 centavos, enquanto que a energia nuclear custa 1,7 centavo.

Somente a expansão da geração nuclear na China deverá envolver cerca de US$ 50 bilhões ou mais em investimentos

Mas a questão econômica não é tão clara quanto parece. O custo da energia nuclear produzida pelas usinas existentes são muito menores do que os custos das usinas recém-construídas, porque os custos de capital das usinas nucleares - que refletem de metade a dois terços do valor do projeto em termos de valor atualizado - há muito já foram esquecidos. A maioria das usinas atuais foram construídas em uma era em que os planejadores centrais não tinham idéia do verdadeiro custo do capital. Os baixos juros atuais são bons para grandes projetos como os nucleares, mas essas taxas podem mudar no futuro. Ao mesmo tempo, os preços do gás e do petróleo - cujos níveis astronômicos atuais reforçam a atratividade da energia nuclear - poderão cair.

Os críticos afirmam que os melhores projetos que a indústria nuclear pode criar não são competitivos com as tecnologias de energia concorrentes. A indústria nuclear aponta para alguns estudos que parecem sugerir que ela pode ser viável economicamente apenas se os benefícios de seu "ciclo de vida" (como a ausência de gases que criam o efeito estufa) e as desvantagens de seus concorrentes (como os custos do combustível para o gás natural) forem mantidas.

Por exemplo, a Agência de Energia Nuclear, braço da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), acabou de publicar estudo realizado em conjunto com a Agência Internacional de Energia (AIE). Depois de revisar os indicadores econômicos, o estudo concluiu que há de fato um futuro brilhante para a energia nuclear: "em uma escala global, há necessidade e espaço para usar todas as tecnologias". (O relatório assume preços elevados de gás, o que favorece a energia nuclear em termos comparativos, premissa contrária às estimativas oficiais da AIE de redução a médio-prazo nos preços do gás).

Contudo, há um vasto terreno para a discussão dos indicadores econômicos envolvidos na geração de energia nuclear, tendo em vista que esses indicadores são sensíveis às premissas sobre os custos de energia de outras fontes de recursos. Como

afirma Ed Cummins, da Westinghouse: "O maior agente motivador da energia nuclear hoje é o preço do gás natural de US$ 6 por milhão de BTU (unidade britânica para medir o poder calórico). Se o preço voltar para US$ 3,50, então as usinas nucleares já não serão competitivas."

Outra fonte de incertezas é como se desfazer do lixo radioativo. Foi essa a questão que atrapalhou os indicadores econômicos do programa nuclear britânico: a Grã-Bretanha decidiu reprocessar o seu lixo, o que se provou enormemente caro. Já os EUA, ao contrário, literalmente entulhavam o lixo dentro de piscinas localizadas no próprio terreno das usinas nucleares. O consenso atual diz que a melhor solução é a armazenagem geológica, que significa enterrar profundamente o lixo.

Levando em consideração as incertezas, a maioria dos estudos realizados sobre os indicadores nucleares concluiu que as novas usinas construídas pelo setor privado, com o suporte de investidores para toda a gama de riscos envolvidos, não são economicamente viáveis sem subsídios.

Embora os defensores da energia nuclear prometam que seus novos projetos custarão apenas US$ 1,5 mil por kW de capacidade instalada, tal custo assume que haja condições ideais e nenhum atraso. Uma avaliação mais realista (segundo a visão consensual entre especialistas que não corroboram com a idéia da indústria nuclear) diz que as novos complexos vão provavelmente custar US$ 2 mil por kW. Esse custo pode até ser inferior, em termos reais, do que o custo de capital das antigas usinas, mas ainda representa o dobro do custo de capital para uma usina térmica. O resultado disso tudo é que mesmo sendo hoje em dia mais baratos, os projetos nucleares de maior segurança continuam sendo mais caros.

Os investidores não estão muito entusiasmados. A agência de classificação de risco Standard & Poor´s declarou recentemente que: "O legado da indústria referente ao crescimento dos custos, problemas de ordem tecnológica, políticas ineficazes e a supervisão dos agentes reguladores e os novos riscos provocados pela concorrência e terrorismo poderão manter o risco de crédito em patamar muito elevado, sendo difícil de ser superado." Parte do problema é que as usinas nucleares são vistas como muito cheias de "caroços" e muito incertas do ponto de vista de investimento. Uma usina de mil MW poderia custar US$ 2 bilhões e levar até cinco anos para ser construída. Uma

planta de carvão de mesmo tamanho custaria cerca de US$ 1,2 bilhão e sua construção levaria de 3 a 4 anos, enquanto uma planta de ciclo combinado de gás de mesmo tamanho custa em torno de US$ 500 milhões e demora menos de dois anos para ser levantada e entrar em atividade.

O risco político representa outro problema. A conexão entre energia nuclear e armas prejudica o negócio. A Westinghouse estava participando da negociação de um contrato chinês concorrendo com empresas francesas e russas. Porém, o congresso temeroso em dar a China acesso à tecnologia nuclear, votou contra a concessão de um empréstimo à empresa de US$ 5 bilhões pelo Banco de Importação e Exportação dos EUA.

Uma importante fonte de incertezas hoje para o setor ainda é como se desfazer do lixo radioativo

Já que os indicadores econômicos são tão pouco promissores, porque está sendo construída tanta capacidade nuclear? Parte dela - na China, por exemplo - pode ser resultado de uma série de motivos combinados. A China pode estar atrás da tecnologia que os EUA se negam a compartilhar. Segurança poderia ser outro fator: os importadores de energia querem que uma parcela de suas necessidades seja atendida por fontes sobre as quais tenham controle.

Os entusiastas da energia nuclear citam o exemplo da Finlândia, onde um sindicato de empresas privadas conseguiu financiar uma usina sem subsídio do governo. Mas ela foi construída sem subsídios ou contou com ajuda indireta? De forma alguma, insiste Simola da TVO. "Você deve estar brincando", retrucou Gilles da UBS.

De fato, a resposta não é clara. A TVO é um consórcio envolvendo seis acionistas, sendo um deles uma empresa controlada pelo governo - a Fortum. Os donos da TVO são seus únicos clientes. Alguns desses clientes são grandes indústrias de papel e celulose que consomem muita energia e outros são municípios que talvez não sejam tão sensíveis aos indicadores econômicos. O negócio de 3 bilhões de euros não se parece com uma transação comercial convencional. Simola diz que há um contrato vitalício de compra de energia com lucro zero: "Pagamos dividendos na forma de energia competitiva."

Alguns estudos consideram que mesmo uma tributação moderada sobre o gás

carbônico faria com que a geração nuclear fosse competitiva. O sistema de comércio de emissão de poluentes da Europa (ETS) é na prática esse tipo de tarifa. E segundo a consultoria britânica Oxera, mesmo com essa tarifa implícita na geração de energia baseada no carbono, a energia nuclear não seria economicamente viável sem ajuda do governo.

Mas caso essa tarifa suba, o cenário poderá mudar. A questão das tarifas sobre a emissão de gás carbônico reflete o custo para a sociedade causado pelo uso da energia fóssil. Precificar esses custos sociais é muito difícil. A ETS da Europa assume que o custo social do dióxido de carbono é de 20 euros por tonelada, no entanto, um estudo do governo britânico realizado em 2002 estimou esse custo em £ 70 por tonelada (112 euros por tonelada). Apesar dessas estimativas serem vagas, se o valor mais alto for introduzido no modelo Oxera, as usinas nucleares começarão a parecer economicamente viáveis.

Contudo, os políticos fazem com que seja improvável que a energia fóssil pague por todos os seus custos sociais. É por essa razão que alguns governos, inclusive os EUA, pensam em subsidiar a geração nuclear. O presidente Bush está tentando alocar uma provisão no seu orçamento de energia para o setor nuclear de cerca de US$ 500 milhões em apólices de seguros contra o risco de atraso provocado por agentes reguladores e outros US$ 6 bilhões em subsídios, para a construção de novas usinas.

Há um poderoso lobby americano de empresas hostil à idéia de negociar cotas de emissão de poluentes com a Europa. Subsidiar a energia nuclear é uma das únicas alternativas de enquadrar os interesses desse lobby à crescente conscientização do eleitorado sobre a necessidade de fazer alguma coisa com relação à mudança climática. Com Bush e os ecologistas que "abraçam árvores" do mesmo lado, a energia nuclear volta ao jogo.

# ANEXO B - NUCLEAR POWER IN BRAZIL

Briefing Paper # 95 of Uranium Information Centre
Disponível em: http://www.uic.com.au/nip95.htm

July 2007

* Brazil has two nuclear reactors generating 4% of its electricity.
* Its first commercial nuclear power reactor began operating in 1982.

Electricity consumption in Brazil has grown strongly since 1990. Per capita consumption is 2235 kWh/yr. Nuclear energy provides 4% of the country's electricity - about 13 billion kWh per year.

About 40% of Brazil's electricity is produced by the national Eletrobras* system. About 30% of electricity is from state-owned utilities, and 20% from the 12.6 GWe Itaipu hydro scheme on the Paraguayan border. About 9% is from autoproducers and private generators.

Eletrobras was set up in 1962 as a holding company controlled by the Ministry of Mines and Energy, and 70% government owned. It is the main shareholder in Eletronuclear, the Brazilian nuclear utility.

**Nuclear industry development**

In 1970 the government decided to seek bids for an initial nuclear plant. The turnkey contract for Angra-1 was awarded to Westinghouse, and construction started in 1971 at a coastal site between Rio de Janeiro and Sao Paulo.

In 1975 the government adopted a policy becoming fully self-sufficient in nuclear technology and signed an agreement with West Germany for supply of eight 1300 MWe nuclear units over 15 years. The first two were to be built immediately, with equipment from Siemens-KWU. The rest were to have 90% Brazilian content under the technology transfer agreement. To effect this, a state-owned company Empresas Nucleares

Brasileiras (Nuclebras) was set up with a number of subsidiaries focused on particular aspects of engineering and the nuclear fuel cycle.

However, Brazil's economic problems meant that construction of the first two Brazilian-German reactors was interrupted, and the whole program was reorganised at the end of the 1980s. In 1988 a new company, Industrias Nucleares Brasileiras SA (INB) replaced Nuclebras and most of its subsidiaries, but with limited authority and function related to fuel cycle activities. INB is a subsidiary of the National Nuclear Energy Commission (CNEN).

Responsibility for construction of Angra 2 & 3 was transferred to the utility Furnas, a subsidiary of Eletrobras. Construction of Angra-2 resumed in 1995, with US$ 1.3 billion of new investment provided by German banks, Furnas and Eletrobras.

Then in 1997 a new company Eletronuclear* was set up as a subsidiary of Eletrobras and made responsible for all construction and operation of nuclear power plants. It combined the nuclear side of Furnas with the engineering company Nuclen, and Siemens then relinquished its 25% share in it. Nuclep is the continuing subsidiary from the Nuclebras period, handling heavy equipment manufacturing and now a subsidiary of CNEN, with INB.

**Operating Brazilian power reactors**

| Reactors | Model | Net MWe | First power |
|---|---|---|---|
| Angra 1 | PWR | 626 | 1982 |
| Angra 2 | PWR | 1270 | 2000 |
| Total (2) | | 1896 MWe | |

Angra-1 suffered continuing problems with its steam supply system and was shut down for some time during its first few years. Its lifetime load factor over the first 15 years was only 25%, but since 1999 it has been much better. Angra-2 has performed well.

The 1245 MWe Angra-3 unit was part of the same contract as Angra-2 and was designed to be a twin of it. While 70% of the equipment is on site, construction has not started. Eletrobras has been seeking a private partner with US$ 1.8 billion to complete it.

In November 2006 the government announced plans to complete Angra-3 and also build four further 1000 MWe nuclear plants from 2015. Angra-3 construction approval was confirmed by Brazil's National Energy Policy Council in June 2007 and received Presidential approval in July.

**Fuel cycle**

Resulting from active exploration in 1970s and 1980s, Brazil has known resources* of 143,000 tonnes of uranium - 4% of world total. Three main deposits are Pocos de Caldas (mine closed in 1997), Lagoa Real (operating), and Itataia (undeveloped, phosphate as co-product).

* Reasonably Assured Resources plus Estimated Additional Resources - category 1, to US$ 80/kg

Uranium has been mined since 1982, but the only extant mine is INB's Lagoa Real Unit, with 340 tU/yr capacity. All mined uranium is used domestically, after conversion and enrichment abroad.

In the early 1980s the Brazilian Navy started a nuclear propulsion program and commenced the development of centrifuge enrichment. A demonstration plant was built at Ipero, and then an industrial plant at Resende which will cater for much of the needs of the Angra reactors. The first cascade of this has commenced operation and the second is expected to do so in 2007-08. Stage 1 - eventually to be four modules totalling 115,000 SWU/yr and costing US$ 170 million - was officially opened in 2006 by INB. Each module consists of four or five cascades of 5000-6000 SWU/yr. The full stage 1 plant is expected to produce 60% of the fuel needs for Angra 1&2.

Stage 2 will take capacity to 200,000 SWU. The centrifuges are domestically-developed and very similar to Urenco technology.

INB's fuel fabrication plant designed by Siemens is also at Resende, with capacity

of 160 tonnes per year pellet production and 280 t/yr fuel assembly.

**Radioactive Waste Management**

CNEN is responsible for management and disposal of radioactive wastes. Legislation in 2001 provides for repository site selection , construction and operation. Spent fuel is stored at Angra. There is no defined policy on reprocessing.

**Regulation and safety**

The main legislation is the national policy on nuclear energy, 1962, the CNEN was set up in 1974 and amending legislation passed in 1989 and 1999.

The Brazilian nuclear regulatory body is the Directorate of Radiation Protection and Safety (DRS) of CNEN. It is responsible for licensing and supervision of all nuclear facilities. The Brazilian Institute for the Environment is also involved with licensing facilities.

CNEN reported initially to the Presidential Secretary for Strategic Affairs but now comes under the Ministry of Science and Technology.

A Nuclear Program Co-ordination and Protection Commission has representatives from every organisation concerned with nuclear issues and is open to local government and others with relevant interests.

**R&D**

The CNEN Directorate of R&D is responsible for all fuel cycle, reactor technology, radioisotopes, and related R&D. Five nuclear research centres carry out various R&D work.

At IPEN, Sao Paulo, there are two research reactors - one a 5 MW pool type - and a cyclotron, with radioisotope production.

At IEN, Rio de Janeiro, there is a small Argonaut research reactor.

At CDTN, Belo Horizonte, there is a small Triga research reactor.

At CTSMP - the Navy Technology Centre at Sao Paulo, a prototype reactor for naval propulsion was being developed, but this program was redirected into possible applications for small power plants in the northeast of the country.

Brazil has been involved in the Generation IV International Forum, and in the IAEA INPRO program, both developing new-generation reactor designs and systems. CNEN is also involved with Westinghouse in developing the IRIS modular reactor.

**Non-proliferation**

Brazil is a party to the Nuclear Non-Proliferation Treaty (NPT) since 1998 as a non-nuclear weapons state, but has been a party to the Tlatelolco Treaty since 1968. Following a new constitution in 1988, it renounced development of nuclear weapons and a Brazilian-Argentine Agency for the Accounting and Control of Nuclear Materials (ABACC) was set up with full-scope safeguards under IAEA auspices since 1994. In 1996 it became a member of the Nuclear Suppliers' Group. Brazil has not accepted the Additional Protocol in relation to its safeguards agreements with the IAEA.

Main References:

IAEA 2003, Country Nuclear Power Profiles

.