

Novas Usinas Nucleares no Brasil

Uma necessidade para o desenvolvimento do país

Eng.º Carlos Henrique da Costa Mariz
chcmariz@gmail.com

ÍNDICE:

1. RESUMO	3
2. INTRODUÇÃO	4
3. EXPANDIR A ENERGIA NUCLEAR: UMA URGÊNCIA PARA O BRASIL	5
4. MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA	8
4.1 MUNDO	8
4.2 BRASIL.....	10
4.3 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA (CENÁRIOS)	15
5 USINAS NUCLEARES	20
5.1 FUNCIONAMENTO	20
5.2 MUNDO.....	26
5.3 BRASIL.....	29
5.3.1 Histórico.....	29
5.3.2 Situação atual.....	29
5.3.3 Novas usinas	31
5.4 – URÂNIO E CICLO DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR.....	35
5.4.1 Reservas brasileiras	35
5.4.2 Reservas mundiais	36
5.4.3 O ciclo do combustível nuclear no Brasil.....	37
5.5 CONTEXTO PÓS-FUKUSHIMA: SEGURANÇA E COMUNICAÇÃO COM O PÚBLICO	44
5.6 RADIAÇÃO, REJEITOS E REPROCESSAMENTO	49
APÊNDICE I: TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO ELÉTRICA NUCLEAR	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1. RESUMO

Partindo de uma visão ampla de como o mundo gera energia elétrica e analisando a matriz de energia elétrica brasileira, o estudo concluiu pela necessidade de maior participação da energia de base de fonte termoeletrica e, principalmente, da energia nuclear, para dar segurança energética, segurança econômica e segurança ambiental ao sistema elétrico brasileiro.

Cenários, desenvolvidos pela Fundação Getulio Vargas – FGV-SP, para a economia do Brasil, no ano de 2040, revelaram que 18 novas unidades nucleares precisarão ser instaladas no país ao longo dos próximos anos.

O Brasil precisará se estruturar, de imediato, para colocar uma usina nuclear em operação, por ano, a partir de meados da próxima década.

Ficou claro que o próximo Governo terá que tomar a decisão, no início de 2015, para poder viabilizar a entrada em operação das primeiras novas usinas nucleares do país, já a partir de 2024.

O relatório também abrangeu considerações sobre o estado atual da geração nuclear no mundo e no Brasil, as reservas de urânio e do ciclo do combustível nuclear, do contexto pós-Fukushima, de questões relativas à radiação, rejeitos e reprocessamento.

Chama-se especial atenção, no caso de uma leitura rápida, para o capítulo 4 (Matrizes de Energia Elétrica) e item 5.3.3 (Novas Usinas), onde a urgência de decisão e a dimensão do programa de construção das novas usinas nucleares, no Brasil, ficam caracterizadas.

Por último é apresentado um apêndice descrevendo as novas tecnologias de geração nuclear em construção e em desenvolvimento no mundo.

2. INTRODUÇÃO

Como parte do grupo das nações com grandes dificuldades sociais e econômicas e grandes deficiências em serviços públicos, o Brasil tem um longo caminho pela frente, demandando crescentes e expressivas quantidades de energia.

O consumo per capita de eletricidade do país, de 2.545 kwh/hab/ano é muito baixo quando comparado com os países desenvolvidos, todos com consumo acima de 6000 kWh/hab/ano, sem falar nos EUA 13.000 kwh/hab/ano ou Noruega 23.500 kwh/hab/ano. Com população já acima de 200 milhões de habitantes, o Brasil tem um tremendo desafio pela frente: produzir a energia necessária para desenvolver o país.

A questão energética, por si só, tem se tornado cada vez mais complexa, requerendo dos governos de cada nação, o desenvolvimento de políticas, estratégias e programas de ação que, agindo com a devida antecedência, possam suprir continuamente as demandas de sua população. Em geral as políticas energéticas têm, por objetivo, a segurança energética, a segurança econômica e a segurança ambiental. Esses três aspectos têm importância estratégica na formação da oferta de energia elétrica e na determinação das tecnologias que melhor atendam aos seus fundamentos. Não se pode desconsiderar, também, questões de natureza geopolítica, como os efeitos da atual crise na Ucrânia. É claro que, entre outros fatores, ela desencadeará novas relações de poder entre os países e as empresas de energia em torno do suprimento e preço do gás natural, energético fundamental para a economia de qualquer país e, sobretudo, o Brasil, afetando as relações e interações sobre os demais energéticos.

É neste contexto internacional e da consciência da vulnerabilidade do sistema elétrico brasileiro, com alta predominância hidroelétrica (76,9%), que o governo a ser instalado no Brasil, em 2015, terá a missão de traçar os novos rumos do país, no campo energético, tomando decisões acertadas e urgentes sobre a geração de energia elétrica, para o curto, médio e longo prazo.

É consenso que na busca de uma oferta de geração elétrica sustentável, para formação da matriz elétrica, não deva existir, de preferência, dependência, seja em relação a uma fonte energética, seja em relação a um fornecedor. Ademais, o resultado econômico e social resultante do desempenho operacional deve ser fortalecido e os impactos decorrentes da volatilidade dos preços dos energéticos bem contabilizados, dentro de uma dinâmica de comparação de custos da produção de energia elétrica final que contemple a competitividade de cada tecnologia, ao longo de sua vida útil. Finalmente, a introdução de penalidades em razão da emissão de gases de efeito estufa, fortalecendo os parâmetros que determinem a escolha de tecnologias limpas.

Assunto deste relatório, a energia nuclear se apresenta aqui no plano técnico, pelo seu alto desempenho operacional, funcionando continuamente 90% do tempo do ano, caracterizando-se como excelente fonte de energia de base. Apresenta-se, no plano de abastecimento do combustível, dada as grandes reservas de urânio do país (a 7ª do mundo) e o domínio completo do ciclo de produção do combustível nuclear. Apresenta-se pelo plano econômico, com grande competitividade em termos de custos globais. E apresenta-se, também, pelo plano ambiental como energia limpa e de baixo impacto ambiental. O que faz com que a energia nuclear seja fundamental para o desenvolvimento socioeconômico e tecnológico do Brasil.

3. EXPANDIR A ENERGIA NUCLEAR: UMA URGÊNCIA PARA O BRASIL

A matriz de energia elétrica do mundo e do Brasil deverão sofrer modificações ao longo dos próximos anos: a primeira, prioritariamente, por pressões ambientais; a segunda, necessariamente, por questões de segurança energética.

Os requisitos de segurança energética e econômica fizeram com que a matriz de energia elétrica mundial atingisse 82% de participação termoelétrica divididas em 67% de energia fóssil (carvão, petróleo e gás) e 15% de energia nuclear. Os 67% de energia fóssil produzem energia elétrica com grandes emissões de gases de efeito estufa provocando grande poluição atmosférica e contribuindo, fortemente, para o aquecimento global do planeta. Os 15% de energia nuclear somados aos 16% de hidroelétrica e 2% de eólica, solar e biomassa, completam os 33% da matriz, de hoje, que geram energia elétrica com baixa emissão de carbono no mundo.

O Brasil tem hoje uma matriz de energia elétrica predominantemente hidroelétrica (76,9%) que tem a vantagem de produzir eletricidade de forma limpa e barata. Por outro lado, a natureza essencialmente hídrica desta matriz tem colocado em risco o Sistema Interligado Nacional, comprometendo a sua segurança energética com a imprevisibilidade das condições climáticas. O racionamento de 2001 e, mais recentemente, a crise energética em 2013, 2014 e, quem sabe, 2015, tem estressado o sistema elétrico brasileiro com severas consequências: elevados custos adicionais de geração térmica; poluição ambiental associada; impacto nos custos tarifários; além de elevados riscos de novo racionamento. Entre os 5 países do mundo com maior potencial hidroelétrico, o Brasil está na 4ª posição e é, de longe, o que possui o maior percentual hidroelétrico em sua matriz (China 16,5%, Rússia 15%, Estados Unidos 6%, Brasil 76,9% e Canadá 58,7%). E é o segundo colocado em termos de utilização desse potencial (China 28%, Rússia 9,8%, Estados Unidos 24,5%, Brasil 34,4% e Canadá 38,4%). O Brasil, entre esses países, é o que tem o sistema elétrico mais dependente da hidroeletricidade e, portanto, mais vulnerável a déficits de suprimento de energia em função das condições climáticas. Estes fatos, aliados a uma expansão hidroelétrica sem reservatórios prevista no PDE(2022) – Programa Decenal de Energia do Ministério de Minas e Energia para os próximos 10 anos – e a perspectiva do esgotamento dos recursos hidroelétricos a partir de meados da próxima década, estão demandando urgentemente uma nova política energética para o país que substitua esse alto percentual hidroelétrico, por uma ampliação da participação térmica, operando em regime de base, com baixo custo operacional e baixo impacto ambiental.

Pressões cada vez maiores da sociedade demandam por modificações substanciais na forma de produzir energia elétrica. Recomendações recentes, IPCC 2014 (Intergovernmental Panel on Climate Change) sugerem uma mudança radical na matriz mundial, para que 80% do suprimento de energia elétrica em 2050 seja proveniente de um mix de energia elétrica de baixa emissão de carbono: as renováveis; a energia nuclear; a energia fóssil com tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS) e a bioenergia com CCS. A recomendação é clara: “A única maneira para estabilizar a concentração atmosférica para aceitáveis baixos níveis é de aproximadamente quadruplicar a produção de renováveis, a produção de energia nuclear, a produção de energia fóssil e bioenergia com CCS até 2050. A presença de todos esses energéticos simultaneamente é absolutamente necessária.” O grande desafio, pela frente, será sair dos atuais 33% de energia de baixo carbono e chegar em 2050 com 80% de participação.

O Brasil tem um baixo consumo per capita de eletricidade de 2.545 kWh/hab/ano e precisará produzir grandes quantidades de energia nos próximos anos, para atingir o patamar mínimo de 6.000 kWh/hab/ano. Este valor permitirá elevar o IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) brasileiro ao nível dos países desenvolvidos que menos consomem energia elétrica.

A visualização da matriz de energia elétrica brasileira em 2040 (FGV-SP) mostra um novo perfil de composição das fontes de energia: hidroeletricidade 49%; gás natural 21%; renováveis 12%;

nuclear 12%; carvão 4% e petróleo 2%. Esses 12% de nuclear, na futura matriz brasileira, significa uma geração de energia de 183.064 GWh, equivalente à geração de Angra 1, 2 e 3 e mais 18 usinas nucleares de 1.100MW, cada uma, operando com um fator de capacidade de 0,9. O Brasil terá que colocar em operação mais 18 usinas nucleares em 25 anos, contados a partir de 2015. Para atingir esta meta, em 2040, será necessário que entre em operação 1 usina nuclear a cada ano, já a partir de 2024 até 2038 e, sendo exato, mais 4 usinas entre 2038 e 2040. A título de comparação, a China constrói neste momento 29 usinas nucleares, simultaneamente, iniciará brevemente a construção de mais 57 e está prevendo incorporar mais 118 usinas nucleares, tudo até 2030. Além de outros países como Estados Unidos e França, por exemplo, o atual programa de desenvolvimento de usinas nucleares na China poderá ser uma boa base de informação, como subsídio para elaboração do novo modelo brasileiro, de como se estruturar para construir essas novas usinas nucleares do país.

Para uma usina nuclear entrar em operação em 2024 será necessário que a decisão seja tomada no início de 2015, pois a concretização do empreendimento dura aproximadamente 10 anos. Esta decisão deve olhar os anos futuros pós 2024, visualizando o programa como um todo. Isto permitirá que se possa negociar com antecedência e maior poder de barganha as encomendas de novos reatores e equipamentos do programa, sem pôr em risco os tempos de entrega, dado o elevado aumento da demanda mundial por energia nuclear. Permitirá também, que todos os agentes envolvidos, inclusive a formação de pessoal, possam se estruturar adequadamente.

Por outro lado, o grande potencial uranífero do país caracterizado pelas reservas atuais (7ª reserva mundial) e as perspectivas futuras deixam o Brasil numa posição de tranquilidade com relação ao suprimento de combustível para esse programa e para outros futuros. Esta vantagem estratégica é fundamental para a independência energética do país, evitando importações de outros energéticos como carvão e gás natural.

A energia nuclear é uma produção termoelétrica que tem uma das maiores taxas de calor entre as fontes térmicas de geração, e não emite gases de efeito estufa. É uma produção de energia em larga escala que opera com elevado fator de capacidade e que se configura como energia de base no sistema elétrico, ocupando uma pequena área física e utilizando um combustível potente e de preço extremamente competitivo. Com essas características a energia nuclear se torna uma fonte fundamental para a produção de eletricidade e, sobretudo, para alavancar o crescimento socioeconômico dos países em desenvolvimento.

De acordo com a WNA (World Nuclear Association 2014) o mundo tem 434 usinas nucleares em operação e está construindo, novas 72, tem 173 para iniciar a construção e mais 309 propostas, todas para entrarem em operação antes de 2030, o que configura definitivamente a opção nuclear como um dos grandes participantes, no cenário energético mundial, para os próximos anos.

O Governo brasileiro terá que assumir um papel ativo trabalhando em conjunto com todos os interessados a fim de ultrapassar obstáculos e obter os resultados pretendidos. Assumir a liderança do processo de comunicação com o público, informando corretamente sobre todo o processo de geração nuclear, de modo a informá-lo corretamente. Igualmente equacionar na definição da participação do capital privado, tendo em vista a quantidade de usinas a serem construídas, o volume de investimento correspondente, a velocidade de construção e a concretização do empreendimento na data programada.

Neste sentido cabe destacar que um comprometimento claro e estável em relação à energia nuclear, como parte da estratégia nacional e para cumprimento da política energética a ser definida é um pré-requisito fundamental para o sucesso de um programa nuclear como pode ser deduzido observando países como Coreia do Sul, China, Índia, Rússia, França, Estados Unidos etc.

Os estudos de sítio nuclear realizados, pela Eletrobras Eletronuclear, para todo território nacional, fornecem os elementos para a escolha dos locais onde deverão ser instaladas as 18 unidades do programa. Todos esses sítios candidatos foram selecionados permitindo a construção de centrais

nucleares, em cada um deles, com até 6 unidades. A escolha de 3 sítios seria suficiente para abrigar as 18 novas usinas nucleares, o que poderia fazer parte, também, da nova política energética para o país.

Em suma, a energia nuclear proporcionará uma ampliação da oferta de energia elétrica no país, reduzindo os riscos de déficits, principalmente nos períodos hidrológicos secos, além de agregar um aumento significativo de energia de base ao Sistema Interligado Nacional, em atendimento à política de diversificação da matriz energética do país. Assegurar o atendimento da demanda crescente, a longo prazo, contribuindo para as metas do IPCC 2014, de redução das emissões de gases de efeito estufa, diminuindo a poluição atmosférica e contribuindo para a redução do aquecimento global do planeta.

O Brasil precisará se estruturar, de imediato, para poder colocar 1 usina nuclear em operação por ano, a partir de meados da próxima década.

Cabe ao próximo Governo a grandiosa tarefa de pôr em prática a nova era do setor elétrico brasileiro, definindo o novo mix energético, onde a energia nuclear terá um papel fundamental para a segurança energética, econômica, e ambiental do Sistema Elétrico Brasileiro e do desenvolvimento socioeconômico do país.

4. MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA

4.1. MUNDO

Como se pode observar, a matriz de energia elétrica mundial (2010), descrita na figura 1, é fortemente dependente das usinas termelétricas: carvão, gás, óleo e nuclear totalizando 82% do atendimento da demanda global. Separando a nuclear (15%), verifica-se que a energia fóssil predomina com 67% da participação total. Só o carvão é responsável por 41% desta matriz.

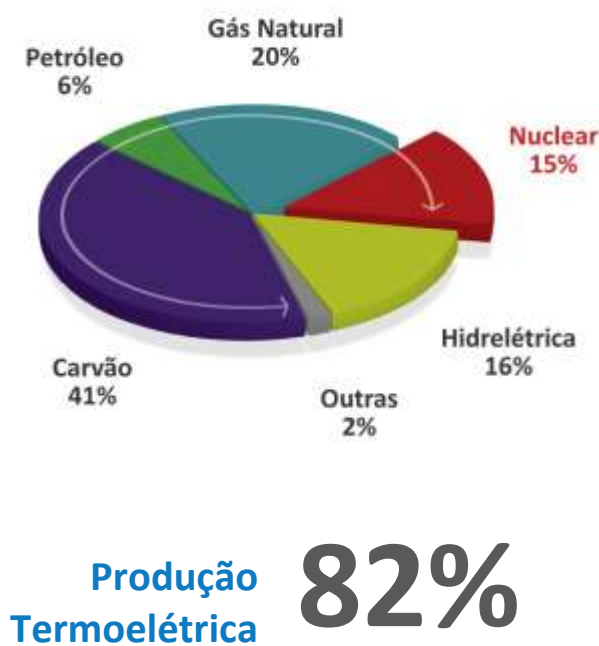


Fig. 1 - Matriz de energia elétrica mundial - 2010

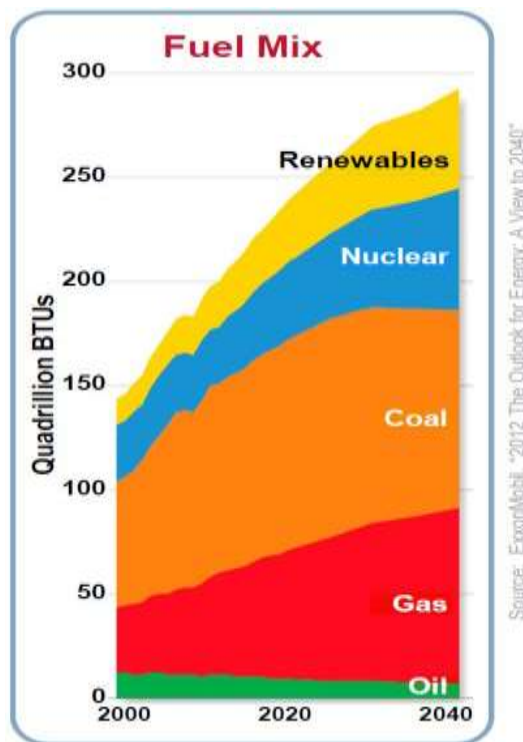


Fig. 2 - Outlook for Energy 2012 - ExxonMobil

Fazendo-se a soma 2% (renováveis) com hidrelétricas 16% e nuclear 15% pode-se afirmar que da totalidade da produção de energia elétrica mundial, apenas 33% é de “energia limpa”, ou seja, com baixa emissão de gases de efeito estufa.

É claro que esta matriz está em mutação e que a pressão mundial para redução das emissões de gases de efeito estufa, é um fator importante na busca por energias mais limpas.

Apesar de todas as pressões, a continuar as tendências atuais, as mudanças deverão ser lentas como se pode observar na figura 2, segundo estimativas apresentadas no Outlook for Energy 2012 – ExxonMobil. A expectativa é de que a matriz de energia elétrica mundial caminhará na direção de uma menor participação do carvão e do petróleo, energias que deverão ser substituídas por uma ampliação das renováveis, do gás natural e das nucleares, numa proporção que dependerá, naturalmente, de fatores técnicos, econômicos e ambientais, mas principalmente das iniciativas de cada um desses setores na boa condução de seus negócios e, regionalmente, das potencialidades e características de cada país.

Por outro lado, recomendação recente do IPCC 2014 (Intergovernmental Panel on Climate Change – Summary for Policy Makers in Climate Change 2014, Mitigation on Climate Change) sugere uma mudança mais radical, nesta matriz, onde 80% do suprimento de energia elétrica em 2050 deverá provir de um mix de energia elétrica de baixa emissão de carbono (fig. 3): as renováveis, a energia nuclear, a energia fóssil e a bioenergia, ambos com tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS). A recomendação é clara: a única maneira de estabilizar a concentração atmosférica para aceitáveis baixos níveis é de, aproximadamente, quadruplicar a produção de renováveis, de geração nuclear de energia fóssil e bioenergia com (CCS) até 2050. Todos esses energéticos são absolutamente necessários.

Lifecycle CO2 Emissions from Electric Sources

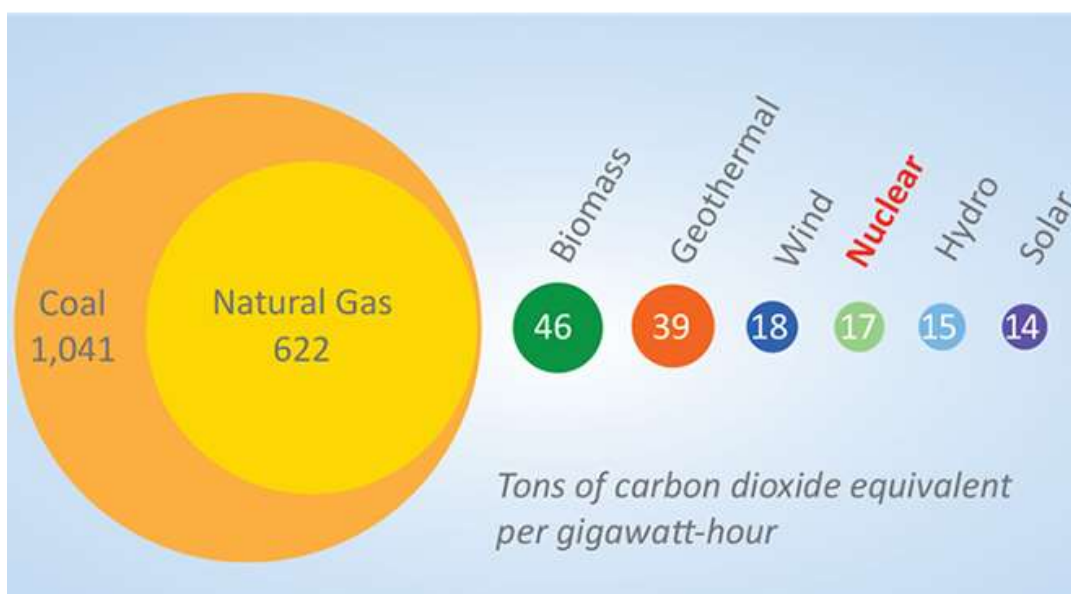


Fig. 3

O grande desafio será evoluir dos atuais 33% de energia de baixo carbono para 80% em 2050, conforme a meta mundial do IPCC 2014. A indústria nuclear precisará se adaptar a essa nova realidade para suprir a grande demanda por novas usinas nucleares, decorrentes desta meta, e da grande quantidade de energia elétrica a ser produzida, oriunda do desenvolvimento socioeconômico de vários países do planeta, inclusive o Brasil.

4.2. BRASIL

A capacidade instalada relativa aos empreendimentos de geração constantes do Sistema Interligado Nacional - SIN, incluindo a parcela de Itaipu importada do Paraguai, totalizou 118,3 mil MW em 31/12/2012.

Esta capacidade instalada por tipo de fonte do parque gerador existente está apresentada na figura 4 e mostra os valores relativos, do SIN, em termos de potência instalada.

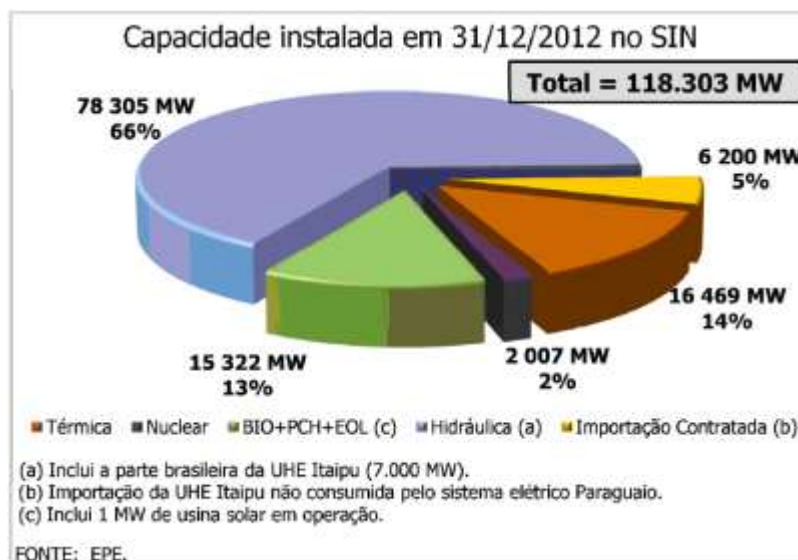


Fig. 4 - Capacidade instalada por tipo de fonte – 2012 – EPE

A potência instalada indica o valor máximo que o Sistema pode produzir. Entretanto, dada as diferenças de fatores de capacidade de cada fonte, é a produção de energia que melhor expressa a participação real na produção anual de energia, conforme apresentado a seguir.

A matriz de energia elétrica brasileira está representada na figura 5, agora com a participação de cada fonte na produção total do país no ano de 2012.



Geração hidráulica² em 2012:
455,6 TWh

Geração total² em 2012:
592,8 TWh (67.671 MW médios)

¹ Inclui gás de coqueria

² Inclui importação

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixo e outras recuperações.

Fig. 5 - Energia produzida em 2012 – ANEEL

Observe-se o alto percentual de 76,9% de participação hidráulica em termos de produção anual de energia. A hidroeletricidade foi priorizada no Brasil, desde a década de 60. O planejamento da expansão de oferta da energia elétrica começou pela exploração do potencial hidráulico disponível nas bacias hidrográficas das regiões sudeste, sul e nordeste, onde a infraestrutura para o seu aproveitamento era de mais fácil acesso, até chegar a esse elevado percentual.

Pelo fato dessa matriz ser predominantemente hidroelétrica, o Sistema Interligado Nacional, fica de tempos em tempos, sob estresse sujeito a riscos de falta de suprimento de energia. Foi o caso em 2001 e está sendo agora em 2014, e quem sabe, 2015, com a redução significativa na acumulação dos reservatórios, como consequência do agravamento das atuais condições climáticas. Essa situação tende a se agravar na medida em que se expande a participação hidroelétrica sem os correspondentes reservatórios de acumulação. O potencial hidroelétrico remanescente, além de situar em bacias hidrográficas mais distantes dos grandes centros de consumo, está, basicamente, localizado na região amazônica, que apresenta pouca declividade com rios que se caracterizam como de planície. Neste sentido, torna-se difícil, planejar e construir grandes reservatório de regularização plurianual nos rios da região norte, pela inexistência de locais adequados, sem implicar em áreas inundadas excessivas, com profundidades médias reduzidas.

Mesmo assim, o prosseguimento do programa hidroelétrico no Brasil passa pela construção de usinas nos rios da região norte, como está ocorrendo com os empreendimentos do Rio Madeira (Jirau e Santo Antônio), Xingu (Belo Monte) e Baixo Tapajós, todos no âmbito do Programa Decenal de Energia - PDE(2022) do Ministério de Minas e Energia. Estas usinas todas a fio d'água, estão distantes dos principais centros de carga do país, o que exige sistemas de transmissão da ordem de 2.500Km, atravessando a floresta amazônica.

A título de ilustração, a figura 6 confirma que, mesmo com a construção dessas hidroelétricas nos 10 anos do PDE(2022), a expansão da capacidade de armazenamento crescerá apenas 2% contra 50% de aumento de carga, mostrando a saturação do sistema de acumulação e confirmando a diminuição relativa cada vez maior da capacidade de regularização do sistema hidroelétrico brasileiro.



Fig. 6 - Evolução da capacidade de armazenamento do SIN

É curioso constatar que o Brasil, entre os 5 países de maior potencial hidroelétrico do mundo (fig. 7), é o que tem a sua matriz com maior potencial hídrico: Brasil 76,9% (fig. 5), Canadá 58,7%

(fig. 12), China 16,5% (fig. 9), Rússia 15% (fig. 10) Estados Unidos 6% (fig. 11). E também, o que utiliza, a exceção do Canadá, o maior percentual de energia hídrica em relação ao potencial disponível (fig. 8): Canadá 38,4%, Brasil 34,4%, China 28%, Estados Unidos 24,5%, Rússia 9,8%. Ou seja, o Brasil, entre estes países, é o que tem o sistema elétrico mais dependente da hidroeletricidade e, portanto, mais vulnerável a déficits de suprimento de energia em função das condições climáticas.



Fig. 7



Fig. 8

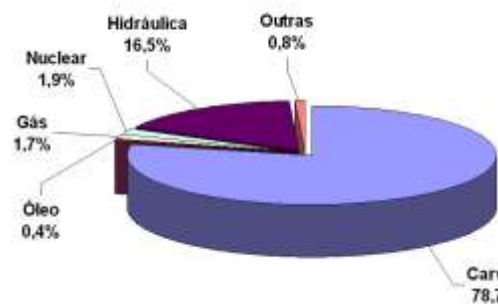


Fig. 9 - China - 2010

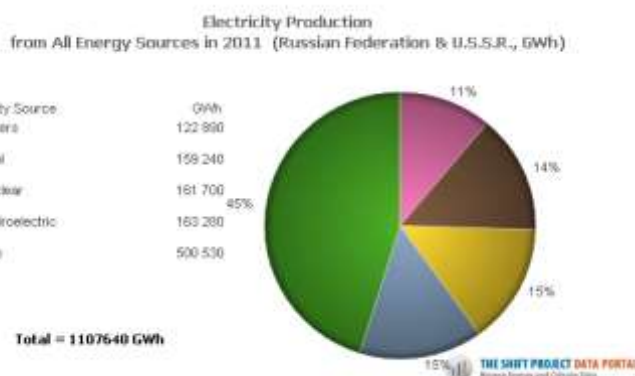


Fig. 10 - Rússia - 2011

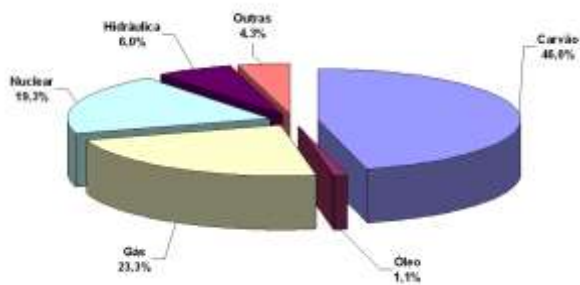


Fig. 11 - Estados Unidos - 2012

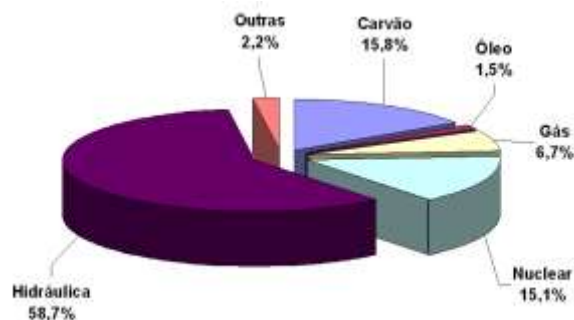


Fig. 12 - Canadá - 2010

De toda maneira não há como planejar a expansão de um sistema predominantemente hidroelétrico com déficit zero de suprimento de energia. Contrariamente, um sistema térmico, o risco de déficit de suprimento de energia é praticamente zero. Neste sistema a geração de energia dependerá, apenas, da disponibilidade de combustível, o que é previsível, desde que haja, evidentemente, potência disponível.

Estes fatos mostram a necessidade de uma ampliação da participação térmica, operando em regime de base e com baixo custo operacional, na matriz de energia elétrica do sistema elétrico nacional, para dar maior tranquilidade ao suprimento energético. Convém salientar, entretanto, que o mix térmico existente hoje no país, além de insuficiente e, em sua grande parte, inadequado para operação econômica em regime de base, tem imposto pesado ônus à matriz energética brasileira neste momento de escassez hídrica, além de uma grande poluição atmosférica associada. Isto explica o custo da energia ter atingido o elevado pico de R\$ 822,83/MWh recentemente, inadmissível para qualquer economia e muito menos à brasileira, impondo barreiras extraordinárias para o crescimento econômico do país.

O Brasil dispõe de recursos energéticos para realizar esta geração térmica de base através do carvão mineral do sul do país, gás natural e urânio. Cada uma destas fontes possui importantes características que justificam sua respectiva participação na composição da matriz de energia elétrica brasileira. A definição desses níveis, ao longo do tempo, é uma tarefa importante do processo decisório relativo ao Setor Energético, cuja escolha é fundamental para a definição da política energética a ser adotada no país.

O uso da tecnologia nuclear tem vantagens comparativas que justificam seu aumento de participação no mix energético brasileiro. As usinas nucleares do país são importantes para a segurança e a confiabilidade da operação do sistema elétrico. Essas usinas produzem eletricidade com alto fator de capacidade e baixo custo operacional, o mais baixo entre todas as fontes térmicas, contribuindo para baixar o custo total e, como consequência, a tarifa de energia elétrica. Neste particular a França, que tem um sistema predominantemente nuclear (75,5% - Fig. 15) tem uma das menores tarifas a nível residencial da Europa como pode ser visto pela figura 13. A opção nuclear viabiliza, também, a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, uma vez que não são emitidos gases de efeito estufa pela sua operação. As emissões advindas da fabricação de combustível nuclear são extremamente baixas. De novo, a França, servindo de exemplo, de um país europeu com uma das menores emissões de CO₂ na atmosfera (Fig. 14).

Por outro lado, a Alemanha tem a tarifa residencial mais cara da Europa, além de ser um país com uma das maiores emissões de CO₂ da comunidade européia (Figuras 13 e 14). Na realidade, o programa alemão de substituição das nucleares pelas renováveis tem imposto pesado ônus sobre os consumidores alemães. Para pagar essa aventura verde, o subsídio veio sob a forma de aumentos na tarifa. A nível residencial o aumento foi de 47%, somente no ano de 2013. A inadimplência, nas contas de energia elétrica, da classe pobre da Alemanha tem aumentado. A indústria alemã tem perdido competitividade, uma vez que o preço da tarifa industrial subiu, nesse mesmo período, e pelas mesmas razões, 46%. A indústria alemã está em dificuldades, pois a tarifa de energia industrial comparada com a França e com a Holanda, é 40% superior e 15% superior à média dos países europeus. Como se não bastasse houve aumento, também durante o ano de 2013, de 1,8% nas emissões de gases de efeito estufa, devido à ampliação da geração a carvão, para compensar a saída de algumas usinas nucleares que as intermitências da energia eólica e solar não puderam suprir (Fig. 16). Neste mesmo período a Europa como um todo reduziu 1,3% das emissões de CO₂.

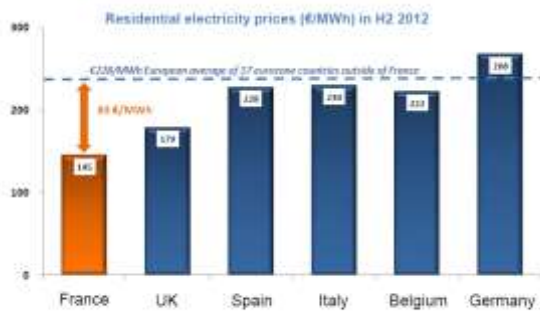


Fig. 13 - Fonte: Eurostat 2012

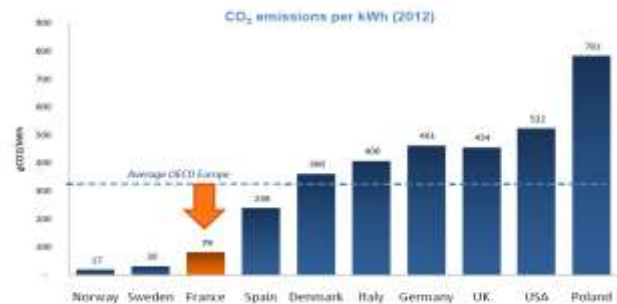


Fig. 14 - Fonte: IEA Facts 2012

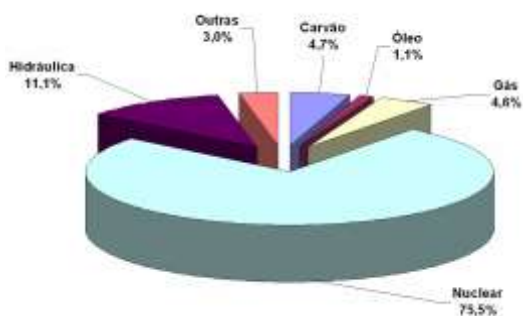


Fig. 15 - França - 2010 - Fonte: IEA Data Services

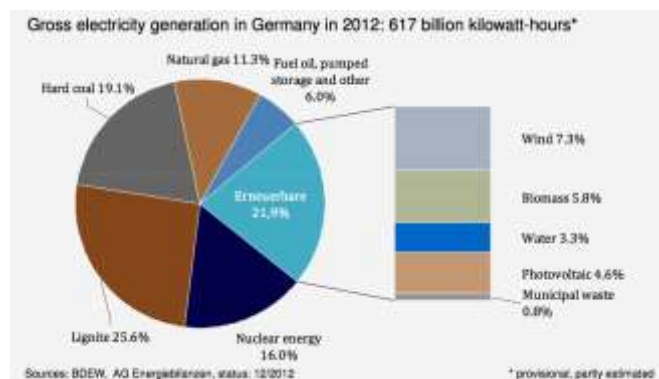


Fig. 16 - Alemanha - 2012 - Fonte: Fraunhofer ISE

Finalizando, dadas as grandes reservas de urânio do país e o fato do Brasil controlar a tecnologia completa do ciclo do combustível nuclear (item 5.4.3), incluindo o enriquecimento do urânio, o país também se beneficiará do acréscimo do uso da geração nuclear sob o ponto de vista da independência energética, evitando que o Brasil possa vir a importar gás natural e carvão mineral. A comparação de custo entre as diversas fontes, incluindo as renováveis, desde que com os custos nivelados, apresentam vantagens competitivas para as novas tecnologias nucleares, planejadas para serem construídas no Brasil, a geração III e III+ (ver Apêndice I).

4.3. EVOLUÇÃO DA MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA (CENÁRIOS)

Embora o Brasil ocupe uma posição privilegiada em termos de produção de energia (10º no ranking internacional), o país sofre profundas desigualdades sociais e grandes disparidades regionais que podem ser deduzidas, observando-se seu baixo consumo per capita. O consumo de eletricidade no Brasil per capita no ano de 2012 foi de 2.545 kWh/hab/ano, (ver fig. 17) , o que é inferior à média mundial e mais baixo do que o consumo per capita da Argentina e do Chile. Consistente com a necessidade de expandir a capacidade instalada e prover acesso universal à eletricidade, o Plano de Expansão de Energia para os próximos 10 anos – PDE(2022), do Ministério de Minas e Energia, é a continuidade do esforço para reduzir esta disparidade. Um longo caminho deve ser percorrido. O Brasil, para se desenvolver, precisa atingir, pelo menos 6.000 kWh/hab/ano, patamar mínimo exigido para se colocar entre os países de alto Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), tarefa que exigirá grandes esforços em várias direções.



Fig. 17 – Brasil: informações referentes a 2012 – EPE

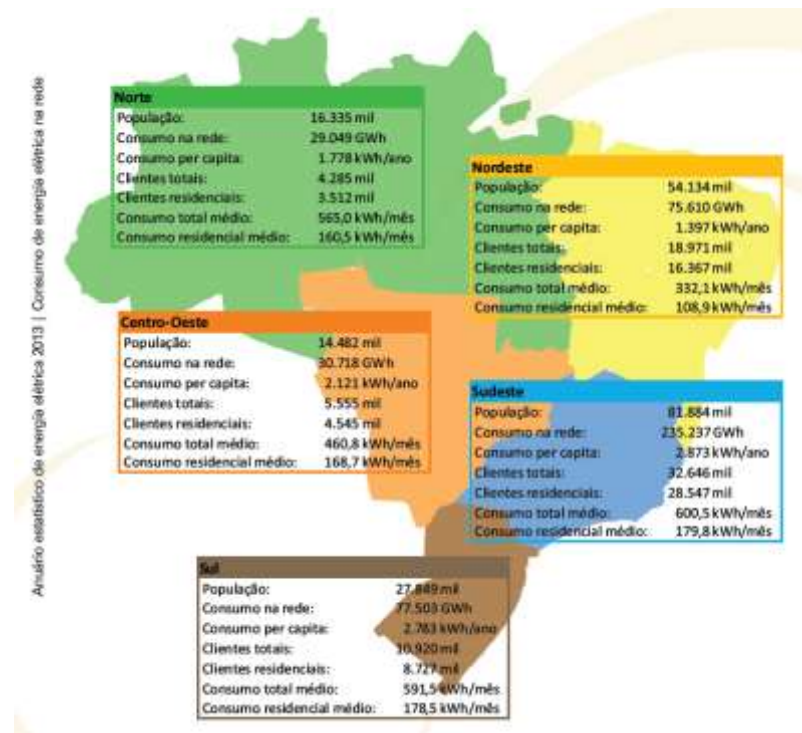


Fig. 18 - Brasil: informações por região geográfica referentes a 2012 – EPE

O Sistema Elétrico Brasileiro precisará passar por profundas modificações nos próximos 10, 20, 30 ou mesmo 40 anos para atingir esta meta. Não se pode desperdiçar qualquer fonte de recurso energético disponível no país, que deverá estar preparado para este desafio. É, de certa forma, angustiante, perceber o imediatismo brasileiro em não captar esta visão estratégica e transformá-la em decisões de curto prazo para que os caminhos necessários se viabilizem no futuro. É urgente que se possa perceber as várias decisões que precisam ser tomadas no campo energético, como por exemplo, o novo programa nuclear brasileiro, e a implementação das ações a esse respeito. Uma decisão tomada em 2015 viabilizará a entrada em operação de novas unidades nucleares a partir de 2024/2025. Anos em que o potencial hidroelétrico brasileiro deverá estar se esgotando.

Para facilitar esta visão e como forma de mostrar prováveis evoluções da nossa matriz, estudo recente da Fundação Getúlio Vargas de São Paulo (FGV-SP), publicado em julho de 2013, apresenta um panorama da matriz elétrica para o ano 2040, portanto para aproximadamente daqui a 25 anos, considerando três diferentes cenários de desenvolvimento do país.

No primeiro cenário (fig. 19), em que o crescimento econômico é maior em curto prazo (4% ao ano até 2017) e menor em longo prazo (de 3% ao ano), a hidroeletricidade responderá por 57% da energia elétrica, o gás natural por 17%, seguido da nuclear e biomassa, ambos com 8%, do carvão 5%, da eólica 3% e óleo 2%.

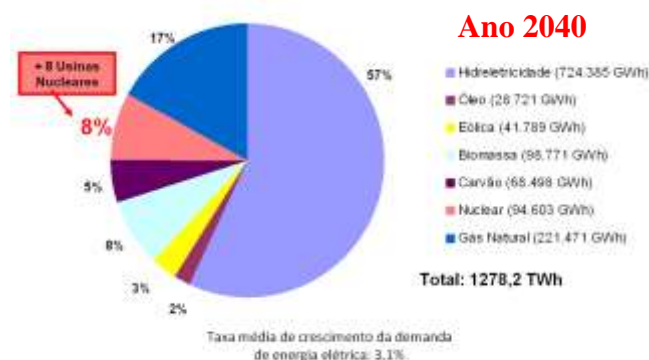


Fig. 19 – Cenário 1 – FGV-SP – 2013

No segundo cenário (fig. 20), o estudo faz uma projeção de crescimento econômico baixo no curto prazo (de 2,5% ao ano) e num momento posterior a economia se reajusta e chega ao patamar de 4% ao ano. Nesse contexto, a hidroeletricidade corresponderá a 49% da energia elétrica gerada e as demais com 21% (gás natural), 12% (nuclear), 6% (biomassa e eólica), 4% (carvão) e 2% (óleo).



Fig. 20 – Cenário 2 – FGV-SP – 2013

No terceiro cenário traçado (fig. 21), as taxas de crescimento são de 2,5% ao ano até 2015 e a partir de então passa para 5% ao ano. A fonte energética mais utilizada permanecerá a hidrelétrica, com percentual menor, de 46%. Gás natural fica em 18% e a nuclear avança, com 15%. Biomassa e eólica corresponderão a 7% cada uma, seguidos de carvão (5%) e óleo (2%).



Fig. 21 – Cenário 3 – FGV-SP – 2013

Evidentemente que cenários são desenvolvidos com o objetivo de orientar políticas e decisões, no presente, que possam ser tomadas com a devida antecedência, e assim viabilizar melhores caminhos para o setor elétrico e do país.

Neste caso, estes três cenários implicam, respectivamente, na construção de mais 8, 18 ou 23 novas usinas nucleares, pós Angra 3, de modo a permitir a participação percentual necessária no horizonte 2040 considerado, compondo respectivamente o referido mix de geração.

A diversificação da matriz cria condições necessárias para minimizar a dependência física e/ou climática da produção de eletricidade. Essa diversificação deve ocorrer a custos competitivos, incluindo uma maior participação na construção de centrais nucleares, em função das inovações introduzidas com as novas tecnologias, a geração III e III+ de reatores nucleares (conforme pode ser visualizada no apêndice I, em segurança, desempenho operacional, facilidades construtivas e outros).

Uma análise destes três cenários, para o caso da fonte nuclear, está representada na figura 22. Toma-se como base 10 anos como período de tempo necessário entre a tomada de decisão e o tempo

de entrada em operação de uma usina nuclear (fig. 23). Considera-se que o início de construção seria a partir de 2015, compatível com o início do próximo governo. Observa-se que a viabilização desses cenários implicará nas seguintes decisões:

Cenário 1: Iniciar a partir de 2015 a construção de 1 usina nuclear a cada 2 anos.

Cenário 2: Iniciar a partir de 2015 a construção de 1 usina a cada ano, sendo que, a partir de 2038, duas usinas por ano.

Cenário 3: Iniciar, a partir de 2015, 3 usinas a cada 2 anos.

Da análise desses cenários, observa-se a urgência na definição e decisão de implantação das novas usinas nucleares no Brasil, pós-Angra 3, de modo que o mix energético formado ao longo do tempo, propicie a segurança energética, econômica e ambiental ao Sistema Elétrico Brasileiro.



Fig. 22 - Programa de construção de novas usinas nucleares

I t e m	Descrição	Ano											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	Seleção e Aquisição de Sítio	█											
2	Licenciamento do Sítio, Ambiental e Nuclear (inicial)		█										
3	Licenciamento Nuclear para Operação					█							
4	Contratação do EPC / Fabricação de componentes pesados				█								
5	Construção e Montagem						█						

Fig. 23 - Cronograma simplificado de construção de uma usina nuclear

Observe-se que o cenário 2 tem como premissa para o desenvolvimento para a economia do Brasil, uma projeção do crescimento baixo no curto prazo (2,5% de crescimento do PIB ao ano) e no momento posterior a economia se reajusta e chega ao patamar de crescimento de 4% ao ano. Este cenário se aproxima bastante do que se espera hoje da economia do país para os próximos anos.

O suporte de energia elétrica, para esse crescimento, já foi apresentado na figura 21 e implica na construção até 2040 de 18 usinas nucleares de 1.100MW, aproximadamente.

O PNE 2030 – MME – Plano Nacional de Energia, previu para a entrada em operação até 2030 mais 4 usinas nucleares. Tomar a decisão em 2015 significará ter essas 4 usinas entrando em operação numa sequência de intervalos de 1 ano e meio, aproximadamente, iniciando a partir de 2024/2025. Olhando para o cenário 2 e para o pós 2030, a continuidade do programa se daria com a entrada em

operação de 1 usina por ano, entre 2031 até 2036 e, a partir daí, 2 usinas por ano até 2040, completando as 18 unidades previstas no cenário.

É claro que, esse quadro, pode parecer, num primeiro momento inatingível, mas é importante frisar que ele é decorrente da necessidade futura da demanda de energia elétrica brasileira e que essa participação nuclear representa apenas 12% do mix energético em 2040 contra 21% do gás natural, 12% das renováveis, 49% das hidrelétricas 4% e 2 %, respectivamente, para o carvão e o petróleo. Reconhecer a dificuldade na execução desses cenários, seria semelhante a reconhecer que o Brasil não poderia crescer na taxa média de 4% ao ano, número, no entanto, que é considerado razoável pelos economistas, para o porte e necessidades da economia brasileira. É bom notar que neste instante somente a China está construindo, simultaneamente, 30 usinas nucleares e programando construir mais 57 até 2030 (fig. 35), também que no passado a França construiu e colocou em operação 40 usinas nucleares em 10 anos (fig. 44). Olhando esses números poderíamos indagar: o que o Brasil precisará fazer para construir mais 4 usinas nucleares até 2030 e prosseguir com mais 14 até 2040?

Em recente encontro internacional em novembro de 2013, INAC 2013 – International Nuclear Atlantic Conference, a Cnen (ref. “A atividade de regulação de reatores nucleares: uma visão prospectiva”) e a INB (ref. “The Nuclear Fuel Cycle in Brazil”) fizeram apresentações mostrando os caminhos que o Brasil precisa seguir, sobretudo na área regulatória e de combustível para poder viabilizar a realização deste programa. Um comprometimento claro e estável em relação à energia nuclear, como parte de uma estratégia nacional para cumprimento de uma política energética e de objetivos ambientais, é um pré-requisito para um programa nuclear de sucesso. O governo terá que assumir um papel ativo, trabalhando em conjunto com todos os interessados, a fim de ultrapassar os obstáculos e atingir os objetivos.

5. USINAS NUCLEARES

5.1. FUNCIONAMENTO

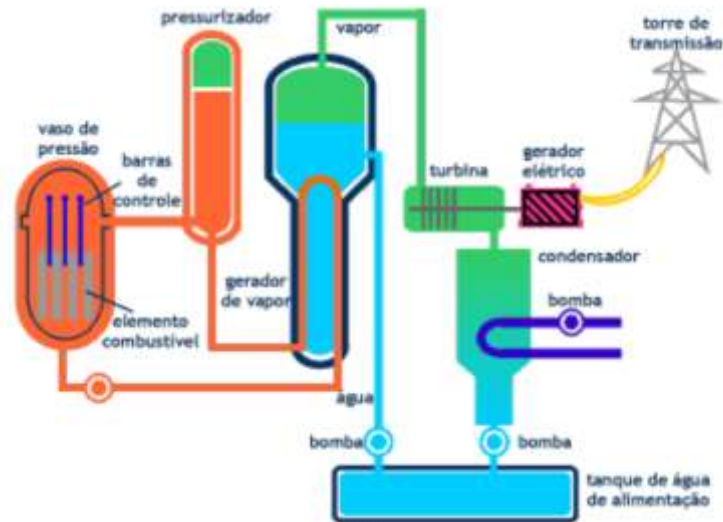


Fig. 24

A grande vantagem de uma Central Térmica Nuclear é a enorme quantidade de energia que pode ser gerada, ou seja, a potência gerada, para pouco material usado (o urânio). Fig. 24

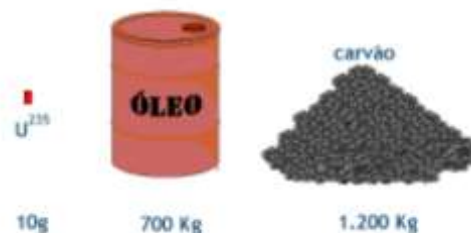


Fig 25

O urânio-235, por analogia, é chamado de combustível nuclear, porque pode substituir o óleo ou o carvão, para gerar calor.

Não há diferença entre a energia gerada por uma fonte convencional (hidroelétrica ou térmica) e a energia elétrica gerada por um Reator Nuclear.

Um reator nuclear do tipo do que foi construído (Angra e Angra 2) é conhecido como PWR (Pressurized Water Reactor = Reator a Água Pressurizada), porque contém água sob alta pressão.

O urânio, enriquecido a cerca de 3.2% em urânio-235, é colocado, em forma de pastilhas de 1 cm de diâmetro, dentro de tubos ("varetas") de 4m de comprimento, feitos de uma liga especial de zircônio, denominada "zircalloy".

As varetas, contendo o urânio, conhecidas como Varetas de Combustível, são montadas em feixes, numa estrutura denominada ELEMENTO Combustível.

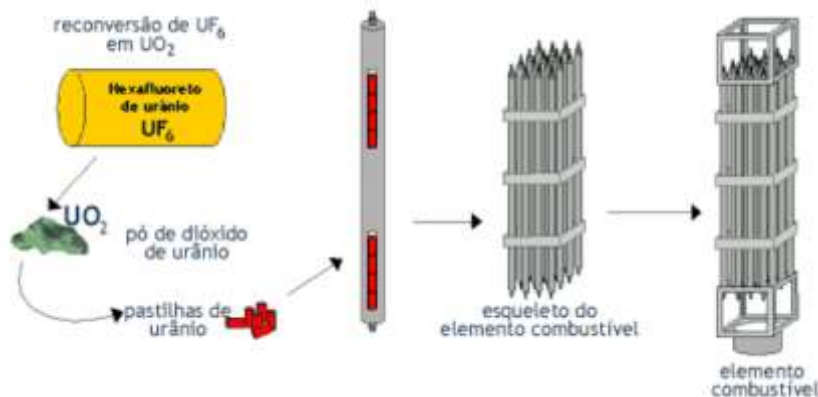


Fig. 26

As varetas são fechadas, com o objetivo de não deixar escapar o material nelas contido (o urânio e os elementos resultantes da fissão) e podem suportar altas temperaturas. Os elementos resultantes da fissão nuclear (produtos de fissão ou fragmentos da fissão) são radioativos, isto é, emitem radiações e, por isso, devem ficar retidos no interior do Reator.

A Vareta de Combustível é uma barreira que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente (Fig. 26).

Na estrutura do Elemento Combustível existem tubos guias, por onde podem passar as Barras de Controle, geralmente feitas de cádmio, material que absorve nêutrons, com o objetivo de controlar a reação de fissão nuclear em cadeia.

Quando as barras de controle estão totalmente para fora, o Reator está trabalhando no máximo de sua capacidade de gerar energia térmica.

Quando elas estão totalmente dentro da estrutura do Elemento Combustível, o Reator está "parado" (não há reação de fissão em cadeia).

Os Elementos Combustíveis são colocados dentro de um grande vaso de aço, com "paredes", no caso de Angra 1, de cerca de 33 cm e, no caso de Angra 2, de 25 cm.

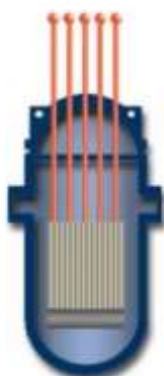


Fig 27 - Vaso de pressão do reator

Esse enorme recipiente, denominado Vaso de Pressão do Reator, é montado sobre uma estrutura de concreto, com cerca de 5 m de espessura na base.

O Vaso de Pressão do Reator é a outra barreira física (fig. 27) que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.

O Vaso de Pressão contém a água de refrigeração do núcleo do reator (os elementos combustíveis). Essa água fica circulando quente pelo Gerador de Vapor, em circuito, isto é, não sai desse Sistema, chamado de Circuito Primário.

Angra 1 tem dois Geradores de Vapor; Angra 2 tem quatro. A água que circula no Circuito Primário é usada para aquecer uma outra corrente de água, que passa pelo Gerador de Vapor.

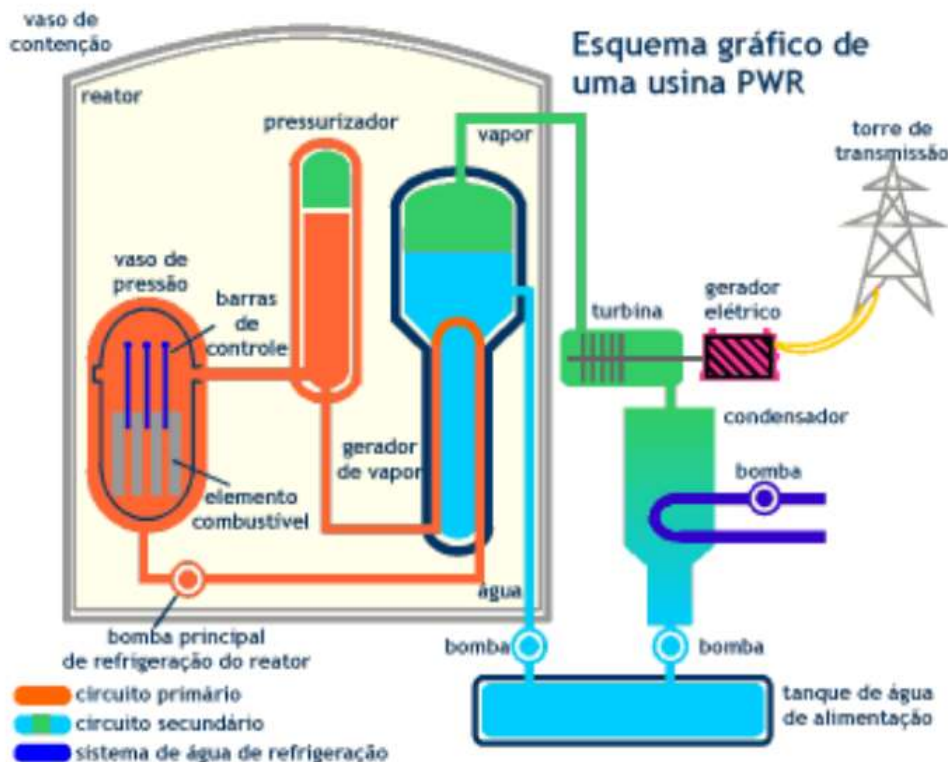


Fig 28 – Esquema gráfico de uma usina PWR

A outra corrente de água, que passa pelo Gerador de Vapor para ser aquecida e transformada em vapor, passa também pela turbina, em forma de vapor, acionando-a. É, a seguir, condensada e bombeada de volta para o Gerador de Vapor, constituindo um outro Sistema de Refrigeração, independente do primeiro. O sistema de geração de vapor é chamado de Circuito Secundário.

A independência entre o Circuito Primário e o Circuito Secundário tem o objetivo de evitar que, danificando-se uma ou mais varetas, o material radioativo (urânio e produtos de fissão) passe para o Circuito Secundário. É interessante mencionar que a própria água do Circuito Primário é radioativa. (Fig. 28)

O Vaso de Pressão do Reator e o Gerador de Vapor são instalados em uma grande "carcaça" de aço, Com 3,8 cm de espessura em Angra 1. Esse envoltório, construído para manter contidos os gases ou vapores possíveis de serem liberados durante a operação do Reator, é denominado Contenção. No caso de Angra 1, a Contenção tem a forma de um tubo (cilindro). Em Angra 2 é esférica. (Fig. 29)

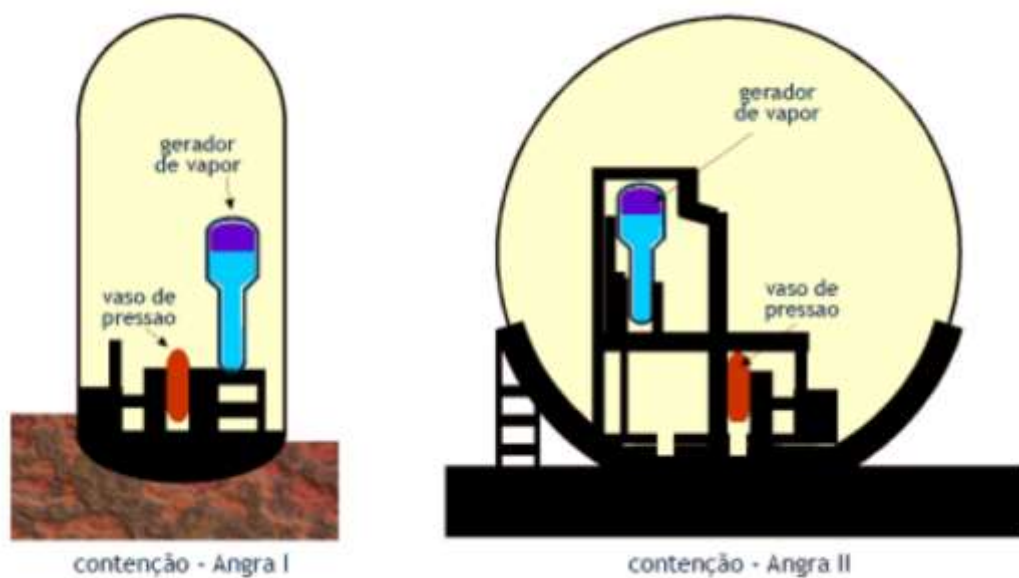


Fig. 29 – Vasos de contenção – Angra 1 e 2

A contenção (fig. 30) é uma barreira que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.

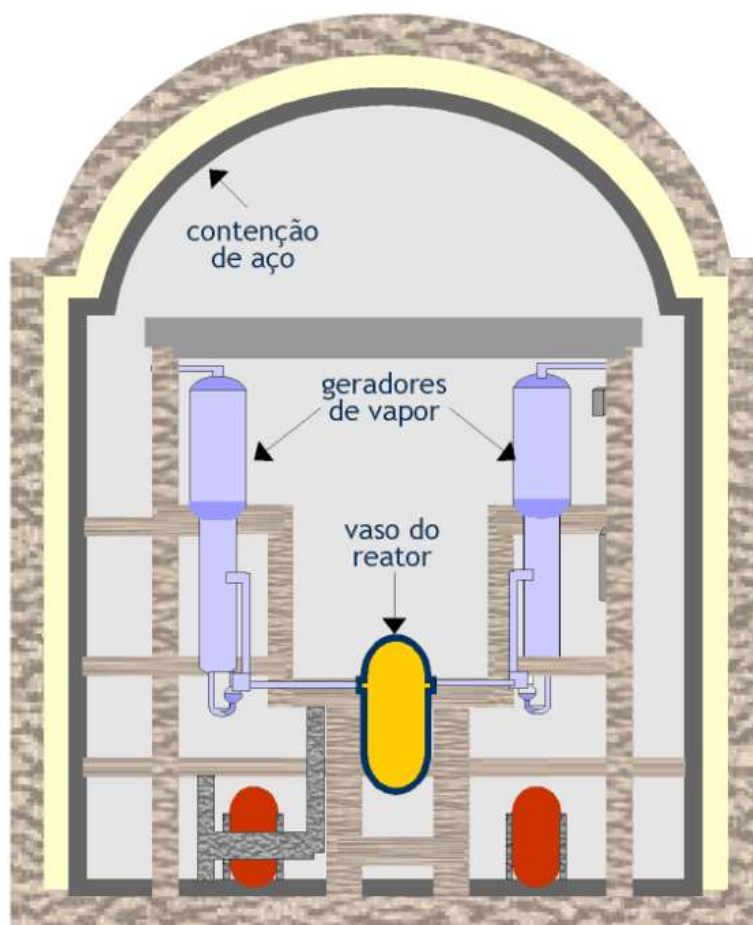


Fig. 30 – Vaso de contenção

Na verdade, existem vários tipos de defesa em uma usina nuclear. Elas podem ser:

DE PROJETO — Este conjunto de barreiras engloba os cuidados que são tomados antes mesmo da escolha do local onde a usina será construída. São analisados todos os possíveis riscos, até mesmo os mais improváveis, como terremotos ou a queda de um avião.

FÍSICAS — Nesta categoria, estão incluídas todas as proteções utilizadas para conter ou minimizar os níveis de radiação inerentes ao funcionamento do reator nuclear. Essas barreiras vão desde a própria estrutura molecular da pastilha de combustível até as grossas paredes de aço e concreto que cercam todo o circuito primário da usina.

DE PROCESSO — Essas barreiras garantem a segurança do trabalho humano e sua interação com a máquina, estabelecendo rotinas de trabalho e procedimentos administrativos e operacionais. Nesta categoria, estão incluídos itens como os treinamentos; programas de testes periódicos; os procedimentos de trabalho; e processos de avaliação interna e externa.

ORGANIZACIONAIS — Aqui estão os controles legais e institucionais relativos à segurança. Elas incluem leis específicas de âmbito nacional e internacional, a existência de um órgão regulador — no caso brasileiro, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen) — e de acordos com organismos nacionais e internacionais.

A figura 31 apresenta todas as barreiras no edifício do reator.

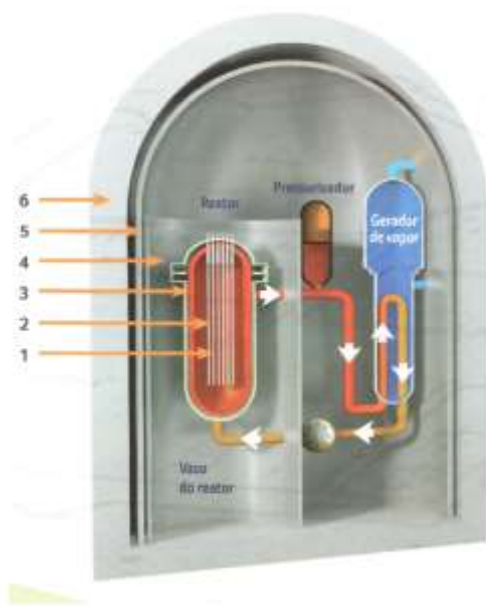


Fig. 31 – Edifício do Reator

1 - As pastilhas de dióxido de urânio possuem uma estrutura molecular que retém a maior parte dos produtos gerados na fissão.

2 - As varetas que contêm as pastilhas são feitas de uma liga especial.

3 - O vaso do reator funciona como urna barreira estanque.

4 - A blindagem radiológica permite que os trabalhadores possam acessar áreas próximas ao reator.

5 - O envoltório de aço, com três centímetros de espessura, conterá qualquer material físsil caso as demais barreiras falhem.

6 - Envoltório de concreto, com 70 centímetros espessura, conterá material físsil e é projetado para resistir a grandes impactos.

A figura 32 apresenta uma visão completa de uma usina nuclear tipo Angra 2.



Fig. 32

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1 – Gerador elétrico | 6 – Piscina de combustível usado |
| 2 – Turbinas de baixa pressão | 7 – Barreira de contenção de aço |
| 3 – Turbina de alta pressão | 8 – Barreira de contenção de concreto |
| 4 – Gerador a vapor | 9 – Sala de controle |
| 5 – Reator | 10 – Edifício da administração |

5.2. MUNDO

Com o crescimento global do consumo energético, muitos esforços têm sido feitos para aumentar a oferta de energia, com a energia nuclear se configurando como uma das tecnologias mais importantes para o futuro desta indústria. A energia nuclear tem uma das melhores taxas de geração de calor entre as fontes térmicas de geração e não emite gases do efeito estufa. É uma produção de energia em larga escala, se configurando como energia de base de sistemas, concentrada em uma pequena área com um combustível potente e de preço extremamente competitivo. Para que as funções de uma sociedade moderna sejam desempenhadas a contento (movimentar indústria, comércio, prover comunicação, saúde, serviços públicos, etc.) é indispensável dispor da energia, em especial da elétrica de forma confiável e a preço adequado. O suprimento e a segurança energética são hoje questões essenciais para qualquer país, e estão na origem de muitas das decisões estratégicas dos governos.

Uma visualização de como a energia nuclear é gerada no mundo está representado na figura 33.

Em 2012 os Estados Unidos foi o país que mais gerou energia por fonte nuclear, sendo responsável por cerca de 32% da produção total deste tipo de energia no mundo. Também se destacaram: França (17%), Japão (6,3%), Alemanha (4%), Rússia (6.5%), Coreia do Sul (6%), Canadá (3.5%), Ucrânia (3,4%) e China + Taiwan (4%). O Brasil foi responsável por 0.6% da geração de energia por fonte nuclear no mundo.

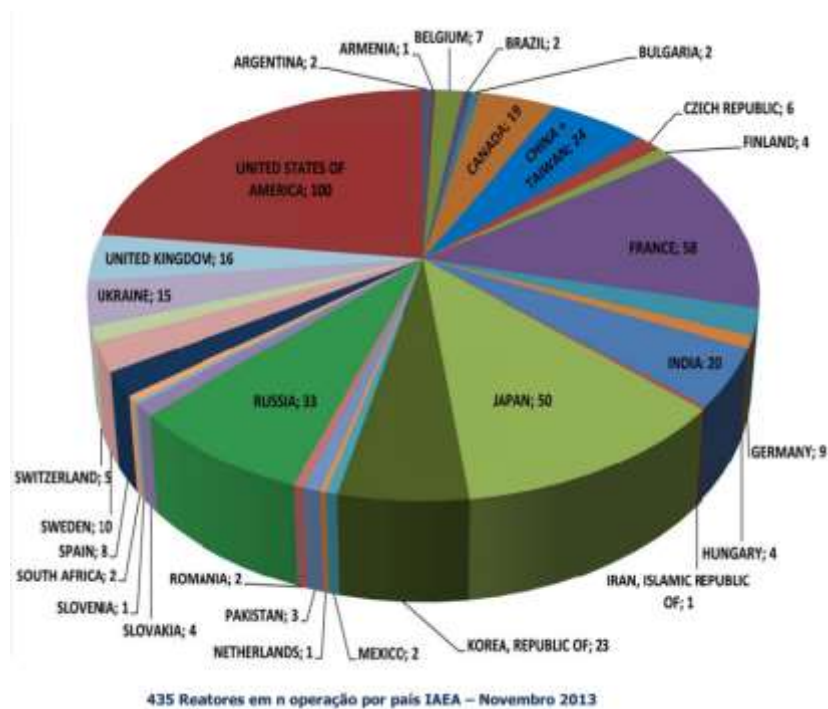


Fig. 33

A França diminuiu sua produção de energia nuclear em 2012 que atingiu 407.438 GWh principalmente devido às paradas mais longas no período.

No Japão a produção foi de apenas 17.230 GWh, com enorme queda em relação a 2011 quando chegou a 156.182 GWh, ainda como consequência do acidente de Fukushima Daiichi. Apenas dois reatores estão em operação.

A Alemanha produziu 94.098 GWh brutos com pequena redução em relação ao ano de 2011 quando atingiu 96.951 GWh líquidos.

Atualmente 65 países que não possuem tecnologia nuclear expressaram junto à AIEA seu interesse nesta questão, para a construção de reatores e/ou desenvolver uma indústria neste sentido. As potências em expansão querem multiplicar o número de usinas em seu território.

Mesmo após o acidente da central de Fukushima no Japão, muitos governos consideram a ampliação internacional da energia nuclear uma opção à mudança climática e uma alternativa às oscilações do preço dos produtos energéticos, além de ser uma proteção à incerteza sobre o suprimento dos combustíveis fósseis. A expansão de energia nuclear em todo o mundo requer que os governos atuem com responsabilidade e critérios de segurança rígidos nesse tipo de empreendimento.

Adicionalmente a IEA (International Energy Agency) projeta a necessidade dos governos mitigarem os riscos financeiros das construções e projetos nucleares através de políticas específicas, como a incorporação do preço do carbono nos custos de geração, de forma que os 375 GWe de fonte nuclear, previstos para iniciar as operações entre 2020 e 2030, tanto para substituir as plantas antigas como em novos projetos de geração elétrica possam obter o adequado investimento.

Entre 1995 e 2013 o número de reatores nucleares para produção de energia elétrica permaneceu virtualmente inalterado. Passou de 434 unidades para 437. Entretanto, a capacidade instalada cresceu de aproximadamente 9%: de 341GWh para 372 GWh. Isto devido, basicamente à substituição de reatores menores, que foram descomissionados, por reatores maiores e pelos “uprades” de potência realizados.

Em março de 2013, a idade média desses 437 reatores em operação era de 28 anos, ao passo que, ao chegar em 2030, 72% (ou 207 GWh) da capacidade de geração nuclear atual terá uma idade média superior a 40 anos. Espera-se que a quase totalidade da capacidade nuclear a ser descomissionada será substituída por novas usinas, com novas capacidades. A exceção talvez da Alemanha e de alguns outros poucos países, mas essa visão pode mudar.

A figura 34 apresenta um panorama do desenvolvimento recente, no período de 2000 a 2012, das usinas nucleares no mundo. Observe-se que, foram descomissionadas 45 unidades, totalizando 27.9GWh, enquanto que, entraram em operação, 48 novas usinas, com 37 GW e, em construção, 83 novas unidades, que adicionarão mais 76GW.

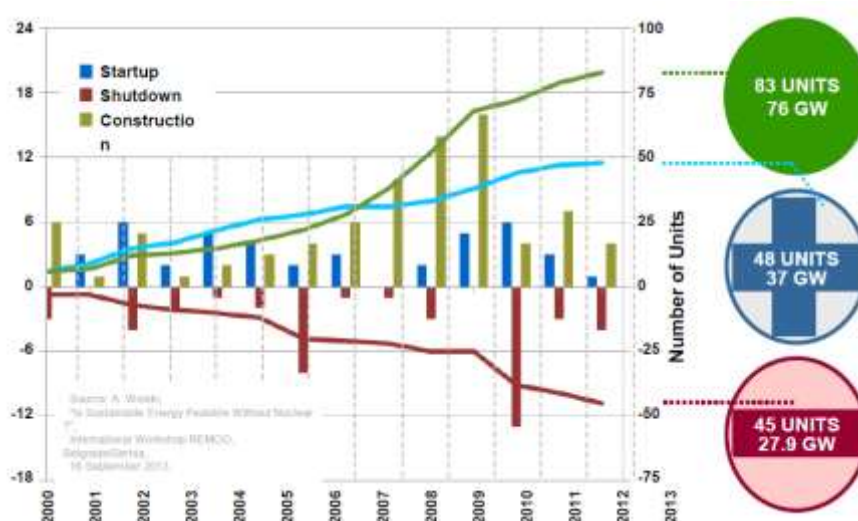


Fig. 34

Passados 3 anos do acidente de Fukushima é cada vez mais claro que o uso da energia nuclear vai continuar a crescer nas próximas décadas. Muitos países com programas nucleares existentes planejam expandi-los. Outros países, tanto desenvolvidos quanto em desenvolvimento pretendem

introduzir a energia nuclear. Note-se na figura 35 que, na data atual (maio/2014), encontram-se em construção no mundo 72 usinas nucleares e estão sendo planejadas mais 173, todas para entrarem em operação antes de 2030, ou seja: num período de 16 anos, contatos a partir deste ano de 2014. Note-se também o elevado número de 309 novas usinas, propostas a entrarem em operação nesse horizonte de 2030. Esse quadro configura definitivamente a opção nuclear como um dos grandes “players” no cenário energético mundial para os próximos anos.

COUNTRY	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION 2012		REACTORS OPERABLE		REACTORS UNDER CONSTRUCTION		REACTORS PLANNED		REACTORS PROPOSED		URANIUM REQUIRED 2014 TONNES U
	billion kWh	% e	No.	MWe net	No.	MWe gross	No.	MWe gross	No.	MWe gross	
Argentina	5.9	4.7	2	935	2	772	0	0	3	1600	213
Armenia	2.1	26.6	1	376	0	0	1	1060			87
Bangladesh	0	0	0	0	0	0	2	2000	0	0	0
Belarus	0	0	0	0	1	1200	1	1200	2	2400	0
Belgium	38.5	51.0	7	5943	0	0	0	0	0	0	1017
Brazil	15.2	3.1	2	1901	1	1405	0	0	4	4000	325
Bulgaria	14.9	31.6	2	1906	0	0	1	950	0	0	321
Canada	89.1	15.3	19	13553	0	0	2	1500	3	3800	1784
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4400	0
China	92.7	2.0	20	17055	29	33035	57	61235	118	122000	6296
Czech Republic	28.6	35.3	6	3766	0	0	2	2400	1	1200	563
Egypt	0	0	0	0	0	0	1	1000	1	1000	0
Finland	22.1	32.6	4	2741	1	1700	0	0	2	2700	480
France	407.4	74.8	58	63130	1	1720	1	1720	1	1100	9927
Germany	94.1	16.1	9	12003	0	0	0	0	0	0	1889
Hungary	14.8	45.9	4	1889	0	0	2	2400	0	0	357
India	29.7	3.6	21	5302	6	4300	22	21300	35	40000	913
Indonesia	0	0	0	0	0	0	1	30	4	4000	0
Iran	1.3	0.6	1	915	0	0	1	1000	1	300	174
Israel	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200	0
Italy	0	0	0	0	0	0	0	0	10	17000	0
Japan	17.2	2.1	48	42569	3	3036	9	12947	3	4145	2119
Jordan	0	0	0	0	0	0	1	1000			0
Kazakhstan	0	0	0	0	0	0	2	600	2	600	0
Korea DPR (North)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	950	0
Korea RO (South)	143.5	30.4	23	20656	5	6870	6	8730	0	0	5022
Lithuania	0	0	0	0	0	0	1	1350	0	0	0
Malaysia	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
Mexico	8.4	4.7	2	1600	0	0	0	0	2	2000	277
Netherlands	3.7	4.4	1	485	0	0	0	0	1	1000	103
Pakistan	5.3	5.3	3	725	2	680	0	0	2	2000	99
Poland	0	0	0	0	0	0	6	6000	0	0	0
Romania	10.6	19.4	2	1310	0	0	2	1310	1	655	179
Russia	166.3	17.8	33	24253	10	9160	31	32780	18	16000	5456
Saudi Arabia	0	0	0	0	0	0	0	0	16	17000	0
Slovakia	14.4	53.8	4	1816	2	942	0	0	1	1200	392
Slovenia	5.2	53.8	1	696	0	0	0	0	1	1000	137
South Africa	12.4	5.1	2	1830	0	0	0	0	6	9600	305
Spain	58.7	20.5	7	7002	0	0	0	0	0	0	1274
Sweden	61.5	38.1	10	9508	0	0	0	0	0	0	1516
Switzerland	24.4	35.9	5	3252	0	0	0	0	3	4000	521
Thailand	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5000	0
Turkey	0	0	0	0	0	0	4	4800	4	4500	0
Ukraine	84.9	46.2	15	13168	0	0	2	1900	11	12000	2359
UAE	0	0	0	0	2	2800	2	2800	10	14400	0
United Kingdom	64.0	18.1	16	10038	0	0	4	6680	7	8920	1738
USA	770.7	19.0	100	99098	5	6018	5	6063	17	26000	18816
Vietnam	0	0	0	0	0	0	4	4000	6	6700	0
WORLD**	2346	c 11	434	374,348	72	76,338	173	188,755	309	346,37	65,908
	billion kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U
	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION		REACTORS OPERABLE		REACTORS UNDER CONSTRUCTION		ON ORDER or PLANNED		PROPOSED		URANIUM REQUIRED

Fig 35 – Fonte: WNA – World Nuclear Association

5.3. BRASIL

5.3.1. Histórico

O interesse do governo brasileiro pela tecnologia nuclear no Brasil surgiu nos anos 1950 com os trabalhos pioneiros do almirante Álvaro Alberto da Mota e Silva, que culminaram com a criação do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), em 1951, e da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen), em 1956. A decisão de construir uma usina termonuclear no Brasil aconteceu em 1969, e as obras de Angra 1 - de tecnologia norte-americana - começaram em 1972. A unidade entrou em operação comercial em 1985. Em junho de 1975, foi assinado o Acordo Nuclear Brasil-Alemanha, que previa a construção de oito usinas nucleares no país. Destas, foram construídas duas: Angra 2, que começou a operar em 2001, e Angra 3, que está em construção e começará a operar nos próximos anos. No entanto, o Brasil tem um amplo programa de uso da energia nuclear para fins pacíficos, que vai muito além da operação das usinas. Cerca de 3 mil instalações funcionam utilizando fontes radioativas com inúmeras aplicações em áreas como medicina, agricultura e indústria.

5.3.2. Situação atual

O Brasil criou e manteve a necessária estrutura legislativa e regulatória para garantir a segurança nuclear. O país assinou várias convenções internacionais que se tornaram legislação nacional. O estado tem completo controle de todas as atividades nucleares, incluindo o controle sobre o licenciamento e a garantia da segurança nuclear.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que foi criada em 1956, é o regulador nacional em acordo com o Ato para a política nacional de Energia Nuclear. A Eletrobrás Eletronuclear, empresa estatal, é responsável pelo projeto, construção e operação de usinas nucleares.

Única empresa no Brasil a produzir eletricidade a partir de fonte nuclear, a Eletrobrás Eletronuclear foi criada em 1997 para consolidar o domínio desta importante tecnologia pelo país. Capaz de construir e operar usinas termonucleares, a empresa conta com duas unidades em funcionamento e outra em construção na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), situada no município de Angra dos Reis (RJ). Os potentes geradores das usinas Angra 1 (640 MW) e Angra 2 (1.350 MW) produzem aproximadamente 3% de toda a energia elétrica consumida no Brasil. Este percentual será ainda mais expressivo quando Angra 3 (1.405 MW), a terceira usina da Central Nuclear, estiver concluída.



Fig. 36 – Usinas Angra 1 e 2

A primeira usina nuclear brasileira entrou em operação comercial em 1985 e conta com um reator de água pressurizada (PWR), o mais utilizado no mundo. Com 640 megawatts (MW) de potência, Angra pode gerar energia equivalente ao consumo de uma cidade com 2.1 milhões de habitantes por um ano. Considerando-se o consumo médio do Brasil (2.586 kWh/hab/ano), a usina atendeu cerca de 2 milhões de habitantes em 2011 (aproximadamente 11.68% do consumo de eletricidade do estado do Rio). A unidade foi adquirida da empresa americana Westinghouse e não previa transferência de tecnologia por parte dos fornecedores. Em 2010, a usina bateu recorde de produção, fato que se repetiu novamente em 2011 e 2012. Já em 2013, Angra produziu quase 4 milhões de MWh, o resultado só não foi melhor porque a usina ficou desligada por quase dois meses para realização dos serviços de substituição da tampa do reator — fator essencial para extensão da sua vida útil. A experiência acumulada pela Eletrobras Eletronuclear em todos esses anos de operação comercial, com indicadores de eficiência que superam o de muitas usinas similares, permite que a empresa tenha, hoje, a capacidade de realizar um programa contínuo de melhoria tecnológica e incorporar os mais recentes avanços da indústria nuclear que poderão permitir a extensão da vida útil de Angra 1 por mais algumas décadas.

A segunda usina nuclear brasileira começou a operar comercialmente em 2001. Com potência de 1350 megawatts (MW), Angra 2, sozinha, poderia atender ao consumo de duas cidades do porte de Fortaleza e Porto Alegre, por aproximadamente um ano. Considerando-se o consumo médio do Brasil (2.586 kWh/hab/ano), Angra 2 atendeu Cerca de 4.1 milhões de habitantes em 2011 (aproximadamente 24.63% do consumo de eletricidade do estado do Rio). A usina conta com um reator de água pressurizada (PWR) de tecnologia alemã da Siemens/ KWU (hoje Areva NP), fruto de acordo nuclear entre Brasil e Alemanha, assinado em 1975. Angra 2 começou a ser construída em 1976, mas teve o ritmo das obras desacelerado a partir de 1983, devido à crise econômica que assolava o país naquele momento. As obras da unidade foram retornadas no final de 1994 e concluídas em 2000. A performance da usina tem sido exemplar desde o início. No final de 2000 e no início de 2001, sua entrada em operação permitiu economizar água dos reservatórios das hidrelétricas brasileiras, amenizando as consequências do racionamento de energia vivido pelo país na época, especialmente na região Sudeste, maior centro de consumo brasileiro. Em 2011, a unidade bateu seu recorde de geração, alcançando a marca de 10,99 milhões de megawatts-hora (MWh) Em 2012 a usina obteve sua segunda melhor marca de produção de energia com 10,6 milhões de MWh, ficando na 18ª posição entre as mais produtivas do planeta. Em 2013, Angra 2 bateu recorde de produção em ano com parada para reabastecimento, atingindo a marca de 10.692-555.33 MWh de energia

Angra 3, cuja construção foi retomada em 2010, será a terceira usina da Central Nuclear de Angra dos Reis e terá potência de 1405 megawatts (MW). Ela será capaz de gerar mais de 11 milhões de megawatts-hora (MWh) anuais, energia suficiente para abastecer as cidades de Brasília e Belo Horizonte durante um ano inteiro.

As obras civis, os serviços de projeto e a fabricação de componentes estão em pleno desenvolvimento. As próximas etapas construtivas estarão fortemente voltadas para a montagem eletromecânica e o comissionamento e testes de equipamentos e sistemas. Com Angra 3, a Eletrobras Eletronuclear passará a gerar o equivalente a cerca de 50% da eletricidade consumida no estado do Rio de Janeiro. A usina será similar a Angra 2, que vem apresentando excelente desempenho operacional desde a sua entrada em operação, e incorporará diversas melhorias operacionais e de segurança no projeto. Dessa forma, Angra 3 terá o estado da arte da tecnologia de usinas nucleares.

A decisão de voltar a construir Angra 3 foi tomada pelo Governo Federal, através do CNPE – Conselho Nacional de Política Energética, que aprovou, no dia 25 de junho de 2007, sua resolução de nº 3. O CNPE determinou que a Eletrobras Eletronuclear conduzisse a retomada da construção de Angra 3, que estava em compasso de espera há mais de 20 anos.



Fig. 37 - Obra de Angra 3



Fig. 38 - Visão Futura

5.3.3 Novas usinas

O Plano Nacional de Energia – PNE 2030, do Ministério de Minas e Energia/EPE, publicado em 2007, reconheceu a importância da continuidade da energia nuclear na composição da matriz de Energia Elétrica Brasileira a partir do ano de 2022. Para isso gerou três cenários, em função do desenvolvimento da economia brasileira, e indicou a necessidade de mais 4, 6 ou 8 usinas, pós Angra 3, até o ano de 2030.

Estas unidades seriam implantadas prioritariamente no Nordeste e Sudeste e iniciariam a operação na região Nordeste. A partir dessa diretriz a Eletrobrás Eletronuclear, por delegação do Ministério de Minas e Energia, iniciou a primeira etapa de estudos, a busca por sítios nucleares. Estabeleceu-se com área de interesse, a região mais próxima do centro de carga elétrica do nordeste, o eixo Salvador-Recife. Neste estudo, a área, inicialmente delimitada, abrange os estados da Bahia, Sergipe, Alagoas e Pernambuco.

Com o objetivo de identificar vários locais discretos com área suficiente (5.000.000m²) para instalação de empreendimentos nucleares de potência, optou-se pela metodologia do EPRI – Electric Power Research Institute – Palo Alto – Califórnia – EUA “Siting Guide: Site Selection and Evaluation Criteria for an Early Site Permit Application – 2002”, e simplificada descrito na figura 38 como uma filtragem sucessiva de etapas.

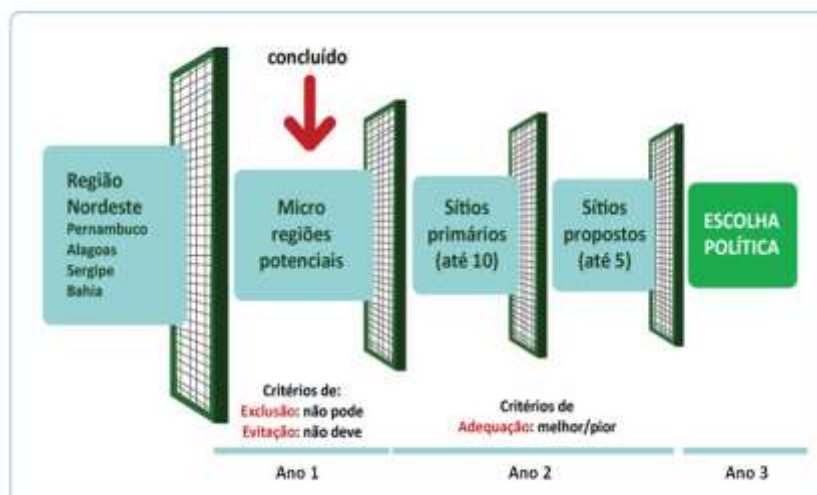


Fig. 39

As etapas 1 e 2 do EPRI Sitting Guide são de natureza geográficas. Foram empregadas técnicas de geoprocessamento, em específico, o software para SIG (Sistema de Informação Geográfica).

Para realização deste trabalho, a Eletrobrás Eletronuclear contou com o apoio técnico do Grupo de Análise e Risco Tecnológico Ambiental – GARTA – vinculado a COPPE/UFRJ (Coordenação de Pós-graduação de Programas de Engenharia):

Para obter os sítios potenciais, considerada uma região de interesse no Nordeste do Brasil (PE, AL, SE e BA), foram utilizados inicialmente, vinte critérios exploratórios caracterizados por áreas, a seguir detalhadas: Saúde e Segurança; Ambientais; Socioeconômicos e Engenharia e Custos.

A seguir os critérios de avaliação utilizados:

Critérios de Saúde e Segurança:

- Movimento Vibratório do solo
- Falhas Capazes
- Falhas Superficiais e deformações
- Perigos Geológicos
- Estabilidade do Solo
- Suprimento de água de Refrigeração
- Temperatura Ambiente
- Inundação
- Instalações Existentes
- Ventos
- Precipitação
- População
- Dispersão Atmosférica
- Aquíferos (Groundwater Radionuclide Pathway)

Critérios Ambientais:

- Ameaças sobre habitats e espécies importantes
- Áreas Alagadas (Wetlands)
- Profundidade do lençol freático

Critério Sócio-Econômicos:

- Efeitos Relacionados com a construção e a Operação

Critérios de Engenharia e Custos:

- Distância de Bombeamento
- Topografia

Neste instante esses estudos estão em compasso de espera, para posterior aprofundamento em sítios a serem definidos, aguardando decisão do Governo Federal pelo prosseguimento da construção de novas centrais nucleares no país. A figura 42 apresenta uma simulação de uma central nuclear, em um dos sítios, situado próximo às margens do Rio São Francisco. Analogamente todos os outros sítios candidatos podem desenvolver centrais, também, com 6 unidades. Este foi um dos critérios de seleção.

Praticamente a totalidade dos sítios nucleares candidatos no Brasil são situados também em rios.



Fig. 42

É interessante notar que a maioria das usinas nucleares do mundo é situada em rios. Só para dar um exemplo, a França, que tem 75,5% de sua produção de energia elétrica com base nuclear, opera 58 usinas (fig.43), sendo 14 à beira mar e 44 em rios. Só 14 estão situadas no rio Rhône (Ródano), 10 no Vale do Loire, 1 no rio Senna, e as demais em outros rios.

A maioria dessas usinas, aproximadamente 40, foi construída num espaço de tempo de dez anos, como mostrado na figura 44.



Fig. 43– Sítios nucleares na França

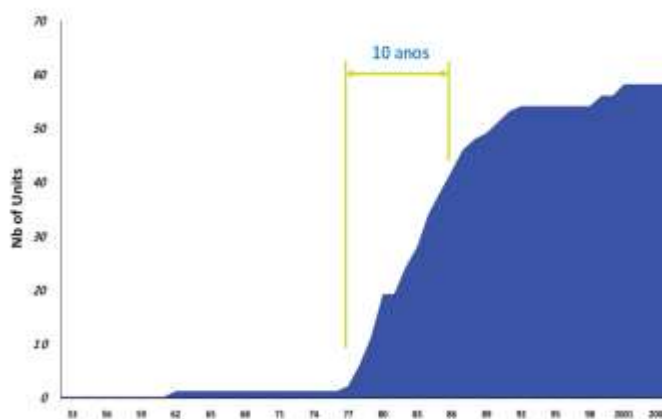


Fig.44 – Implantação de Usinas Nucleares na França

5.4 – URÂNIO E CICLO DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR

O urânio se distribui sobre toda a crosta terrestre aparecendo como constituinte da maioria das rochas. As reservas deste elemento, para que se tornem economicamente atrativas, dependem do teor de urânio presente assim como da alternativa tecnológica usada para o seu aproveitamento.

5.4.1 Reservas brasileiras

O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de urânio o que permite o suprimento das necessidades domésticas a longo prazo e a disponibilização do excedente para o mercado externo.

O País registra a sétima maior reserva geológica de urânio do mundo. Com cerca de 309.000t de U_3O_8 nos Estados da Bahia, Ceará, Paraná e Minas Gerais, entre outras ocorrências.

As reservas geológicas brasileiras evoluíram de 9.400 toneladas, conhecidas em 1975, para a atual quantidade, podendo certamente serem ampliadas com novos trabalhos de prospecção e pesquisa mineral já que esses foram realizados em apenas 25% do território nacional.

O País possui também ocorrências uraníferas associadas a outros minerais, como aqueles encontrados nos depósitos de Pitinga no Estado do Amazonas além de áreas extremamente promissoras como a de Carajás, no Estado do Pará. Nesses, se estima um potencial adicional de 300.000t.

Segundo a classificação utilizada pela AIEA as reservas brasileiras estão assim distribuídas:

Ocorrência	Medidas e Indicadas			Inferidas	TOTAL
Depósito-Jazida	< 40US\$/kg U	< 80US\$/kg U	Sub-Total	< 80US\$/kg U	
Caldas (MG)		500t	500t	4.000t	4.500t
Lagoa Real/Caetité (BA)	24.200t	69.800t	94.000t	6.770t	100.770t
Santa Quitéria (CE)	42.000t	41.000t	83.000t	59.500t	142.500t
Outras				61.600t	61.600t
TOTAL	66.200t	111.300t	177.500t	131.870t	309.370t

Fig. 45

O mapa da figura 46 apresenta mais detalhes, inclusive uma estimativa de novas jazidas.



Fig. 46

A demanda urânio no Brasil U_3O_8 (para uma vida útil de uma usina nuclear de 60 anos) está representada nas tabelas da figura 47, onde se pode observar os consumos previstos de Angra 1, 2 e 3 e o consumo correspondente a cada unidade de 1.100 MW das 4 usinas adicionais previstas para entrar no sistema até 2030 conforme estudo realizado pelo PNE – Plano Nacional de Energia, do Ministério de Minas e Energia. Verifica-se que as reservas de urânio atuais atendem com folga a demanda dessas 7 usinas, como pode ser observado pelo saldo ainda disponível de 87.000t de urânio. Considerando que cada usina de 1.100MW tem o consumo de 15.000t de U_3O_8 para adicionar mais 14 unidades até 2040, conforme o cenário 2, apresentado no item 3.3, seriam necessárias 210.000t de U_3O_8 que deduzidas do saldo de 87.000t, daria 123.000t de U_3O_8 que precisariam ser obtidas por novas jazidas fig. 48.

Urânio Recuperável (t de U_3O_8)	
Caetité	80.000
Santa Quitéria	107.000
Total	187.000

Disponível	Demanda	Saldo
187.000	100.000	87.000

DEMANDA DE URÂNIO	
Em toneladas de U_3O_8 para uma vida útil de uma usina nuclear (60 anos)	
Angra 1	4.800
Angra 2	16.000
Angra 3	19.200
N1	15.000
N2	15.000
N3	15.000
N4	15.000
TOTAL	100.000

Fig 47

Depósito	Toneladas de U_3O_8		
	Medida	Inferido	Total
Caetité / Lagoa Real	94.000	6.700	100.770
Santa Quitéria	91.200	51.300	142.500
Outros	39.500	26.670	66.100
Total	224.700	84.670	309.370
Prognóstico: Pitinga (AM): 150.000			
Rio Cristalino (PA): 150.000			
Especulativo: 500.000			

Fig 48

5.4.2 Reservas mundiais

Considerando que o quilo (kg) de urânio possível de ser obtido a custos inferiores a US\$130,00, as reservas mundiais se distribuem conforme a tabela abaixo:

País	t U_3O_8	t U
	< US\$ 130 / kg U	< US\$ 130 / kg U
Austrália	1.462.000	1.243.000
Cazaquistão	961.000	817.000
Rússia	641.000	546.000
África do Sul	512.000	435.000
Canadá	497.000	423.000
Estados Unidos	399.000	342.000
Brasil	310.000	279.000

Fig. 49 - AIEA - janeiro de 2007

5.4.3 O ciclo do combustível nuclear no Brasil

O ciclo do combustível nuclear no Brasil pode ser resumido na figura 50



Fig. 50 - Ciclo do combustível nuclear



Fig. 51 - Mineração e Produção de Concentrado de Urânio (U_3O_8)

Mineração e Produção de Concentrado de Urânio (U_3O_8): o elemento químico urânio é um metal encontrado em formações rochosas da crosta terrestre. Na primeira etapa do ciclo do combustível, após o conjunto de operações, que têm como objetivo descobrir uma jazida e fazer sua

avaliação econômica - prospecção e pesquisa -, determina-se o local onde será realizada a extração do minério do solo, e o início dos procedimentos para a MINERAÇÃO e para o BENEFICIAMENTO.

Na usina de beneficiamento o urânio é extraído do minério, purificado e concentrado sob a forma de um sal de cor amarela, conhecido como "yellowcake", matéria prima para produção da energia gerada em um reator nuclear. Estas atividades são desenvolvidas na INB CAETITÉ.



Fig. 52 - Conversão de U_3O_8 em UF_6

Conversão de U_3O_8 em UF_6 : é a transformação do yellowcake (U_3O_8) em hexafluoreto de urânio (UF_6). Na usina de conversão, o urânio sob a forma de yellowcake, é dissolvido e purificado, obtendo-se então o urânio nuclearmente puro. A seguir, é convertido para o estado gasoso, o hexafluoreto de urânio (UF_6), para permitir a transformação seguinte: **enriquecimento isotópico**.



Fig. 53 - Enriquecimento Isotópico

Enriquecimento Isotópico: o urânio₂₃₅ é o isótopo físsil responsável pela reação em cadeia nos reatores nucleares. A operação de enriquecimento do urânio tem por objetivo aumentar a concentração do urânio₂₃₅ acima da natural - o urânio natural contém apenas 0,7% de urânio₂₃₅ - para, em torno de 3% permitir sua utilização como combustível para geração de energia elétrica.

Atualmente, o processo de enriquecimento é efetuado no exterior e enviado em contêineres para a Fábrica de Combustível Nuclear - Reconversão.

Parte desta etapa, será realizada no País, na FCN, com a utilização de tecnologia desenvolvida pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo - CTMSP.

O desenvolvimento da tecnologia de ultracentrifugação de urânio é um marco de sucesso na história tecnológica do Brasil. Do interesse inicial do Almirante Álvaro Alberto, o qual tentou trazer centrífugas da Alemanha no pós-Guerra, enfrentando forte resistência externa, conseguiu-se com o esforço, dedicação, criatividade e obstinação de técnicos e engenheiros brasileiros, ao longo de 15 anos, conceber e aperfeiçoar uma série de máquinas para produção de material para uso no combustível nuclear, emprego pacífico da energia nuclear, como estabelece nossa Constituição Federal.

A decisão tomada no final dos anos 70 pela escolha da ultracentrifugação foi acertada, por ser um método muito eficiente, em termos de consumo de energia elétrica, e modular, trabalhando com unidades padronizadas e organizadas em arranjos em série e paralelo, o que garante boa flexibilidade operacional. Prova do acerto da decisão é visto na recente evolução tecnológica dos países que usavam a difusão gasosa, como os EUA e a França, para o processo da ultracentrifugação.

Como produtos do desenvolvimento da implantação da tecnologia de ultracentrifugação, foi desenvolvida no Brasil a produção de aços de alta resistência, assim como de válvulas especiais para operar com substâncias corrosivas. Igualmente importante, vários componentes de satélites e mísseis têm sido fabricados e testados usando recursos laboratoriais e industriais do CEA, originalmente estabelecidos para o desenvolvimento do programa nuclear conduzido pela Marinha. Recentemente, identifica-se também como resultado expressivo o trabalho conjunto da MB, Força Aérea Brasileira (FAB), universidades e institutos de pesquisa, para a produção no país de fibra de carbono de alto desempenho, por meio de convênio com a Financiadora de Projetos (FINEP), órgão do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT).

O sucesso alcançado pelo projeto de enriquecimento, dentro do lema do CTMSP de que “Tecnologia Própria é Independência”, constitui-se em exemplo de que o caminho de acreditar no potencial dos brasileiros e utilizá-lo para suplantando obstáculos ao desenvolvimento nacional é, em alguns casos, o único viável e, em muitos outros, aquele que poderá garantir às futuras gerações maior autonomia e independência.

Este contrato de implantação foi assinado em julho de 2.000 para processar no País em escala industrial, a médio prazo, o enriquecimento de urânio através do processo de ultracentrifugação.



Fig. 54 - Reconversão do UF₆ em Pó de UO₂

Reconversão do UF₆ em Pó de UO₂: o hexafluoreto de urânio (UF₆) é transformado em dióxido de urânio (UO₂). Reconversão é o retorno do gás UF₆ ao estado sólido, sob a forma de pó de dióxido de urânio (UO₂).

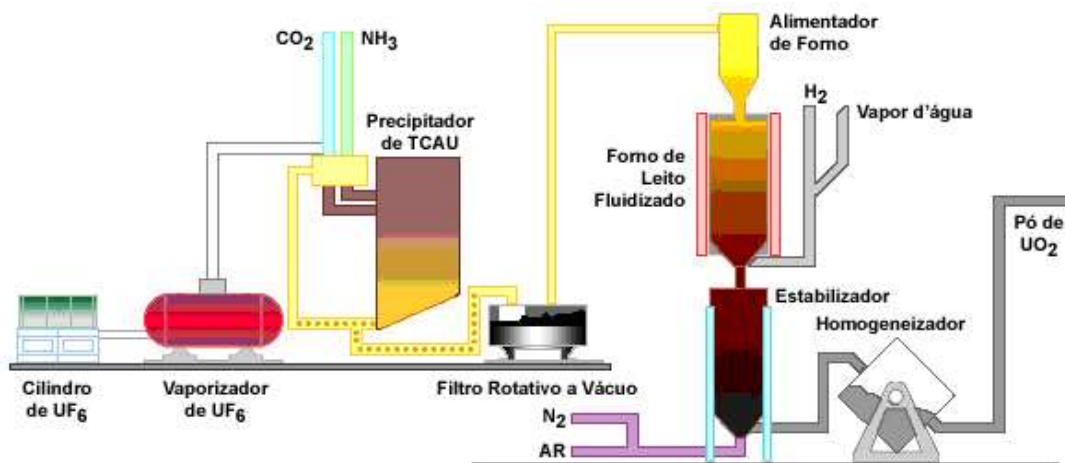


Fig. 55

No estado sólido, em recipientes cilíndricos [1], o urânio enriquecido, na forma de hexafluoreto de urânio (UF₆), é levado para aquecimento no vaporizador [2]. A 100°C o UF₆, já no estado gasoso, é misturado com outros dois gases [3]: gás carbônico (CO₂) e gás amoníaco (NH₃), em um tanque precipitador [4], contendo água desmineralizada (pura). A reação química entre estes compostos produz o tricarbonato de amônio e uranila (TCAU), sólido amarelo insolúvel em água. Em seguida, o conteúdo do precipitador é bombeado para filtros rotativos a vácuo [5] onde o pó de TCAU é seco e transportado para o alimentador do forno [6]. No forno de leito fluidizado [7], à temperatura de 600° C, o TCAU é alimentado juntamente com gás hidrogênio (H₂) e vapor d'água [8]. O produto gerado - dióxido de urânio UO₂, ainda instável - é descarregado no estabilizador [9] onde recebe a adição de gás nitrogênio (N₂) e ar [10]. Após a estabilização, o UO₂ é transportado para grandes caixas giratórias misturadoras, os homogeneizadores [11], onde a este pó é adicionado outro composto de urânio (U₃₀₈), estando pronto e à disposição da FCN Pastilhas.



Fig. 56 - Fabricação de Pastilhas de UO₂

Fabricação de Pastilhas de UO₂: duas pastilhas de urânio produzem energia suficiente para atender, por um mês, uma residência média em que vivam quatro pessoas.



Fig. 57 – Pastilhas de urânio (UO₂)

Estas pastilhas de dióxido de urânio (UO₂), que tem a forma de um cilindro de mais ou menos um centímetro de comprimento e de diâmetro são produzidas na [Fábrica de Combustível Nuclear \(FCN\) - Pastilhas](#), que após serem submetidas a diversos testes - dimensionais, metalográficos e químicos - estarão aptas a compor o Elemento Combustível, combustível para centrais nucleares.

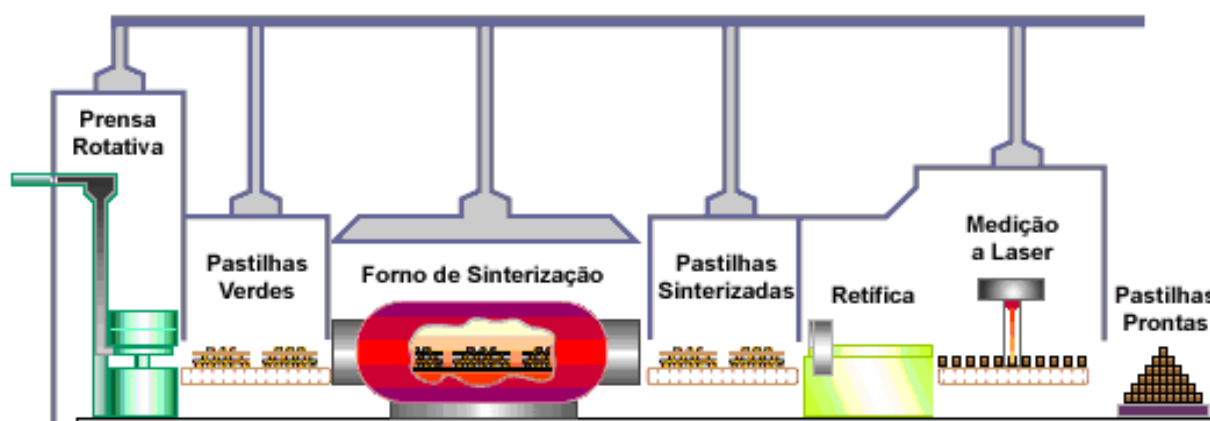


Fig. 58

Processo: após o processo de mistura (homogeneização) com U₃O₈, o pó de UO₂ é transportado para uma prensa rotativa automática [1], onde são produzidas pastilhas. Nesta fase do processo são chamadas de "pastilhas verdes" [2]. As "pastilhas verdes", ainda relativamente frágeis, são encaminhados ao forno de sinterização [3], sob temperatura de 1750° C, em processo semelhante ao da fabricação de cerâmicas, onde adquirem resistência (ou endurecimento) necessária às condições de operação a que serão submetidas dentro de um reator de uma usina nuclear. As pastilhas sinterizadas [4] passam, ainda, por uma etapa de retificação [5] para ajuste fino das dimensões. Após a retificação todas as pastilhas sinterizadas são verificadas através de medição a laser [6], que rejeita aquelas cuja circunferência estiver fora dos padrões adequados. As pastilhas sinterizadas aprovadas são acondicionadas em caixas [7] e armazenadas adequadamente num depósito existente dentro da FCN Pastilhas. Os equipamentos são mantidos sob ventilação/exaustão [8] controladas, visando a manutenção da boa qualidade do ar no interior da fábrica.



Fig. 59

Fabricação de Elementos Combustíveis: é composto pelas pastilhas de dióxido de urânio montadas em tubos de uma liga metálica especial - o zircaloy - formando um conjunto de varetas, cuja estrutura é mantida rígida por reticulados chamados grades espaçadoras.

Ainda em Resende, na Fábrica de Combustível Nuclear - FCN - Componentes e Montagem, é produzido, obedecendo a severos padrões de qualidade e precisão mecânica.

O Elemento Combustível é a fonte geradora do calor para geração de energia elétrica, em uma usina nuclear, devido à fissão de núcleos de átomos de urânio.

O elemento combustível é um conjunto de 235 varetas combustíveis - fabricadas em zircaloy - rigidamente posicionadas em uma estrutura metálica, formada por grades espaçadoras; 21 tubos-guias e dois bocais, um inferior e outro superior. Nos tubos-guias são inseridas as barras de controle da reação nuclear. Antes de serem unidas a estes tubos por solda eletrônica, as grades espaçadoras são alinhadas por equipamentos de alta precisão. A solda das extremidades das varetas se dá em atmosfera de gás inerte e sua qualidade é verificada por raios-X. Um elemento combustível supre de energia 42.000 residências médias durante um mês.

As pastilhas de urânio, antes de serem inseridas nas varetas combustíveis, são pesadas e arrumadas em carregadores e secadas em forno especiais. Simultaneamente, os tubos de zircaloy têm suas medidas conferidas por testes de ultra-som e são minuciosamente limpos. Só então as pastilhas são acomodadas dentro das varetas sob a pressão de uma mola afastada do urânio através de isolantes térmicos de óxidos de alumínio. A figura é autoexplicativa mostra a economia de combustível fóssil propiciado pela operação de uma usina nuclear.

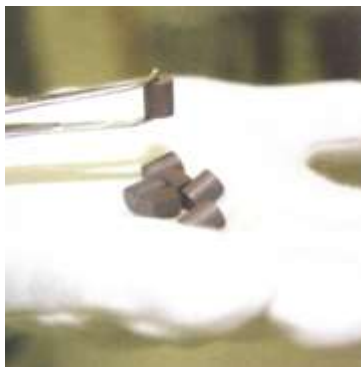


Fig. 60

Uma pastilha de urânio enriquecido como esta, usada nas usinas de Angra, pesa cerca de 8g, dos quais apenas 0,3g são combustível de fato (urânio 235). Apesar de parecer pouco, cada pastilha destas tem potencial energético muito grande, equivalente a aproximadamente 550 mil litros de óleo diesel.

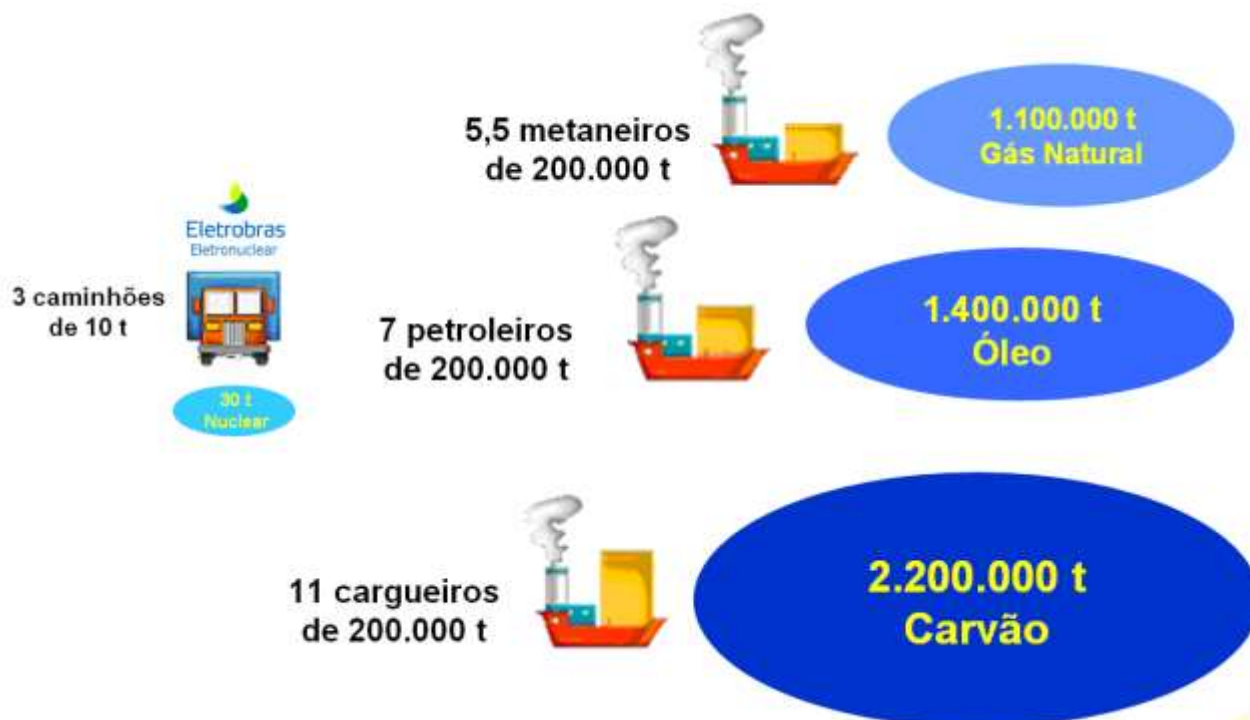


Fig.61 - Quantidade de combustível necessária para operar uma usina de 1.000MWe durante 1 ano

5.5. CONTEXTO PÓS-FUKUSHIMA: SEGURANÇA E COMUNICAÇÃO COM O PÚBLICO

Primeiramente e de forma mais elementar, acidentes nucleares acontecem. Não se trata de uma simples observação. Mesmo que se empenhe no sentido de ter uma gestão de instalações nucleares impecável, nunca se poderá ter 100% de certeza. Tampouco se pode esperar que a população acredite nisso. Deve-se reconhecer que os seres humanos erram individual e coletivamente. O problema reside na forma como essa realidade é construída. Neste momento, a maioria das pessoas continua a acreditar que a geração elétrica nuclear tem grande probabilidade de produzir um evento altamente letal. Embora Fukushima dê fortes provas do contrário, poucos da população em geral percebem a situação assim. O futuro da geração elétrica nuclear continuará a ter bases frágeis se continuar presente a percepção de graves riscos ao bem estar humano.

O objetivo deve ser explicar ao público que, mesmo no pior dos casos, a probabilidade de ocorrência de incidentes nucleares não somente é extremamente baixa, mas também cada vez menor, visto que a tecnologia nuclear continua a progredir. Simultaneamente, mesmo no caso de um acidente vir a acontecer, suas consequências não têm o alto grau de letalidade que as pessoas creem. Estas são verdades objetivas e devem ser apresentadas de forma convincente ao público.

A despeito das impressões difundidas em sentido contrário, Fukushima enfatizou a segurança essencial da energia nuclear. De fato, este foi o pior dos casos em termos de acidente nuclear. Além disso, mesmo tendo ocorrido liberações significativas de radioatividade, o caráter de precaução extremamente conservadora das políticas japonesas relativas aos padrões de segurança e de evacuação, não houve nem haverá um único caso de contaminação radioativa fatal resultante do acidente de Fukushima, e isso no contexto de um desastre natural, um terremoto seguido de Tsunami, que produziu 25.000 mortes (OMS, 2013). Esta não é uma afirmação feita com complacência, feita com o objetivo de minimizar o ocorrido: trata-se somente de um fato concreto e objetivo. Tampouco isso deve ser visto como uma surpresa. Se Fukushima produzisse um acidente fatal por radiação, este seria o primeiro a ocorrer na história da energia nuclear do Japão, dos EUA ou da França, países que contabilizam metade dos reatores nucleares do mundo. Excluído Chernobyl, não se tem notícia de nenhum incidente radioativo fatal ocorrido em toda a história da geração elétrica nuclear, levando em conta perto de 14.500 anos reator de geração elétrica nuclear em mais de 30 países ao redor do mundo. Essa verdade impressionante é totalmente desconhecida pela população e pela mídia. Sabe-se que, só nos três meses após Fukushima, milhares de pessoas morreram ao redor do mundo, seja na extração de combustíveis fósseis, ou seja, devido às consequências para a saúde da queima desses combustíveis sobretudo por doenças cardiorrespiratórias. Observado nesse contexto de letalidade continua, em larga escala e factual, aquilo que agora é comumente chamado de “desastre nuclear” de Fukushima pede uma descrição menos hiperbólica.

A cobertura da mídia nos dias de hoje tende mais ao catastrofismo do que ao equilíbrio em relação a qualquer evento envolvendo a energia nuclear. Num mundo de notícias televisionadas de forma competitiva, urgente, existe uma clara compulsão para a cobertura de qualquer história nuclear como o equivalente industrial de uma grande catástrofe. No contexto atual, os termos “derretimento” e “vazamento radioativo” são muito excitantes e tentadores, e deve-se manter a expectativa de que essa tendência continuará enquanto não conseguir desmistificar a energia nuclear. Realizar essa desmistificação significa criar uma maior compreensão pública acerca da radiação como fenômeno natural onipresente e das limitadas resultantes de vazamentos radioativos, mesmo na pior das situações.

Uma realidade enfatizada por Fukushima é a estranha fragilidade do apoio à geração elétrica nuclear em alguns países europeus avançados em termos tecnológicos. O caso da Alemanha, enquanto principal potência econômica européia, é particularmente significativo. Agindo em nome do meio ambiente, os alemães começaram agora a queimar mais carvão, petróleo e gás, ao mesmo tempo em

que continuam, sempre quando necessário, a importar eletricidade nuclear dos seus vizinhos. Enquanto o governo alemão se move em direção a uma confusa nuvem de fantasia em relação ao potencial futuro de energias renováveis, pode-se perguntar de modo muito racional como a Alemanha fará, realisticamente falando, para cumprir suas obrigações ambientais em relação aos seus parceiros europeus e ao mundo. Além disso, como explicar aos seus cidadãos o aumento tarifário de 46%, só em 2013, por conta dos elevados subsídios da energia eólica e solar, tornando a tarifa residencial e industrial mais cara da Europa, como já visto no item 4.2.

Em contrapartida tem a solidez do apoio político para a geração elétrica nuclear na maioria dos países que agora a utilizam. Isso se verifica especialmente naqueles países que planejam a implantação de programas importantes de novas construções nucleares, liderados pela China, Índia, Rússia, Inglaterra, África do Sul e Coreia do Sul. Em outros países importantes também, incluindo a França, a Polônia, a Ucrânia, o Canadá e os EUA, observam-se algumas reações contrárias, porém limitadas, com pequena perda de impulso, porém com os planos de expansão permanecendo inalterados. Sem falar na decisão recente, do governo japonês, no retorno à produção e à expansão nuclear.

Uma realidade que vem se somar às anteriores é que a compreensão pública sobre a geração elétrica nuclear em muitos países continua limitada e facilmente suscetível de uma percepção equivocada. Nos países onde observamos constância na política de apoio à energia nuclear, há principalmente o consenso de que os responsáveis políticos não tornarão a energia nuclear uma questão ideológica controversa na política local, tal como aconteceu na Alemanha. Entretanto, Fukushima teve claramente um efeito negativo de longo alcance. Em vários países de todo o mundo, a impressão geral de que "desastre nuclear" do Japão se deveu a falhas humanas e não a uma catástrofe natural, como foi o caso, enfraqueceu a confiança pública na energia nuclear. Uma vez mais se soube que "radiação" é uma das palavras mais poderosas e evocativas em qualquer língua.

Uma verdade intimamente ligada, e intensamente enfatizada pela cobertura da mídia sobre Fukushima, é que o mito de Chernobyl tem um peso enorme na consciência pública e continua sendo um ponto referência jornalística fundamental em relação a possíveis perigos da energia nuclear. Com referência ao "mito" de Chernobyl, porque pouquíssimas pessoas compreendem que o reator de Chernobyl que explodiu e pegou fogo em 1986 tem pouca pertinência em relação a qualquer reator em funcionamento agora, e também porque as consequências reais, cientificamente analisadas, causadas por Chernobyl, diferem muito daquelas percebidas pelo senso comum. Na verdade, existe um forte consenso científico de que as mortes pela radiação em Chernobyl são muito limitadas, restringindo-se a algumas dezenas de pessoas seriamente atingidas enquanto combatiam o incêndio no reator e um pequeno número de pessoas nas vizinhanças de Chernobyl, consideradas estatisticamente como algo perto de 16 em número, as quais pode-se supor que tenham morrido de câncer de tireóide causado por iodo radioativo emitido pelo reator em chamas. Como muitas autoridades sobre Chernobyl poderão atestar, a alegação da existência de quaisquer outras mortes decorrentes da radiação depende exclusivamente da chamada hipótese da "dose coletiva", que é Cientificamente infundada e ao mesmo tempo contraria todo bom senso. Entre aqueles que têm competência e preparo para afirmar isso inclui-se o presidente do Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR, 2013). Mas o público em geral não conhece essa realidade científica. Nesse sentido, também são mal compreendidas as classificações da Escala Internacional de Eventos Nucleares (AIEA, 2013). Quando Fukushima atingiu o grau 7, ou seja, um "Acidente Sério" na Escala da INES, um grau até então somente atingido por Chernobyl, esses mal-entendidos se combinaram, e milhões de pessoas no mundo inteiro concluíram que estavam testemunhando uma catástrofe humana de imensas proporções.

A economia da geração elétrica nuclear continua sendo de suma importância. Uma última realidade, que chama a atenção quando se considera a reação estratégica latente pelo mundo afora em relação a Fukushima, é que o lado econômico da geração elétrica nuclear continua sendo crucial para o seu futuro. É bem conhecido o fato de que, comparada a outras tecnologias importantes de geração de eletricidade, a energia nuclear é de investimento alto e de funcionamento barato, como a maioria das

grandes hidroelétricas. Na última década, ainda que haja aumentado a confiança no futuro da geração elétrica nuclear no mundo todo, observa-se o esforço industrial para limitar os custos de capital enquanto se empreende a construção da próxima geração de reatores. Neste contexto, é extremamente importante notar que as ações regulatórias tomadas como reação a Fukushima deverão trazer benefícios claros em termos de segurança, e não considerarem novos requisitos que somente aumentem custos sem trazer razoáveis reduções de riscos.

Como o governo e a indústria deveriam reagir? Num clima predominante imbuído do impulso pela necessidade de "fazer algo", identificam-se princípios a partir dos quais é possível avaliar qualquer reação proposta.

Estrutura institucional sólida para reação. Em primeiro lugar, tem-se que reconhecer o setor nuclear está bem equipado institucionalmente para examinar o evento de Fukushima e aprender com ele. No plano nacional, as autoridades de segurança nuclear e agências de fiscalização e controle já estão trabalhando e, internacionalmente, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), a Associação Mundial de Operadores Nucleares (WANO), que representa as concessionárias de geração elétrica nuclear do mundo, e a Associação Nuclear Mundial (WNA), cujos membros incluem não só as concessionárias, mas também as empresas que planejam, equipam e constroem as usinas nucleares, representam exatamente os mecanismos de que se necessita. Essas instituições estão apoiando a reação a Fukushima tanto em nível nacional como internacional e coordenando a participação de especialistas a elas associados.

Ressaltar exclusivamente as medidas importantes. Em segundo lugar, a reação a Fukushima deve se concentrar exclusivamente em medidas substanciais capazes de produzir reais ganhos para a segurança nuclear. Muitos pontos essenciais podem ser analisados agora. O primeiro deles é reforçar as ações de defesa em profundidade, mantendo em todas as usinas um conjunto adicional de sistemas de backup que garanta o resfriamento pós-desligamento em quaisquer circunstâncias. Isso inclui medidas para recuperar energia em corrente alternada na situação de blackout, ter geradores diesel à prova de inundação, assegurar tempos adequados de funcionamento com baterias, e um plano alternativo seguro para o suprimento de água e respectivos sistemas de bombeamento. Fukushima também requer uma nova consideração acerca de como aperfeiçoar ainda mais a segurança e a eficácia na gestão do combustível usado. Numa reação de emergência, uma interessante proposta partiu do Instituto de Operações de Energia Nuclear (INPO) norte-americano, que prevê a criação e manutenção de uma unidade de reação de emergência internacional, buscando uma ação rápida e liderada por especialistas e utilizando equipamentos interoperáveis pré-testados. Este conceito pode ser visto com ceticismo, porém o próprio ato de abordar a questão da ajuda internacional pode servir como um estímulo valioso às análises de necessidades e preparativos de emergência no plano nacional. Em relação a implicações para a tecnologia das usinas, Fukushima provavelmente oferece novas perspectivas. Embora a concepção das usinas nucleares tenha evoluído consideravelmente desde que a central de Fukushima Daiichi foi construída, é bem possível que a análise técnica aprofundada da dinâmica do que aconteceu na explosão de hidrogênio, na dispersão do material radioativo e na perda parcial da contenção permita que os responsáveis pelo projeto e construção de usinas façam aperfeiçoamentos para o futuro, tanto nas usinas em operação como nas em construção e em projeto.

Evitar gestos puramente simbólicos. Terceiro, a reação de Fukushima deveria evitar ações de natureza simbólica que oferecem pouco ganho real em termos de segurança nuclear. Um caso a ser visto é a iniciativa do Secretário Geral das Nações Unidas que convocou várias agências das Nações Unidas para tratar de como evitar outra Fukushima. Tendo em vista a proeminência da IAEA enquanto meio reconhecido pelas Nações Unidas como provedor de conhecimento especializado para que esses objetivos sejam alcançados, é difícil ver como essa conferência vagamente concebida pode ser mais do que um convite para ostentar uma imagem diante do público e causar problemas políticos. Ao contrário, os testes de estresse feitos tanto na Europa quanto em outros lugares podem conciliar simbolismo e conteúdos consistentes. A iniciativa já serviu para ampliar a consciência em relação à segurança no sentido de dar nova ênfase em relação a desastres naturais, e isso também representa um

passo potencialmente construtivo em direção de uma harmonização de normas internacionais relativas à concepção de usinas nucleares. Devemos ter como objetivo assegurar que, na prática, os resultados desses testes de estresse representarão verdadeiras melhorias na segurança.

Rever e recomeçar a trabalhar a percepção da população. Finalmente, deve-se repensar a questão da percepção da população acerca da energia nuclear. No quarto de século depois de Chernobyl, a indústria e o governo trabalharam no paradigma de que normas cada vez mais rígidas relativas à segurança nuclear e um registro de desempenho nuclear seguro cada vez mais longo traria confiança para a população em relação à geração elétrica nuclear. Isso não foi mal conduzido e foi, até certo ponto, um êxito. Porém foi incompleto. Fukushima revelou de uma forma cruel que tanto a mídia quanto a população só receberam parte da mensagem. A indústria nuclear ainda é, essencialmente, vista como “Máquinas do Juízo Final”, ainda que operadas e geridas com segurança. Nesse conceito, a palavra “dia do Juízo Final” sempre vai se sobrepor à palavra “segurança”. De fato, reguladores e indústria contribuíram, sem dúvida, para uma imagem da geração elétrica nuclear como perigosa ao aplicar normas de proteção radiológica que tendem a ser muito mais restritivas do que as que são aplicadas na medicina, na indústria não nuclear, e até mesmo as normas que determinam locais de risco onde as pessoas não podem viver. Embora alguns se orgulhem dessa prática, ela implica que a radiação proveniente da energia nuclear, por mais limitada que seja, é de alguma forma percebida como diferente e mais fatal do que os demais agentes danosos à saúde pública. Deve-se agir para mudar esse conceito disseminado. Sendo a eletricidade um serviço público vital e não simplesmente uma commodity de mercado, a questão sobre como a eletricidade é gerada hoje e como será gerada nos próximos anos é agora urgente no ponto de vista do futuro do meio ambiente terrestre, visto que os nossos cientistas e responsáveis pela concepção (IPCC 2014) de políticas estão convencidos de que a geração elétrica nuclear deve desempenhar um papel primordial, se quer realmente evitar mudanças climáticas radicais e, sobretudo, alavancar para o desenvolvimento socioeconômico de vários países, como o Brasil, por exemplo. Existe, então, um interesse imperativo da população, e uma política de laissez-faire não será suficiente. Precisa-se voltar meticulosamente, num esforço solidário, reunindo a indústria e o governo, para a questão da compreensão da população. Os fatos favorecem a energia nuclear. O desafio é como usar da melhor maneira os fatos para aliviar medos, instilar confiança e aumentar a consciência da geração elétrica nuclear. Para construir uma verdadeira consciência da população serão necessários projetos educacionais voltados para esse objetivo, em países onde os ministérios de energia e as empresas nucleares estão preparados para disponibilizar recursos para fortalecer as fundações sobre as quais a geração elétrica nuclear funciona. Esses projetos poderiam ser extremamente econômicos, em particular, empregando o efeito multiplicador de educadores. Cada projeto começaria com um olhar cuidadoso em relação ao que os alunos que estão aprendendo, ao que não estão aprendendo e ao que estão aprendendo incorretamente sobre a energia nuclear. À medida que se prepara uma reação para Fukushima, temos que reconhecer uma verdade básica: esse evento não mudou em nada a realidade evidente que levou tantas nações, nestes últimos anos, a um caminho nuclear comum.

- A população mundial continuará o seu crescimento explosivo: de 3 bilhões em 1960 quase 7 bilhões hoje, e subindo para 9 bilhões até 2050.

- A demanda mundial de eletricidade irá crescer continuamente e rapidamente.

- A ciência dos sistemas ecológicos do planeta Terra continuará a alertar sobre a nossa necessidade em reduzir 80% as emissões de carbono, ou correr o risco de passar por mudanças radicais no clima do planeta, o que representará uma ameaça para toda a civilização.

- E continuará a ser verdade que o nosso mundo pode realizar uma revolução no sentido de ter uma energia limpa com um uso amplo e extensivo da geração elétrica nuclear. Essas realidades são tão importantes e fundamentais quanto eram antes do histórico desastre natural do Japão. Portanto, o importante papel da geração elétrica nuclear também continua sendo o mesmo de antes. Encontrar os meios que permitirão que essa tecnologia de imenso valor desempenhe o seu papel fundamental e

necessário na contínua melhoria das condições de vida da humanidade é o desafio que continua a enfrentar.

A maior lição de Fukushima, a partir da análise do evento e de suas repercussões mundiais, é que a reação deve combinar uma prática cada vez mais segura com um melhor esclarecimento da população. Sem ambas, as bases da energia nuclear serão perigosamente frágeis, e assim também serão as perspectivas para a revolução mundial da energia limpa da qual depende crucialmente o futuro ambiental do nosso planeta e o desenvolvimento socioeconômico do Brasil.

5.6 – RADIAÇÃO, REJEITOS E REPROCESSAMENTO

Toda atividade humana produz resíduos. Nenhuma tecnologia é absolutamente segura ou livre de impactos ambientais.

Combustível irradiado: resíduos convencionais são restos provenientes de quaisquer atividades ou processos de origens industrial, hospitalar, comercial, agropecuária e outros, incluindo os lodos e cinzas provenientes de sistema de controle de poluição ou de tratamento de água, nos estados sólido, semi-sólido e/ou líquido.

Segundo a AIEA, a descarga anual de combustível irradiado proveniente de todos os reatores de geração de energia elétrica é de 10.500 toneladas (de metal pesado).

Alguns países veem o combustível irradiado como rejeito que deve ser guardado em repositórios definitivos para alta radiação. Outros países veem este material como um recurso energético para ser reprocessado e reutilizado.



**Fig. 62 - Usina de Processamento Sellafield
Cumbria – Inglaterra**

Desta forma, existem duas estratégias de gerenciamento deste material sendo implementadas no mundo. A primeira é o reprocessamento ou armazenagem para futuro reprocessamento, de forma a extrair o combustível ainda existente no material irradiado (Urânio e Plutônio) para produzir o MOX (óxido misto de Urânio e Plutônio) que será usado como combustível em usinas preparadas para tal. Cerca de 33% da descarga mundial tem sido reprocessada.

Na segunda estratégia o combustível usado é considerado rejeito e é armazenado preliminarmente até a sua disposição final. A experiência de 50 anos no manuseio deste material se mostrou segura e eficiente em ambas as tecnologias que foram até agora empregadas — armazenamento a seco ou em piscinas (Wet and Dry technologies). Nos dois casos o combustível irradiado é primeiramente armazenado na piscina do reator e depois em repositórios intermediários que podem ser na própria usina.

Hoje os países que reprocessam combustível nuclear são China, França, Índia, Japão, Rússia e Reino Unido. Os que guardam podendo reprocessar no futuro são Canadá, Finlândia e Suécia.

Os Estados Unidos não estão completamente definidos sobre a tecnologia a usar. A grande maioria dos demais países sequer definiu a estratégia e estão armazenando seu combustível usado e aguardando maior desenvolvimento das tecnologias associadas a ambas as estratégias.

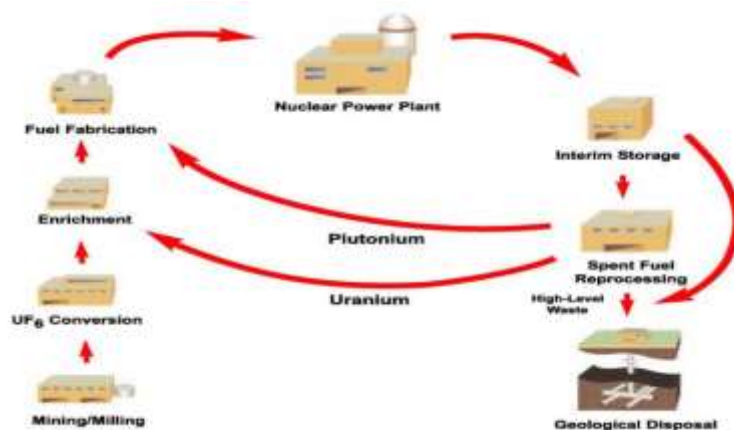


Fig. 63 - Ciclo do Combustível Nuclear

Em 2006 cerca 180 toneladas de MOX foram usadas em dois reatores BWR e em 30 PWR em diversos países (Bélgica, França, Suíça, Alemanha, etc.). O maior uso é esperado no Japão e na Índia a partir de 2010.

Programas de depósitos definitivos para combustível irradiado estão em andamento em diversos lugares, mas nenhum deles deve operar comercialmente antes de 2020. O fato de não haver nenhum depósito definitivo em operação não significa que não se tenha concebido uma solução para o tratamento dos rejeitos. A tecnologia de tratamento para deposição definitiva compreende o isolamento dos materiais através de blindagem e vitrificação e em seguida o seu depósito em cavidades rochosas estáveis. Neste local o material deverá permanecer contido até o seu decaimento a níveis que não causem danos à espécie humana ou ao meio ambiente.

O desenvolvimento de soluções inovativas como o projeto Myrrha (Multi-purpose Hybrid Research Reactor for High-Tech Applications) na Bélgica oferecem outras possibilidades para o tratamento de resíduo nuclear como a transmutação. Apesar de uma fábrica com capacidade ainda estar muito distante, um projeto piloto (ao custo de 1 bilhão de euros) deverá ser comissionado até 2019 no Centro Belga de Pesquisas Nucleares-SCK, como parte do projeto Myrrha. Os testes levarão 5 anos até o início da operação comercial, porém poderão levar a uma grande redução na quantidade e no tamanho dos depósitos permanentes para resíduos de alta atividade.

Radiação:

Como muitas coisas na natureza a radiação pode ser boa ou ruim dependendo da quantidade. No nosso planeta existe uma radiação natural de fundo (natural background source) à qual todos nós estamos submetidos todos os dias. O ser humano está adaptado a essas fontes. O sol, as rochas de granito, as areias monaziticas, outros materiais naturalmente radioativos encontrados no ar, no mar e na terra fazem parte dessa radiação. As radiações de fundo variam enormemente pelas regiões do mundo dependendo de fatores como composição de rochas no ambiente, altitude, etc.



Fig. 64 - Apenas 15% das emissões são provocadas pelo homem (medicina e indústria nuclear)

A radiação produzida por um reator nuclear é similar natural só que mais intensa, e por isso ele tem as proteções necessárias de forma a isolar a radiação do ambiente e das pessoas. As doses de radiação recebidas pela humanidade são, em mais de 85%, vindas da natureza.

Tipos de Radiação	Características - Perigo Apresentado
ALFA	Não penetra na pele – perigoso apenas se ingerido
BETA	podem ser barrados por madeira/ alumínio, etc. – pouco perigo
Raio GAMA	perigoso para pessoas - precisa ser isolado
Raio X	perigoso para pessoas - precisa ser isolado
Radiação CÓSMICA	Partículas que veem do espaço muito perigosas, não fosse a proteção da atmosfera terrestre
NEUTRONS	produzidos por fissão nuclear, podem causar danos ao homem - precisa ser isolado

Fig. 65

Os sentidos dos seres humanos não são capazes de detectar radiação e por isso são necessários equipamentos de detecção para a medição de tais liberações, sejam elas naturais ou derivadas de acidentes. Diariamente cada habitante do planeta recebe uma carga radioativa que varia conforme sua localização e/ou atividade desenvolvida. Procedimentos médicos já corriqueiros na sociedade acrescentam doses extras de radiação ao corpo humano.

A tabela abaixo dá exemplos de dose radioativa por procedimento médico realizado:

Procedimento Médico	Dose em mSv
Radiografia Dental	0,005
Mamografia	2
Scan de Cérebro	0,8 a 5
Scan de Mama	6 a 18
Raio-X Gastrintestinal	14

Fig. 66

A unidade de medida de exposição à radiação é o Sievert (Sv) e seus derivados, o mili Sievert - mSv (um milésimo do Sievert = 0,001 Sv) e o micro Sievert - μ Sv (milionésimo do Sievert = 0,000001 Sv). Esta é a unidade internacional que define os padrões para as proteções contra a radiação, levando em conta os diferentes efeitos biológicos dos diferentes tipos de radiação. As doses são

cumulativas quando a fonte é constante: $\mu\text{Sv/h} = 1$ milionésimo do Sievert por hora de exposição (0.000001 Sv/h). Outra unidade usada é o Rem que é igual a 0.01 Sv.

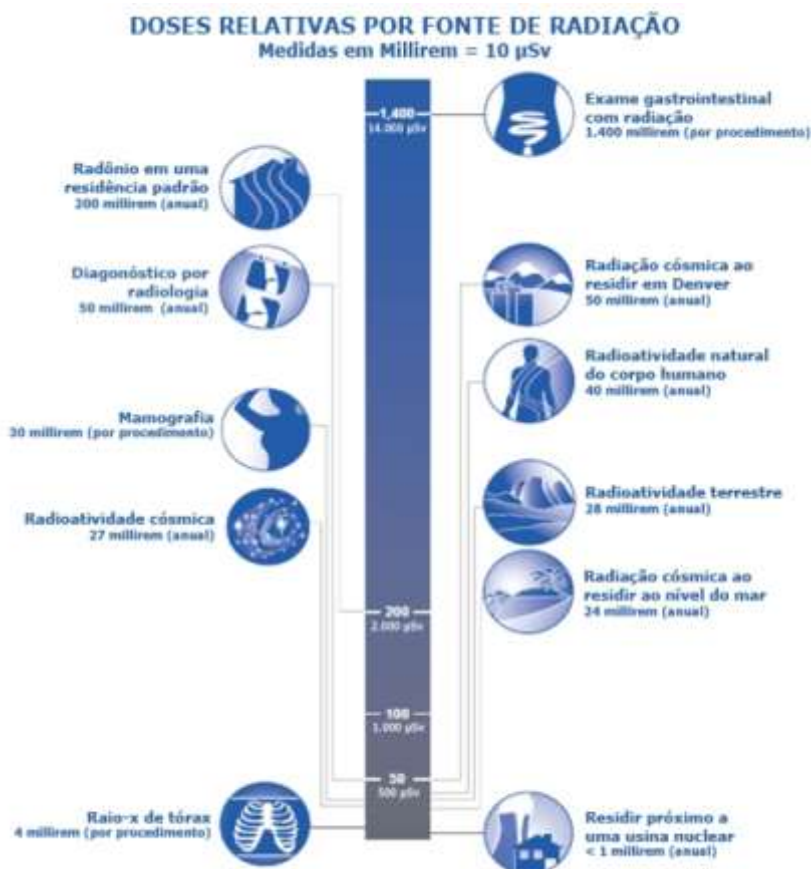


Fig. 67 - A partir da EPA – Radiations: Risks and Realities

Comparado com outros eventos que afetam a saúde das pessoas a Radioatividade é um dos assuntos mais estudados e compreendidos pela ciência. Em cada país os padrões de proteção são estabelecidos em acordo com as recomendações da Comissão Internacional para a Proteção Radiológica (ICRP- International Commission on Radiological Protection) que determina que qualquer exposição deve ser tão baixa quanto possível (conceito ALARA - as low as reasonably achievable). A maior autoridade mundial em efeitos da radiação na saúde humana é o UNSCEAR - UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, órgão das Nações Unidas dedicado ao assunto.

Dose Radioativa Anual	mSv/ano
Dose máxima aceitável para qualquer obra humana	1
Dose aceitável para viver próximo a Central Nuclear	0,0001 a 0,01
Dose aceitável para viver próximo a Central a Carvão	0,0003
Dose para dormir junto a outra pessoa (8 horas/ dia)	0,02
Dose anual por radiação cósmica	0,24
Dose anual por radiação terrestre	0,28
Dose anual por radiação do corpo humano	0,4
Dose anual por radiação de fontes atmosféricas	2
Dose média anual para americanos	6,2
Dose média em vôos de Nova York a Tóquio	9
Dose média anual limite para empregados de nucleares	20
Dose de radiação de fundo em partes do Irã, da Índia e da	50
Dose de radiação por fumar 30 cigarros por dia	60 a 160

Fig. 68

O desconhecimento do público sobre este assunto e a grande quantidade unidades de medida dão margem a muita confusão e permite a desinformação, muitas vezes proposital, podendo causar medo e ansiedade no público leigo.

Contaminação radioativa:

É a presença de material radioativo em algum lugar onde não queremos, portanto, um material radiativo sem um controle de contenção, Limpar resíduos radioativos normalmente significa esfregar com água e sabão, baldes e pincéis, num processo confuso que é perigoso para as pessoas expostas à poeira e águas residuais contaminadas.

Quase tudo no mundo emite radiação normalmente. A radioatividade de um material emissor de radiação precisa ser medida para se definir os critérios de proteção. Neste caso a física define a unidade Bequerel (Bq) que representa a quantidade de desintegrações por segundo no material considerado.

A exposição à radioatividade é acumulativa, pode ser medida em $\mu\text{Sv/h}$ é muito variada e conhecida na maioria dos casos. A seguir apresentamos exemplos de dose radioativa por hora de exposição em $\mu\text{Sv/h}$.

Dose média de radiação medida	$\mu\text{Sv/h}$
Média individual por radiação de fundo	0,230
Média individual por radiação de fundo para Americanos	0,340
Média individual por radiação de fundo para Australianos	0,170
Dose média em Fukushima no dia 25/05/2011	1,600
Dose média na cidade de Tóquio no dia 25/05/2011	0,062

Fig. 69

No Brasil, na localidade de Guarapari, no Espírito Santo uma dose de 200mSv/ano é normal devido às areias monazíticas que compõem as praias. Exemplos de dose radioativa por ano de exposição contínua:

Radioatividade em alguns materiais naturais ou não	
Fonte: WNA	
1 adulto humano (65 Bq/kg)	4.500 Bq
1 kgde café	1.000 Bq
1 kg fertilizante superfosfatado	5.000 Bq
O ar de uma casa de 100 m ² na Austrália (radon)	3.000 Bq
O ar de uma casa de 100 m ² na Europa (radon)	até 30.000 Bq
1 detector de fumaça (com amerício)	30.000 Bq
Radiosótopos para diagnósticos médicos	70 milhões Bq
Fontes de Radiosótopos terapias médicas	100Trilhões Bq (100 TBq)
1 kg de resíduo nuclear (vitrificado) de alta atividade com 50 anos de idade	10 Trilhões Bq (= 10 TBq)
1 sinal luminoso de saída (anos 1970)	1 Trilhões Bq (1 TBq)
1 kg de urânio	25 milhões Bq
1 kg do minério de urano (Canadá, 15%)	25 milhões Bq
1 kg do minério de urano (Austrália, 0.3%)	500.000 Bq
1 kg de resíduo nuclear de baixa atividade	1 milhão Bq
1 kg de cinzas de carvão	2.000 Bq

Fig. 70 – Dose radioativa por ano de exposição contínua

Doses acidentais de radiação apresentam efeitos variados no ser humano em função da exposição ser maior ou mais concentrada.

- Efeitos biológicos só começam a ser sentidos a partir de uma exposição aguda de 250 mSv.
- Efeitos transitórios como náuseas, vômitos e diarreia aparecem com dose aguda de 1000 mSv.
- Com doses agudas de 4.000 mSv o ser humano é severamente afetado e cerca de 50% veem a falecer em curt espaço de tempo (cerca de 1 mês)
- Com doses agudas de 7.000 mSv são letais para 100% das pessoas

Se a radiação é recebida de fontes externas, a pele e os tecidos próximos à superfície do corpo são os mais afetados. Os órgãos profundos dentro do corpo são afetados somente pela radiação penetrante gama e nêutron. Entretanto se o material radioativo é ingerido, inalado ou introduzido no corpo através de ferimentos, o material radioativo pode ser levado às proximidades dos órgãos críticos e irradiá-los nesta posição interna. A quantidade de radiação recebida de urna fonte externa pode ser controlada simplesmente afastando a fonte.

Uma vez o material inalado e/ou ingerido, ele continua a irradiar o corpo até ser eliminado naturalmente pelo organismo. Alguns radionuclídeos permanecem no corpo por longo período de tempo — meses ou mesmo anos. Os efeitos biológicos do material radioativo ingerido são idênticos àqueles produzidos pela radiação externa, visto que a contaminação emite radiação. A localização interna do material emitindo radiação alfa e beta permite que essas radiações afetem os órgãos e tecidos, que normalmente não afetariam devido a sua baixa capacidade de penetração.

Fatos sobre Radiação:

Mesmo quando se vive ao lado de uma central nuclear, ainda se recebe menos radiação anual do que fazendo apenas uma viagem de avião entre Porto Alegre e Manaus.

Cerca de 85% da radiação recebida pelo homem vem de fontes naturais como os raios cósmicos vindos do espaço, do granito das rochas e mesmo da comida. O restante da dose anual de cada um vem de fontes artificiais como aparelhos de raio X médicos. Menos de 0,1% vem da indústria nuclear como um todo.

Iodeto de Potássio — Uma medida preventiva não uma pílula mágica:

Uma das medidas de proteção que as comunidades próximas a centrais nucleares podem fazer uso em caso de emergências radiológicas é o iodeto de potássio. Mas este produto, um sal (fórmula química KI) não é uma pílula antirradiação.

Ele se destina, se tornado em tempo adequado e na quantidade correta, a proteger a glândula tireoide de doenças causadas pela absorção indesejada de iodo radiativo, impedindo que a glândula absorva esse este radionuclídeo em caso de acidente severo num reator nuclear. O KI não protege a glândula nem o corpo contra quaisquer outros elementos radiativos a que a pessoa possa estar submetida.

Resíduos nucleares e Rejeitos Radiativos

A gestão de resíduos nucleares começa no projeto da instalação que usa material radioativo e prossegue durante a operação destas instalações considerando a necessidade de limitar, ao máximo, o volume e a atividade de sua produção de resíduos. A identificação, seleção, tratamento, empacotamento, transporte, o depósito intermediário e o depósito definitivo fazem parte do processo

de gestão, sendo que cada item precisa ser apropriadamente tratado. As condições de segurança, proteção radiológica, rastreabilidade e redução de volume são a base deste trabalho.

Todos os rejeitos radioativos gerados nas usinas nucleares devem ser armazenados de forma segura e isolados do público e meio ambiente. Os rejeitos são classificados como de alta atividade (elementos combustíveis irradiados); rejeitos de média atividade (resinas de purificação e fluídos de processo); e rejeitos de baixa atividade (material descartável usado na operação e manutenção).

Os rejeitos de alta atividade das usinas nucleares são armazenados em piscinas no interior ou no exterior das usinas, com capacidade para toda vida útil de operação da usina. Os rejeitos de média atividade devem estar armazenados em prédios adequadamente projetados junto à usina e devem ter capacidade para toda a vida útil da usina. Os rejeitos de baixa atividade também estão armazenados em prédios localizados próximos a usina.

A CNEN- Comissão Nacional de Energia Nuclear tem a responsabilidade da implantação da Política Nacional de Rejeitos Radioativos e possui os seguintes projetos em andamento:

- **Repositório para Rejeitos de Baixo e Médio Nível de Radiação.** Objetivo: Conceber, projetar, licenciar, construir, e comissionar o Repositório Nacional para Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Nível de Radiação.
- **Desenvolvimento de Recipientes para Transporte e para Armazenagem de Combustíveis Irrradiados.** Objetivo: Definir, desenvolver, construir qualificar um recipiente para transporte e, outro recipiente para armazenagem de combustíveis irradiados de centrais nucleares de potência.

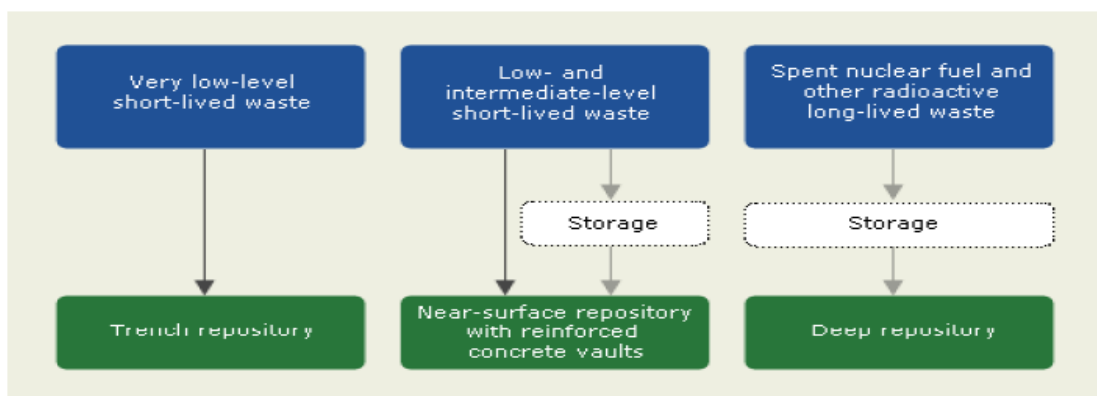


Fig. 71

Os rejeitos radioativos são gerados em diferentes fases do ciclo do combustível e podem aparecer sob a forma de líquidos, gases e sólidos em um largo espectro de toxicidade. O tratamento, condicionamento e armazenagem são dependentes do nível de atividade (baixa, média ou alta) do material.

Resíduos de baixa e média atividade de usinas nucleares são em geral os materiais usados em limpeza, peças de reposição, roupas, sapatilhas e luvas utilizadas no interior dos prédios dos reatores, impurezas, filtros etc. Tais materiais são acondicionados em embalagens metálicas, tostadas e qualificadas por órgão regulador e transferidos para um depósito inicial, construído, normalmente, no próprio sítio da usina. Esse depósito é permanentemente controlado e fiscalizado por técnicos em proteção radiológica e especialistas em segurança da nuclear.



Fig. 72 - Depósitos finais de baixa e média atividade no mundo

Já os elementos combustíveis irradiados, considerados resíduos de alta atividade, são colocados dentro de uma piscina no interior das usinas ou em um depósito intermediário de longa duração, cercado de todos os requisitos de segurança exigidos internacionalmente. Até que o ciclo do combustível seja fechado, através de reprocessamento, os reatores refrigerados a água continuarão a produzir rejeitos de alta atividade que precisam ser gerenciados e guardados por longo tempo.

Uma vez que estes resíduos são de magnitude muito menor que resíduos de geração elétrica à combustíveis fósseis como o carvão, por exemplo, e como nas centrais nucleares em geral há muito espaço para armazenagem dos rejeitos durante a vida útil da usina, não há urgência na implementação de uma solução definitiva para o acondicionamento dos mesmos. Esta condição permite desenvolver, com cuidado, planos e políticas para fechar o ciclo incluindo a deposição final do rejeito.

Abordagem para a Gestão de Resíduo Nuclear por país			
Tipo de abordagem / País	Combustível irradiado em Toneladas métricas	Armazenamento Intermediário	data de operação para depósito em sítio geológico
Deposição direta			
Bélgica	2.699	sim	2040
Canadá	40.054	não	2025
Finlândia	1.684	não	2020
Coreia do Sul	10.185	Planejado para 2016	desconhecida
Espanha	3.827	Planejado para 2012	2050
Suécia	4.893	sim	2022
USA	62.400	não	desconhecida
Reprocessamento			
China	1.532	Não	2050
França	12.400	Não	2025
Alemanha	12.788	sim	2035
Japão	12.585	Não	2035
Suíça	1.040	sim	2040
Grã-Bretanha	423	Não	2025

Fonte: EIA_US DoE 2011

Fig. 73 - Depósitos finais de baixa e média atividade no mundo

APÊNDICE I: TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO ELÉTRICA NUCLEAR

O estado-da-arte da tecnologia de geração elétrica nuclear é o resultado de mais de 50 anos de pesquisa, desenvolvimento e engenharia. Essa tecnologia está consolidada nas 437 usinas nucleares atualmente em operação, conforme apresentado no item 5.2.

Esse parque, ao qual se soma as usinas já descomissionadas, representa uma efetiva experiência operacional cerca de 15.000 reatores-ano. Reatores-ano é uma medida de experiência operacional. A operação de 1 reator por 1 ano representa 1 reator-ano. 400 reatores operando 50 anos seriam 20.000 reatores-ano.

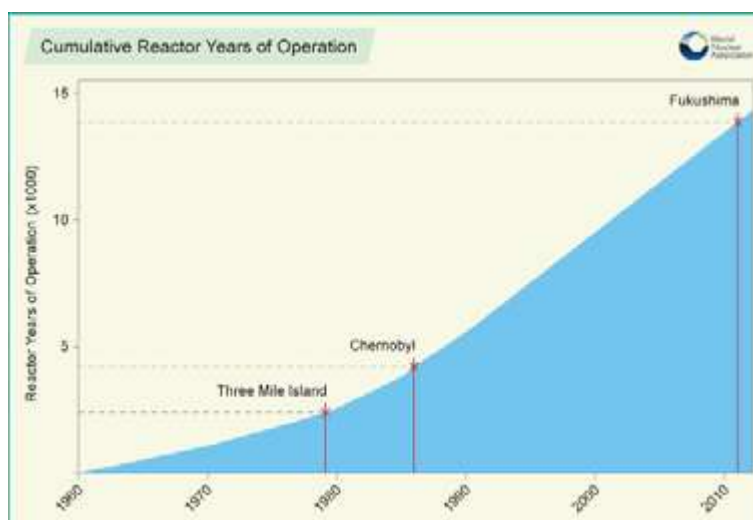


Fig. 74 - Experiência operacional acumulada (em reatores-ano)

Os mais modernos projetos de usinas nucleares, hoje em construção, incorporam lições aprendidas dessa experiência assim como os mais recentes avanços tecnológicos para melhoria da segurança e da produtividade. A geração nuclear é uma tecnologia madura, com muito baixa emissão de carbono, que se encontra disponível hoje para ampla utilização. Existem atualmente 72 usinas nucleares em construção no mundo, conforme visto no item 4.2.

Tem-se convencionado classificar os projetos de usinas nucleares em “gerações”. Assim, as primeiras usinas comerciais, basicamente protótipos de demonstração industrial são chamadas de “Geração I”. As usinas que compõem o parque nuclear atual em operação são chamadas de “Geração II”. Os projetos modernos e em construção são chamados de “Geração III”. Eles incluem diversas evoluções tecnológicas em relação à geração anterior, como, por exemplo, Instrumentação e Controle (I&C) digital, dispositivos para enfrentar acidentes severos (como recuperador de “corium”). Alguns deles são chamados de “Geração III+”, quando incluem também dispositivos inovadores de segurança intrínseca, como resfriamento passivo por circulação natural. Os projetos de Geração III são considerados para utilização até o final da década de 2020. Encontram-se também em pesquisa e desenvolvimento futuras usinas nucleares para emprego após a década de 2020, chamadas de “Geração IV”. São conceitos bastante diversos dos atuais, que são basicamente fundamentados em reatores resfriados a água com combustível óxido de urânio, empregando novos tipos de combustíveis e fluidos de resfriamento.

Generations of Nuclear Energy

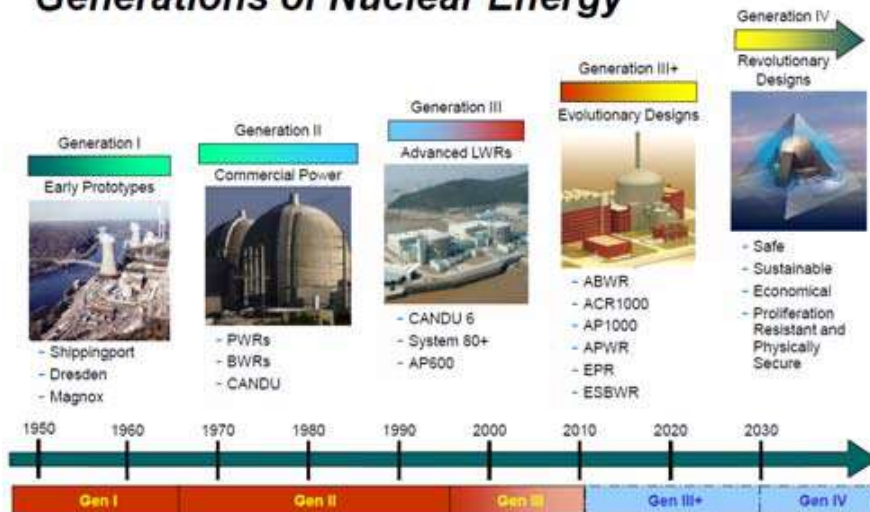


Fig. 75 - Evolução da Tecnologia de Geração Elétrica Nuclear

Existe ainda uma classe de potenciais futuras usinas nucleares em pesquisa e desenvolvimento baseada em pequenos reatores modulares (SMR – Small Modular Reactors). Envolveram diversos conceitos, alguns a

água e urânio, mas outros próximos dos conceitos da Geração IV.

Finalmente, existem os continuados esforços em viabilizar o emprego da fusão nuclear na geração comercial de eletricidade, promessa tecnológica antiga e ainda não concretizada. Os desenvolvimentos atuais, porém, se mostram promissores.

GERAÇÃO III e III+

O AP-1000 (Advanced Project) é o modelo emblemático da Westinghouse. Embora seja majoritariamente da Toshiba do Japão, a Westinghouse tem a sua sede nos EUA. O AP-1000 é um reator a água pressurizada (PWR) com capacidade de aproximadamente 1.200 MW, sendo que as quatro primeiras unidades encontram-se num estágio avançado de construção na China e quatro outras unidades em estágio inicial de construção nos EUA. O modelo também foi selecionado pela maioria das novas construções americanas planejadas e tem sido oferecido no Reino Unido e em outros mercados.

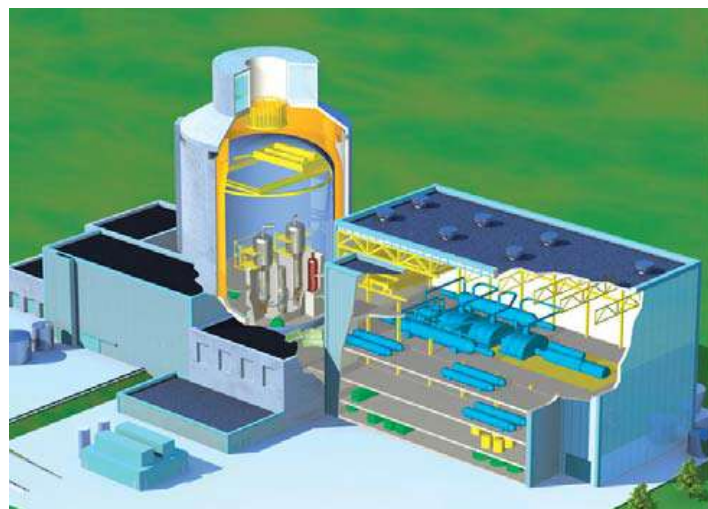


Fig. 76 - Westinghouse AP-1000.

O EPR (Evolutive Pressurized Reactor) é o produto principal da AREVA, principal grupo industrial nuclear europeu, controlado majoritariamente pelo Estado francês. É também um PWR avançado, que terá uma capacidade de 1 600 a 1 700 MW. As duas primeiras unidades se encontram em construção na Finlândia e na França e duas unidades adicionais na China, com possivelmente mais uma a ser iniciada na França. Havendo já encomendas adicionais no Reino Unido, enquanto que outros estão sendo considerados também nos EUA.



Fig. 77 - AREVA EPR7

A AREVA desenvolve ainda dois projetos de potência menor, na faixa dos 1.000 MW: ATMEA e ACE. O ATMEA é uma joint venture com a MHI (Mitsubishi Heavy Industries), que vem sendo desenvolvido há alguns anos e cujos princípios de segurança foram certificados pela Autoridade de Segurança Nuclear (ASN) francesa. O ACE (Areva-China-EdF) é uma iniciativa mais recente, fruto da cooperação com a EdF (Electricité de France) e CGNPH (China Guangdong Nuclear Power Holding Company).

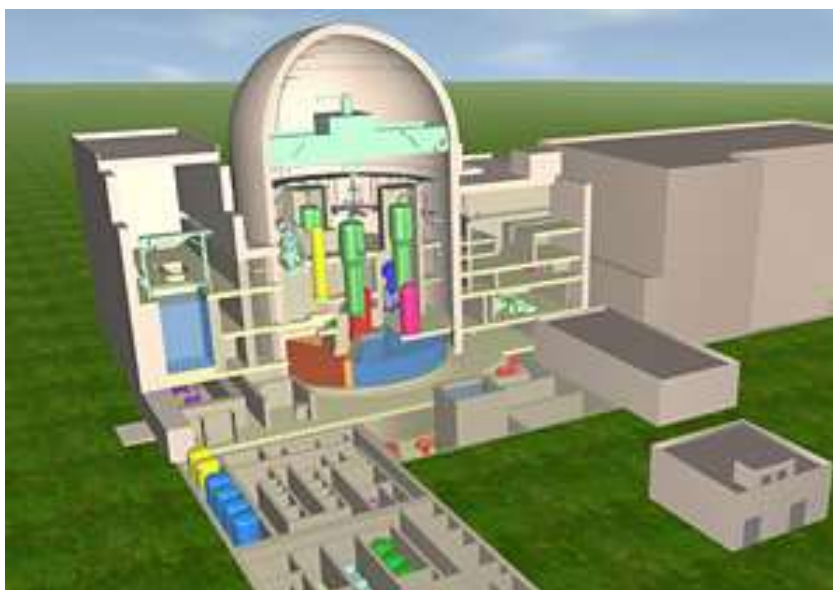


Fig. 78 - MITSUBUSHI/AREVA ATMEA8

O ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) é o único dos modelos recentes já em operação, com quatro unidades no Japão. Mais dois ABWR estão sendo construídos em Taipei, na China. Essas unidades têm uma produção em torno de 1 300 MW, mas versões que chegam a 1 600 MW também são oferecidas. O projeto básico foi desenvolvido junto pela GE (General Electric) dos EUA e Toshiba e Hitachi do Japão. Posteriormente a GE e Hitachi fizeram uma fusão das suas áreas nucleares.

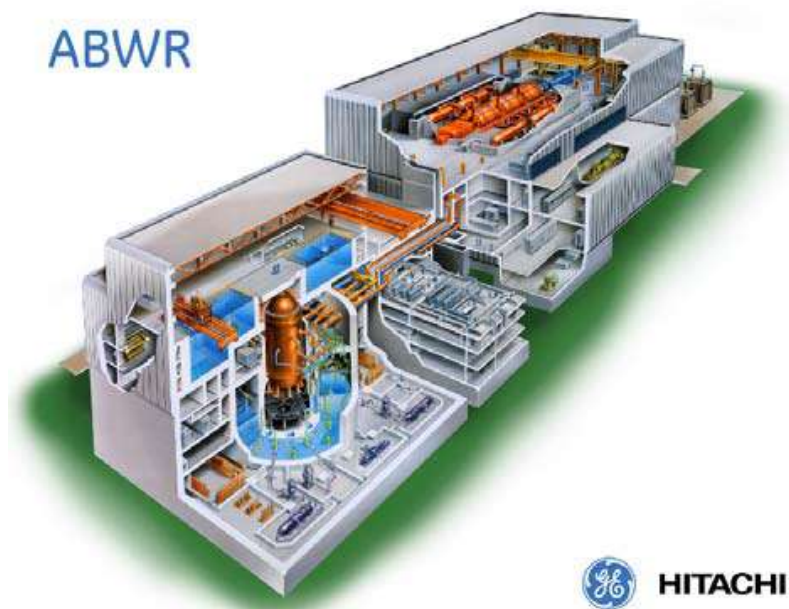


Fig. 79 - GE/HITACHI ABWR

O ESBWR, um desenvolvimento avançado do conceito do ABWR, é o último modelo oferecido pela GE-Hitachi. Sua produção se situará em torno de 1 600 MW. Nenhum pedido foi feito até agora, mas o modelo foi selecionado para algumas possíveis novas usinas nos EUA e Lituânia.

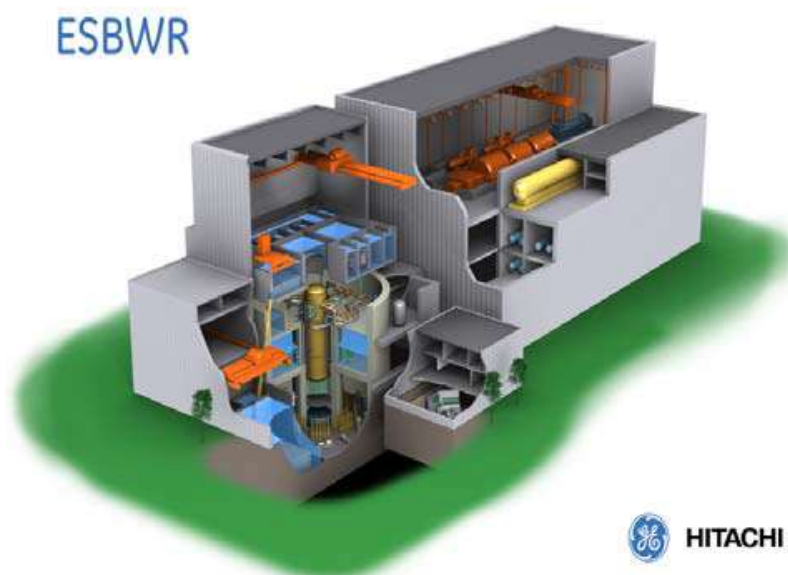


Fig. 80 - GE/HITACHI ESBWR10

O APWR (Advanced PWR) foi desenvolvido para o mercado japonês pela Mitsubishi Heavy Industries (MHI), sendo que se espera o início da construção de duas unidades num futuro próximo. Sua produção será em torno de 1 500 MW por unidade. A MHI também está oferecendo uma versão do APWR no mercado americano, e foi selecionada para um possível projeto.



Fig. 81 - MITSUBISHI APWR11

O VVER-1200 (também conhecido como AES-2006) é a versão mais avançada da série VVER do projeto PWR produzido pela indústria nuclear russa, agora sob o controle do grupo estatal nuclear Rosatom. Quatro unidades do VVER-1200 estão em construção na Rússia, cada um com uma produção de energia em torno de 1 100 MW e duas outras na Índia.



Fig. 82 - ROSATOM AES-2006

O ACR (Advanced CANDU Reactor) é o novo projeto da Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL), controlada pelo governo canadense. Os CANDUs utiliza água pesada para moderar (ou desacelerar) nêutrons, tornando possível usar combustível à base de urânio natural. Entretanto, os ACR 1.200 MW utilizarão combustível levemente enriquecido, o primeiro projetado para isso. A AECL também oferece o Enhanced CANDU 6, uma unidade de 700 MW utilizando urânio natural. Não houve nenhuma encomenda firme para esses modelos.



Fig. 83 - CANDU ACR13

O APR-1400 é o mais recente projeto PWR da KEPCO (Korean Electric Power Company), de 1.340 MW, com uma unidade em operação e outra em comissionamento, mas com muitas mais planejadas na Coreia do Sul. Baseia-se numa tecnologia da Combustion Engineering, atualmente de propriedade da Westinghouse, que foi posteriormente desenvolvida pela indústria coreana numa série de projetos mais avançados. O acordo de licenciamento ainda limita sua disponibilidade nos mercados de exportação, mas no final de 2009 um consórcio liderado pela KEPCO (com a participação da Westinghouse) ganhou um contrato para construir quatro APR-1400 nos Emirados Árabes Unidos.

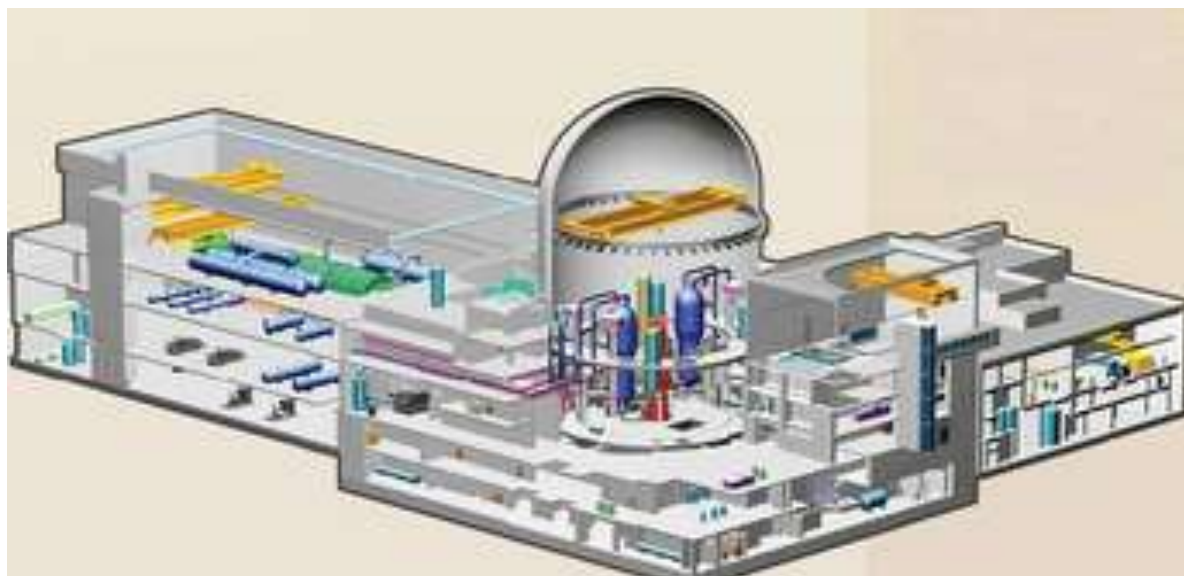


Fig. 84 - KEPCO APR-140014

O CPR-1000 é o principal modelo que está sendo produzido na China, com 16 unidades em construção. Esse modelo de 1000 MW é uma versão modernizada do modelo AREVA Generation II de 1980, cuja tecnologia foi transferida para a China.



Fig. 85 - China Guangdong Nuclear Power Company (CGNPC) CP-100015

Um acordo feito em 2007 com a Westinghouse para a construção de quatro AP-1000 inclui a transferência dessa tecnologia para a China. As primeiras quatro unidades se encontram-se em construção. Em um processo de transferência de tecnologia similar, a China está desenvolvendo o projeto CAP-1400. Espera-se que esse projeto forme a base da sua próxima geração de usinas nucleares.



Fig. 86 - State Nuclear Power Technology Corporation (SNPTC) CAP-140016

Os modelos PHWR (Pressurised Heavy Water Reactor) da Índia baseiam-se em um primeiro modelo CANDU exportado do Canadá nos anos 1960. As últimas unidades têm uma capacidade de 540 MW, sendo que unidades de 700 MW estão sendo projetadas. Embora constituam desenvolvimentos importantes a partir do projeto original, esses modelos são menos avançados do que os modelos da Geração III. O AHWR- 300 LEU (Advanced Heavy Water Reactor with low enriched uranium and thorium mixed oxide 300MW) é um exemplo desses desenvolvimentos na Índia.

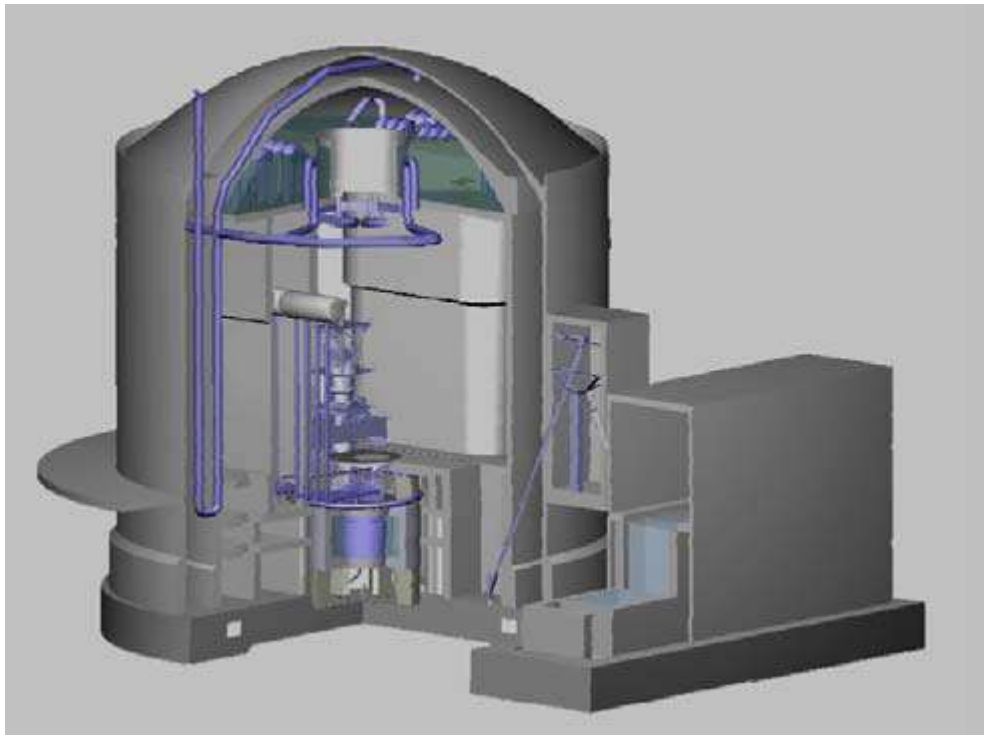


Fig. 87 - Bhabha Atomic Research Centre (BARC) PHWR-300 17

GERAÇÃO IV

Alguns conceitos próprios aos sistemas de energia nuclear da Geração IV já foram selecionados para desenvolvimento e utilização de futuras tecnologias, para aplicação após 2020:

Reator rápido refrigerado a sódio – Sodium-cooled Fast Reactor (SFR): Muitos protótipos do SFR já foram construídos e estão funcionando em alguns países tornando- o uma das tecnologias mais solidamente estabelecidas da Geração IV. Os modelos SFR apresentam um espectro de nêutrons rápido, sistema de refrigeração por sódio líquido e um ciclo de combustível fechado. Modelos grandes (que chegam a 1 500 MW) utilizam como combustível óxido misto de urânio e plutônio, com instalações de reciclagem centralizadas. Modelos pequenos na dimensão de 100MW, usando combustível metálico e instalações de reciclagem no mesmo espaço também estão sendo consideradas. Os modelos SFR têm uma temperatura de saída relativamente baixa (550 °C), limitando seu uso a aplicações não elétricas. A redução de custos de capital e o aumento da segurança passiva são importantes objetivos de P&D (pesquisa e desenvolvimento), juntamente com o desenvolvimento de tecnologias avançadas de reprocessamento de combustível.

Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)

Characteristics

- Sodium coolant
- 550C outlet temperature
- 600-1500 MWe large size, or
- 300-600 MWe intermediate size
- 50 MWe small module option
- Metal fuel with pyroprocessing or MOX fuel with advanced aqueous separation

Benefits

- High thermal efficiency
- Consumption of LWR actinides
- Efficient fissile material generation

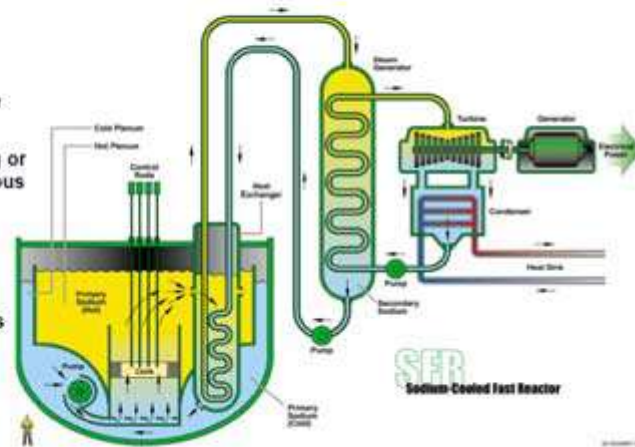


Fig. 88

Reator de Temperatura Muito Elevada – Very High Temperature Reactor (VHTR): O principal interesse do conceito VHTR é a sua capacidade de produzir altas temperaturas (acima de 1 000 °C) necessárias para a produção de hidrogênio e calor para processos industriais. Entretanto, os modelos VHTR não permitiriam o uso de um ciclo de combustível fechado. Os modelos de referência estão em torno de 250 MW de potência elétrica (600 MW de potência térmica), com refrigeração por hélio e espectro de nêutrons térmicos por moderação a grafite. O combustível tem a forma de partículas revestidas, formadas dentro de blocos ou “pelotas” de acordo com o projeto de núcleo adotado. Os modelos VHTR baseiam-se em protótipos construídos no passado pelos EUA e Alemanha, incorporando grande esforço adicional de P&D. Os desafios restantes incluem o desenvolvimento de materiais com melhor resistência à temperatura e o projeto e produção do combustível.

Very-High-Temperature Reactor (VHTR)

Characteristics

- He coolant
- >900C outlet temperature
- 250 MWe
- Coated particle fuel in either pebble bed or prismatic fuel

Benefits

- Hydrogen production
- Process heat applications
- High degree of passive safety
- High thermal efficiency option

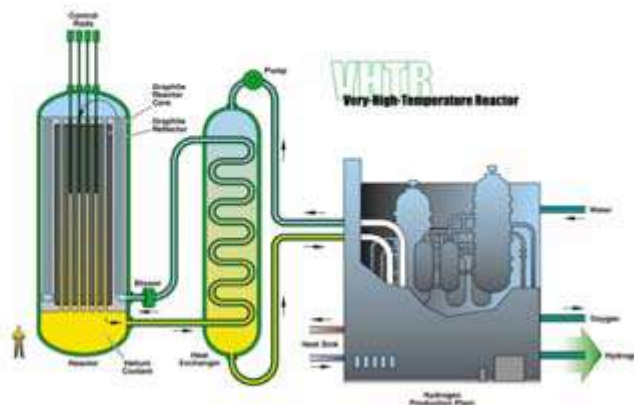


Fig. 89

Reator Supercrítico Refrigerado a Água – Super-Critical Water-cooled Reactor (SCWR): Os modelos SCWR são de água leve (Light Water Reactor, “família” dos PWR e BWR) operando em altas temperaturas e pressões, acima do ponto crítico termodinâmico da água; isso permite simplificação do projeto e grande melhoria de eficiência térmica. Os projetos de referência têm potência acima de 1 500 MW, e usam urânio ou óxido misto, e mantêm temperaturas de saída acima de 625 °C. Os modelos SCWR podem ter também um espectro de nêutrons térmico ou rápido; no caso rápido, poderá utilizar um ciclo de combustível fechado baseado em instalações de reciclagem associadas. Os desafios mais importantes de P&D envolvem a superação de questões relacionadas à segurança, assim como o desenvolvimento de materiais resistentes à corrosão a altas temperaturas.

Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)

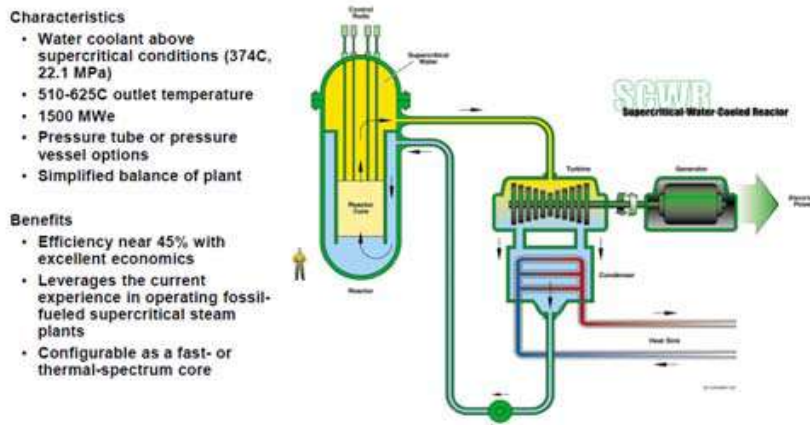


Fig. 90

Reator Rápido Resfriado a Gás – Gás-cooled Fast Reactor (GFR): O projeto de referência do sistema GFR inclui um reator de 1 200 MW resfriado a hélio com um espectro de nêutrons rápidos e um ciclo de combustível fechado com uma usina de reprocessamento no próprio sítio. Emprega uma turbina de hélio de ciclo direto com alta eficiência térmica para geração de eletricidade. A mais alta temperatura de saída (850 °C) também pode ser desejável para a produção de hidrogênio ou calor para processos industriais. Os principais desafios de P&D incluem o desenvolvimento de novos combustíveis (tal como combustíveis de cerâmica revestida ou partículas de combustível) e materiais, assim como o projeto do núcleo e da turbina de hélio.

Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)

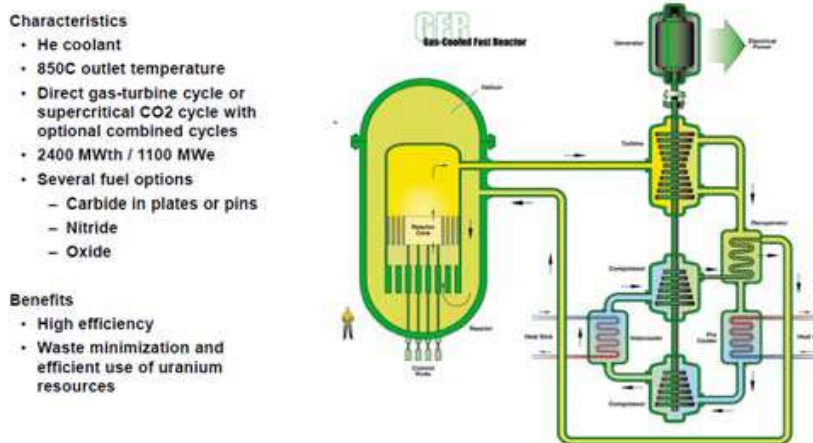


Fig. 91

Reatores Rápidos Resfriado a Chumbo – Lead-cooled Fast Reactor (LFR): O sistema LFR apresenta um reator refrigerado a metal líquido com espectro rápido e um ciclo de combustível fechado, já bastante testado na propulsão de submarinos nucleares russos. O chumbo líquido é um fluido de resfriamento relativamente inerte, que oferece vantagens de segurança em relação ao sódio, sendo ao mesmo tempo abundante e barato. Os modelos pesquisados até hoje incluem os pequenas (20 MW) e médias (600 MW) unidades. O projeto típico seria composto por unidades modulares, com período de troca de combustível muito longo (15-20 anos). Inicialmente, os modelos LFR seriam desenvolvidos para produção de eletricidade, mas versões funcionando a alta temperatura poderiam permitir a produção de hidrogênio. As necessidades mais importantes de P&D concentram-se em combustíveis, materiais e controle de corrosão.

Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)

Characteristics

- Pb or Pb/Bi coolant
- 550C to 800C outlet temperature
- Small transportable system 50-150 MWe, and
- Larger station 300-1200 MWe
- 15-30 year core life option

Benefits

- Distributed electricity generation
- Hydrogen and potable water
- Replaceable core for regional fuel processing
- High degree of passive safety
- Proliferation resistance through long-life core

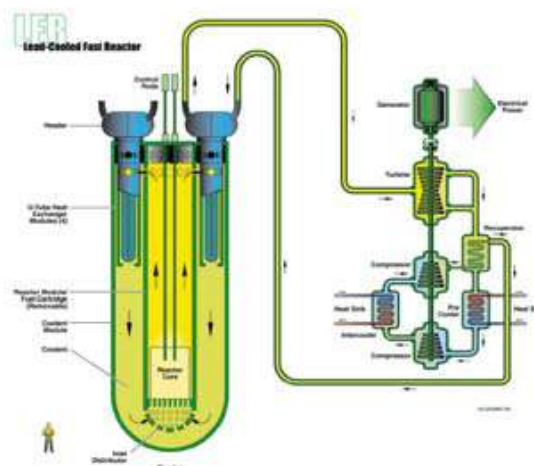


Fig. 92

Reator a Sal Fundido – Molten Salt Reactor (MSR): Nos MSRs, o combustível é dissolvido em um fluido de resfriamento à base de sal fluoreto fundido. O combustível líquido evita a necessidade da fabricação e permite um ajuste contínuo da mistura combustível. O conceito corrente aplica-se a um reator de nêutrons rápidos de 1.000 MW, com ciclo de combustível fechado. Pode ser usado na composição do combustível tório, plutônio e outros actínídeos menores. Um HTR Avançado resfriado a sal fluoreto líquido também está sendo estudado. A química do sal fundido, a resistência à corrosão e sua manipulação, assim como o ciclo do combustível e os materiais empregados, constituem os principais desafios em P&D.

Molten Salt Reactor (MSR)

Characteristics

- Fuel is liquid fluorides of U and Pu with Li, Be, Na and other fluorides
- 700-800C outlet temperature
- 1000 MWe
- Low pressure (<0.5 MPa)

Benefits

- Waste minimization
- Avoids fuel development
- Proliferation resistance through low fissile material inventory

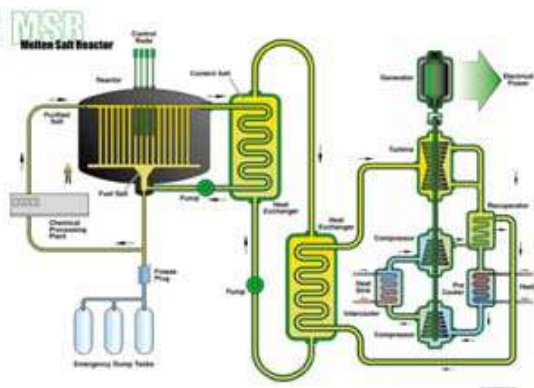


Fig. 93

Algumas dessas tecnologias serão adequadas para uma ampla variedade de locais e para possíveis novas aplicações. Cada uma delas envolve um avanço tecnológico significativo e exigirá demonstração em escala real antes de sua utilização comercial. Tais sistemas poderão começar a contribuir para a capacidade nuclear antes de 2050.

REATORES A TÓRIO

Reatores de tório também têm sido oferecidos utilizando o isótopo de tório naturalmente abundante, ^{232}Th , como material fértil. No reator, o Th-232 é transmutado no isótopo de urânio artificial físsil U-233 , que é o combustível nuclear. Ao contrário do urânio natural, o tório natural contém somente vestígios de material físsil (tal como Th-231), que são insuficientes para iniciar uma reação em cadeia. É necessária a presença de um material físsil adicional ou outra fonte de nêutrons para iniciar a reação em cadeia. Em um reator com combustível de tório, o Th-232 absorve nêutrons para produzir U-233 . Isso é comparável ao processo em reatores de urânio através do qual o U-238 fértil absorve nêutrons para formar o Pu-239 físsil.

Dependendo do projeto do reator e de seu ciclo combustível, o U-233 gera fissões no núcleo do reator ou é separado quimicamente do combustível usado e se transforma num novo combustível nuclear. O ciclo de combustível do tório mostra ter muitas possíveis vantagens sobre o ciclo de combustível do urânio, incluindo a grande abundância do tório na crosta terrestre, propriedades físico-químicas e nucleares superiores, melhor resistência à proliferação de armas nucleares e menor produção de plutônio e actinídeos.

Um exemplo prático de reatores a tório é o projeto Fuji, reator a fluoreto de tório líquido (Liquid fluoride thorium reactor – LFTR19, variante do conceito MSR da Geração IV), em desenvolvimento pela empresa japonesa International Thorium Energy & Molten-Salt Technology (IThEMS).

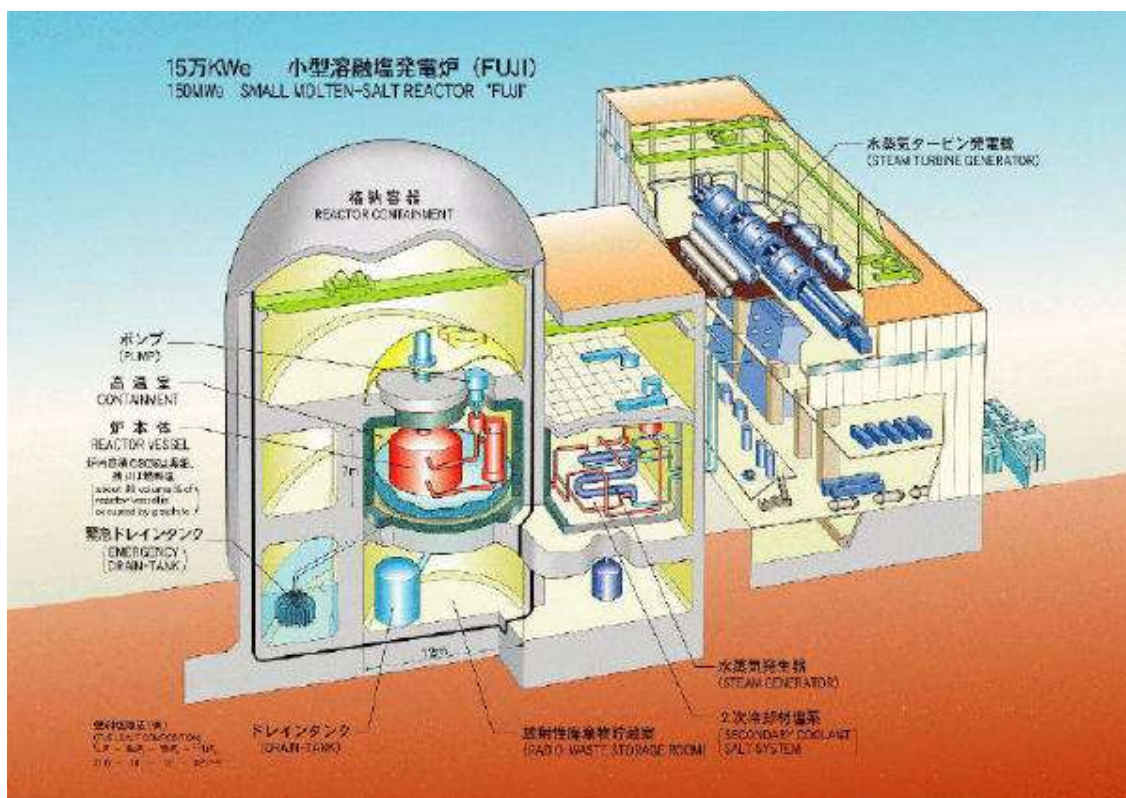


Fig. 94 - IThEMS MSR FUJI

Outro exemplo é reator AHWR-300 desenvolvido pelo Bhabha Atomic Research Centre (BARC) da Índia, que é um PHWR que utiliza como combustível óxido mixto de urânio e tório (MOXth), de forma similar aos reatores PWR e BWR atuais que utilizam o óxido mixto de urânio e plutônio (MOX)

PEQUENOS REATORES MODULARES (SMR)

Há também um renascimento do interesse em pequenas e mais simples unidades para a geração elétrica nuclear, e para geração de calor para processos industriais, liderado pelo Department of Energy dos EUA (USDOE). Este interesse em pequenas e médias usinas nucleares é impulsionado pelo desejo de reduzir o impacto dos custos de capital e para geração em sistemas isolados, longe de redes de transmissão. As tecnologias envolvidas são muito diversas.

**Reatores de médio e pequeno (acima de 25 MWe)
com desenvolvimento avançado**

Nome	Capacidade	Tipo	Desenvolvedor
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Russia
VK-300	300 MWe	BWR	Atomenergoproekt, Russia
CAREM	27-100 MWe	PWR	CNEA & INVAP, Argentina
IRIS	100-335 MWe	PWR	Westinghouse-led, international
Westinghouse SMR	200 MWe	PWR	Westinghouse, USA
mPower	150-180 MWe	PWR	Babcock & Wilcox + Bechtel, USA
SMR-160	160 MWe	PWR	Holtec, USA
SMART	100 MWe	PWR	KAERI, South Korea
NuScale	45 MWe	PWR	NuScale Power + Fluor, USA
ACP100	100 MWe	PWR	CNNC & Guodian, China
HTR-PM	2x105 MWe	HTR	INET & Huaneng, China
EM2	240 MWe	HTR	General Atomics (USA)
SC-HTGR (Antares)	250 MWe	HTR	Areva
BREST	300 MWe	FNR	RDIFE, Russia
SVBR-100	100 MWe	FNR	AKME-engineering (Rosatom/En+), Russia
Gen4 module	25 MWe	FNR	Gen4 (Hyperion), USA
Prism	311 MWe	FNR	GE-Hitachi, USA
FUJI	100 MWe	MSR	ITHMSO, Japan-Russia-USA

HTR: High Temperature reactor; FNR: Fast Nuclear Reactor; MSR: Molten Salt Reactor

Fig. 95

Hoje em dia, devido ao alto custo de capital das grandes usinas nucleares e à necessidade de manutenção de redes elétricas de pequeno porte, com menos de 4 GWe, há um movimento para desenvolver pequenas unidades. Estes podem ser construídos de forma independente ou como módulos de um complexo (“cluster”), com a capacidade adicionada incrementalmente conforme necessário. Economias de escala são fornecidas não pela potência da unidade, mas pelo maior número de unidades construídas. Pequenas unidades são vistas como um investimento muito mais controlável do que as grandes.

• *Advanced SMRs (incl. Modular and integrated-PWRs)*



Fig. 96

• *Innovative SMRs*



Fig. 97

• *Converted/Modified SMRs*

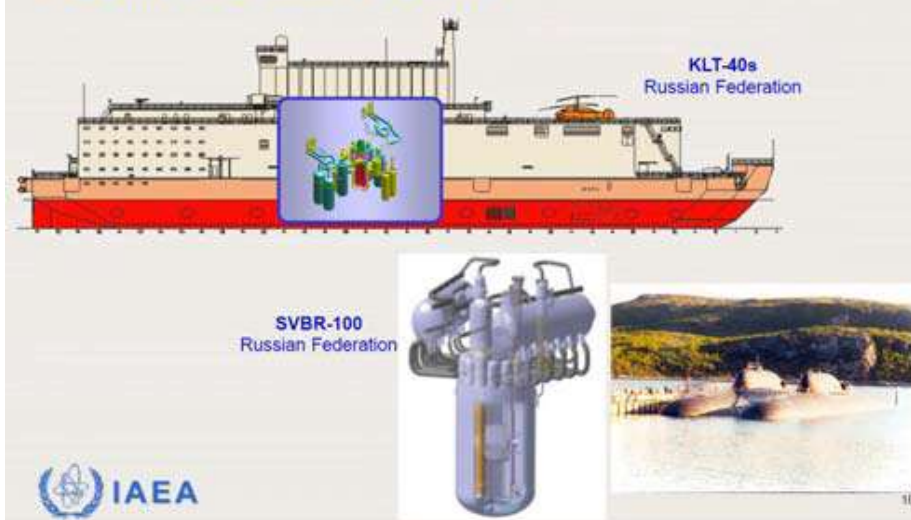


Fig. 98

• **Conventional SMRs**

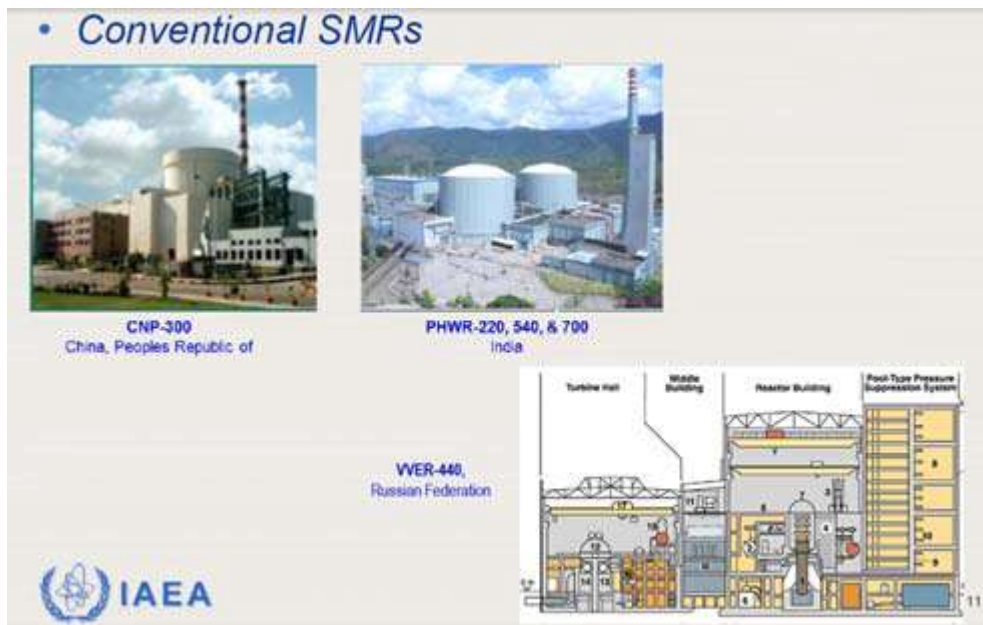


Fig. 99

SMRs for Near-term Deployment					
	Name	Design Organization	Country of Origin	Electrical Capacity, MWe	Design Status
1	SVBR-100	JSC AKME Engineering	Russian Federation	100	Detailed design for prototype construction
2	System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART)	Korea Atomic Energy Research Institute	Republic of Korea	100	Standard Design Approval Received 4 July 2012
3	mPower	Babcock & Wilcox	United States of America	180/module	Detailed design, to apply for certification - end of 2013
4	NuScale	NuScale Power Inc.	United States of America	45/module	Detailed design, to apply for certification - end of 2013
5	Westinghouse SMR	Westinghouse	United States of America	225	Detailed Design
6	VBER-300	OKBM Afrikantov	Russian Federation	300	Detailed design
7	Super-Safe, Small and Simple (4S)	Toshiba	Japan	10	Detailed design

Fig. 100 – IAEA Small and Medium Sized Reactors

Modernas pequenas unidades deverão ter maior simplicidade de projeto, economia de produção em massa e redução dos custos de implantação. São também concebidas para um elevado nível de segurança passiva ou intrínseca. Alguns dispositivos de segurança necessários nas usinas de grande porte não são necessárias nos futuros projetos de pequeno porte.

REATORES A FUSÃO NUCLEAR

Em longo prazo, a utilização comercial de usinas nucleares a fusão não pode ser negligenciada. O ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) é um projeto internacional de construção do maior e mais avançado reator experimental de fusão nuclear do tipo “tokamak” em Cadarache, no sul da França. O projeto ITER tem a finalidade de realizar a transição, há muito desejada, dos estudos experimentais da física do plasma para as usinas nucleares a fusão para a produção de eletricidade em escala industrial. O projeto é financiado e realizado por sete membros: a União Europeia (EU), a Índia,

o Japão, a China, a Rússia, a Coreia do Sul e os EUA. A União Europeia, como anfitriã do complexo ITER, contribui com 45% do custo, e as outras seis partes contribuem com 9% cada uma.

O reator a fusão ITER foi projetado para produzir 500 megawatts de potência de saída para 50 megawatts de potência de entrada, ou seja produz dez vezes mais do que seu consumo. Espera-se que a máquina demonstre o princípio de balanço energético positivo no processo de fusão, algo que não foi atingido com os “tokamak” anteriores. A construção da instalação começou em 2007, e o primeiro plasma é esperado para 2019. Quando o ITER se tornar operacional, ele será o maior experimento físico com plasma em confinamento magnético em uso, ultrapassando o Joint European Torus (JET), em operação. A primeira demonstração comercial de uma usina nuclear a fusão, chamada DEMO, propõe-se a continuar a partir do ponto em que chegou o projeto ITER para levar a energia de fusão ao mercado comercial.

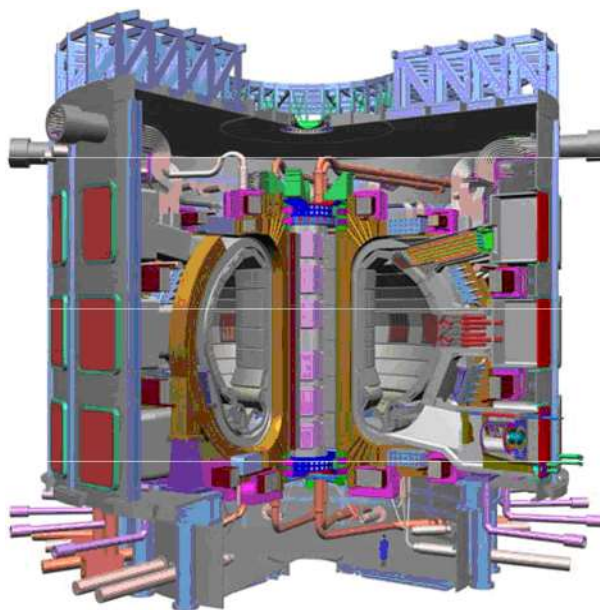


Fig. 101 - ITER 22

Também em longo prazo, reatores nucleares híbridos fusão-fissão são um meio proposto para geração de energia elétrica, pelo uso do acoplamento dos processos de fusão e de fissão nuclear. O conceito vem dos anos 1950, e foi brevemente promovido por Hans Bethe durante os anos 1970, mas ficou inexplorado até o ressurgimento de interesse em 2009, devido aos atrasos na realização da fusão pura.



Fig. 102

No projeto LIFE, do Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), utilizando a tecnologia de fusão por confinamento inercial desenvolvida na National Ignition Facility (NIF). O objetivo é usar

“pelotas” de combustível deutério-trítio revestidas por uma casca de material físsil (ou fértil) para produzir uma quantidade de energia maior do que a usada para a ignição do processo de fusão. O princípio é induzir a fusão nuclear por confinamento inercial por laser na “pelota” combustível, que atua como uma fonte de nêutrons altamente concentrada. Os nêutrons assim gerados transmutam e fissionam a casca externa, gerando aí a energia que será convertida em eletricidade.

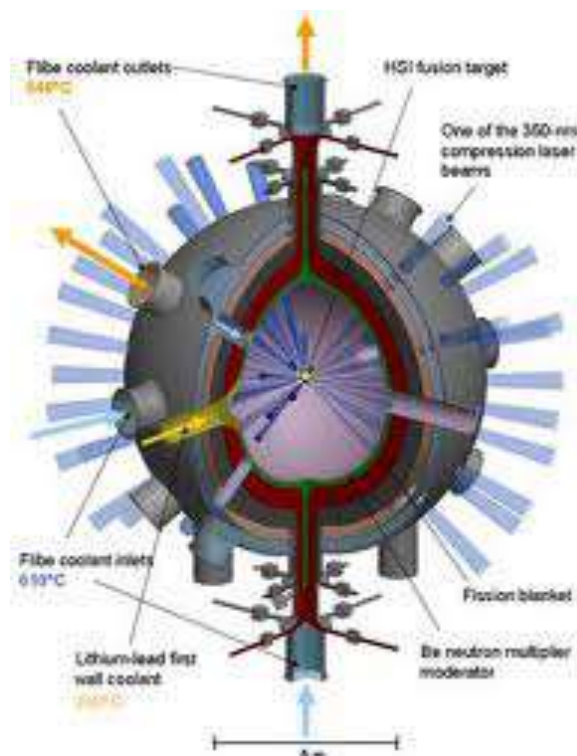


Fig. 103 - REATOR LIFE 24

Paralelamente à abordagem da fusão por confinamento inercial, a Universidade do Texas em Austin está desenvolvendo um sistema baseado no reator a fusão tipo “tokamak”. Os princípios básicos de utilização dos reatores de fusão por confinamento ou tokamak como uma fonte de nêutrons são fundamentalmente os mesmos. A diferença essencial é que o confinamento gera uma fonte de nêutrons pontual, enquanto os tokamaks são fontes toroidais, mais difusas.

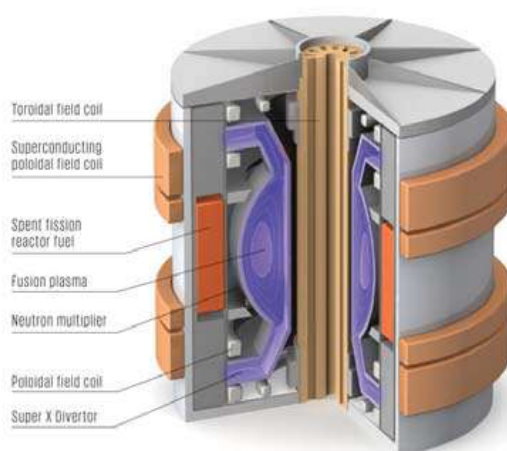


Fig. 104 - Super X Divertor (Tokamak de Transmutação) 25

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATALLA, Drausio Lima. *Usinas nucleoeletricas – escolha de local*. 2009.

CROMMELINCK, Yves; LABANCA, Gustavo Henrique; RIBAS, Paulo. *Main prerequisites when considering an investment in nuclear new build*. Palestra apresentada no INAC 2013 (International Nuclear Atlantic Conference). GDF Suez, nov/2013.

GUIMARÃES, Leonam dos Santos. *Energia nuclear: desmistificação e desenvolvimento*. Advir, dez/2013.

GUIMARÃES, Leonam dos Santos. *Futuro tecnológico da geração elétrica nuclear*. Dez/2013.

GROMANN, Alexandre. *A atividade de regulação de reatores nucleares: uma visão prospectiva*. Palestra apresentada no INAC 2013 (International Nuclear Atlantic Conference). Comissão Nacional de Energia Nuclear, nov/2013.

LEIPNER, Carlos. *Nuclear Power a journey of continuous improvement*. Palestra apresentada no INAC 2013 (International Nuclear Atlantic Conference). Westinghouse, nov/2013.

Localização de sítios para empreendimento nuclear de potência – Brasil – região nordeste. Eletronuclear / COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, dez/2009.

MARIZ, Carlos Henrique da Costa. *Desenvolvimento do Brasil e energia elétrica*. Revista da Associação Comercial de Pernambuco, Recife, jan/2014.

MARIZ, Carlos Henrique da Costa. *Em defesa da energia nuclear*. Revista Algo Mais, Ano 8, no. 90, set/2013.

MARIZ, Carlos Henrique da Costa. *Algumas idéias sobre a construção de novas usinas nucleares no Brasil*. Palestra apresentada no INAC 2013 (International Nuclear Atlantic Conference). Industrial Nucleares do Brasil, nov/2013.

MARTINEZ, Aquilino Senra. *The nuclear fuel cycle in Brazil*. Palestra apresentada no INAC 2013 (International Nuclear Atlantic Conference). Industrial Nucleares do Brasil, nov/2013.

MIELNIK, Otavio. *Expansão da energia elétrica no Brasil e a geração nuclear*. Palestra apresentada no INAC 2013 (International Nuclear Atlantic Conference). Industrial Nucleares do Brasil, nov/2013.

MÜLLER, Antonio. *Abdan propõe criação de leilões específicos para energia nuclear no Brasil*. Abr/2014.

O futuro energético e a geração nuclear. FGV Projetos - SP, São Paulo, jun/2013.

POETS, Karl-heinz. *The world nuclear future*. Palestra apresentada no INAC 2013 (International Nuclear Atlantic Conference). Areva, nov/2013.

Panorama da energia nuclear no mundo. Abdan/Eletronuclear, Rio de Janeiro, 2013.

Plano nacional de energia 2030. MME – Ministério de Minas e Energia, Brasília, fev/2008.

Programa decenal de energia – PDE 2022. MME – Ministério de Minas e Energia, Brasília, nov/2013.

Programa nuclear brasileiro e sua continuidade. Abdan – Associação Brasileira para o Desenvolvimento e Atividades Nucleares, Rio de Janeiro, jun/2010.

SACRESTE, Jacques. *EDF Nuclear developments strategy and projects.* Palestra apresentada no INAC 2013 (International Nuclear Atlantic Conference). EDF International, nov/2013.

SANTOS, Ricardo P., ROSA, Luiz Pinguelli; AROUCA, Maurício C.; RIBEIRO, Alan. *The importance of nuclear energy for the expansion of Brazil's electricity grid.* 2013.

Siting guide: site selection and evaluation criteria an early site permit application. EPRI, California, mar/2002.

IPCC 2014: Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policy makers in climate change - mitigation of climate change. 2014.

The Outlook for energy: a view to 2040. ExxonMobil, 2012.

VENTURA FILHO, Altino. *The end of hydroelectric energy production in Brazil.* Palestra apresentada no INAC 2013 (International Nuclear Atlantic Conference). Ministério de Minas e Energia, nov/2013.