



UNIFACS
UNIVERSIDADE SALVADOR
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

**UNIFACS UNIVERSIDADE SALVADOR
MESTRADO EM ENERGIA**

ANYA DANTAS CABRAL

**ENERGIA TERMONUCLEAR NO SÃO FRANCISCO
PERSPECTIVAS E RESTRIÇÕES**

Salvador
2016

ANYA DANTAS CABRAL

**ENERGIA TERMONUCLEAR NO SÃO FRANCISCO
PERSPECTIVAS E RESTRIÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado em Energia da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Barbosa.

Co-Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Rodrigues de Araújo.

Salvador
2016

FICHA CATALOGRÁFICA

(Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities)

Cabral, Anya Dantas Cabral

Energia termonuclear no São Francisco: perspectivas e restrições./
Anya Dantas Cabral.- Salvador: UNIFACS, 2016.

127 f. : il.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Energia da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International
Universities como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Profº. Dr. Daniel Barbosa.

Co-Orientador: Profº. Dr. Daniel Barbosa.

1. Política energética. 2. Usinas termonucleares. 3. Política
nuclear. I. Barbosa, Daniel, orient. II. Araújo, Paulo Sérgio
Rodrigues de, orient. III. Título.

CDD:333.79

ANYA DANTAS CABRAL

ENERGIA TERMONUCLEAR NO SÃO FRANCISCO
PERSPECTIVAS E RESTRIÇÕES

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Energia, na UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities, à seguinte banca examinadora:

Daniel Barbosa - Orientador _____
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - USP
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities

Paulo Sérgio Rodrigues de Araújo – Co-Orientador _____
Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
(ESALQ/USP)
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities

Kleber Freire da Silva _____
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - USP
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities

Paulo Roberto Ferreira de Moura Bastos _____
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Salvador, 26 de março de 2016.

AGRADECIMENTOS

À Fapesb pelo apoio financeiro. A meus orientadores Daniel Barbosa e Paulo Araújo. A Kleber Freire, coordenador do Mestrado em Energia e a Fernando Pedrão.

RESUMO

Em 2008, o Plano Nacional de Energia 2030, anunciava a necessidade de expandir o parque nuclear com a finalização de Angra 3 e a construção de pelo menos quatro novas usinas nucleares, sendo duas na região Sudeste e duas no Nordeste. Estudos de localização apontavam as margens do rio São Francisco como ideais para abrigar a central nuclear do Nordeste. A energia nuclear, além de fornecer energia firme ao sistema elétrico, surgia como uma alternativa ambientalmente correta face a outras térmicas convencionais tanto pela baixa emissão de CO₂, quanto pelo preço do MWh gerado. A construção de usinas nucleares fazia parte de um projeto mais amplo de valorização da energia nuclear sua importância era estratégica para a nação que, durante o governo do presidente Lula, pretendia posicionar-se como grande potência no cenário internacional. As novas usinas viabilizavam economicamente a mineração e o beneficiamento do urânio, abundante no país. A crise econômica mundial de 2008, o acidente nuclear de Fukushima, a crise hídrica que assolou o Nordeste e o Sudeste a partir de 2012 e, por último, a crise político-econômica brasileira de 2016 modificaram as condições para a implantação de usinas nucleares no país. A partir de uma análise histórico-dialética esta dissertação trata de verificar se, nas atuais condições, a implantação de uma central nuclear às margens do rio São Francisco é factível do ponto de vista ambiental; é desejável, na perspectiva da operação do sistema elétrico; é viável, pela ótica econômica e continua sendo estratégica para o Brasil.

Palavras chave: Política energética. Usinas termonucleares. Política nuclear.

ABSTRACT

By 2008 the National Energy Plan for 2010 announced the need to expand the nuclear park with the finishing of Angra 3 and the setting up of least four new nuclear plants, from which two in the Southeast region and two in the Northeast. Location studies pointed out the São Francisco river margins as ideals to hold the Northeast component. Nuclear energy, more than providing firm energy, was an environmental alternative better than the conventional ones as in regard to CO2 emissions, as well as for the price of KWA. The construction of nuclear plants was central to a Project of valuing the strategic role of nuclear power for the international role of the country. The new centrals should make feasible new mining projects and for treating uranium. The economic crisis untaped in 2008 and the nuclear accident at Fukushima, besides de water shortage in the Northeast summed with economic crisis in Brazil changing the conditions por installing new nuclear plants in the country. From an historic – dialectics approach this study aims to verify the actual conditions for a nuclear plant in the mid-São Francisco basin with its environmental and economic implications, given the presente operational conditions of electric energy operations.

Keywords: Energy policy. Thermonuclear plants . Nuclear policy.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1- Fissão Nuclear | 22 |
| Figura 2 - Cronologia dos Reatores de Potência | 24 |
| Figura 3 – Representação esquemática do FBRN | 27 |
| Figura 4 - Representação do sistema primário de um PWR com 4 circuitos | 30 |
| Figura 5 – Esquema de uma usina com reator PWR | 31 |
| Figura 6 – Barreiras físicas de contenção da radiação de Angra 2..... | 32 |
| Figura 7 – Ciclo do combustível nuclear..... | 35 |
| Figura 8 - Modelo brasileiro de ultracentrífuga..... | 38 |
| Figura 9 - Vareta de combustível com pastilhas de UO ₂ | 39 |
| Figura 10 - Integração eletroenergética do SIN..... | 52 |
| Figura 11– Diagrama esquemático de hidrelétricas – Bacia do rio São Francisco | 56 |
| Figura 12 - Número de reatores em operação em 6/8/2015 | 58 |
| Figura 13 - Participação da energia nuclear na geração elétrica - 2005 - 2014..... | 59 |
| Figura 14 - Número de reatores em construção em 6/8/2015..... | 60 |
| Figura 15 - Suprimento de energia elétrica de origem nuclear - 1995-2014..... | 61 |
| Figura 16 – A CNAAA..... | 62 |
| Figura 17 - Áreas potenciais para abrigar centrais nucleares | 71 |
| Figura 18 – Fluxograma do processo de seleção de sítios..... | 72 |
| Figura 19 – Áreas favoráveis para a instalação de centrais nucleares no Nordeste | 75 |
| Figura 20 – Sítio principal e sítio alternativo no estado de Pernambuco | 76 |
| Figura 21 - Energia Armazenada no Subsistema Nordeste 2012 a janeiro de 2015 | 101 |
| Figura 22 - Geração e importação de energia elétrica no Subsistema Nordeste de 2002 a fev. 2016 | 103 |
| Figura 23 - Capacidade instalada e geração das usinas eólicas no Nordeste | 104 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Principais componentes de um reator nuclear..... | 24 |
| Quadro 2 – Tipos de reatores nucleares..... | 25 |
| Quadro 3 – Principais modelos de reatores da geração III e III+ | 26 |
| Quadro 4 - Comparação dos Elementos Combustíveis de Angra 1 e Angra 2..... | 39 |
| Quadro 5 – Consumo de combustível e resíduos produzidos para produção de 1 MW em um ano | 43 |
| Quadro 6 - Gerenciamento de combustíveis irradiados na CNA AAA..... | 46 |
| Quadro 7 - Cenários do PNE-2030..... | 65 |
| Quadro 8 – Critérios selecionados para estudos de localização da Central do Nordeste | 74 |
| Quadro 9 – Modelos de reatores evolucionários PWR ~1.000 MWe | 83 |
| Quadro 10 – Modelos de reatores evolucionários resfriados a água > 1.400 MWe..... | 83 |
| Quadro 11 – Vilas residenciais da Eletronuclear..... | 94 |
| Quadro 12 – Perfil da mão de obra requerida para Angra 3..... | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Capacidade instalada do Subsistema Nordeste em 31/12/2014..... | 55 |
| Tabela 2 - Alternativas para a expansão da oferta de energia elétrica no período 2015-2030 | 67 |
| Tabela 3 - Projeção do consumo de eletricidade por Subsistema | 68 |
| Tabela 4 - Projeção da Carga de Energia | 68 |
| Tabela 5 - Custo do Combustível na Geração Térmica..... | 68 |
| Tabela 6 – Desempenho dos reatores em operação por categoria de reator de 2012 a 2014 | 81 |
| Tabela 7 - Reatores em operação e construção no mundo em 1/04/2016 por tipo..... | 82 |
| Tabela 8 – Angra 3. Orçamento estimativo (base: junho-2010)..... | 98 |
| Tabela 9 – Usinas eólicas em operação e em construção por região eletro-geográfica em 27/03/2016..... | 104 |

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

| | |
|-----------------|--|
| AGR | <i>Advanced Gas Reactor</i> |
| AIEA | Agência Internacional de Energia Atômica |
| ANA | Agência Nacional de guas |
| ASN | <i>Autorit de Sret Nucléaire</i> |
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| BWR | <i>Boiling Water Reactor</i> |
| Candu | <i>CANada Deuterium Uranium</i> |
| CNNC | <i>China National Nuclear Corporation</i> |
| COG | Candu Owner Group |
| CNAAA | Central Almirante Álvaro Alberto |
| CNEN | Comissão Nacional de Energia Nuclear |
| CNPE | Conselho Nacional de Política Energética |
| DECON | <i>Decontamination</i> |
| DUA | Diuranato de amônio |
| EIA/Rima | Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental |
| ENTOMB | <i>Entombed</i> |
| EPC | <i>Engineering, Procurement and Construction</i> |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| EPRI | <i>Electric Power Research Institute</i> |
| FBR | <i>Fast Breeder Reactor</i> |
| FBRN | <i>Fixed Bed Nuclear Reactor</i> |
| FCN | Fábrica do Combustível Nuclear |
| Feema | Fundao Estadual de Engenharia do Meio Ambiente |
| GARTA | Grupo de Análise de Risco Tecnológico e Ambiental |
| GCR | <i>Gas Cooled Reactor</i> |
| GIF | <i>Generation International Forum</i> |
| HLW | <i>High Level Waste</i> |
| HTGR | <i>High Temperature Gas Reactor</i> |
| IAEA | <i>International Atomic Energy Agency</i> |
| Ibama | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |

| | |
|-----------------------|---|
| INB | Indústrias Nucleares do Brasil |
| IRSN | <i>Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire</i> |
| IME | Instituto Militar de Engenharia |
| ILW | <i>Intermediate Level Waste</i> |
| LLW | <i>Low Level Waste)</i> |
| LWGR | <i>Light Water Graphite Reactor</i> |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| MOx | <i>Mixed Oxydes</i> |
| MRE | Mecanismo de Realocação de Energia |
| NGF | <i>New Generation Fuel</i> |
| N | Norte |
| Nuclemon | Nuclebrás Pesquisa de Tório e Areias Monazíticas S/A |
| Nuclep | Nuclebrás Equipamentos Pesados |
| ONS | Operador Nacional do Sistema elétrico |
| PEC | Proposta de Emenda à Constituição |
| PCH | Pequenas Centrais Hidrelétricas |
| PDE | Plano Decenal de Energia |
| PNE | Plano Nacional de Energia |
| PEL | Planejamento de Operação Elétrica |
| PEN | Plano da Operação Energética |
| PET | Programa de Expansão de Transmissão |
| PFBR | <i>Prototype Fast Breeder Reactor</i> |
| PHWR | <i>Pressurized Heavy Water Reactor</i> |
| PWR | <i>Pressurized Water Reactor</i> |
| SAFSTOR | <i>Safe Storage</i> |
| SE/CO | Sudeste/Centro Oeste |
| SIG | Sistema de Informações Geográficas |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| SMR | <i>Small Modular Reactor</i> |
| TBq | <i>Tera Bequeréis</i> |
| TNT | Tratado de Não Proliferação de armas nucleares |
| UF₆ | Hexafluoreto de Urânio |
| UO₂ | Dióxido de urânio |

| | |
|-----------------------|--|
| UO₃ | Trióxido de urânio |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |
| U.S.NRC | <i>United States Nuclear Regulatory Commission</i> |
| Usam | Usina Santo Amaro |

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL..... | 18 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 18 |
| 1.3 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA | 19 |
| 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO | 19 |
| 2 ASPECTOS TÉCNICOS | 21 |
| 2.1 ENERGIA NUCLEAR..... | 21 |
| 2.2 A FISSÃO NUCLEAR..... | 21 |
| 2.3 REATORES NUCLEARES | 23 |
| 2.4 FUNCIONAMENTO DE UMA USINA NUCLEAR COM REATOR PWR..... | 28 |
| 2.4.1 Segurança na geração termonuclear..... | 32 |
| 2.5 O COMBUSTÍVEL NUCLEAR..... | 34 |
| 2.6 OS REJEITOS RADIOATIVOS..... | 42 |
| 2.7 O DESCOMISSIONAMENTO..... | 47 |
| 2.8 O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO | 49 |
| 2.8.1 A Região Eletro-Geográfica Nordeste | 55 |
| 3 A GERAÇÃO NUCLEOELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO..... | 57 |
| 4 O PLANO DE EXPANSÃO NUCLEOELÉTRICA PARA O NORDESTE | 63 |
| 4.1 ASPECTOS ESTRATÉGICOS..... | 63 |
| 4.2 ASPECTOS ECONÔMICOS E OPERACIONAIS DO SISTEMA ELÉTRICO... 65 | |
| 4.2 A ESCOLHA DA REGIÃO NORDESTE | 67 |
| 4.3 A LOCALIZAÇÃO DA CENTRAL NORDESTE..... | 69 |
| 4.3.1 Rejeição pública e localização da Central Nordeste..... | 77 |
| 4.4 A ESCOLHA TECNOLÓGICA DOS REATORES | 79 |
| 4.4.1 Considerações sobre os PHWR | 81 |
| 4.4.2 A opção pelos reatores PWR | 82 |
| 4.5 ASPECTOS AMBIENTAIS..... | 86 |
| 4.5.1 Os efeitos da radioatividade | 86 |
| 4.5.2 Riscos de exposição à radiação | 87 |
| 4.5.3 Impactos ambientais de uma usina nuclear em operação normal | 88 |
| 4.5.4 Água, energia nuclear e segurança | 91 |
| 4.6 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS..... | 93 |
| 4.7 CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA NUCLEAR..... | 97 |
| 4.7.3 Aspectos operacionais do subsistema Nordeste | 100 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 106 |

| | |
|---|------------|
| REFERÊNCIAS | 109 |
| ANEXO A– ANGRA 1: INFORMAÇÕES GERAIS E DADOS BÁSICOS..... | 117 |
| ANEXO B – ANGRA 2 - INFORMAÇÕES GERAIS E DADOS..... | 119 |
| ANEXO C – IV GERAÇÃO DE REATORES | 121 |
| ANEXO D - CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE SÍTIOS NUCLEARES DO EPRI <i>SITING GUIDE</i> | 123 |

1 INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica no Brasil desenvolveu-se atraída pela disponibilidade de muitas oportunidades de geração de energia hidrelétrica em larga escala. A expansão do sistema elétrico realizou-se com a incorporação de tecnologias na construção de barragens e em sistemas de controle, além de inovações na distribuição. Isto resultou na construção de grandes barragens territorialmente concentradas, portanto com um padrão de custos de distribuição. A progressiva interligação do sistema nacional permitiu sua regulação a partir das bacias hidrográficas e de seus reservatórios através de compensações inter-regionais via sistema de transmissão. O sistema predominantemente hidráulico dispunha da complementação de usinas térmicas, que eram despachadas quando necessário (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2014).

Esse sistema hidráulico encontrava dificuldades crescentes para prosseguir em seu crescimento dado que as principais oportunidades para barragens com paredes altas passaram a escassear, significando que os diversos custos indiretos ambientais aumentaram de modo mais que proporcional aos benefícios da energia gerada.

Os grandes projetos de irrigação e as mudanças climáticas comprometeram o nível dos reservatórios e, conseqüentemente a geração hidrelétrica. A opção do Brasil por hidrelétricas a fio d'água, com reservatórios menores, ao invés de alagar grandes áreas para manter a capacidade de acumulação, diminuiu a geração de energia firme e aumentou a dependência de usinas térmicas emissoras de Gases de Efeito Estufa. Simultaneamente, estimulou-se a entrada de fontes renováveis como a eólica, a solar ou a biomassa, mas se do ponto de vista ambiental essas fontes auxiliavam no controle da emissão de Gases de Efeito Estufa, nenhuma delas gerava energia de forma constante.

A produção de energia hidroelétrica no Nordeste está concentrada no sistema São Francisco, pressionado por altas taxas de evaporação sobre longos trechos sem afluentes. A evapotranspiração no reservatório de Sobradinho, mais que no de Itaparica, agrava esse quadro (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2004). A impossibilidade de aumentar a oferta por hidroeletricidade pôs a região sob duas condicionantes de maior importação de outras regiões e aumento da produção de energia térmica emissora de CO₂. Este cenário de crescente vulnerabilidade indicava a necessidade de expandir a produção

regional por outras fontes. No conjunto, esse sistema enfrentava custos crescentes irreduzíveis de distribuição. Por estas razões havia um problema concreto de estratégia de aumento de produção com redução de riscos.

Uma das fontes cogitadas para diminuir a vulnerabilidade do sistema e que não contribuiria para o efeito estufa era a energia nuclear. Pese as controvérsias sobre a segurança, a energia nuclear é uma fonte, que gera energia firme e não emite CO₂ no processo de geração (SCOTT, 2013).

O PNE-2030 (Plano Nacional de Energia 2030), anunciado em 2008, presumia uma expansão do setor termonuclear com a construção de pelo menos quatro novas usinas nucleares, duas no Nordeste e duas no Sudeste e a conclusão de Angra 3, ampliando a capacidade instalada termonuclear de 1.990 MW para 7.360 MW em 2015, em um cenário intermediário, e 8360 MW em um cenário alto (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007).

A expansão termonuclear surgia como parte de um projeto de governo mais amplo de valorização da energia nuclear em outros setores, com saúde, agricultura, indústria e defesa. O desenvolvimento do setor nuclear era considerado estratégico para a nação por estar relacionado com autossuficiência energética, defesa das reservas energéticas e desenvolvimento tecnológico, contribuindo para projetar o país no cenário internacional.

O caráter dual da energia nuclear, cuja tecnologia pode ser aproveitada tanto para fins bélicos como para usos pacíficos, tornou essa tecnologia passível de controles internacionais cada vez mais rígidos, visando conter a proliferação de armas nucleares, o que dificulta o desenvolvimento autônomo da tecnologia.

O aproveitamento da energia nuclear para produção de energia elétrica, no mundo iniciou-se na década de 1950. Certos países, como a França, adotaram a energia nuclear como principal fonte para gerar eletricidade. Em 2013, a energia nuclear representou 73,3% da energia elétrica produzida naquele país (RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ, 2014). Em 2014, a participação da energia nuclear no cenário mundial de eletricidade foi de 11,1% (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015). No Brasil, a geração de energia elétrica de origem termonuclear foi de 14,7 TWh, que correspondeu a 2,7% da geração de

energia elétrica total no mesmo período (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2015).

O acidente nuclear de Fukushima, ocorrido em março de 2011, modificou o quadro mundial da expansão da energia nuclear. Países como a Alemanha reafirmaram a decisão de abandonar a geração termonuclear (RABL; RABL, 2013), mas países detentores de tecnologia de reatores e do processamento de combustível como a Rússia e o Japão intensificaram o comércio de usinas nucleares na África e no Leste Europeu.

No Brasil, a energia nuclear é produzida por duas únicas usinas localizadas na CNAAA (Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto) em Angra dos Reis, município do Rio de Janeiro, com potência elétrica bruta de 1.990 MW (ELETRONUCLEAR, 2014a). A expansão da geração termonuclear no sistema elétrico brasileiro estava incluída no Plano Nacional de Energia 2030. Até 2030, estava prevista a construção de quatro a oito usinas nucleares com potência de 1.000 MW cada, duas em uma central no Nordeste e duas em uma central no Sudeste, além da conclusão de Angra 3, com 1.405 MW de potência.

O acidente de Fukushima adiou temporariamente a construção de novas usinas, porém, o baixo nível dos reservatórios, em decorrência de índices pluviométricos abaixo da média, desde 2012, comprometendo a geração hidrelétrica e obrigando o despacho de térmicas e a importação de energia de outras regiões fez ressurgir o debate sobre o papel das usinas termonucleares na geração de energia elétrica no Brasil, no Nordeste e, especificamente às margens do rio São Francisco.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo discute as perspectivas e restrições da geração termonuclear no Brasil, em especial no Nordeste, e em particular no Sub-médio São Francisco.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Verificar se nas atuais condições: a) após a crise hídrica, a implantação de usinas nucleares no subsistema Nordeste, às margens do rio São Francisco é factível, do ponto de vista ambiental; b) após a inserção de fontes intermitentes no subsistema Nordeste, a implantação

das usinas é desejável, do ponto de vista da operação do sistema elétrico; c) após a crise econômica, a aquisição de usinas nucleares estrangeiras é viável; e d) se a implantação de usinas nucleares no Brasil é estratégica para o país.

1.3 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

Os estudos sobre energia nuclear ainda são restritos a órgãos públicos especializados, algumas universidades e organizações da área e as decisões de política nuclear são tomadas pelo governo federal baseadas em estudos não divulgados. Há pouca ou nenhuma participação estadual e uma omissão quase total da sociedade civil.

A importância deste trabalho consiste em reabrir o debate sobre a questão nuclear como um alerta das implicações (positivas e negativas) do uso de energia nuclear, antecipando problemas que poderão surgir com a implantação de empreendimentos nucleares no Nordeste e que não estão sendo percebidos pela sociedade civil e pelas entidades representativas na esfera estadual e municipal.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro reza sobre os aspectos técnicos da energia nuclear, o processo de geração de energia elétrica de origem nuclear e o funcionamento de uma usina nuclear, o combustível nuclear e o ciclo do combustível, os rejeitos radioativos e o descomissionamento de uma usina; o segundo capítulo, apresenta o panorama da geração mundial e brasileira; o terceiro discute os impactos ambientais da energia nuclear, enfatizando a importância da água para a operação segura de uma usina nuclear, os impactos sócio-econômicos de sua implantação e os investimentos de capital para construí-la; o quarto apresenta as condições atuais do sistema elétrico brasileiro e da região eletro-geográfica Nordeste, apontando para as restrições da inserção da energia nuclear no subsistema Nordeste; o quinto expõe o Plano de Expansão nucleoeletrica para o Nordeste, que prevê a construção de uma Central Nuclear às margens do rio São Francisco, nas etapas da escolha do local e da tecnologia de reatores e o sexto e último tece considerações sobre o papel estratégico da construção de usinas nucleares para o Programa Nuclear Brasileiro.

Este estudo será realizado mediante uma revisão bibliográfica do tema e de opiniões expressas em palestras e seminários de especialistas do setor. Com este propósito, empreende-se uma revisão dos conceitos técnicos necessários para a compreensão do tema.

2 ASPECTOS TÉCNICOS

O primeiro obstáculo de um estudo sobre energia nuclear é a pouca divulgação do conhecimento disponível do tema. Neste primeiro capítulo descreve-se a energia nuclear, os reatores nucleares e todas as etapas que envolvem a geração nucleoe elétrica, que começam na obtenção e transformação de urânio em combustível nuclear, na operação de uma usina termonuclear, no gerenciamento dos rejeitos e no descomissionamento da planta.

2.1 ENERGIA NUCLEAR

Determinados isótopos de alguns elementos são radioativos por terem a propriedade de transformar massa em energia, através de reações nucleares. São chamados isótopos instáveis, pois possuem um número de nêutrons maior que o número de prótons e emitem espontaneamente partículas ou energia pelo núcleo. Essas reações nucleares modificam a composição dos núcleos atômicos, transformando-os em outros e liberando uma grande quantidade de energia. Esses processos são a fissão nuclear, a fusão nuclear e o decaimento radioativo (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2006).

Os elementos (ou isótopos) radioativos, ao emitirem partículas e energia, decaem transformando-se em outros elementos ou em isótopos diferentes do mesmo elemento mais estáveis. Cada elemento tem uma velocidade de transmutação característica. O tempo necessário para que a sua atividade¹ seja reduzida à metade é chamado de meia-vida. Alguns elementos possuem meia-vida de bilhões de anos e outros de milionésimos de segundos.

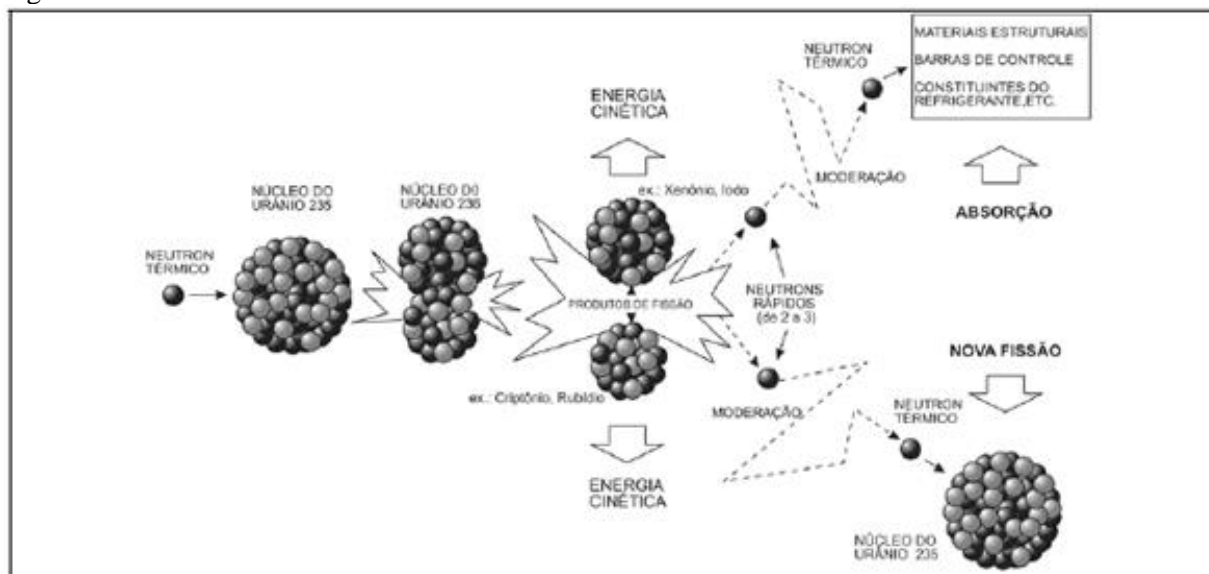
2.2 A FISSÃO NUCLEAR²

A fissão nuclear é o processo no qual um núcleo pesado se divide em dois ou mais fragmentos, liberando uma grande quantidade de energia, assim como a emissão de raio gama e nêutrons e raramente ocorre espontaneamente. A fissão nuclear pode ser induzida pelo bombardeamento de nêutrons (Figura 1).

¹ Atividade radioativa é a taxa de transformação de uma amostra de átomos radioativos ou fonte radioativa e é medida em Bq (Becquerel). 1 Bq=1 desintegração por segundo.

² A fissão atômica não é o único modo de obtenção de energia nuclear, mas é o único utilizado comercialmente para fins pacíficos, nos dias atuais.

Figura 1- Fissão Nuclear



Fonte: Eletronuclear (1998).

O nêutron bombardeado, ao ser absorvido pelo núcleo libera, além dos dois fragmentos de núcleo, dois ou três nêutrons, que por sua vez podem atingir outros núcleos, provocando sucessivas fissões. Se houver um grande número de núcleos disponíveis, de urânio 235, por exemplo, será maior a probabilidade de ocorrerem novas fissões. Esta reação é chamada reação de fissão nuclear em cadeia ou simplesmente reação em cadeia.

O elemento mais utilizado no processo de fissão atômica para a obtenção de energia térmica é o urânio por ser o elemento mais pesado existente na natureza. O urânio é encontrado na natureza na forma de uma mistura de três isótopos em diferentes proporções: o U-234 (0,005%); o U-235 (0,7%) e o U-238 (99,3%) (WISE-URANIUM, 2016).

Para efeito de fissão nuclear o isótopo mais usado é o U-235, de núcleo físsil, embora alguns países como Canadá, detenham uma tecnologia que permite usar o urânio natural, com grande concentração de U-238 (núcleo fissionável), Em uma reação de fissão envolvendo o U-235 a energia liberada é de aproximadamente 200 MeV.

A reação de fissão nuclear em cadeia pode ser não controlada ou controlada. A reação em cadeia não controlada ocorre quando a fissão de um núcleo provoca mais de uma fissão (CARDOSO, E. *et al.* 2006). Deste modo, os nêutrons liberados na primeira fissão, ao serem absorvidos por mais de um núcleo resultam em duas fissões que, por sua vez provocam quatro numa sucessão sempre crescente de fissões que produzirão uma quantidade cada vez

maior de energia, deixando o sistema em estado de supercriticalidade. É o que acontece, por exemplo, durante a explosão de uma bomba atômica. Por sua vez, a reação em cadeia controlada depende da criticalidade do sistema, isto é da geração constante de energia. Com o controle da população de nêutrons torna-se possível aproveitar a energia da fissão e convertê-la em energia elétrica. Essa reação ocorre, de maneira controlada no núcleo do reator nuclear, que nos reatores PWR (*Pressurized Water Reactor*) é uma câmara de resfriamento hermética e blindada contra radiação.

2.3 REATORES NUCLEARES

O reator nuclear é um sistema onde podem ser produzidas reações em cadeia controladas. A maioria dos reatores em funcionamento utiliza urânio como combustível, mas existem reatores abastecidos a tório, plutônio ou combinações de elementos. Os reatores de potência, são aqueles utilizados para a produção de energia elétrica nas usinas nucleares ou para propulsão naval.

Os principais componentes de um reator nuclear são o combustível; o moderador; o refrigerante; o absorvedor; o refletor e a blindagem, as estruturas e os elementos de segurança (SILVA, 2012), que variam em função do tipo de reator (Quadro 1).

O combustível contém os elementos físseis e férteis que irão produzir as fissões na reação em cadeia; o moderador diminui a velocidade dos nêutrons rápidos para níveis de energia térmica); os refletores podem retornar ao núcleo nêutrons espalhados para fora do núcleo; os absorvedores têm como função manter a reação em cadeia dentro do núcleo de forma controlada; o papel do refrigerante é de retirar o calor gerado pelas fissões nucleares; a blindagem serve de barreira para atenuar os efeitos da radiação sobre o meio exterior; e os elementos de segurança, que podem ser passivos ou ativos, mantêm o controle da reação em cadeia e garantem uma parada segura do reator (PERROTTA, 1999a).

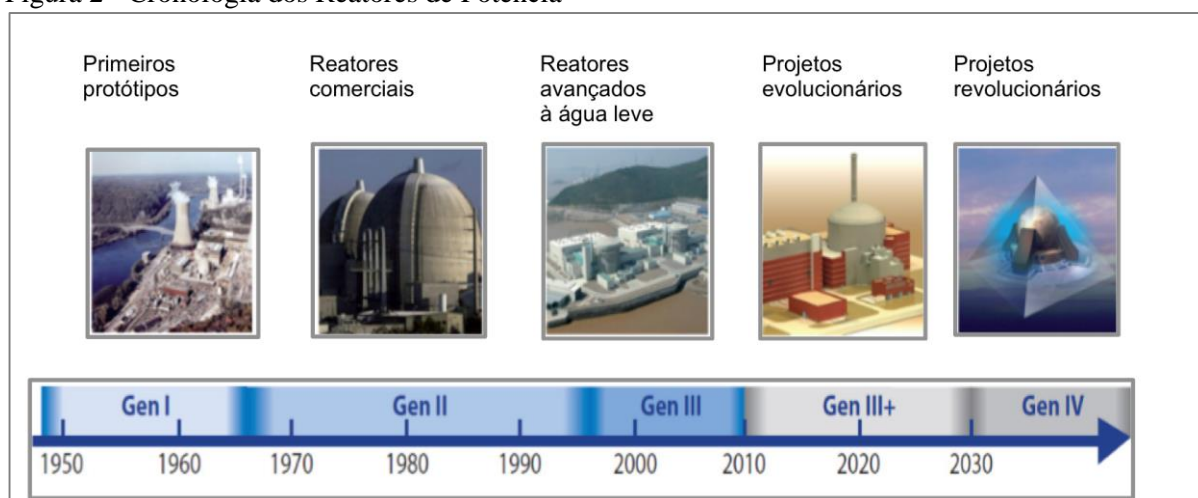
Quadro 1 - Principais componentes de um reator nuclear

| Combustível | Moderador | Refletor | Absorvedor | Refrigerante | Blindagem |
|-------------|----------------|-------------|------------|--------------------|-----------|
| urânio | água leve | água leve | boro | hélio | chumbo |
| plutônio | água pesada | água pesada | cádmio | dióxido de carbono | aço |
| tório | grafita | grafita | háfnio | água pesada | água leve |
| | berílio | urânio | índio | água leve | concreto |
| | sódio metálico | | prata | sódio metálico | zircaloy |
| | | | gadolínio | | |

Fonte: Elaboração do autor a partir de Perrotta (1999a).

Os reatores são ordenados por geração (Figura 2). A primeira geração correspondeu aos protótipos de reatores instalados a partir da década de 1950 e 1960. O princípio de todos eles foi concebido durante ou logo após a Segunda Guerra Mundial, com fins bélicos, seja para a produção de plutônio, para pesquisa, treinamento ou para propulsão naval. A partir dos anos cinquenta foram adaptados e modificados para gerar energia elétrica.

Figura 2 - Cronologia dos Reatores de Potência



Fonte: IAEA (2016).

Uma segunda geração de reatores, mais potentes, foi instalada a partir dos anos 1970 e representa a maioria dos reatores operantes no mundo, que diferem segundo o combustível, o refrigerante e o moderador. São eles: a) PWR, reator refrigerado a água leve pressurizada; b) BWR (*Boiling Water Reactor*), reator refrigerado a água leve fervente; c) GCR (*Gas Cooled Reactor*), reator refrigerado a gás; d) AGR (*Advanced Gas Reactor*), reator avançado refrigerado a gás; e) HTGR (*High Temperature Gas Reactor*), reator refrigerado a gás em alta temperatura; f) PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*), reator refrigerado a água pesada

pressurizada; g) FBR (*Fast Breeder Reactor*), reator reprodutor rápido; e h) LWGR (*Light Water Graphite Reactor*), reator refrigerado a água leve e moderado a grafite (Quadro 2).

Quadro 2 – Tipos de reatores nucleares

| Tipo de reator | Combustível | Moderador | Refrigerante | Enriquecimento | País de origem |
|----------------|-----------------------------------|------------------|-----------------------------|----------------|----------------------------|
| BWR | UO ₂ | H ₂ O | H ₂ O (fervente) | 2% a 4% | EUA |
| PWR | UO ₂ | H ₂ O | H ₂ O | 2% a 5% | EUA |
| GCR | U metálico | Grafite | CO ₂ | - | Reino Unido |
| AGR | UO ₂ | Grafite | CO ₂ | 2% a 4% | Reino Unido |
| HTGR | ThC+UC ₂ | Grafite | He | 93% | EUA/ Reino Unido /Alemanha |
| PHWR | UO ₂ | D ₂ O | D ₂ O | - | Canadá |
| LWGR | UO ₂ | Grafite | H ₂ O (fervente) | 2% a 4% | URSS |
| FBR | UO ₂ +PuO ₂ | - | Na ⁰ líquido | - | Vários |

Fonte: Silva (2012).

A terceira geração de reatores começou a ser desenvolvida nos anos oitenta, após o acidente de Chernobyl, e evoluíram, posteriormente, para a chamada geração III+. A principal vantagem dos projetos da terceira geração é dispor de sistemas passivos de resfriamento, independentes dos sistemas motorizados e da eletricidade. O resfriamento em projetos de terceira geração serve-se de condições naturais de gravidade e de processos termodinâmicos de resfriamento. O primeiro reator da geração III começou a operar no Japão, em 1996 (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2014).

Os reatores disponíveis comercialmente são reatores de geração III e III+, apresentando um projeto padronizado de maneira a agilizar o licenciamento, reduzir o custo de capital e o tempo de construção. Seu desenho é mais compacto e mais simples, sendo mais fáceis de operar e menos vulneráveis a transtornos operacionais. Sua vida útil é de sessenta anos, ao invés dos quarenta anos da geração anterior.

Os projetos preveem resistência a impactos da queda de aeronaves e a abalos sísmicos. A introdução de sistemas passivos de segurança e de redundância permite que a usina, em caso de acidente, aumente o tempo de resposta para três dias ou mais, reduzindo a probabilidade de fusão do núcleo. Por outro lado, o uso de venenos³ com maior poder de absorção amplia a vida útil do combustível e diminui a produção de resíduos de alta atividade. Alguns modelos

³ “Venenos queimáveis são materiais que se caracterizam por apresentar uma alta seção de choque para absorção de nêutrons e, ao absorvem nêutrons, transmutam-se em outros isótopos com seção de choque para absorção de nêutrons bem inferior a do combustível” (GIADA, 2005. p,1).

permitem o uso de vários combustíveis, como os modelos da Areva ou o EC6 do Candu (*CANada Deuterium Uranium*), o mais flexível de todos (Quadro 3).

Quadro 3 – Principais modelos de reatores da geração III e III+

| Modelo | Empresa | País | MWe | Combustível | Tipo |
|----------|----------------------|--------------|-------|-----------------------------|------|
| EPR | Areva | França | 1.650 | UO ₂ 5%, RU, MOX | PWR |
| Atmea 1 | Areva/ Mitsubishi | França/Japão | 1.100 | UO ₂ , RU, MOX | PWR |
| Kerena | Areva | França | 1.250 | UO ₂ , RU, MOX | BWR |
| AP-1000 | Westinghouse/Toshiba | EUA/Japão | 1.154 | UO ₂ | PWR |
| ABWR | GE-Hitachi | EUA/Japão | 1.350 | UO ₂ | BWR |
| ESBWR | GE-Hitachi | EUA/Japão | 1.520 | UO ₂ | BWR |
| APR1400 | KEPCO | Coréia | 1.400 | UO ₂ | PWR |
| US-APWR | Mitsubishi | Japão | 1.700 | UO ₂ | PWR |
| AES-92 | RosEnergAtom | Rússia | 1.000 | UO ₂ | PWR |
| AES-2006 | RosEnergAtom | Rússia | 1.200 | UO ₂ | PWR |
| EC6 | Candu | Canadá | 700 | U, RU, MOX, Th | PHWR |
| ACC1000 | CNNC & CGN | China | 1.000 | UO ₂ | PWR |
| PHWR | NPCIL | Índia | 700 | U | PHWR |

Fonte: Elaboração própria, adaptado de Areva (2014); Westinghouse (2014); GE-Hitachi (2014); Candu (2014).

Mais de 95% dos reatores disponíveis comercialmente são refrigerados a água, assim como 64 dos 67 reatores em construção (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015).

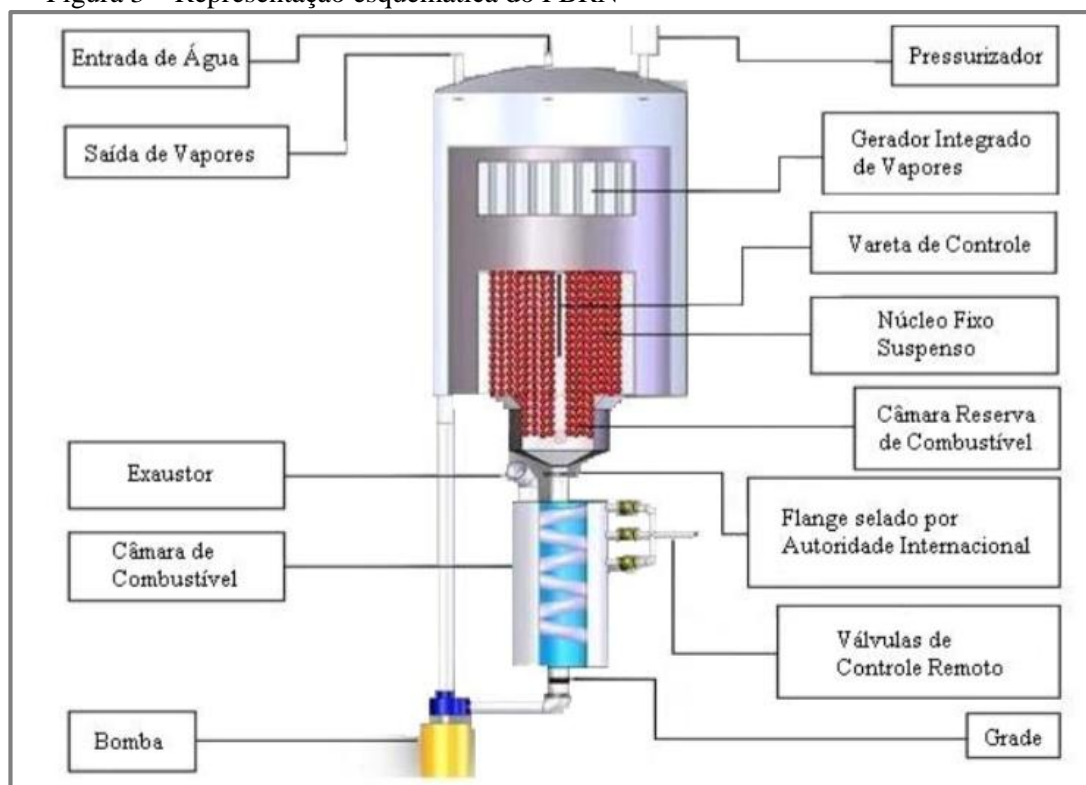
Quase todos os tipos de reatores dispõem de modelos com menos de 600 MW de potência, denominados SMR (*Small Medium Reactor*). São considerados *Small* os reatores com potência abaixo de 300 MWe e *Medium* entre 300 MWe e 600 MWe (DEGNAN, 2014).

Os SMR contornam o principal problema de hoje na construção de reatores nucleares, que é a escassez de grandes forjados, necessários para a fabricação do vaso de pressão do reator, geradores de vapor e grandes turbinas, que até 2009 eram construídos em apenas três países: França (Le Creusot), Rússia (OMZ Izhora) e Japão (*Japan Steel Work*) (ATALLA, 2009c) e cuja espera de encomenda pode superar os três anos, o que retarda a construção de usinas. A empresa japonesa, que detém 80% do mercado de grandes forjados só tem capacidade para produzir quatro vasos de pressão por ano.

Os modelos de SMR com potência inferior a 300 MW, de construção simplificada e construídos na fábrica são mais facilmente transportados e montados no sítio, diminuindo o tempo de construção da usina a 18 meses e os riscos de EPC (*Engineering, Procurement and Construction*). Há modelos ainda menores com potência de menos de 30 MW como o Carem25, que a Argentina está construindo (MAGAN, *et al.*, 2001) ou o FBRN (*Fixed Bed*

Nuclear Reactor) (em fase de projeto a procura de investidores), que está sendo desenvolvido na UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) pelo professor iraniano Farhang Sefidvash. Trata-se de um reator modular de 70 MWe a leito fixo, que possui segurança passiva e ativa, resfriamento passivo e utiliza esferas combustíveis compactadas Cermet⁴ (ŞAHIN; SEFIDVASH, 2007) (Figura 3).

Figura 3 – Representação esquemática do FBRN



Fonte: Şahin e Sefidvash (2007).

Os SMR podem ser montados em instalações subterrâneas ou móveis, com balsas para atender a comunidades isoladas e quando instalados em grupo em uma mesma usina atendem melhor à modulação de carga do que reatores com maiores potências. Os primeiros SMR foram desenvolvidos pelos Estados Unidos nos anos cinquenta.

Os três primeiros SMR inovadores estão sendo construídos pela Argentina (Carem-25), China (HTR-PM) e Rússia (KLT-40S). A Rússia pretende construir sete unidades, instaladas em balsas, nos próximos anos, para fornecer energia elétrica em regiões árticas, beneficiando a

⁴ Combustível formado por partículas cerâmicas, no caso do FRBN, de óxido urânio, revestidas por zircônio, alojadas em uma matriz igualmente revestida de zircônio.

exploração de gás e petróleo em regiões isoladas (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2016).

Uma quarta geração de reatores já está sendo desenvolvida e encontra-se em fase de projetos e testes a procura de combustíveis alternativos ao urânio. Os projetos concebem reatores com sistemas passivos de segurança. Alguns modelos pretendem além da geração de energia elétrica, produzir hidrogênio, dessalinizar água e produzir vapor em altíssimas temperaturas para serem integrados em plantas químicas isoladas (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2015).

O Fórum Internacional da IV Geração, fundado em julho de 2001, por nove países membros (Argentina, Brasil, Canadá, França, Japão, Coreia do Sul, África do Sul, Reino Unido e Estados Unidos), conta hoje com trinta países membros. O IV GIF (*IV Generation International Forum*) selecionou seis conceitos de reatores, que estão sendo desenvolvidos com a participação de diversos países, inclusive do Brasil, embora como observador.

O mercado de reatores é extremamente sensível ao progresso tecnológico. Os avanços no controle e na viabilidade econômica da fusão atômica, que deverá suceder a quarta geração de reatores irão causar uma ruptura, que poderão tornar obsoleta a tecnologia de fissão nuclear utilizada para a geração de energia elétrica, independentemente do tipo de reator de fissão.

2.4 FUNCIONAMENTO DE UMA USINA NUCLEAR COM REATOR PWR

Os reatores do tipo PWR foram inicialmente projetados para propulsão naval. São menores e mais compactos do que outros tipos de reator. Posteriormente foram adaptados para a produção de energia elétrica.

O Brasil optou pelos reatores do tipo PWR nos anos 1970, quando foi decidida a construção da primeira usina nuclear no país e foram abandonadas as pesquisas para desenvolver outros tipos de reator. Por esta razão, descrever-se-á o funcionamento de uma usina dotada de um reator desse tipo.

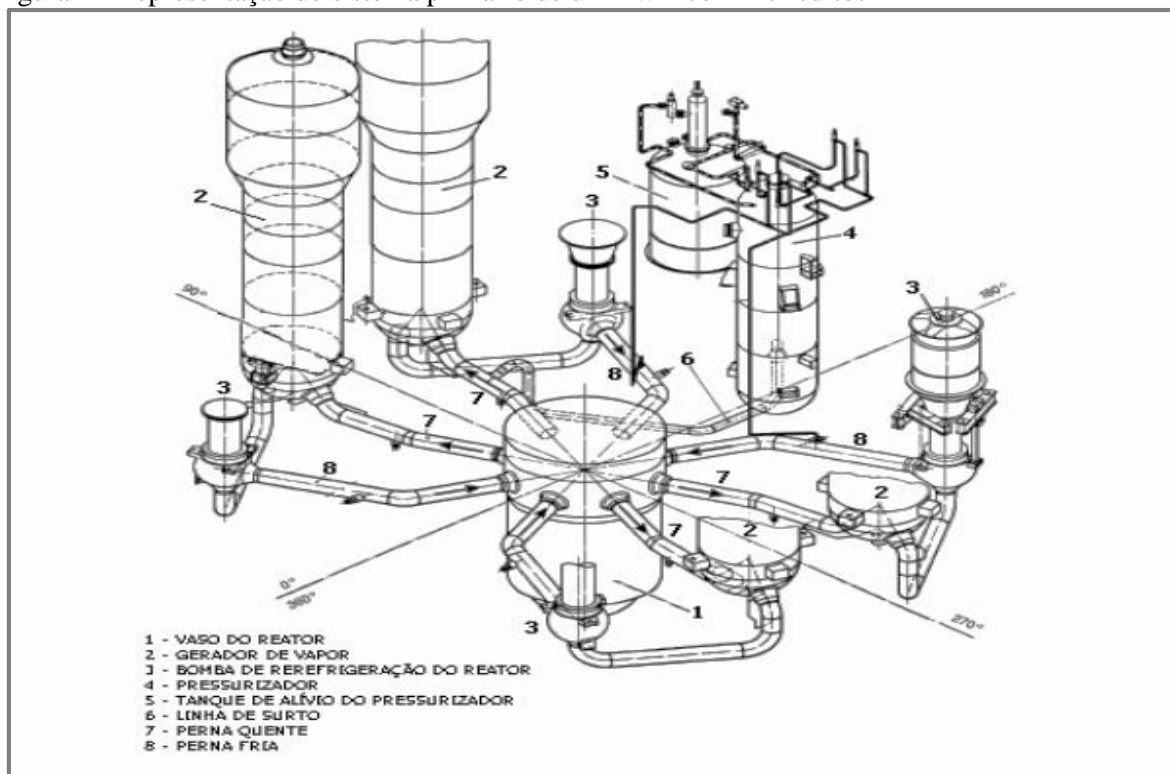
A usina nuclear é uma termoelétrica cujo calor é produzido pela fissão de núcleos de elementos radioativos no interior de um reator. O funcionamento da ilha nuclear de uma usina varia em função do tipo de reator.

Para iniciar a o processo fissão nuclear que irá produzir calor em um reator PWR, é inserida uma fonte de nêutrons no reator denominada fonte primária, que emite nêutrons naturalmente. Essa fonte primária ativa outras fontes de nêutrons chamadas de secundárias. O equilíbrio entre a emissão, a fuga e a absorção de nêutrons é o que garante a estabilidade da reação nuclear (FONSECA, 2006).

A fissão nuclear dos átomos de urânio localizados dentro das varetas do Elemento Combustível gera energia térmica. Esse calor aquece o refrigerante, a água que circula no vaso cilíndrico onde se encontram os Elementos Combustíveis a uma temperatura de 296 °C (temperatura média entre a entrada e saída de água no reator), que é mantida sob pressão de 158 bar, para evitar que entre em ebulição, vaporizando a água e mudando de fase. Essa água, desmineralizada e borada, circula em circuito fechado, chamado circuito primário.

A configuração do sistema primário depende da potência nominal da usina e pode ser constituído de dois, três ou quatro circuitos, cada um provido de um gerador de vapor, uma bomba de refrigeração e tubulações que interligam esses componentes ao reator (FONSECA, 2006) (Figura 4). O sistema primário de Angra 1 é dotado de dois circuitos e o de Angra 2 de quatro.

Figura 4 - Representação do sistema primário de um PWR com 4 circuitos

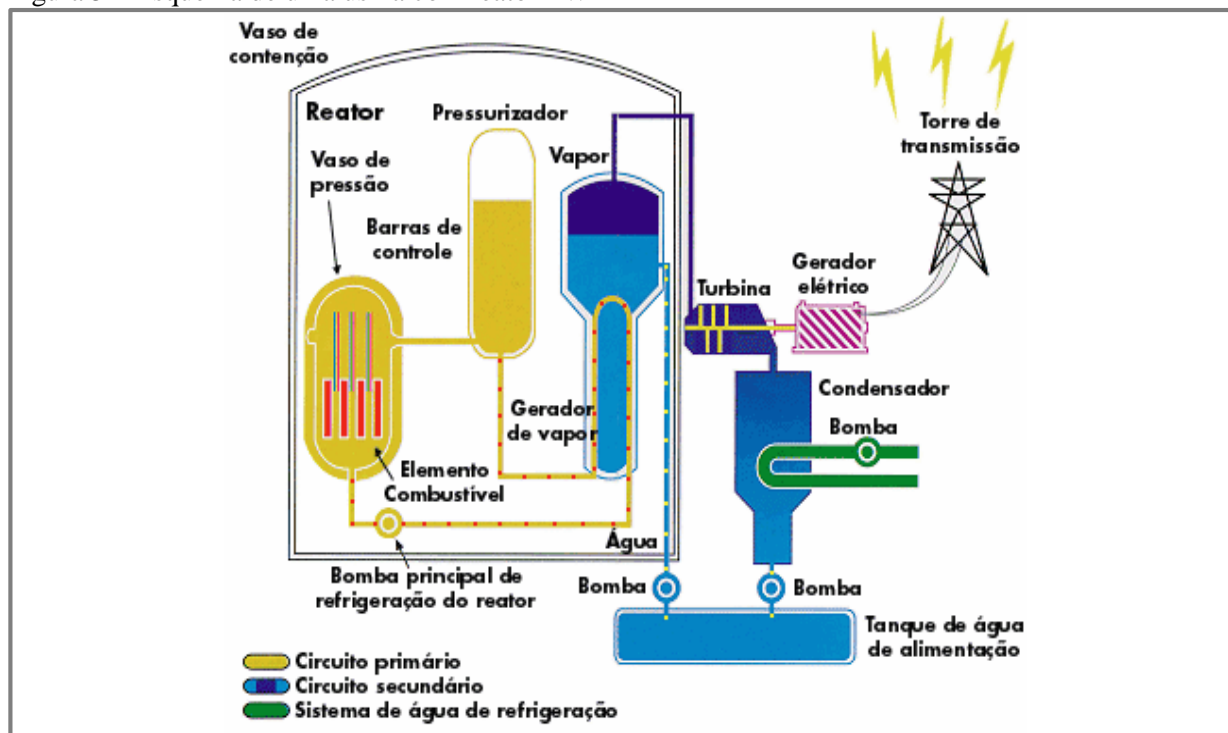


Fonte: Fonseca (2006).

A pressão do sistema primário é mantida por um pressurizador, que serve a todos os circuitos (*loop*) e ajusta as mudanças de volume da água devido às variações de temperatura (OLIVEIRA, 2002). Esse conjunto de equipamentos é mantido em uma contenção de aço cilíndrica ou semiesférica de aproximadamente 30 mm construído no interior de um prédio com paredes de concreto de 500 mm de espessura (FONSECA, 2006). A edificação é estanque e mantida a pressão abaixo da pressão ambiente. A entrada na sala do reator é realizada através de eclusas que permitem manter as diferenças de pressão (ELETRONUCLEAR, 2015).

Através das paredes da tubulação do circuito primário o calor é transferido para a água dos geradores de vapor (quatro para Angra 2 e 3 e dois para Angra 1) do segundo circuito fechado - circuito secundário – onde é transformada no vapor que movimenta um conjunto de turbinas – de alta e baixa pressão - a uma velocidade de 1.800 rpm, acionando um gerador elétrico. Depois de mover a turbina, o vapor passa por um condensador refrigerado por uma fonte fria - mar, lago, rio - que circula num terceiro circuito independente, aberto. A separação desses três circuitos impede que a água radioativa do reator entre em contato com a água do circuito aberto, que é liberada no ambiente após o uso (Figura 5) (ELETRONUCLEAR, 2016).

Figura 5 – Esquema de uma usina com reator PWR



Fonte: Eletronuclear (2016).

Um sistema adicional de resfriamento torna-se necessário, a depender das condições ambientes devido ao aumento na temperatura da água ao redor do ponto de descarga da água residual. O uso de torres de resfriamento diminui o impacto do aquecimento da água mas aumenta o custo total da usina, além de provocar descargas de vapor na atmosfera (VICAUD, 2007).

Quando a energia produzida não é mais suficiente para manter a potência nominal, periodicamente – 12 meses para Angra 1 e 13 meses para Angra 2 (no projeto) (ANEXO A e ANEXO B - um terço dos Elementos Combustíveis são substituídos). Para efetuar essa troca, o reator é aberto e a água é nivelada com a da piscina onde é armazenado o combustível usado. Os Elementos Combustíveis a serem substituídos são retirados do núcleo do reator e substituídos por outros que foram previamente colocados na piscina de armazenamento de combustíveis queimados.

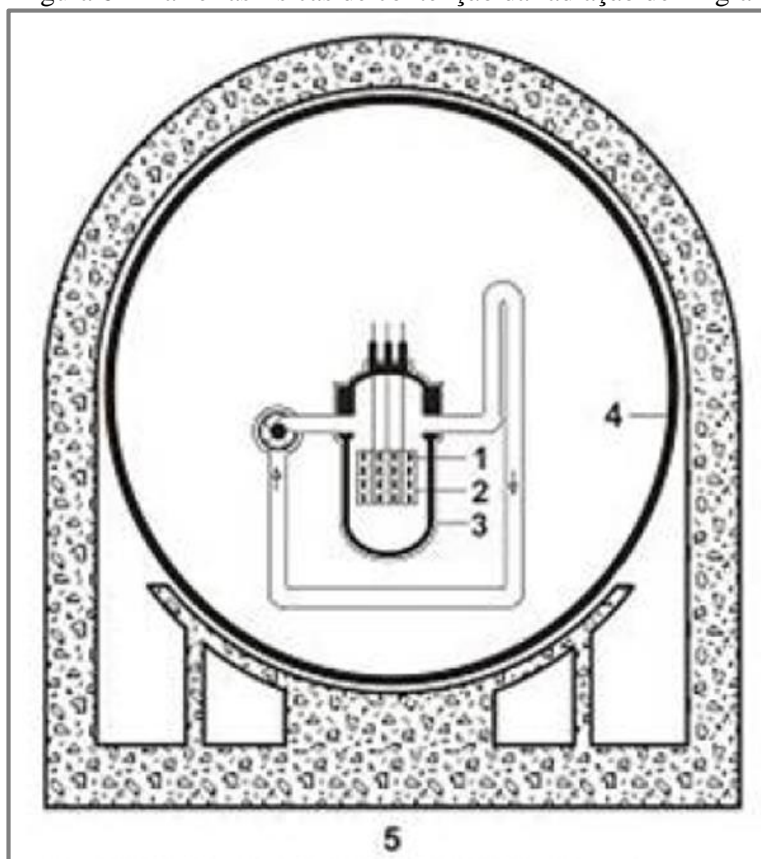
O ciclo de operação, isto é, o tempo em uma usina opera sem interrupção programada para manutenção e recarga pode ser modificado e estendido a partir de novos arranjos entre os Elementos Combustíveis queimados que serão substituídos e os Elementos parcialmente queimados.

2.4.1 Segurança na geração termonuclear

Devido à magnitude dos danos de um acidente nuclear, a segurança é um requisito prioritário no funcionamento de uma instalação nuclear.

Há defesas para garantir a segurança nuclear de projeto, onde são analisados os riscos do empreendimento; barreiras físicas (Figura 6), para conter e minimizar os níveis de radiação e de processo, para assegurar a segurança funcional e organizacionais (ELETRONUCLEAR, 2015).

Figura 6 – Barreiras físicas de contenção da radiação de Angra 2



Fonte: Eletronuclear (1998).

Legenda: 1 - pastilhas cerâmicas de urânio; 2 - varetas de zircaloy;
3 - vaso de pressão; 4 - contenção de aço; 5 - contenção de concreto

O primeiro condicionante para manter a segurança de um reator é o seu desligamento seguro em qualquer situação. Esse desligamento é garantido pelas barras de controle, que mantêm a criticalidade da fissão nuclear no interior do núcleo, absorvendo o excesso da reatividade, controlando a população de nêutrons e regulando a potência do reator. Antes do início da operação de um reator, as barras de controle encontram-se totalmente inseridas pelos tubos-

guia e são gradativamente retiradas a medida que o combustível é consumido (GIADA, 2005), mas quando necessário elas são inseridas completamente parando a reação em cadeia e mantendo o reator em estado subcrítico. Nos reatores PWR, caem todas por gravidade mediante a interrupção da corrente elétrica nas bobinas de atracamento do mecanismo eletromagnético que as sustenta (AGUIAR, 2011), diferentemente dos reatores BWR – como o de Fukushima – onde as barras de controle são instaladas na parte inferior do núcleo do reator sendo necessários mecanismos elétricos para acioná-las.

Uma segunda condição para manter a segurança de uma usina nuclear em operação é a disponibilidade de água em abundância. O volume de água necessário para o resfriamento de uma usina nuclear de 1.000 MW de potência, em circuito aberto, é de aproximadamente $50\text{m}^3/\text{s}$ ($1.580\text{ hm}^3/\text{ano}$), já em circuito fechado, com torre de resfriamento, esse volume cai para $2\text{ m}^3/\text{s}$ ($50\text{ hm}^3/\text{ano}$). O volume de água necessário no circuitos primário e secundário é de, respectivamente, 200 m^3 e 2000 m^3 . Levando em consideração eventuais vazamentos e purgas, a água necessária nos circuitos fechados é da ordem de $100.000\text{ m}^3/\text{ano}$ (VICAUD, 2007).

A água do circuito primário que mantém os Elementos Combustíveis submersos e a remoção do calor do núcleo pelos circuitos secundário e terciário, este último alimentado por uma fonte fria, são condições *sine qua non* para evitar a fusão do núcleo e a integridade das barreiras de contenção em um reator do tipo PWR.

O terceiro condicionante para o funcionamento seguro de uma usina nuclear é a alimentação elétrica. Em caso de interrupção do suprimento de energia elétrica da rede são necessários sistemas auxiliares de suprimento de energia de emergência, como grupos diesel-gerador de partida rápida para garantir a pronta alimentação dos sistemas de proteção e segurança da usina (BONFIETTI, 2003).

Os principais sistemas auxiliares de uma usina nuclear são:

- a) de controle de pressão do refrigerante;
- b) de controle químico e volumétrico do refrigerante;
- c) de purificação do refrigerante;
- d) de tratamento e armazenamento do refrigerante;

- e) de ventilação e controle da qualidade do ar;
- f) de processamento dos rejeitos sólidos,
- g) efluentes líquidos e emissões atmosféricas radioativas;
- h) de manuseio e estocagem dos rejeitos sólidos radioativos;
- i) de água de alimentação de emergência; e
- j) de isolamento da contenção e sistema de purga da contenção (ELETRONUCLEAR, 1998).

Os reatores PWR são projetados para operar com coeficientes negativos de temperatura, tanto do combustível quanto do refrigerante, de modo a prevenir contra aumentos repentinos de potência, que podem ocorrer pela ejeção acidental de uma barra de controle ou uma redução drástica da carga do grupo turbina-gerador, devido a falhas em uma ou várias linhas de transmissão (ELETRONUCLEAR, 1998). O controle automático do reator aceita um limite de mais ou menos 10% para variação instantânea de carga e mais ou menos 15% por minuto para variação de carga em rampa (OLIVEIRA, 2002).

O controle da reatividade de um reator é realizado por meio de materiais absorvedores de nêutrons, que servem para diminuir o excesso de reatividade positiva do núcleo durante a “queima” do combustível. Servem também para regular a distribuição de potência do núcleo e controlar o reator, permitindo seu desligamento e religamento (PERROTTA, 1999b).

2.5 O COMBUSTÍVEL NUCLEAR

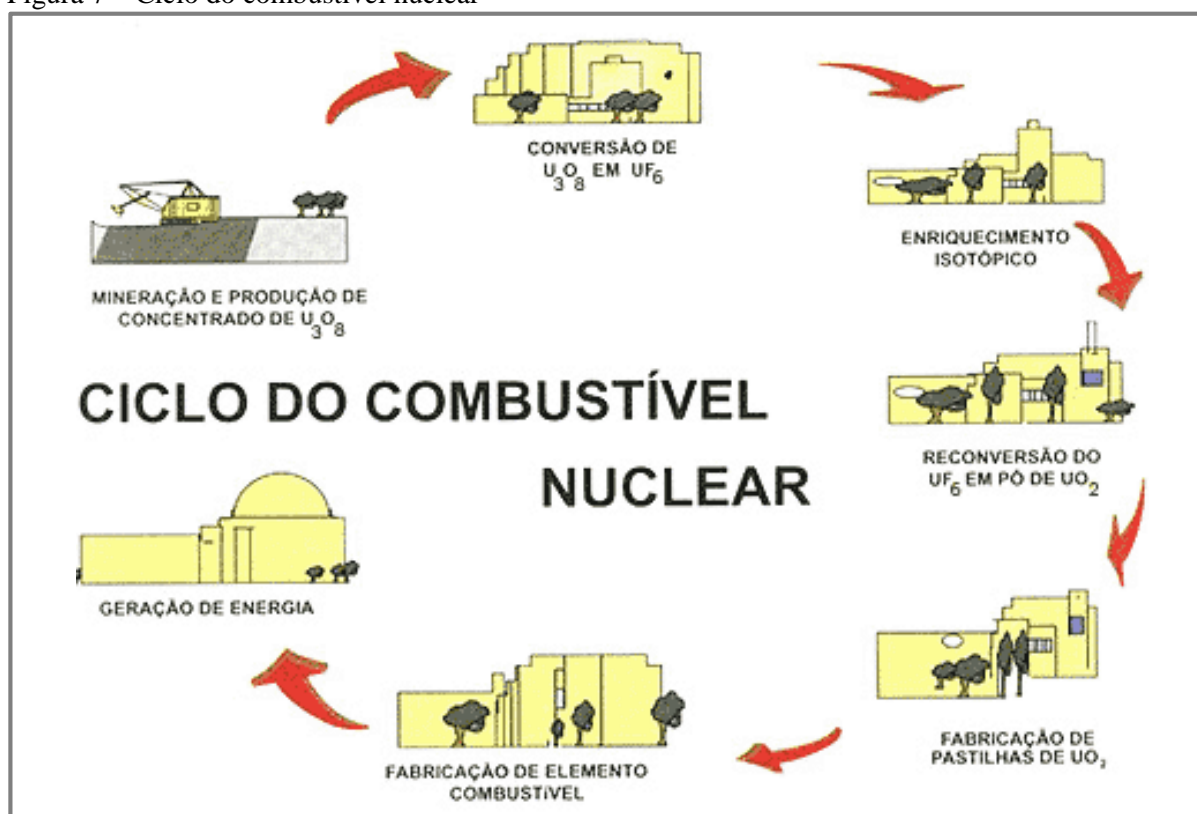
Cada tipo de reator usa um combustível específico constituído de um elemento ou mistura de elementos radioativos como urânio enriquecido, urânio natural, tório, plutônio e urânio natural, MOx (*Mixed Oxydes*), que é uma mistura de óxido de urânio natural ou empobrecido e óxido de plutônio. Nos reatores do tipo PWR de segunda geração o combustível é urânio enriquecido entre 2 e 5%.

Para alimentar reatores PWR, o urânio passa por várias etapas de beneficiamento até transformar-se em combustível nuclear. Esse conjunto de etapas é denominado ciclo do combustível. e resulta, basicamente, em:

- a) extração do minério de urânio;

- b) produção do DUA (Diuranato de Amônio);
- c) purificação do concentrado em UO_3 (trióxido de urânio);
- d) conversão em UF_6 (Hexafluoreto de Urânio), um gás;
- e) enriquecimento do hexafluoreto de urânio;
- f) reconversão em UO_2 (dióxido de urânio);
- g) produção das pastilhas e
- h) montagem do Elemento Combustível (Figura 7).

Figura 7 – Ciclo do combustível nuclear



Fonte: Ambiente Brasil (2016).

No Brasil, assim como o processo de extração do minério de urânio, a produção de diuranato de amônio, também chamado de *yellow cake* é realizada na INB-Caetité (Indústrias Nucleares do Brasil), no sudoeste da Bahia (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2009). O *yellow cake* é acondicionado em tambores, transportado em contêineres até o porto de Salvador e enviado ao Canadá (Cameco), ou aos Estados Unidos (Nukem) para conversão. A conversão consiste em dissolver e purificar o U_3O_8 , para retirar elementos como cádmio e boro (elementos que absorvem nêutrons e que, portanto, interferem na reação em cadeia, transforma-lo em UO_3 e depois convertê-lo em um gás, o UF_6 . Este gás é posteriormente

acondicionado em contêineres sob pressão e levado à Europa para a usina de enriquecimento da Urenco, consórcio de países (Holanda, Reino Unido e Alemanha) para o enriquecimento de urânio pelo processo de ultracentrifugação.

A INB responde pela exploração do urânio, desde a mineração e o beneficiamento primário até a produção e montagem dos elementos combustíveis que acionam os reatores de usinas nucleares. Possui unidades produtoras de minerais radioativos em Caetité-BA, Santa Quitéria-CE, Poços de Caldas-MG e São Francisco de Itabapoana-RJ e uma fábrica de combustíveis nucleares em Resende-RJ.

Atualmente, a única mina de urânio em produção no Brasil, situa-se no município de Caetité, no semiárido baiano. A produção de aproximadamente 400 t/a de concentrado de urânio, atende a demanda das usinas de Angra 1 e Angra 2. Em 2010, foi iniciada a construção da galeria que permitiria a exploração subterrânea do minério. A exploração subterrânea elevaria a produção da Unidade de Caetité de 400t/a para 800t/a de concentrado, suficiente para atender a demanda de Angra 1, Angra 2 e Angra 3. A construção da galeria foi interrompida devido a um desabamento e decidido o rebaixamento em vinte metros da mina Cachoeira explorada a céu aberto. Devido à alta concentração energética do urânio (10,139 tep por tonelada), o urânio contribui significativamente na produção estadual de energia primária da Bahia, mas não na oferta interna, uma vez que é totalmente exportado.

Está prevista a entrada em operação da mina Itataia em Santa Quitéria-CE, onde o urânio está associado ao fosfato. Esse empreendimento, denominado Projeto Santa Quitéria, será realizado em parceria com a empresa privada Galvani (desde 2016 controlada pela empresa norueguesa Yara, que adquiriu 60% da participação da Galvani), que será a responsável pela exploração e comercialização do fosfato associado, entregando o subproduto desse processo (licor de urânio) à INB, responsável pela produção do concentrado de urânio. A produção do concentrado de urânio em Santa Quitéria atenderá à demanda das novas usinas nucleares. O excedente deverá ser exportado.

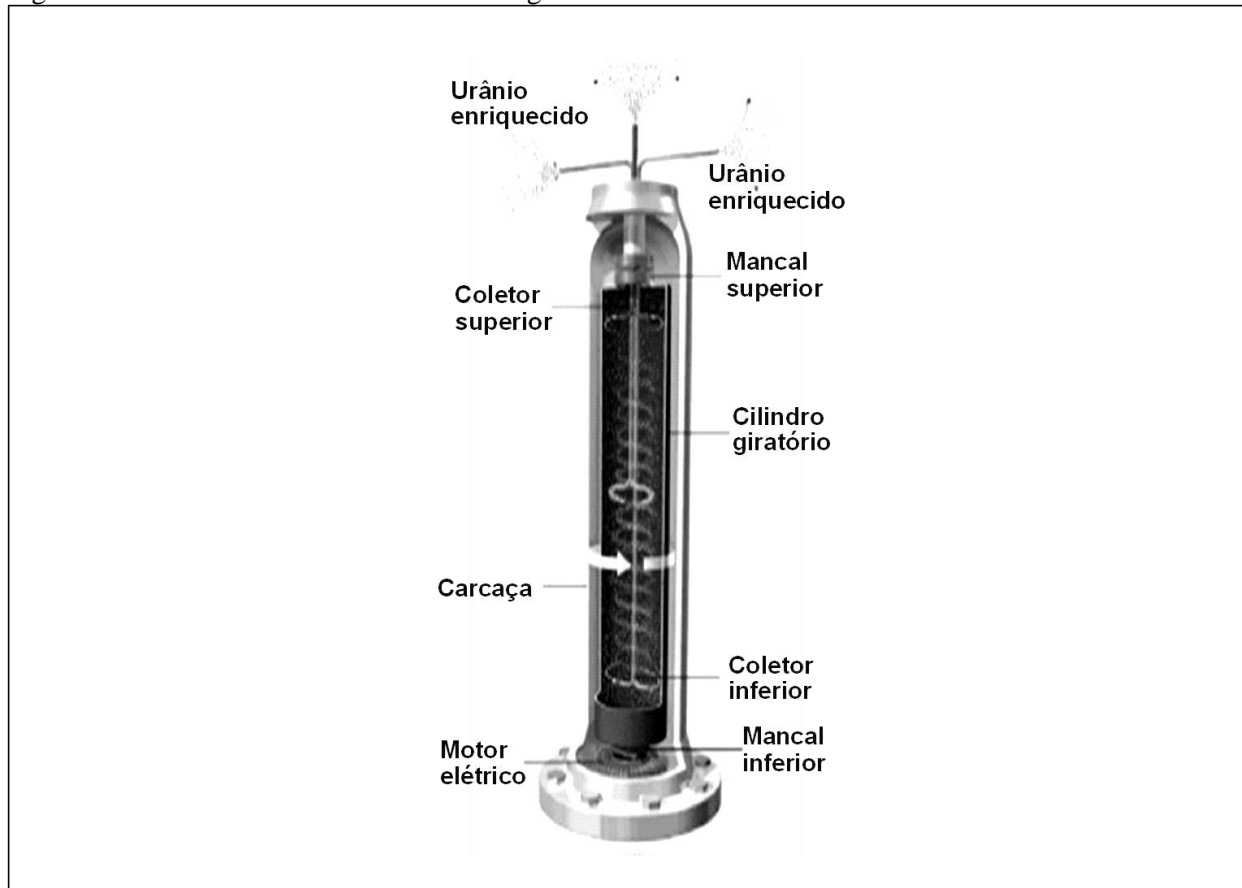
A Bahia produz apenas concentrado de urânio. As demais etapas do ciclo do combustível são realizadas no exterior, nas instalações da INB em Resende, no Rio de Janeiro ou no Centro Experimental Aramar, da Marinha do Brasil, localizada em Iperó, no estado de São Paulo. Não há previsão que outras etapas do ciclo do combustível sejam realizadas no Nordeste. No

que concerne a combustível, o investimento em uma usina termonuclear no Nordeste não implica em vantagens de localização (CABRAL; PEDRÃO, 2014).

O urânio na natureza é composto de uma grande proporção de urânio 238, em relação ao urânio 235, que é o isótopo que mais se adéqua à fissão. Isso acontece porque o urânio-235 é mais instável, ou seja, mais fácil de ser quebrado para gerar energia. A proporção da mistura depende do uso que terá. Usinas nucleares usam uma proporção de 2% a 4% de U-235 e 98% a 96% de U-238. Reatores nucleares para pesquisa usam combustível enriquecido a cerca de 20% de U-235, embora alguns utilizem combustível enriquecido a 90%. Já as bombas atômicas usam combustível U-235 enriquecido acima de 90%. O urânio natural possui somente 0,7% de U-235. Existem várias técnicas de enriquecimento de urânio, como a difusão gasosa, o *jet-nozzle* ou jatocentrífugo, o enriquecimento a laser e a ultracentrifugação.

O Brasil desenvolveu uma tecnologia própria de ultracentrifugação. Nesse processo, são usadas as centrífugas (Figura 8). Rodando a uma velocidade supersônica elas fazem com que o urânio 235 que é mais leve, fique no centro e seja sugado indo para outra centrífuga. Isso é repetido dezenas de milhares de vezes até que o gás seja enriquecido na proporção desejada. A vantagem dessa tecnologia é a de não utilizar apoio mecânico, mas um campo eletromagnético, o que torna as centrífugas mais eficientes e econômicas.

Figura 8 - Modelo brasileiro de ultracentrífuga



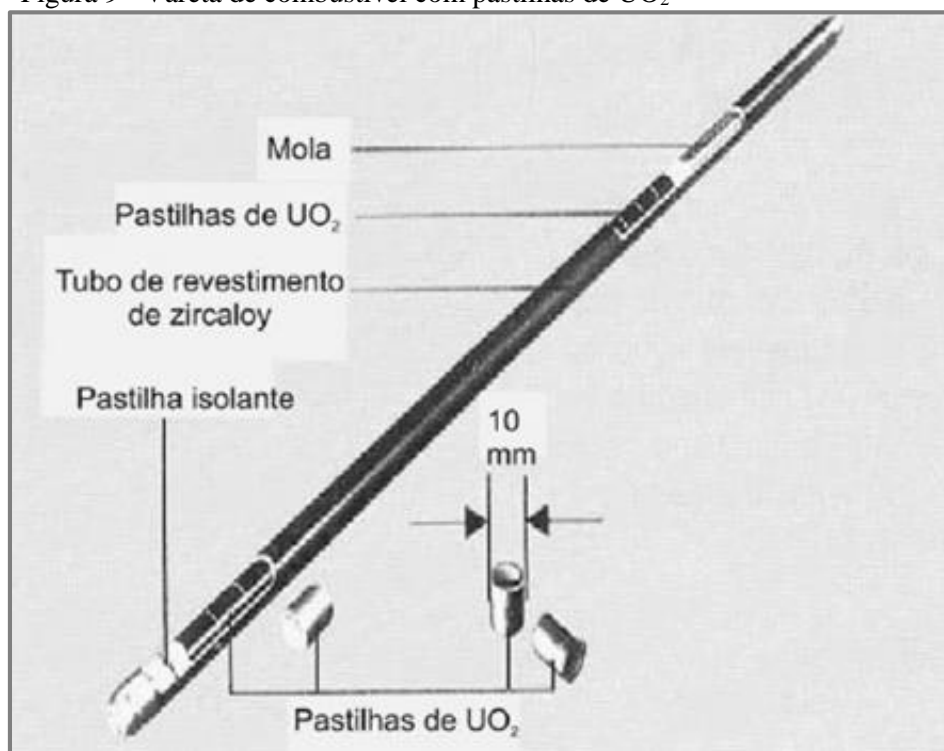
Fonte: Tranjan Filho (2011).

Uma vez enriquecido, o urânio é novamente embarcado para o Brasil, para o porto do Rio de Janeiro, seguindo, posteriormente, por via terrestre até a Fábrica de Combustível Nuclear (FCN), pertencente à INB, localizada em Resende, no Rio de Janeiro. A INB de Resende opera com quatro unidades de produção independentes onde é fabricado e montado o Elemento Combustível. Na FCN-Reconversão o hexafluoreto é reconvertido em pó, o dióxido de urânio (UO_2), e então levado à FCN-Pastilhas onde, através de um longo processo minero-químico-industrial é transformado em pastilhas cerâmicas sinterizadas encaminhadas para a FCN-Componente e Montagem do Elemento Combustível (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2014).

O Elemento Combustível de um reator do tipo PWR como o de Angra 2, é composto pelas pastilhas de dióxido de urânio – resistentes à temperatura de $2.830\text{ }^{\circ}\text{C}$ - montadas em tubos de uma liga metálica especial - o zircaloy (liga de zircônio e zinco) – (Figura 9) formando um conjunto de varetas hermeticamente fechadas e pressurizadas com gás hélio (para evitar deformações durante a operação) (AGUIAR, 2011), que resistem à temperatura de $1.400\text{ }^{\circ}\text{C}$,

cuja estrutura é mantida rígida por reticulados chamados grades espaçadoras (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2014). Juntamente com as varetas, são montados os tubos-guia, onde se movimentam verticalmente as barras de controle e servem para freia-las hidráulicamente durante a queda no núcleo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2000). As barras de controle são distribuídas em conjuntos de varetas presas a uma peça denominada aranha (AGUIAR, 2011).

Figura 9 - Vareta de combustível com pastilhas de UO_2



Fonte: Eletronuclear (2006).

O Elemento Combustível varia em dimensões e número de varetas conforme as especificações do reator, assim como o diâmetro das varetas e das pastilhas de dióxido de urânio (Quadro 3).

Quadro 4 - Comparação dos Elementos Combustíveis de Angra 1 e Angra 2

| Elemento Combustível | Angra 1 | Angra 2 |
|------------------------------|--------------|--------------|
| Quantidade | 121 | 193 |
| Varetas | 28.435 | 45.548 |
| Pastilhas | 10,5 milhões | 17,5 milhões |
| Comprimento | 4,00 m | 5,00 m |
| Peso do urânio | 411 kg | 543 kg |
| Peso do Elemento Combustível | 600 kg | 840 kg |

Fonte: Silva (2009).

O Elemento Combustível de Angra 1 - tecnologia Westinghouse – é composto de 235 varetas combustíveis de 4,0 m, 8 grades espaçadoras, 20 tubos guias, 1 tubo de instrumentação e 2 bocais (um superior e um inferior). O Elemento Combustível de Angra 2 – tecnologia Siemens/Areva possui 236 varetas combustíveis de 5,0 m de comprimento e conta com 9 grades espaçadoras, 20 tubos guias e 2 bocais, Angra 3 terá as mesmas especificações de Angra 2 (TRANJAN FILHO, 2011).

Os materiais utilizados para a fabricação de Elementos Combustíveis são o aço 304L (bocais superior e inferior); o Inconel 718 (grades espaçadoras das extremidades de Angra 1 e Angra 2 grades espaçadoras intermediárias STD (*Standard*) de Angra 1); o Inconel 750 (conjunto de retenção de Angra 2); o HPA (grade espaçadoras de Angra 2); o Zirlo (grade espaçadoras intermediárias NGF de Angra 1, Tubos-guia STD e NGF (*New Generation Fuel*) de Angra 1); o Zircaloy-4 (Varetas combustíveis e tubos-guia); o Al203 (varetas combustíveis de Angra 1 e Angra 2); e o aço inox (varetas combustíveis) (TRANJAN FILHO, 2011).

À exceção do aço 304L, todos os demais materiais são importados. Desde 2010, a Coppe em parceria com o IME (Instituto Militar de Engenharia) e a INB atuam no projeto ZirBrasil no Laboratório de Fusão a Arco, na intenção de desenvolver nacionalmente as superligas, que começaram a ser desenvolvidas em outros países na década de 1950.

Apresentando difícil nacionalização, a fabricação das ligas de zircaloy contendo nióbio é realizada nos Estados Unidos, Grã-Bretanha, Suécia, Itália, Rússia, Índia, França, China e Canadá e constitui um dos gargalos da cadeia de suprimento do ciclo do combustível nuclear. No Brasil, foi desenvolvida a ZirBrasil-1, uma liga experimental de zircônio e nióbio, que se encontra em fase de testes e estuda-se a reciclagem das aparas do material importado para reaproveitamento (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010).

O entendimento do ciclo do combustível esclarece o papel do urânio para geração de energia, uma vez que, diferentemente do gás ou do carvão, não é utilizado *in natura*. Não é a combustão e sim o processo de fissão do núcleo do urânio que libera energia. A fissão nuclear ocorre no reator e são necessários vários outros elementos para que essa reação seja desencadeada de forma controlada para permitir o aproveitamento da energia. Isto modifica a visão simplificadora de que a energia nuclear é economicamente vantajosa para o Brasil em função do país possuir reservas de urânio. As reservas de urânio são uma vantagem

comparativa porém, é necessário o domínio de todo o ciclo do combustível assim como o da tecnologia da engenharia de reatores e de materiais.

O Brasil é um país tradicionalmente exportador de produtos primários, rico em reservas de bens minerais estratégicos para a indústria nuclear (tório, urânio, zircônio, berílio, nióbio, lítio, terras raras, vanádio) e por essa razão foi aceito no círculo dos países que desenvolvem atividades “nucleares”. A exploração de alguns desses recursos data do início da Segunda Guerra Mundial e é grande a pressão internacional para que o país continue nessa condição e privatize as atividades de mineração e beneficiamento de bens minerais sensíveis.

Encontram-se sob monopólio do estado a comercialização de minerais nucleares (urânio e tório) e seus derivados (BRASIL, 1988), mas permitem-se, sob controle da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), as exportações de minerais e minérios de berílio, lítio, zircônio e nióbio (de interesse para a indústria nuclear) (CABRAL, 2012).

A viabilidade econômica da exploração e beneficiamento nacionais do urânio em escala comercial depende do sucesso do plano de expansão termonuclear. Para justificar a construção de uma planta de enriquecimento de urânio com capacidade de 1 milhão de UTS (Unidade de Trabalho de Separação⁵) por ano, com investimentos em capital na ordem de 1 bilhão de dólares, são necessários dez reatores nucleares de 1.000 MW, sem os quais é mais vantajoso adquirir o urânio enriquecido no mercado internacional (GOLDEMBERG, 2008). Apesar de dominar a tecnologia de enriquecimento do urânio desde a década de 1980, até 2015, o país tinha a capacidade de enriquecer apenas 7% da demanda de Angra 1 e 2 (MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2015). Um plano de expansão termonuclear baseado na aquisição de usinas estrangeiras, com aquisição “casada” de combustível, como foi contrato de aquisição de Angra 1, da Westinghouse, poderá comprometer a toda a indústria nuclear brasileira.

⁵ UTS ou SWU (*Separative Work Unit*) é a unidade de medida de energia necessária para enriquecer uma determinada quantidade de urânio a uma dada porcentagem.

Existe uma crescente pressão internacional para coibir países não-nuclearmente armados a enriquecer urânio, “obrigando-os” a adquirir urânio fracamente enriquecido de um banco internacional, de propriedade e controlado pela IAEA (*International Atomic Energy Agency*). A criação desse banco, que foi aprovada pela IAEA e a Rússia em 2010, e será estabelecido no Cazaquistão, oferecerá a preços de mercado urânio fracamente enriquecido para abastecer reatores em países que não consigam adquirir o produto no mercado internacional (EFE, 2015). A iniciativa, que pretende contribuir para a não-proliferação de armas nucleares e assegurar o fornecimento a usinas nucleares irá inibir países como o Brasil a prosseguir com o desenvolvimento da tecnologia nuclear rumo à autonomia, como ocorreu com o Irã.

2.6 OS REJEITOS RADIOATIVOS

A produção de rejeitos radioativos e seu acondicionamento é uma das preocupações que atinge a sociedade civil quando se questiona a construção de uma usina nuclear pois a radioatividade que emana pressupõe um gerenciamento que ultrapassa em centenas ou milhares de anos a vida útil do empreendimento que os produz.

Rejeito radioativo é todo e qualquer material resultante de atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites estabelecidos pelo órgão responsável (no Brasil, a CNEN) pelas atividades nucleares, cuja reutilização é imprópria ou não prevista. (HIROMOTO, 1999).

Os rejeitos são oriundos:

- a) das instalações nucleares, que englobam as instalações de todo o ciclo do combustível, isto é, mineração, beneficiamento, conversão, enriquecimento, reconversão, produção das pastilhas e do elemento combustível, usinas nucleares e armazenamento final; e
- b) das instalações radiativas, que são os outros tipos de instalação como centro de pesquisas, indústrias, universidades, hospitais e clínicas.

Para não causar danos ao homem e ao meio ambiente esses rejeitos precisam ser cuidados através de ações que incluem a coleta, a separação de rejeitos, transporte para área de

tratamento ou destino final, o tratamento de rejeitos, o armazenamento e a deposição final. Essa série de ações é chamada de gerência de rejeitos.

Os rejeitos radioativos são o principal entrave para a adoção da energia nuclear como fonte para a produção de energia elétrica. É comum apresentar a opção nuclear, na matriz energética, como aquela que utiliza proporcionalmente uma menor quantidade de combustível, e comparar a quantidade de rejeitos produzidos numa usina térmica a carvão com a quantidade de combustível irradiado de uma usina térmica nuclear (Quadro 5).

Quadro 5 – Consumo de combustível e resíduos produzidos para produção de 1 MW em um ano

| Tipo de Térmica | Consumo de combustível para produção de 1 MW/ano | Resíduos produzidos |
|-----------------|--|--|
| Carvão | 2.500.000 kg | 5.000.000 kg de CO ₂ , SO ₂ , cinzas e metais pesados liberados para atmosfera |
| Óleo | 1.500.000 kg | 4.800.000 kg de CO ₂ , SO ₂ e outros |
| Gás Natural | 700.000 kg | 2.400.000 kg de CO ₂ |
| Urânio | 25 kg de urânio enriquecido | 23 kg de resíduos (apenas kg de resíduo de alta atividade) |

Fonte: Brasil Nuclear (2007).

Ao apontar apenas os rejeitos de alta radiatividade, dá-se a falsa impressão que o problema de destinação dos rejeitos de uma usina nuclear seja menor que o de uma usina térmica a carvão. No entanto, os rejeitos radioativos se distinguem de outros tipos de rejeitos industriais pela radioatividade, que se propaga contaminando outros objetos ou mesmo pessoas. Essa característica faz com que o armazenamento desses rejeitos precise de condições especiais para o total isolamento dos radionuclídeos, por um tempo de até setecentos milhões de anos, que é o tempo de decaimento do U-235.

Os rejeitos são classificados⁶ segundo o seu teor de radioatividade, em:

- a) baixa radioatividade ou LLW (*Low Level Waste*);
- b) média radioatividade ou ILW (*Intermediate Level Waste*); e
- c) alta radioatividade, HLW (*High Level Waste*) (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA, 1985).

⁶ Refere-se à classificação e destinação de rejeitos produzidos na Central Almirante Álvaro Alberto (CNAAA).

a) Os rejeitos de baixa radioatividade são materiais utilizados na operação das usinas, como luvas, sapatilhas, roupas especiais, equipamentos e até fitas-crepe. Eles são coletados, separados e descontaminados, de sorte a diminuir seus níveis de radioatividade. Em seguida são compactados e acondicionados em recipientes que isolam a radiação, como tambores, e após o tempo de decaimento são descartados.

b) São considerados rejeitos de média radioatividade, compostos de filtros, utilizados para reter partículas radioativas, efluentes líquidos solidificados e resinas exauridas, usadas na remoção e purificação da água contaminada. Os rejeitos de média radioatividade são acondicionados em uma matriz sólida de cimento e mantidos dentro de recipientes de aço apropriados, sendo monitorados até perderem a radiatividade, quando podem ser descartados.

c) Os rejeitos de alta radioatividade são os elementos combustíveis usados no reator. No Brasil, os rejeitos de alta radioatividade produzidos em Angra 1 e Angra 2 são estocados em piscinas dentro das instalações da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, em Angra dos Reis, Rio de Janeiro. As piscinas foram projetadas em função da vida útil das usinas, isto é, 40 anos. As piscinas têm como função resfriar os elementos combustíveis retirando o calor residual para serem reprocessados e armazenados definitivamente.

Os rejeitos radioativos devem ser acondicionados em depósitos, de maneira a evitar a contaminação radioativa, característica particular das atividades nucleares. Esses depósitos seguem um padrão em todo o mundo. No Brasil, eles são regulamentados pela Lei n. 10.308 de 20 de novembro de 2001 (BRASIL, 2001).

Existem três tipos de depósitos de rejeitos para rejeitos radioativos:

- a) depósito inicial, cujo responsável é o operador;
- b) depósito intermediário, cujo responsável no Brasil é a CNEN; e
- c) depósito final, cujo responsável também é a CNEN (BRASIL, 2001).

Os depósitos iniciais para rejeitos radioativos podem ser:

- a) secos, em *casks* de concreto ou aço armazenados a céu aberto ou abrigados em estruturas apropriadas; ou

b) úmidos, em piscinas abrigadas em estruturas apropriadas. (SANTOS, 2008).

Na CNAEA os rejeitos nucleares de baixa e média radioatividade são armazenados em *casks* e os rejeitos de alta radioatividade são armazenados em piscinas, no interior das usinas nucleares.

A falta de um depósito definitivo de rejeitos foi um dos obstáculos ao licenciamento para a construção de Angra 3 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2002). As obras foram paralisadas por mais de vinte anos e retomadas em 2010.

Um depósito definitivo dos rejeitos de alta radioatividade é sem dúvida fundamental, porém, o prolongamento da utilização das piscinas como depósito intermediário tem fundamentos que não são comumente discutidos. Enquanto forem armazenados nas piscinas – depósito intermediário – os rejeitos não podem ser rotulados como lixo atômico, quando não seriam mais reutilizados. Ora, é mister o avanço tecnológico mundial no que se refere ao reprocessamento de material de alta radioatividade. Atualmente, trata-se de uma tecnologia cara que apenas seis países no mundo dispõem (Rússia, Japão, Bélgica, Reino Unido, França e Estados Unidos com destaque para a França e Rússia, embora o combustível reciclado (MOx) seja mais radioativo do que o próprio combustível queimado).

A Argentina tem estudos que propõem a compra do material irradiado brasileiro para abastecer suas usinas, cuja tecnologia dispensa o uso de urânio enriquecido⁷. Esta decisão poderia solucionar o problema da falta de depósitos definitivos em solo brasileiro e ainda ser uma fonte de recursos para o país.

O gerenciamento dos rejeitos radioativos é um ponto que exige extrema atenção na opção nuclear. Ao ser construída, uma usina nuclear é projetada para funcionar um determinado número de anos, atualmente em torno de sessenta anos, mas Angra 1 e 2, por volta de quarenta anos. A vida útil da usina, por sua vez, irá determinar a quantidade de combustível (e de elementos combustíveis) necessária para o funcionamento da usina nesse período, para o qual os depósitos são dimensionados (em especial as piscinas, localizadas no interior das

⁷ O Ciclo Tandem consiste na reutilização do combustível irradiado de reatores do tipo PWR em reatores do tipo CANDU, que ainda contém 1,5% de material físsil (MAI, 1997).

usinas) (Quadro 6). O prolongamento da vida útil de uma usina posterga, sem dúvidas, o problema do descomissionamento, mas cria outro, que é o redimensionamento dos depósitos de combustível queimado altamente radioativos.

Quadro 6 - Gerenciamento de combustíveis irradiados na CNAEA

| Dados | Angra 1 | Angra 2 | Angra 3 |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Início das operações | 1985 | 2000 | 2014 |
| Vida útil projetada (anos) | 60 | 60 | 60 |
| Número de ECs ⁸ no reator | 121 | 193 | 193 |
| Capacidade da Piscina do reator (nº de ECs) | 1252 | 1084 | 1084 |
| Total de combustível irradiado durante a vida útil das plantas (valor estimado em unidades) | 8000 | | |

Fonte: Eletronuclear (2006).

No Brasil a capacidade de armazenamento das piscinas de combustível irradiado já foi aumentada, com a introdução de racks supercompactos desenvolvidos pela Nuclep (Nuclebrás Equipamentos Pesados). A blindagem com chapas de aço borado inibe a reatividade dos Elementos Combustíveis armazenados, permitindo uma maior aproximação entre eles (RIBEIRO, 2002).

Mas não existe só o problema do depósito definitivo dos rejeitos de alta produtividade, mas também os depósitos de rejeitos de baixa e média radioatividade, sobretudo rejeitos de grande porte. Até esse momento a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto não havia produzido rejeitos de grande porte. Isto ocorreu entre março e maio de 2009, quando foram trocados os dois geradores de vapor de Angra 1. Esses geradores encontram-se dentro da área de contenção da usina nuclear e por eles circula a água que tem contato com o reator, logo água radioativa. Cada um dos dois geradores que foram trocados tem 4,5 metros de diâmetro e 20,6 metros de comprimento e pesam (vazios) trezentas e trinta toneladas cada. Esses rejeitos de grande porte foram armazenados no Depósito Inicial dos Geradores de Vapor numa área que fica a 800 metros da usina denominada Ponta Fina e, segundo o diretor da Aben (Associação Brasileira de Energia Nuclear), o prazo para que eles possam ser descartados no meio ambiente é de sessenta a cem anos. Em 2013 foi substituída a tampa do reator de Angra 1, que foi armazenada nesse depósito (ELETRONUCLEAR, 2013a).

⁸ Elementos Combustíveis.

Os depósitos dentro da área da central nuclear constituem uma solução, na medida em que mitigam a propagação da radiação caso os rejeitos fossem transportados a uma maior distância. Mas, por outro lado, comprometem os prazos de descomissionamento considerados para a central nuclear. Supõe-se que a vida útil de Angra 1 é de quarenta anos, isto é, até 2022, e que a troca de equipamentos prolongaria a vida útil em mais vinte anos. O reator de Angra 1 seria então desligado em 2042, quando daria início o descomissionamento da usina. O depósito encontra-se na área da central e os equipamentos trocados levam pelo menos sessenta anos para que possam ser descartados no meio ambiente, sendo relevante determinar o prazo de descontaminação.

Embora a rejeição para a produção de energia elétrica de origem nuclear ainda seja grande no Brasil, as maiores implicações que o país teve com contaminação radiológica foram no acidente com a cápsula de césio em Goiânia, em setembro de 1987. A cápsula, medindo apenas três centímetros de comprimento causou quatro mortes e dezesseis outras lesões corporais, mas o que impressiona é a quantidade de lixo radioativo gerado durante o processo de descontaminação. Foram três mil e quinhentos metros cúbicos de lixo radioativo, que foram acondicionados em tonéis de aço e posteriormente concretados no único depósito definitivo do país, em Abadia, Goiânia (WASCHECK; FERREIRA; ALENCAR, 2007).

2.7 O DESCOMISSIONAMENTO

A última etapa a ser planejada visando a implantação de uma usina nuclear é seu descomissionamento.

No que se refere a instalações nucleares ou radiativas, descomissionar significa, segundo a AIEA (Agência Internacional de Energia Atômica), tomar todas as providências necessárias para a desativação de uma instalação nuclear ao final de sua vida útil, observando-se todos os cuidados para proteger a saúde e a segurança dos trabalhadores e das pessoas em geral e, ao mesmo tempo o meio ambiente. Estas medidas visam reduzir a radiatividade residual do local a níveis que permitam seu uso restrito ou irrestrito.

No Brasil o descomissionamento de usinas nucleoeletricas é regulado pela norma 9.01 e pela resolução 133/12 da CNEN, que estabelece três estratégias para descomissionar usinas nucleares. A primeira, DECON (*Decontamination*), consiste no desmantelamento imediato,

pela qual são removidos imediatamente ou descontaminados equipamentos, estruturas e plantas do sítio. Esse processo dura aproximadamente 10 anos. Pela segunda, SAFSTOR (*Safe Storage*), a instalação é mantida segura e monitorada e seu desmantelamento é protelado até que o nível de radiação decaia a doses reduzidas, permitindo o desmantelamento seguro. Este processo dura em média sessenta anos. A DECON também pode ser realizada após a SAFSTOR, isto é, passados sessenta anos. Pela terceira, ENTOMB (*Entombed*), sistemas, equipamentos e estruturas são encapsulados por uma estrutura de vida longa e “sepultados e o acesso ao sítio é restrito, como ocorreu com Chernobyl-4. Esse processo pode durar mais de cem anos (CARAJILESCOV, 2014; COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2012). O responsável pelo descomissionamento de uma instalação é o proprietário ou o operador da instalação.

A IAEA classifica em onze as etapas para completar o descomissionamento, o que permite o controle das usinas ao longo do processo, que pode levar mais de cem anos. A primeira etapa consiste na elaboração de um plano de descomissionamento final; na segunda opera-se a retirada do combustível do reator; na terceira e quarta os rejeitos radioativos são acondicionados e mantidos no sítio ou acondicionados e estocados fora do sítio. Nessas duas fases são considerados descomissionados apenas os rejeitos; a quinta etapa resulta na preparação do confinamento seguro; na sexta é realizado o desmantelamento parcial; a sétima e oitava são o início e o fim do período monitoramento seguro; a nona é o desmantelamento final; na décima é realizado o Relatório Final do Descomissionamento e a décima primeira é quando o descomissionamento é considerado finalizado pela agência reguladora (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015).

A única instalação nuclear descomissionada no Brasil foi a Usam (Usina Santo Amaro) inicialmente pertencente à Orquima, depois à Nuclemon (Nuclebrás Pesquisa de Tório e Areias Monazíticas S/A) e à INB. A mina de urânio em Poços de Caldas-MG encontra-se em fase de descomissionamento. A Usam funcionava no Bairro do Brooklin, em São Paulo e sua desativação foi decidida em 1994. Segundo a INB o descomissionamento da Usam foi um sucesso e a INB obteve da CNEN um documento declarando o terreno liberado para uso irrestrito. (LIMA, 2008). Para o Ministério Público Estadual de São Paulo o processo de descontaminação não foi efetivo e foram encontrados no local, em 2003, níveis anormais de radiações ionizantes. Alegou-se que a INB optara por realizar um aterro ao invés de retirar até

dois metros de solo, como recomendam os especialistas do setor nuclear (LIMA et al., 2008). Atualmente, construções residenciais ocupam a área.

O descomissionamento de uma usina nuclear pressupõe a existência de uma destinação definitiva dos rejeitos produzidos por essa usina e, caso essa destinação seja no entorno da usina, o gerenciamento desses rejeitos por prazo que pode ultrapassar centenas de anos. No momento, a tendência mundial é de prorrogar a vida das centrais nucleares ao invés de descomissioná-las. A troca dos geradores de Angra 1 e a troca da tampa do reator, por exemplo, prolongou a vida útil de Angra 1 em mais vinte anos, adiando também o problema do descomissionamento.

2.8 O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

O sistema elétrico brasileiro surgiu da articulação de uma progressão de grandes empreendimentos hidrelétricos que foram realizados desde a década de 1950, com um determinado desempenho tecnológico e perfil territorial. Ao esgotarem-se as oportunidades para novas barragens, esse sistema não pode continuar crescendo sobre as mesmas bases, justificando que se considerem transições de energia.

O sistema de energia elétrica é composto classicamente por três subsistemas principais:

- a) o subsistema de geração, que é constituído por unidades de produção com diferentes capacidades e tecnologias para gerar energia, de diversas fontes, como carvão, hidráulica, gás natural, nuclear, eólica, biomassa e outras. No Brasil, as principais unidades de produção são
- b) hidrelétricas e termoeletricas;
- c) o subsistema de transporte, composto das linhas de transmissão e suas subestações, com capacidades de intercâmbio de energia conforme as características das unidades de produção e dos centros de consumo; e
- d) o subsistema do consumo, com as instalações de distribuição nos centros de carga (GONÇALVES JÚNIOR, 2007).

Esses três subsistemas são interdependentes e interagem simultaneamente, necessitando, portanto de uma coordenação de todas as operações do sistema elétrico para definir o

despacho das unidades de geração em função das necessidades dos centros de consumo, para manter o equilíbrio elétrico do sistema. No Brasil, cabe ao ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) o desempenho dessa função (GONÇALVES JÚNIOR, 2007).

O sistema elétrico brasileiro combina um sistema interligado, denominado SIN (Sistema Interligado Nacional) e que abrange as instalações das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, e sistemas isolados localizados principalmente no Norte, com circuitos radiais de curta distância. Importa energia da Venezuela, através da interligação Santa Helena-Boa Vista e intercambia energia elétrica com Argentina, Paraguai e Uruguai (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2016). Em março de 2016, a capacidade instalada totalizava 142.109.037kW, correspondente a 4.477 empreendimentos em operação, sendo 347 de fonte eólica, 37 de fonte fotovoltaica, 1.212 de fonte hidrelétrica e 2.879 de fonte termelétrica, dentre os quais, dois empreendimentos termonucleares (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).

As hidrelétricas estão distribuídas em doze grandes bacias hidrográficas, nas regiões hidrográficas correspondentes⁹, podendo ser hidrelétricas com reservatórios de acumulação, isto é, dotadas de reservatórios com capacidade de armazenamento de água plurianual ou hidrelétricas a fio d'água, que operam com o regime de vazão estabelecido pelo rio, muitas com capacidade de regularização diária ou semanal.

As hidrelétricas de acumulação foram projetadas de maneira que seus reservatórios acumulem água nos períodos chuvosos para utilização nos períodos de estiagem para garantir a geração durante todo o ciclo das águas (GONÇALVES JÚNIOR, 2007). Sua principal função, no entanto, é a de regularizar a vazão do rio e da bacia, condicionando a afluência e a geração de outras usinas a jusante. Os primeiros grandes reservatórios de regularização a serem construídos foram Três Marias, na Bacia do São Francisco, em 1962; Furnas, na Bacia do Grande, em 1963; Ilha Solteira, no rio Paraná, em 1973 e Sobradinho, no rio São Francisco, em 1979 (JUNQUEIRA; CHAN, 2013).

As hidrelétricas a fio d'água podem possuir ou não reservatórios porém, sua afluência é determinada por reservatórios de acumulação a montante. A hidrelétrica de Itaipu, localizada

⁹Amazônica; do Tocantins-Araguaia; Atlântico Nordeste Ocidental; do Parnaíba; Atlântico Nordeste Oriental; do São Francisco; Atlântico Leste; do Paraguai; do Paraná; do Sudeste; do Uruguai; e Atlântico Sul.

no Paraná, apesar das dimensões do seu lago (1.350 km²) e da barragem (196 m de altura e 7.919 m de extensão) é uma usina a fio d'água, cuja afluência é controlada por um conjunto de reservatórios localizados nos rios Grande, Paranapanema, Parnaíba, Tietê e Paraná. O mesmo ocorre com a hidrelétrica a fio d'água de Xingó, na bacia do São Francisco cuja afluência é controlada pela defluência de Luiz Gonzaga (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2014).

Um terceiro tipo de usina, pouco utilizada no Brasil, são as usinas reversíveis ou elevatórias, cuja função é bombear a água de um reservatório a jusante para outro a montante e gerar energia (SOARES JÚNIOR, 2013). A Usina Elevatória de Pedreira, no estado de São Paulo, foi a primeira usina reversível do mundo a entrar em operação comercial. Inaugurada em 1939, permite que as águas do Rio Pinheiros passem para o Reservatório Billings, elevando o nível da água do reservatório em até 25 metros (EMPRESA METROPOLITANA DE ÁGUAS E ENERGIA, 2014). Desde 1992, no entanto, o bombeamento é acionado apenas para prevenir enchentes em decorrência do aumento do nível das águas dos rios Pinheiros e Tietê, devido à degradação da qualidade da água do rio Tietê, cujo reuso afeta a qualidade da água do reservatório para abastecimento público.

As usinas reversíveis ou elevatórias poderiam cumprir um papel preponderante na geração de energia elétrica no Nordeste se associadas a empreendimentos eólicos, de modo a aproveitar a energia eólica em períodos de baixo consumo para bombear água para o reservatório a montante da usina e reutiliza-la para gerar energia em períodos de pico de consumo, compensando assim a capacidade de acumulação do reservatório, no entanto, sua eficiência é proporcional ao desnível entre os reservatórios e, segundo um pré-inventário da Eletrobrás em 1979, para o Nordeste o potencial seria de 5.000 MW, muito inferior aquele de Minas Gerais (24.000 MW) e do Rio de Janeiro (260.000 MW) (ZUCULIN; PINTO; BARBOSA, 201-?).

Em um país de dimensões continentais como o Brasil, o regime das chuvas varia entre as regiões, de acordo com os períodos secos e úmidos de cada bacia (PESSOA FILHO, 2013). Condicionado pela regularização das vazões, o SIN é servido por uma extensa rede de linhas de transmissão, que liga as fontes de geração aos centros de carga e interliga os subsistemas regionais, que servem às regiões eletro-geográficas (Figura 17). Esta interligação regional permite aproveitar as diferenças sazonais de consumo e de geração a partir de compensações,

eletricidade, mas apesar da importância das transferências inter-regionais, estas estão condicionadas aos limites da capacidade de transporte, sujeita a riscos de falhas nas linhas de transmissão e perdas de energia e a mudanças climáticas, que podem modificar a sazonalidade das precipitações e a uma variação na demanda de carga em função da temperatura ocasionando um congestionamento no sistema de transmissão.

O despacho de usinas é determinado pelo Planejamento da Operação do SIN realizado pelo ONS, entidade de natureza privada, mas subordinada ao MME (Ministério de Minas e Energia), que define os procedimentos e operações voltados para a otimização dos despachos, conforme as Diretrizes para a Operação do SIN. Por esse planejamento, define-se a cada instante a geração de cada usina de modo a atender a demanda por eletricidade ao menor custo de produção, ao mesmo tempo assegurando o nível dos reservatórios para garantir o suprimento de energia elétrica, no curto, médio e longo prazo.

As usinas não tem autonomia para decidir sua operação e o risco dessa operação centralizada é compartilhado entre as usinas hidrelétricas implicadas por meio de um mecanismo financeiro, o MRE (Mecanismo de Realocação de Energia). Esse mecanismo permite o ONS realizar o despacho em função da otimização do SIN, o que não necessariamente corresponde à otimização da usina (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

A otimização do sistema elétrico é realizada em três níveis: no médio prazo, com horizonte de cinco anos e atualização mensal; no curto prazo, com horizonte de um a seis meses e atualização semanal; e no programa diário, com horizonte de uma semana e atualização segundo patamar de carga (CHIPP, 2010).

A dimensão continental e a complexidade do sistema elétrico brasileiro fazem com que as decisões relativas ao despacho tenham consequências espaciais e temporais acumulativas. As principais dificuldades para o planejamento operacional do sistema resultam, basicamente, da incerteza sobre as vazões afluentes futuras e a demanda de energia. Outros fatores, externos ao sistema elétrico, como o aumento do consumo de água para abastecimento ou irrigação ou controle das cheias, contribuem com os riscos de ineficiência.

O Planejamento da Operação do SIN apoia-se nos relatórios do PEL (Planejamento de Operação Elétrica), que realiza o diagnóstico de desempenho do SIN, utilizando a capacidade

instalada existente, tanto de geração quanto de transmissão e leva em conta a previsão de carga e a entrada de novos recursos de geração e transmissão no período de um ano e do PEN (Plano da Operação Energética), que avalia as condições de atendimento ao consumo de energia elétrica, no horizonte de cinco anos, com base nos critérios estipulados pelo CNPE (Conselho Nacional de Política Energética). Elaborado anualmente, o PEN é sujeito a revisões, quando necessário (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2015).

É importante salientar que o planejamento da energia elétrica no Brasil segue as diretrizes indicadas pelos estudos da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), dentre os quais Estudos de inventário e viabilidade para expansão da geração hidrelétrica; estudos de expansão de transmissão de energia elétrica e estudos para o planejamento do setor energético, dentre os quais o PDE (Plano Decenal de Energia), o PNE (Plano Nacional de Energia), o PET (Programa de Expansão de Transmissão), Revisões quadrimestrais da demanda de energia elétrica e resenhas mensais de acompanhamento do mercado de energia elétrica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2015c).

Esses estudos indicam as opções de política energética do governo brasileiro, que não só obedecem às recomendações técnicas. Isso explica, por exemplo, a preferência por reforçar as linhas de transmissão aumentando a capacidade das transferências inter-regionais Norte para o Sudeste/Centro-Oeste, isolando o Nordeste, ao invés de investir em empreendimentos de geração de modo a aumentar a autonomia dos subsistemas e diminuir as perdas, que no subsistema Nordeste representaram 18,3% em 2014 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2015a).

A escolha por hidrelétricas a fio d'água, devido a dificuldades na obtenção de licenças ambientais para projetos de hidrelétrica com reservatórios, tem concorrido para reduzir a capacidade de regularização do sistema elétrico, tornando-o mais vulnerável à incerteza hidrológica. As alternativas renováveis como eólica, solar ou biomassa, apesar de contribuírem na redução de impactos ambientais frente a termelétricas a combustíveis fósseis, têm a geração limitada pela afluência dos ventos, incidência solar e entressafra não assegurando, portanto, confiabilidade ao sistema elétrico, com energia de base.

2.8.1 A Região Eletro-Geográfica Nordeste

O subsistema Nordeste do SIN serve a toda região Nordeste à exceção do estado do Maranhão, que é servido pelo subsistema Norte. É atendido por um conjunto de usinas hidrelétricas situadas principalmente no Rio São Francisco, mas também em outras bacias; por usinas térmicas, eólicas e fotovoltaicas distribuídas na região e pela energia importada de outras regiões eletro-geográficas através das linhas de transmissão (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2014a).

A capacidade instalada da Região eletro-geográfica Nordeste para a geração de energia elétrica é predominante de fonte hídrica, que corresponde a quase 50% da capacidade instalada total do parque de geração de energia elétrica (Tabela 1).

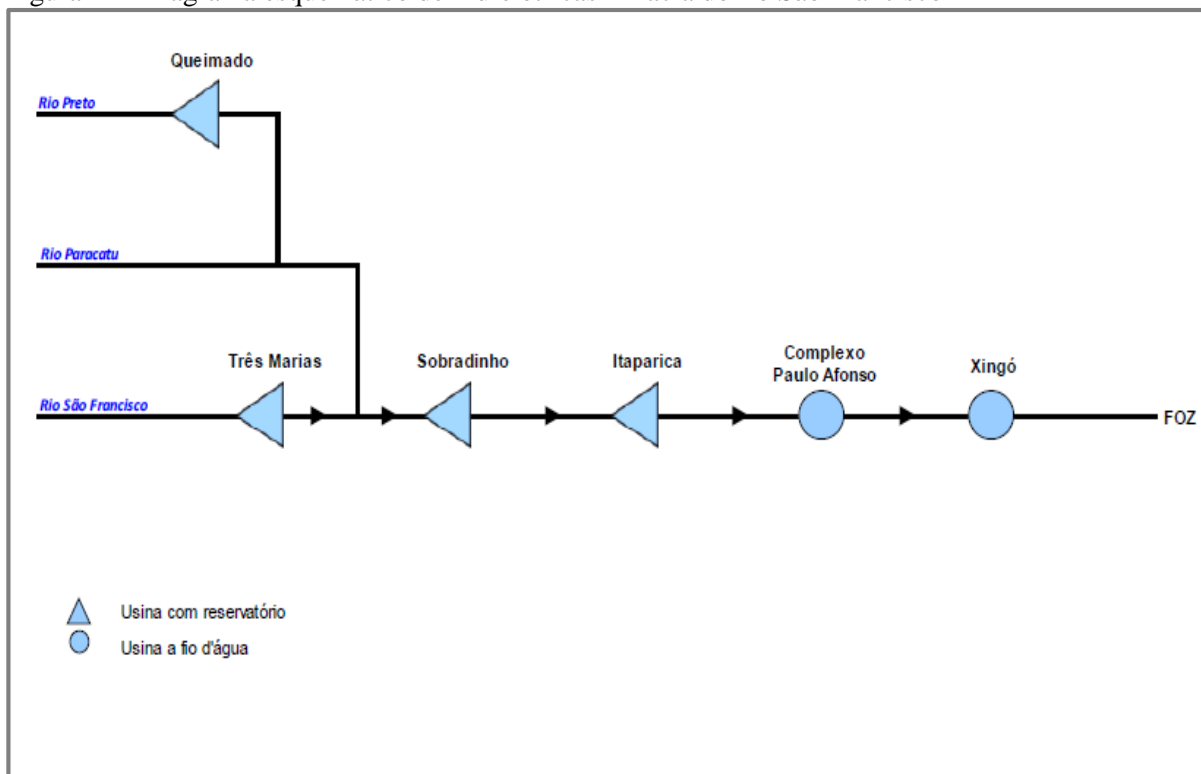
Tabela 1 – Capacidade instalada do Subsistema Nordeste em 31/12/2014

| Fonte | Quantidade de usinas | Capacidade por fonte (kW) | % |
|----------|----------------------|---------------------------|-------|
| Biomassa | 62 | 1.286.391 | 5,75 |
| Eólica | 179 | 3.903.875 | 17,46 |
| Fóssil | 165 | 6.153.995 | 27,52 |
| Hídrica | 59 | 11.007.767 | 49,23 |
| Solar | 87 | 6.700 | 0,03 |

Fonte: Aneel (2015).

A principal característica da Região eletro-geográfica Nordeste é a concentração da produção hidrelétrica em pequeno trecho do rio São Francisco, que vai de Sobradinho a Xingó. Localizadas entre o Sub-Médio e o Baixo São Francisco, as usinas hidrelétricas de Sobradinho, Luiz Gonzaga (antiga Itaparica), Apolônio Sales (antiga Moxotó), Paulo Afonso I, II, III e IV, Piloto e Xingó têm juntas potência associada de 6.811.501 kW sendo a potência instalada de Xingó de 3.162.000 kW (Figura 18) (CHESF, 2014).

Figura 11– Diagrama esquemático de hidrelétricas – Bacia do rio São Francisco



Fonte: Agência Nacional de Águas (2016).

Situado em grande parte na região do semiárido o subsistema São Francisco sofre com a variabilidade pluviométrica e os limites de defluência em consideração ao controle das cheias. O potencial inventariado ainda não explorado na bacia é insuficiente para o atendimento da demanda de eletricidade do subsistema, com taxas médias de crescimento de consumo estimadas em 4,4%, segundo a 2ª Revisão Quadrimestral da EPE/ONS (EPE, 2014), sem contar com o crescimento de múltiplos usos da bacia, em especial os usos consuntivos como irrigação e abastecimento urbano, que diminuem a disponibilidade de água para geração de energia (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2005; CARVALHO; GODIM FILHO; SUGAI, 2004) e sem mencionar a transposição do rio, em andamento.

A capacidade máxima de armazenamento da Região NE é de 51.860 MWmed/mês, o que corresponde a 20% da capacidade de armazenamento do SIN. Três Marias, Sobradinho e Luiz Gonzaga são os principais reservatórios de acumulação do rio São Francisco e juntos representam 97% do armazenamento da Região NE (CISNEIROS, 2015).

3 A GERAÇÃO NUCLEOELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO

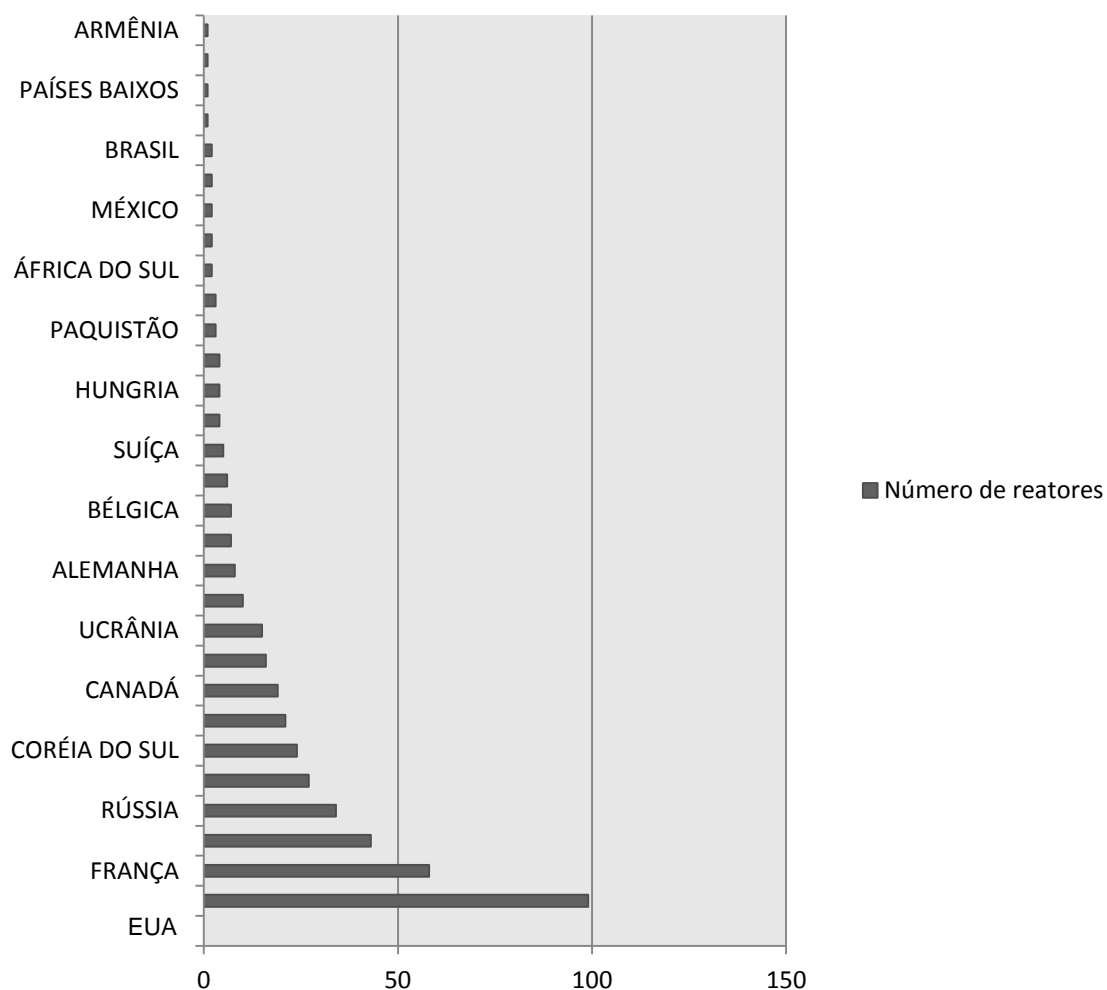
O aproveitamento da energia nuclear para produção de energia elétrica, no mundo iniciou-se na década de 1950. Certos países, como a França, adotaram a energia nuclear como principal fonte para gerar eletricidade. Outros incluíram usinas nucleares para complementar a produção de energia elétrica, mas com forte dependência como o Japão. No Brasil, depois de tentativas fracassadas em diversos governos desde o de Juscelino Kubitschek, em 1982, entrou em operação comercial Angra I, a primeira usina nuclear brasileira.

A nuclearização do mercado energético foi muito rápida. Em 1973, a energia nuclear correspondia a 1% da energia elétrica mundial produzida. Entre 1974 e 1986, a taxa de média anual de consumo de eletricidade cresceu 3,8% enquanto a participação da energia nuclear na produção subiu para 16%, mantendo-se estável em torno dessa cifra até 2006 (PEREIRA, 1990).

Em 2014, a participação da energia nuclear no cenário mundial de eletricidade foi de 11,1% (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015). No Brasil, a geração de energia elétrica de origem termonuclear foi de 14,7 TWh, que corresponde a 2,7% da geração de energia elétrica total, no mesmo período (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2015).

Em agosto de 2015 encontravam-se em operação 431 reatores no mundo, distribuídos em 30 países (Figura 12) com capacidade instalada total de 372.954 MW (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015). Estados Unidos, que gera, aproximadamente, 30% da energia nuclear no mundo e França possuem os maiores parques nucleoeletricos com 99 e 58 reatores em operação, respectivamente. Os 43 reatores em operação do terceiro parque nucleoeletrico mundial, no Japão, encontram-se temporariamente desligados em consequência ao acidente de Fukushima.

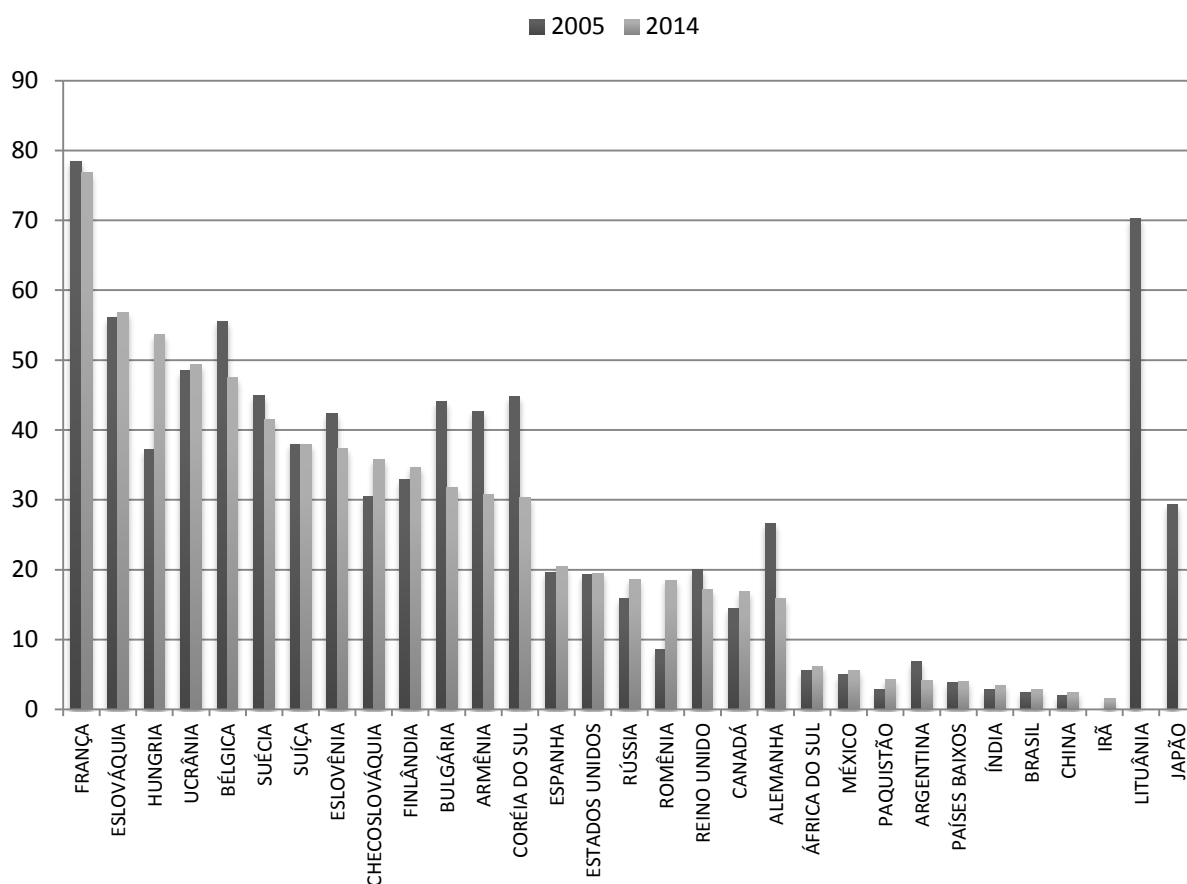
Figura 12 - Número de reatores em operação em 6/8/2015



Fonte: IAEA (2015).

Em 2014, o país que mais dependeu da energia nuclear foi a França, onde a energia nuclear representou 76,9% da energia elétrica total gerada, diferentemente da China onde os 123.807,69 GWh gerados pela energia nuclear produzida pelos 23 reatores em operação corresponderam a apenas 2,4% do total de energia elétrica gerada naquele período. Assim como na França, a participação da energia nuclear na geração elétrica foi significativa na Ucrânia (49,4%) Eslováquia (56,8%) e Hungria (53,6%). Mesmo em países que decidiram renunciar à energia nucleoeletrica como Bélgica (47,5) e Suíça (37,9%) a geração eletronuclear continua um componente representativo na matriz elétrica (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015) (Figura 13).

Figura 13 - Participação da energia nuclear na geração elétrica - 2005 - 2014



Fonte: IAEA (2015).

Contrariamente ao que é comumente divulgado a Alemanha não decidiu pelo fechamento de suas usinas nucleares após o acidente de Fukushima. O governo alemão já havia, em 2000, acordado a eliminação gradual da energia nuclear (por motivos políticos), que foi precipitada pelo acidente de Fukushima, após o qual oito usinas nucleares foram imediatamente desligadas. Em 2014, 15,9% da eletricidade gerada na Alemanha foi de origem nuclear e quase a metade originou-se de termelétricas a carvão (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2015).

A Lituânia, cuja geração elétrica era predominantemente nuclear fechou sua única usina em operação Ignalina 2 em 2009, como exigência para sua entrada na União Europeia. O reator LWGR (o mesmo tipo do acidente de Chernobyl) foi considerado fora dos padrões de segurança ocidentais.

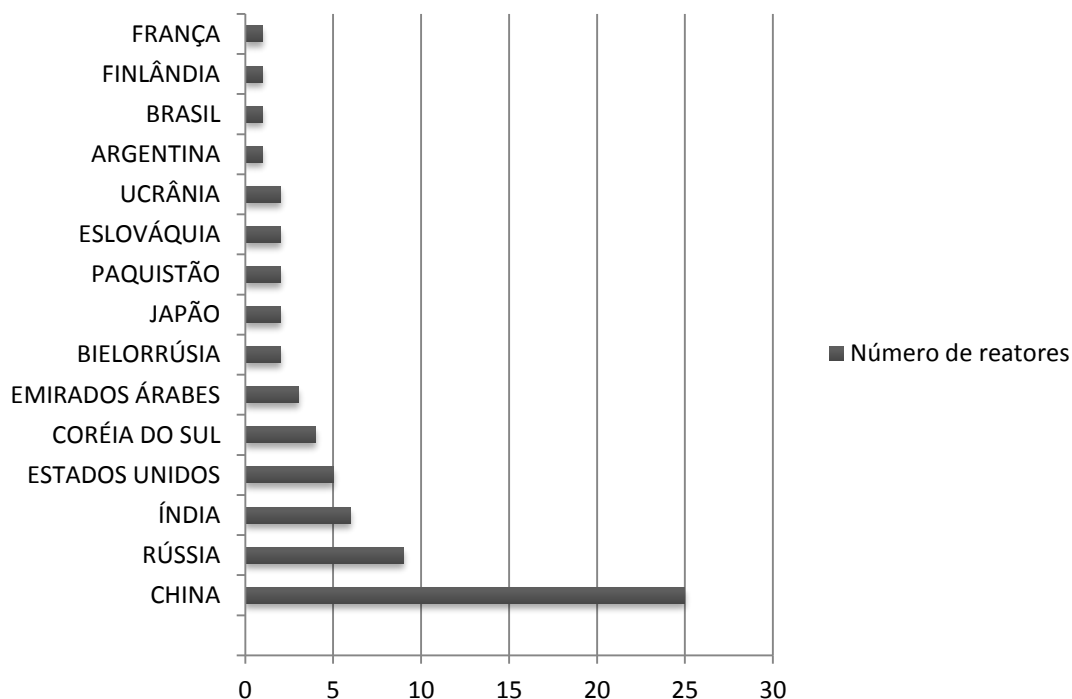
Dos nove países onde a participação da energia nuclear foi inferior a 10% da geração elétrica só os Países Baixos haviam decidido abandonar a geração nucleoeleétrica, após o acidente de

Chernobyl, mas reverteram posteriormente sua posição. Embora a participação da energia nuclear na geração de eletricidade não ultrapasse os 4%, os Países Baixos são líderes na produção mundial de radioisótopos e no enriquecimento do urânio por ultracentrifugação, serviço do qual depende a maior parte das usinas em funcionamento no mundo.

Todos os demais apostam na expansão nucleoeletrica, com destaque para China, com 23 reatores em construção e 32 em operação (3/04/2016) e a Índia, que desenvolveu seu programa nuclear civil apesar das restrições impostas por países membros da IAEA, por ter se recusado a assinar o TNT (Tratado de Não Proliferação de armas nucleares). As dificuldades em adquirir equipamentos e urânio levou o país a desenvolver uma linha de reatores e um ciclo de combustível próprios a partir do tório (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2015).

Nos próximos anos a capacidade instalada total elétrica líquida será acrescida de 66.482 MW, dos 68 reatores em construção (Figura 14). Países como os Estados Unidos recomeçaram a construir usinas nucleares, após trinta anos, e países como os Emirados Árabes e a Bielorrússia iniciaram a construção de suas primeiras usinas nucleares.

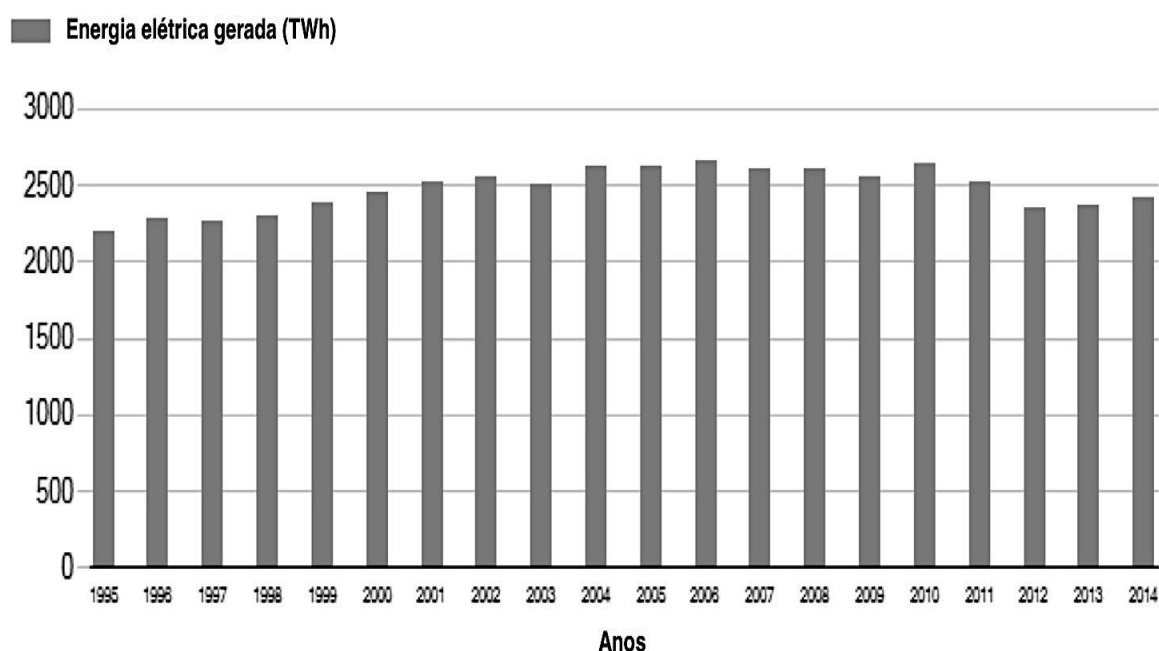
Figura 14 - Número de reatores em construção em 6/8/2015



Fonte: IAEA (2015).

O suprimento de energia elétrica de origem nuclear gerada oscilou pouco nos últimos vinte anos (Figura 15). Em 1995, 436 reatores produziram 2.190,94 TWh contra os 2.410,37 TWh gerados por 439 em 2014. A entrada em operação de novos reatores ao longo do período compensou o número de reatores desligados permanentemente. Até 31 de dezembro de 2014 haviam sido desligados 150 reatores com capacidade instalada de 57.532 MW (INTERNACIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015).

Figura 15 - Suprimento de energia elétrica de origem nuclear - 1995-2014



Fonte: IAEA (2015).

O desligamento permanente de um reator pode ocorrer por razões tecnológicas, quando a tecnologia ou processo tornam-se obsoletos; econômicas, quando a operação não é mais lucrativa; após um incidente ou acidente de operação; por decisões políticas, devido, por exemplo à rejeição pública a essa tecnologia, por razões técnicas como uma falha ou deterioração de um importante componente, que indiquem o fim da vida útil da instalação ou por novas exigências regulatórias que impeçam seu funcionamento.

No Brasil, operam duas usinas nucleares (Angra 1 e Angra 2), e mais uma usina encontra-se em construção (Angra 3), todas na mesma central nuclear, a CNAEA, situada no Município de Angra dos Reis, no Estado do Rio de Janeiro (Figura 16). A capacidade instalada elétrica

bruta total (Angra 1 e Angra 2) é de 1.990 MWe, sendo 640 MWe de Angra 1 e 1.350 MWe de Angra 2. Essa capacidade será acrescida de mais 1.450 MWe, assim que Angra 3 entrar em operação, cujo início está previsto para dezembro de 2018. O reator de Angra 1 é da Westinghouse (Estados Unidos) e os de Angra 2 e 3 da Siemens/KWU (Alemanha). Angra 2 entrou em operação em 2001 (ver ANEXO A e ANEXO B).

Figura 16 – A CNAAA



Fonte: Eletronuclear (2016).

Angra 1 e 2 satisfazem juntas 33% do consumo de energia elétrica do Estado do Rio de Janeiro e 3% do consumo de energia elétrica do Brasil (ELETRONUCLEAR, 2016).

4 O PLANO DE EXPANSÃO NUCLEOELÉTRICA PARA O NORDESTE

O Plano de expansão termonuclear para o Nordeste foi concebido em um período em que o Brasil e o Nordeste passavam por um ciclo de expansão econômica. Os programas de eletrificação, a maior capacidade da população de adquirir eletrodomésticos e eletroeletrônicos e o crescimento industrial pressionavam o consumo de energia elétrica, que havia crescido de 3.231 milhares de Tep (Tonelada equivalente de petróleo), em 1970 para 31.103 milhares de Tep, em 2005, a uma taxa anual de 6.7% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007).

Por outro lado, a implantação de usinas nucleares estava prevista no Programa Nuclear Brasileiro, uma das prioridades do governo do presidente Lula, que pretendia tornar o Brasil em uma potência no cenário internacional.

4.1 ASPECTOS ESTRATÉGICOS

Desde 2004, o governo brasileiro estudava a recuperação do Programa Nuclear Brasileiro. Este estudo foi realizado com a participação do Ministério de Ciência e Tecnologia, através da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear); do Ministério de Minas e Energia e da Presidência da República. As principais metas eram:

- a) aumentar a participação da energia nuclear na matriz energética brasileira em até 5% para 2030;
- b) satisfazer a demanda de combustível nuclear, com a produção de todas as fases do ciclo do combustível, inclusive o enriquecimento do urânio; e
- c) continuar investindo em ciência e tecnologia e alcançar a autonomia nuclear.

Entre os objetivos específicos do Programa destacavam-se:

- a) a finalização de Angra 3;
- b) a construção de mais quatro a oito usinas nucleares;
- c) a realização de investimentos em todos os setores do ciclo do combustível, desde a prospecção até a montagem do elemento combustível;
- d) a execução de investimentos em todas as áreas nucleares;

- e) a revisão da legislação brasileira sobre energia nuclear; e
- f) a criação de uma estatal para gestar os rejeitos radiativos e construir depósitos definitivos.

Em fevereiro de 2008, foi formada uma Comissão Interministerial com a participação da Casa Civil; do Ministério de Minas e Energia; do Ministério de Ciência e Tecnologia; do Ministério da Defesa; do Ministério de Indústria e Comércio, do Ministério da Economia; do Ministério do Planejamento; do Ministério do Meio-Ambiente; da Secretaria de Segurança Pública e da Secretaria de Assuntos Estratégicos (GONÇALVES, 2008) a fim de por em prática o Programa. Essa Comissão Interministerial, com a participação do Ministério da Defesa, evidenciava que o papel do setor nuclear no Brasil extrapolava a função de produção de energia elétrica. Tratava-se de um setor estratégico para o país (juntamente com os setores cibernético e espacial), essencial para a Estratégia Nacional de Defesa aprovada em dezembro de 2008 (Decreto nº 6.703), e, considerada pelo Ministério da Defesa como um dos tripés da criação de um complexo-industrial militar, completado pelas comunicações e as pesquisas aeroespaciais (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2012).

O setor nuclear passava por uma nova etapa de desenvolvimento cuja prática definiria seu futuro. Seu papel estratégico para o país era determinado por múltiplas funções atribuídas simultaneamente ao setor. Assim como ocorrera nos Estados Unidos, durante a Segunda Guerra Mundial, o desenvolvimento da energia nuclear no Brasil era uma meta comum do governo, das Forças Armadas e do setor produtivo em várias áreas, como mineração, produção de energia, indústria de equipamentos pesados. Diversamente do esforço de guerra estadunidense, a preocupação do governo brasileiro era diretamente relacionada com autossuficiência energética, defesa das reservas energéticas e desenvolvimento tecnológico.

Para países que não desenvolveram uma linha de reatores nacional e não dominam o ciclo do combustível, a opção de implantar usinas nucleares pode inicialmente resolver um problema de falta de alternativas para gerar energia elétrica, mas pode criar uma dependência – inclusive energética – com os países exportadores dessa tecnologia. Isso ocorreu com o Brasil, quando Estados Unidos interrompeu o fornecimento de combustível para Angra 1, rompendo uma cláusula contratual (ROSA, 1985).

No atual patamar de desenvolvimento da tecnologia nuclear no Brasil, a expansão termonuclear – mesmo com reatores importados - é primordial para manter o conhecimento adquirido com a construção e operação de Angra 1, 2 e 3, tanto para viabilizar economicamente as plantas de beneficiamento de urânio, quanto para rentabilizar a exploração de urânio, conquanto pressuponha transferência tecnológica, que permita o país desenvolver um reator nuclear com alto grau de nacionalização.

4.2 ASPECTOS ECONÔMICOS E OPERACIONAIS DO SISTEMA ELÉTRICO

Como parte dessa proposta mais ampla, em 2008, foi divulgado o PNE 2030 (Plano Nacional de Energia 2030). O PNE-2030 dava destaque à energia termonuclear, resultado de uma série de reuniões temáticas, promovidas pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), desde dezembro de 2005, direcionadas para estudos sobre a oferta de energia, inclusive da energia termonuclear (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007).

O Plano presumia uma expansão do setor termonuclear com a construção de pelo menos quatro novas usinas nucleares, duas no Nordeste e duas no Sudeste e a conclusão de Angra 3, cuja construção foi iniciada em 2010. Assim, segundo o PNE-2030, a capacidade instalada termonuclear passaria dos atuais 1.990 MW para 7.360 MW em 2015, no cenário intermediário, e 8360 MW no cenário alto (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007) (Quadro 7).

Quadro 7 - Cenários do PNE-2030

| | 2007-2015 | 2016-2020 | 2021-2025 | 2026-2030 | 2016-2030 |
|---------------|-----------|-----------|--------------|--------------|-----------|
| REFERÊNCIA | 1.360 MW | 1.000 MW | 1.000 MW | 2.000 MW | 4.000 MW |
| cenário 1 | Angra 3 | NE 1 | NE 2 | SE 1+ SE2 | |
| INTERMEDIÁRIO | 1.360 MW | 1.000 MW | 2.000 MW | 3.000 MW | 6.000 MW |
| cenário 2 | Angra 3 | NE 1 | NE 1+NE 2 | SE1+SE2+NE 3 | |
| ALTO | 1.360 MW | 2.000 MW | 3.000 MW | 3.000 MW | 8.000 MW |
| cenário 3 | Angra 3 | NE 1+NE 2 | SE1+SE2+NE 3 | SE3+SE4+NE 4 | |

Fonte: Soares (2008).

As justificativas alegadas para a construção de novas usinas nucleares eram:

- a) a expansão da demanda por energia elétrica em consequência de novos investimentos industriais e do aumento populacional;

- b) a falta de condições físicas e os crescentes custos ambientais para a construção de barragens de grande porte;
- c) a necessidade de diversificar a matriz energética;
- d) o pequeno aporte de energia das PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas) e outras fontes alternativas de energia (eólica¹¹, solar, geotérmica, marés);
- e) a emissão de CO₂ de outros tipos de térmicas (biomassa, carvão e gás);
- f) o preço do combustível nuclear (urânio), pelo fato do país possuir [à época] a sexta reserva de urânio do mundo e dominar o ciclo do combustível; e
- g) as mudanças climáticas que poderiam alterar a hidrologia, tornando nosso sistema hidráulico vulnerável.

Essas razões se popularizaram após o “apagão” do sistema elétrico ocorrido em março de 2001, quando “o sistema caiu apagando as principais cidades do país por causa de um acidente [uma falha] inicial que seria controlável em condições normais” (BRANCO, 2002, p. 81)¹².

Para a EPE, a construção de novas usinas, para aumentar a oferta de energia no sistema, justificava-se pela lógica econômica, isto é, quando é mais econômico construir uma usina para atender a demanda de um quilowatt adicional de consumo, do que aumentar a geração do sistema existente (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007). A escolha da fonte de geração, segundo a EPE (2007), era determinada pelo valor do fator de capacidade, por sua vez condicionado por restrições técnicas físicas ou regulatórias e comerciais, tendo em vista o uso prioritário das fontes de menor custo variável de operação. Porém, outros condicionantes sócio-ambientais e de natureza diversa, específicos de cada fonte de geração, como capacitação da indústria nacional e desenvolvimento tecnológicos também eram considerados na escolha da estratégia de expansão da oferta de energia elétrica.

Considerando que as térmicas estavam assumindo cada vez mais uma função de geração de base, na operação do sistema elétrico, e não só de complementação, o custo de geração de

¹¹ Contrariamente às previsões, a energia eólica tem contribuído significativamente na geração de energia, especialmente no Nordeste.

¹² No artigo “A Crise de Energia Elétrica: Causas e Medidas de Mitigação” de Luiz Pinguelli Rosa. (BRANCO, 2002, p, 81-95), o autor desmonta alguns dos argumentos utilizados para explicar a crise que se sucedeu, como a falta de investimentos no setor ou a vulnerabilidade do setor em consequência da falta de chuvas.

base das térmicas refletiria o custo marginal de expansão, que estabeleceria a competitividade entre térmicas e hidráulicas concorrentes (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007).

Com base nas projeções de consumo e de carga, na disponibilidade de cada fonte e no menor custo, a EPE elaborou um quadro de alternativas para a expansão de cada subsistema, onde a energia nuclear aparecia como uma fonte possível para as regiões eletro-geográficas Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste (Tabela 2).

Tabela 2 - Alternativas para a expansão da oferta de energia elétrica no período 2015-2030

| Fonte | Norte | Nordeste | Sudeste/Centro-Oeste | Sul | Acréscimo máximo | |
|------------------|---------------|---------------|----------------------|---------------|------------------|--------------|
| | (MW) | (MW) | (MW) | (MW) | Período (MW) | Por ano (MW) |
| Hidrelétricas | 44.000 | 1.100 | 10.000 | 6.200 | 61.300 | 4.090 |
| Grande porte | 44.000 | 1.100 | 10.000 | 6.200 | 61.300 | 4.090 |
| Térmicas | 0 | 9.000 | 15.000 | 6.000 | 30.000 | 2.000 |
| Gás natural | 0 | 4.000 | 10.000 | 1.000 | 15.000 | 1.000 |
| Nuclear | 0 | 3.000 | 3.000 | 0 | 6.000 | 400 |
| Carvão | 0 | 2.000 | 2.000 | 5.000 | 9.000 | 600 |
| Outras | | 0 | 0 | 0 | | |
| Alternativas | 0 | 3.950 | 8.000 | 3.400 | 15.350 | 1.025 |
| PCH | 0 | 500 | 4.000 | 1.500 | 6.000 | 400 |
| Centrais eólicas | 0 | 2.200 | 0 | 1.100 | 3.300 | 220 |
| Biomassa de cana | 0 | 950 | 3.300 | 500 | 4.750 | 320 |
| Resíduos urbanos | 0 | 300 | 700 | 300 | 1.300 | 85 |
| TOTAL | 44.000 | 14.050 | 33.000 | 15.600 | 106.650 | 7.115 |

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2007).

Para essas regiões, a expansão da oferta de energia hidráulica local e da importação de outras regiões se justificaria até o custo equivalente da geração nuclear em regime de base (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007).

4.2 A ESCOLHA DA REGIÃO NORDESTE

Conforme os resultados dos estudos realizados pela EPE, a região eletro-geográfica Nordeste foi escolhida para sediar as primeiras duas usinas, implantadas em uma única central nuclear.

Com uma projeção do consumo crescendo a taxas superiores a das outras regiões (Tabela 3) e com 15% da carga, cujo crescimento projetado em 4,5%, no período 2005-2030, superior ao

da região eletrogeográfica Sudeste/Centro-Oeste (3,8%, no mesmo período) (Tabela 4) a região eletro-geográfica Nordeste encontrava-se com os recursos hidráulicos exauridos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007), não tendo outra alternativa a não ser expandir a geração de base por meio de térmicas.

Tabela 3 - Projeção do consumo de eletricidade por Subsistema

| | 2005 | 2010 | 2020 | 2030 | $\Delta\%$ AO ANO |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| | (TWh) | (TWh) | (TWh) | (TWh) | 2005-2030 |
| Norte | 30,1 | 40,4 | 73,8 | 143 | 6,4 |
| Nordeste | 47,6 | 63,6 | 95,2 | 148,8 | 4,7 |
| Sudeste/Centro-Oeste | 209,5 | 269,6 | 377,7 | 536,9 | 3,8 |
| Sul | 57,7 | 75,2 | 109,1 | 159,4 | 4,2 |
| TOTAL | 344,9 | 448,8 | 655,7 | 988,2 | 4,3 |

Inclui sistemas isolados no subsistema Norte

Fonte: Empresa de Pesquisa energética (2007).

Tabela 4 - Projeção da Carga de Energia

| | 2005 | 2010 | 2020 | 2030 | $\Delta\%$ AO ANO |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| | (MWmédio) | (MWmédio) | (MWmédio) | (MWmédio) | 2005-2030 |
| Norte | 3.160 | 4.204 | 7.154 | 13.265 | 7 |
| Nordeste | 6.708 | 8.801 | 12.945 | 19.988 | 4,5 |
| Sudeste/Centro-Oeste | 28.800 | 36.693 | 50.855 | 71.841 | 3,8 |
| Sul | 7.627 | 9.910 | 14.140 | 20.674 | 4,1 |
| TOTAL | 46.295 | 59.608 | 85.094 | 125.768 | 4,08 |

Exclui sistemas isolados remanescentes

Fonte: Empresa de Pesquisa energética (2007).

Dentre as térmicas, a geração nuclear era a que apresentava o menor custo variável, em função do baixo custo relativo do combustível (Tabela 5).

Tabela 5 - Custo do Combustível na Geração Térmica

| Combustível | US\$/t | US\$/MWh |
|------------------|--------|----------|
| Urânio (nuclear) | ... | 8 |
| Carvão nacional | 16,4 | 16,4 |
| Carvão importado | 64 | 28,8 |
| Gás natural | 6,5 | 40,3 |

custo CIF-usina; custo de US\$/106BTU

Fonte: Empresa de Pesquisa energética (2007).

4.3 A LOCALIZAÇÃO DA CENTRAL NORDESTE

A implantação de uma usina nuclear pressupunha uma série de decisões a serem tomadas antes do início da construção, como:

- a) seleção de sítio;
- b) seleção da tecnologia;
- c) estratégias de licenciamento;
- d) estabelecimento da estrutura de capital;
- e) busca de financiamento e
- f) análise e mitigação dos riscos (ATALLA, 2009).

Estas decisões podiam ser tomadas paralelamente ou sucessivamente. No Brasil, estudos preliminares de localização já haviam sido concluídos e a escolha dos reatores tendia a um número reduzido de opções, como será abordado a seguir.

A escolha do sítio, assim como o da tecnologia de reatores e dos fornecedores, a depender da Eletronuclear, seria baseada em critérios empresariais. As implicações ambientais eram observadas para adequar os novos investimentos à legislação vigente e aos padrões de segurança internacionais, de modo a agilizar as licenças e evitar que controles posteriores impedissem ou dificultassem a operação das usinas.

Porém, como a decisão final sobre a construção de novas usinas e sua localização dependia da aquiescência do Congresso Nacional, fatores políticos eram preponderantes nas escolhas finais, onde a rejeição pública tem um peso significativo.

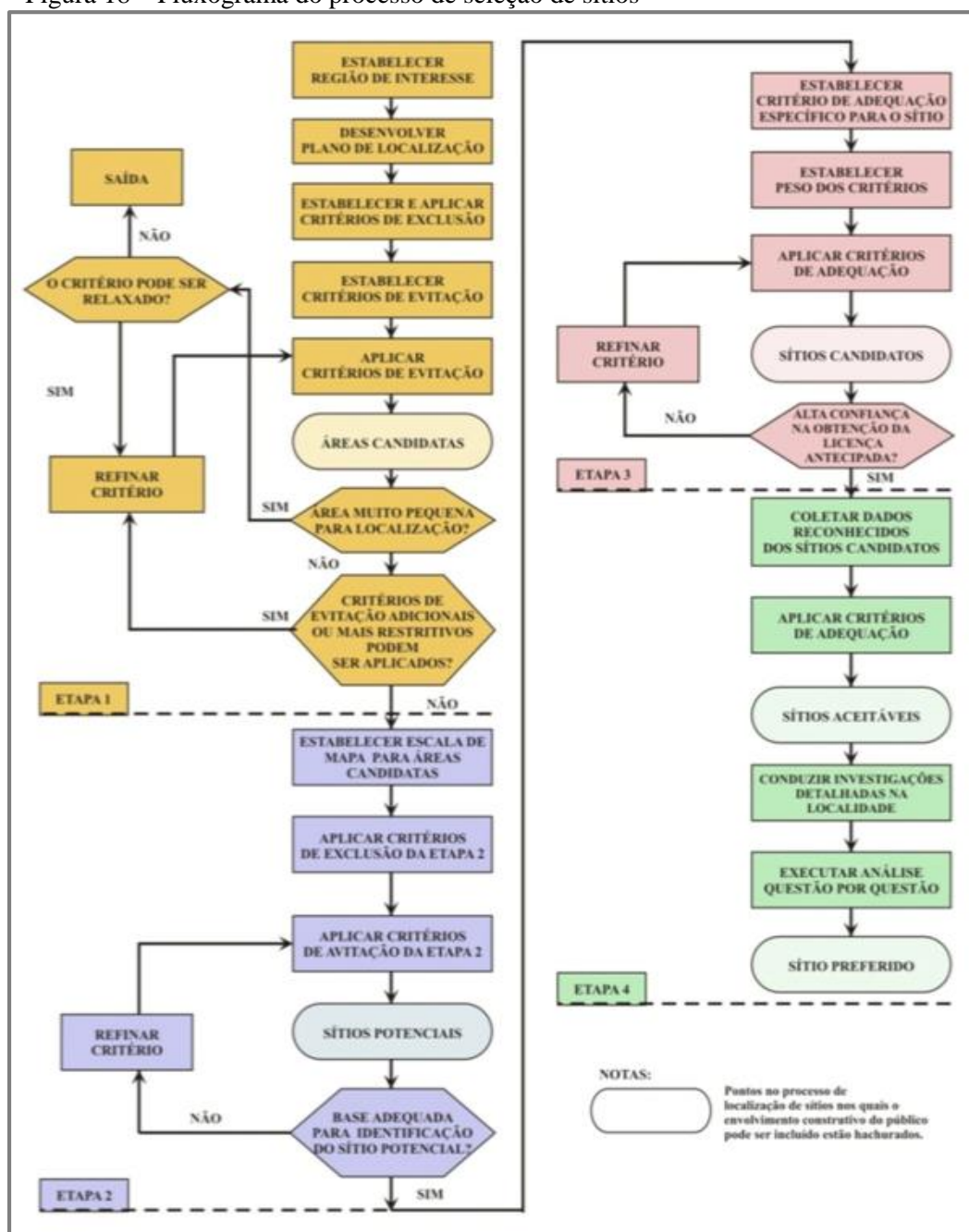
Os estudos de localização da Central Nuclear do Nordeste foram iniciados em 2008, por determinação da Secretaria do Planejamento e Desenvolvimento do Ministério de Minas e Energia. À época a área de interesse situava-se no litoral entre Salvador e Recife. A primeira fase foi elaborada pela empresa CDIOX, fruto de uma parceria entre ex-executivos da White Martins e pesquisadores do GARTA (Grupo de Análise de Risco Tecnológico e Ambiental), da Coppe/UFRJ, que foi contratada para realizar o “Estudo de localização de sítios na Região Nordeste do Brasil para empreendimento nuclear de potência” (CABRAL, 2012).

Inicialmente a área do São Francisco havia sido excluída em razão do risco de diminuição da vazão de água provocada pela transposição do rio e da demanda de água de grandes projetos de mineração, como o ferro de Caetité. O problema da vazão foi solucionado modificando-se o sistema de resfriamento e projetando-se torres de resfriamento, diminuindo a necessidade de água para resfriamento de $65\text{m}^3/\text{s}$ para $5\text{m}^3/\text{s}$. As usinas teriam capacidade de 1.000 MW de potência e, segundo o Governo, seriam construídas em um prazo previsto de cinco anos.

Os estudos de localização de usinas nucleares, inicialmente para o Nordeste foram, posteriormente estendidos para o Sudeste e para todo o território brasileiro, onde foram identificadas quarenta áreas em todo país aptas para abrigar usinas nucleares (Figura 2). Um Atlas Nuclear de Localização de Centrais Nucleares foi apresentado pela Eletronuclear ao governo federal em 2011, mas sua divulgação foi comprometida pelo acidente nuclear de Fukushima.

O processo de decisão da seleção de sítios é constituído de quatro etapas, em que são aplicados sucessivamente, por meio de uma árvore de decisão (Figura 3), a uma determinada área de interesse, envolvendo três tipos de critérios, de exclusão, evitação e adequação (ATALLA, 2009). Segundo Atalla (2009), esses critérios são estabelecidos em função das limitações impostas pela regulamentação, que possam impedir ou atrasar a outorga das licenças ou dos requisitos do projeto da usina.

Figura 18 – Fluxograma do processo de seleção de sítios



Fonte: Dantas (2011).

Os critérios de exclusão descartam áreas inaceitáveis para a construção de usinas nucleares. Para tanto são analisados o movimento vibratório do solo, falhas capazes, falhas superficiais e deformação, requisitos de temperatura ambiente, inundação, ventos, precipitação, população, dispersão atmosférica, ameaças a habitats e espécies importantes, terrenos úmidos, efeitos relativos à construção, operação e topografia. A esses critérios são agregados critérios de evitação, como perigos geológicos, estabilidade do solo, construções existentes, suprimento de água para refrigeração e distância do bombeamento, dispersão de radionuclídeos, profundidade do lençol freático efeitos relativos à construção e operação. Por último, são utilizados critérios de adequação, como construções previstas, planejamento de emergência, dispersão atmosférica e capacidade de diluição, proximidade de consumidores de água, contaminação, proximidade de terrenos úmidos, qualidade da água, efeitos socioeconômicos concernentes tanto à construção quanto à operação, justiça ambiental, contramedidas industriais do sítio, acesso (rodoviário, ferroviário e hidroviário), custos de transmissão, preços de mercado da eletricidade, direito sobre o uso da terra e salários (engenharia e construção) (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 2002).

Na etapa 1, define-se a região de interesse; desenvolve-se um plano de assentamento; define-se e aplicam-se critérios de exclusão; definem-se e aplicam-se critérios de evitação. Desta etapa resultam áreas candidatas. Na etapa 2, define-se a escala de mapas de áreas candidatas; aplicam-se critérios de exclusão da etapa 2; aplicam-se critérios de evitação da etapa 2, ao fim do qual determinam-se os sítios potenciais. Na etapa 3, estabelecem-se critérios adequados específicos ao sítio; estabelecem-se ponderações entre os critérios; aplicam-se critérios de adequação. Nesta etapa são definidos os sítios candidatos com alta confiabilidade na obtenção da licença. Na etapa 4, obtém-se informações de dados do local e aplicam-se critérios de adequação para precisar os sítios aceitáveis, onde serão posteriormente conduzidas investigações detalhadas, analisados e ponderados os dados, item a item, para a definição do sítio preferencial (ATALLA, 2009).

O EPRI elenca aproximadamente 50 critérios a serem utilizados para a definição do sítio nuclear (ANEXO C). Nem todos eles foram utilizados nos estudos locacionais da Central do Nordeste (Quadro 8). A seleção de um mesmo elenco de critérios, a depender da ponderação atribuída a cada um levou a resultados diferentes.

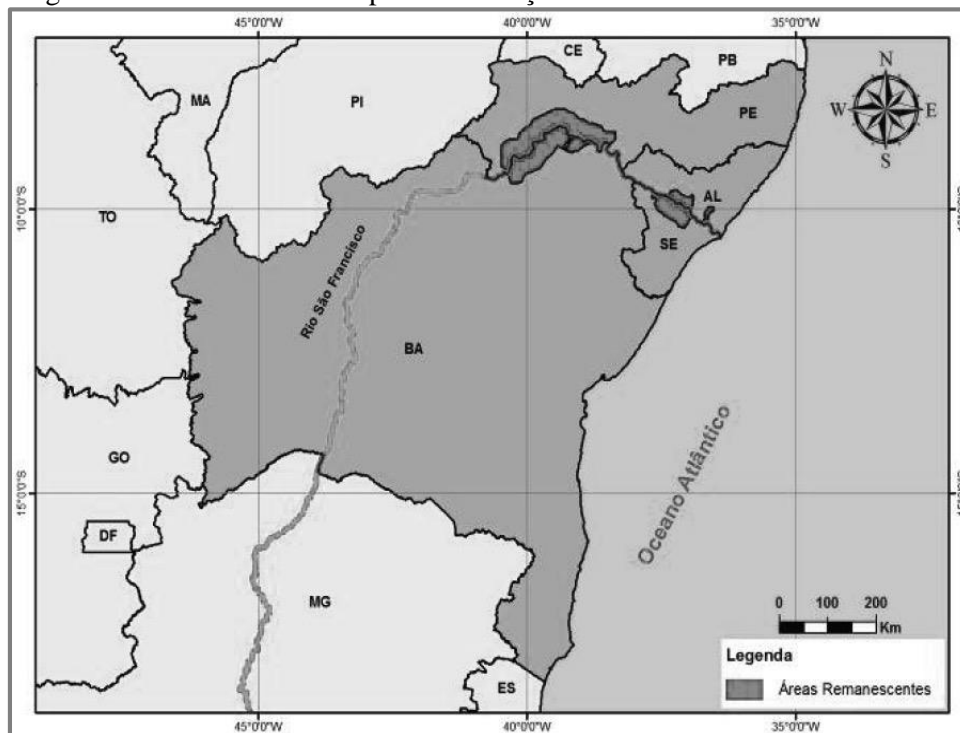
Quadro 8 – Critérios selecionados para estudos de localização da Central do Nordeste

| Saúde e segurança (15) | Meio Ambiente (5) | Socioeconômicos (2) | Engenharia e Custos (2) |
|---------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Água para refrigeração | Área de proteção ambiental | Efeitos da construção | Distância das fontes de água |
| Vibrações do solo | Riscos Inundações | Efeitos da operação | Topografia |
| Populações vizinhas | Riscos a espécies importantes | | |
| Falhas capazes | Riscos a importantes habitats | | |
| Perigos geológicos | Profundidade do lençol freático | | |
| Estabilidade do solo | | | |
| Presença de aquíferos | | | |
| Temperatura ambiente | | | |
| Instalações já existentes | | | |
| Incidência de chuvas | | | |
| Incidência de ventos | | | |
| Falhas de superfície | | | |
| Deformações na superfície | | | |
| Risco de inundação | | | |
| Dispersão atmosférica | | | |

Fonte: Travassos (2015).

Com base nesses estudos, no Nordeste, foram detectadas quatro micro áreas favoráveis nos estados de Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Bahia (Figura 4), todas às margens do rio São Francisco.

Figura 19 – Áreas favoráveis para a instalação de centrais nucleares no Nordeste



Fonte: Eletronuclear (2012).

Segundo a Eletronuclear (2014), com o auxílio do SIG (Sistema de Informações Geográficas) as áreas foram mapeadas a partir de imagens satélites, utilizando dados sobre população, sísmica, meteorologia e fontes de água existentes para a refrigeração do reator.

Em cada um dos estados foram identificados pelo menos um sítio principal e um sítio alternativo. As áreas candidatas foram apresentadas ao MME, em 2011 e os locais foram posteriormente selecionados embora não tenham sido elaborados o EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto do Meio Ambiente) do sítio em questão (ELETRONUCLEAR, 2016).

Para a Eletronuclear, antes do acidente de Fukushima, o sítio de Belém do São Francisco, no município de Itacuruba, em Pernambuco, era apresentado como o local que detinha as melhores condições para a construção da Central Nordeste. Nesse Estado, além do sítio principal de Belém do São Francisco, um sítio alternativo, distante de 35 quilômetros, era considerado no município de Petrolândia, em Pernambuco (ELETRONUCLEAR, 2014) (Figura 5).

Figura 20 – Sítio principal e sítio alternativo no estado de Pernambuco



Fonte: Eletronuclear (2010).

A preferência da Eletronuclear pela margem esquerda do rio (Pernambuco e Alagoas) resultaria da preocupação com o transporte de grandes equipamentos necessários para a construção das usinas, seja do exterior ou da Nuclep, em Itaguaí, no Rio de Janeiro. O acesso rodoviário ao Porto de Suape facilitaria a logística de transporte do empreendimento.

O sítio de Belém do São Francisco no município de Itacuruba-PE, às margens do reservatório de Itaparica foi escolhido principalmente devido: a) à baixa densidade demográfica (de 0,94 a 12,73 hab/km²); b) à estabilidade do solo; c) à existência de linhas de alta tensão no município; d) à equidistância dos dois maiores centros consumidores no Nordeste, Salvador e Recife; e) à operação com as hidroelétricas existentes; f) à disponibilidade de fonte fria e foi excluída a faixa litorânea em função da alta densidade populacional, existência de aquíferos, extensas áreas de proteção ambiental, oleodutos e solos sedimentares (CABRAL; BARBOSA, 2014).

Ao longo dos anos, o resultado dos estudos de localização de sítios nucleares apresentados em seminários pela Eletronuclear, utilizando a mesma metodologia, chegaram a resultados diferentes. Assim, em 2007, o sítio estaria localizado no Baixo São Francisco, entre a

hidrelétrica de Xingó e a foz, em Alagoas ou Sergipe; em 2008, a área candidata para abrigar a Central do Nordeste situava-se no litoral, perto do Complexo Portuário Industrial de Suape; em 2012 a área do litoral passou a ser descartada e o sítio preferencial considerado resultou às margens do rio São Francisco, na represa de Itaparica; e mais recentemente, com o impacto da crise hídrica iniciada em 2012, novamente o litoral passou a ser considerado, como sugere o Relatório de Sustentabilidade da Eletronuclear 2013 (ELETRONUCLEAR, 2014), embora os últimos estudos de localização divulgados ainda apontem para o sítio de Belém do São Francisco no município de Itacuruba-PE.

4.3.1 Rejeição pública e localização da Central Nordeste

A rejeição pública é um fator de grande relevância para a indústria nuclear, pois pode colocar em risco operações rotineiras. O atraso nos licenciamentos e as paralisações provocadas por denúncias e manifestações impactam toda a cadeia de decisões. Paralisações na mina de urânio em Caetité, por exemplo atrasam o cronograma da fabricação do combustível nuclear obrigando à importação de urânio. Atrasos nos licenciamentos ambientais aumentam o tempo de construção de usinas e conseqüentemente uma série de custos improdutivos como custos financeiros ou seguros. Assim, a escolha do sítio levará em consideração o grau de rejeição pública local considerando a eficácia das medidas para reverter essa rejeição.

Embora não haja uma posição oficial quanto ao Estado que abrigará a Central Nuclear do Nordeste, Pernambuco é o único dos quatro Estados cuja Constituição, no Art. 216, permite a construção de usinas nucleares, desde que esgotadas a capacidade de produzir energia hidrelétrica e oriunda de outras fontes (PERNAMBUCO, 2008). A Constituição do Estado de Sergipe, no parágrafo 8º do Art. 232, veta a construção de usinas nucleares, o depósito de lixo atômico e o transporte de cargas nucleares em território sergipano (SERGIPE, 2007); a Constituição do Estado de Alagoas, no Art. 221, proíbe a instalação de usinas nucleares e de depósitos de resíduos atômicos, em território alagoano (ALAGOAS, 2012) e a Constituição Estadual da Bahia, em seu Art. 226, parágrafos III e IV, proíbe a instalação de usinas nucleares e o depósito de resíduos nucleares ou radioativos gerados fora dele (BAHIA, 1989).

A inclusão do tema energia nuclear em constituições estaduais do Nordeste é repercussão do acidente radiológico de Goiânia, ocorrido em 1987 e visava proteger a população do Estado

dos riscos nucleares e hoje constitui um empecilho – contornável por reforma constitucional – para a construção de empreendimentos nucleares.

A posição desses Estados em relação à instalação de usinas nucleares é contestada pela Procuradoria-Geral da República, que ingressou no Supremo Tribunal Federal uma Ação Direta de Inconstitucionalidade contra o parágrafo 8º do Art. 232 da Constituição sergipana, sob a alegação de que o tema é da competência da União e de que não há lei federal complementar que autorize os Estados a legislar sobre questões específicas de energia nuclear (PROCURADORIA-GERAL DA REPÚBLICA, 2013).

Como a escolha do sítio depende de lei específica aprovada pelo Congresso Nacional a rejeição pública será considerada uma variável importante conquanto implica em perdas eleitorais e pode tornar-se decisiva na escolha do local para abrigar uma central nuclear.

Para o setor nuclear, a rejeição pública só é considerada em situações específicas onde os movimentos de contestação impedem ou dificultam as atividades desenvolvidas. Mesmo nesses casos, opta-se por criar mecanismos coercitivos de modo a garantir o funcionamento de instalações nucleares e o transporte de material nuclear (CABRAL, 2012).

No Sub-Médio São Francisco, movimentos de contestação à instalação de usinas nucleares são incitados por entidades nacionais e internacionais dos mais variados propósitos, movimentos socioambientais e pesquisadores acadêmicos e é grande a influência da Igreja Católica. A mobilização da população local – inclusive com representantes de tribos indígenas como Tuxá ou Pankaré – contra a construção de usinas nucleares no São Francisco é facilitada pela pré-existência de um temor da população local de ser novamente desalojada como ocorreu na ocasião da construção da barragem de Itaparica. A instalação de usinas nucleares na região representa uma nova intervenção do Estado com poder de desestabilizar a sociedade local, não em função da desocupação de áreas inundadas, mas pelo risco de desocupação em função de um acidente radioativo (CABRAL, 2012).

Se o acidente nuclear de Fukushima ocorrido em março de 2011 provocou um aumento da rejeição pública à tecnologia nuclear, a crise hídrica que assolou a região de 2012 a 2016, com impactos na geração hidrelétrica despertou reflexões sobre alternativas energéticas à hidroeletricidade, dentre elas a nuclear. A percepção dos riscos de um acidente nuclear é

minimizada quando comparada ao risco de um colapso no abastecimento de água e fornecimento de energia elétrica, que atinge diretamente o cotidiano das atividades locais.

4.4 A ESCOLHA TECNOLÓGICA DOS REATORES

O desenvolvimento tecnológico brasileiro na área da energia nucleoeletrica avança lentamente, devido em parte, à opção brasileira de almejar a tecnologia nuclear por transferência tecnológica via cooperação internacional, ou aquisição de equipamentos, quando se sabe que não existe transferência em tecnologias de ponta e estratégicas. Pressões internacionais, especialmente dos Estados Unidos¹³ que consideram o desenvolvimento brasileiro no campo nuclear uma afronta à segurança estadunidense, assim como a falta de apoio do governo brasileiro contribuem para o atraso do Brasil nesse campo.

O atraso na construção de um reator nuclear de potência brasileiro – um protótipo de um reator do tipo PWR está sendo construído no Aramar, centro experimental da Marinha do Brasil, em Iperó, São Paulo e deve ficar pronto em 2017 – e as dificuldades para financiar o projeto de um reator de quarta geração desenvolvido na UFRGS, em fase de conceito desde a década de 1980, obriga o país a adquirir tecnologia estrangeira, com os respectivos constrangimentos.

A escolha dos modelos de reatores para as usinas nucleares a serem construídas, previstas no Programa Nuclear Brasileiro, deverá levar em conta as especificidades dos diferentes tipos e modelos de reatores disponíveis comercialmente, que implica numa cadeia sucessória de decisões em áreas como reposição de peças, operação de usinas e manutenção de equipamentos e transferência tecnológica. A escolha recairá certamente em um reator com experiência comprovada, de modo a diminuir os riscos com segurança e seguindo as orientações da AIEA. Enseja-se a transferência tecnológica, que nem todos os construtores consideram, mas que depende, essencialmente, do sucesso da negociação.

¹³ Segundo Bandeira (2004) o Brasil, durante o governo do presidente Collor “cedeu à pressão dos Estados Unidos para que renunciasse a qualquer ambição de autonomia em questões de caráter estratégico” (BANDEIRA, 2004, p.57).

Além dos atributos técnicos, questões relacionadas a certificações internacionais estão sendo consideradas na escolha tecnológica. A certificação estadunidense concedida pela U.S.NRC (*United States Nuclear Regulatory Commission*) aos reatores ABWR da GE-Hitachi e ao AP-1000, coloca em vantagem o AP-1000 em relação a outros modelos. A certificação da U.S.NRC, embora válida apenas em território estadunidense é aceita pela CNEN como sinal de confiabilidade do projeto. A U.S.NRC encoraja projetos com sistemas passivos de resfriamento, modulares e simplificados, mais seguros e mais econômicos.

Os reatores escolhidos na expansão da geração termonuclear no Brasil serão do tipo PWR, de um mesmo fornecedor, pois não há uma preocupação na diversificação de tecnologias para minimizar a dependência, como ocorre na China, que adquiriu tecnologia de diferentes países e fornecedores (Canadá, França, Rússia e Estados Unidos), a partir dos quais desenvolveu modelos nacionais. A escolha brasileira levará em conta os avanços tecnológicos do país na área de produção de combustível pela INB, na usinagem de grandes forjados, pela Nuclep e na experiência em operação desse tipo de reatores (PWR) pela Eletronuclear na CNAEA. Para a EPE (2007), essa opção reduziria os custos de implantação das usinas justificando a construção das mesmas.

Reatores do tipo BWR evolucionários como o ABWR, ESBWR e o Kerena foram descartados do plano de expansão brasileira, assim como os GCR, LWGR e FBR e PHWR.

Os reatores do tipo BWR sofreram com o impacto do acidente de Fukushima e mesmo a GE-Hitachi, líder na construção e manutenção de reatores desse tipo está ampliando o mercado e prestando serviços de manutenção e troca de combustível também a reatores do tipo PWR.

Os reatores GCR e LWGR não são mais fabricados. Os LWGR, entraram em desuso após o acidente de Tchernobyl, apesar de terem incorporado quesitos de segurança, sendo que apenas 15 reatores LWGR ainda operam na Rússia e, dos reatores GCR, considerados ineficientes, somente 14 unidades encontram-se em operação na Inglaterra.

Uma nova geração de reatores FBR ainda está na fase de testes. O BN-20 chinês, opera desde 2011, o BN-800 russo, desde 2015 e o PFBR (*Prototype Fast Breeder Reactor*) indiano, encontra-se em construção.

Apesar de ter sido considerado o tipo de reator com melhores índices de desempenho (Tabela 6), os reatores PHWR tampouco são listados entre as opções brasileiras.

Tabela 6 – Desempenho dos reatores em operação por categoria de reator de 2012 a 2014

| Categoria | unidades | FD (%) | PCP (%) | FC (%) | PCNP (%) | FO (%) | FCar (%) |
|--------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| PWR | 279 | 77,0 | 18,2 | 77,8 | 2,6 | 77,0 | 75,9 |
| < 600 MWe | 47 | 69,1 | 27,6 | 69,6 | 1,5 | 71,1 | 67,4 |
| ≥ 600 MWe | 232 | 77,7 | 17,3 | 78,6 | 2,6 | 78,2 | 76,7 |
| BWR | 83 | 60,9 | 36,9 | 61,1 | 2,5 | 61,3 | 60,6 |
| < 600 MWe | 9 | 33,8 | 58,0 | 33,9 | 14,3 | 39,9 | 33,0 |
| ≥ 600 MWe | 74 | 62,2 | 35,9 | 62,4 | 2,2 | 64,0 | 61,9 |
| PHWR | 49 | 83,4 | 9,7 | 85,3 | 4,3 | 83,3 | 80,2 |
| < 600 MWe | 26 | 77,2 | 9,9 | 82,5 | 6,8 | 83,1 | 76,9 |
| ≥ 600 MWe | 23 | 86,3 | 9,6 | 86,7 | 3,1 | 83,5 | 81,7 |
| LWGR | 15 | 73,1 | 24,3 | 73,4 | 2,6 | 76,4 | 74,2 |
| < 600 MWe | 4 | 83,2 | 16,5 | 83,2 | 0,3 | 76,6 | 41,0 |
| ≥ 600 MWe | 11 | 73,1 | 24,3 | 73,4 | 2,6 | 76,3 | 74,3 |
| GCR | 17 | 73,9 | 11,9 | 74,1 | 10,5 | 79,8 | 74,2 |
| FBR | 1 | 80,1 | 16,8 | 80,1 | 3,2 | 84,0 | 81,7 |
| TOTAL | 444 | 73,9 | 21,6 | 74,6 | 2,9 | 74,8 | 72,9 |

Notas: FD – Fator de Disponibilidade; PCP – Perda de Capacidade Planejada; FC – Fator de Capacidade; PCNP – Perda de Capacidade Não Planejada; FO – Fator de Operação; FCar – Fator de Carga

Fonte: AIEA (2015).

4.4.1 Considerações sobre os PHWR

Os reatores PHWR, foram desenvolvidos no Canadá no final da Segunda Guerra Mundial. O Candu é um reator a urânio natural, moderado e refrigerado a água pesada. A tecnologia dispensa o enriquecimento de urânio e o reator pode ser abastecido durante a operação, por diferentes tipos de combustível, inclusive urânio irradiado proveniente de reatores a água leve. Utiliza 15% a menos de urânio natural para cada megawatt de eletricidade gerada, em comparação com os reatores à água pressurizada, o que o torna o reator a urânio da segunda geração com o melhor desempenho.

Candu foi adquirido por diversos países como Argentina, Índia, Paquistão, China, Coreia do Sul e Romênia, todos participantes do COG (Candu Owner Group), organização sem fins lucrativos que trabalha em cooperação e troca de informação para o desenvolvimento da tecnologia nuclear (CANDU OWNER GROUP INC, 2016). À exceção da Romênia os demais países investiram no desenvolvimento de reatores nacionais.

Embora tenha sido concebido para fins exclusivamente pacíficos de produção de energia elétrica, assim como os reatores militares para produção de plutônio, Candu permitia a recuperação de plutônio de pureza militar (assim como os RBMK (*Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy*) soviéticos, os Magnox (*MAGnesium Non Oxidising*), de primeira geração britânicos e os GCR na França). Por essa razão não consegue a certificação e licenciamento da U.S. NCR, o que limita as exportações dos reatores canadenses e não faz parte do leque de opções brasileiro.

4.4.2 A opção pelos reatores PWR

Concebidos após a Segunda Guerra Mundial para a Marinha dos Estados Unidos, os reatores PWR são compactos, respondem melhor a variações bruscas de potência, razões pelas quais tornaram-se os reatores mais difundidos do mundo.

Dos 443 reatores em operação no mundo, mais de 50% são do tipo PWR. Em abril de 2016, encontravam-se em construção 65 reatores, 55 dos quais do tipo PWR (Tabela 7).

Tabela 7 - Reatores em operação e construção no mundo em 1/04/2016 por tipo

| Tipo de reator | Em operação | | Em construção | |
|----------------|-------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
| | unidades | Potência instalada (MWe) | unidades | Potência outorgada (MWe) |
| BWR | 78 | 75.208 | 4 | 5.250 |
| FBR | 3 | 1.369 | 1 | 470 |
| GCR | 14 | 7.720 | 0 | 0 |
| HTGR | 0 | 0 | 1 | 200 |
| LWGR | 15 | 10.219 | 0 | 0 |
| PHWR | 49 | 24.634 | 4 | 2.520 |
| PWR | 284 | 266.123 | 55 | 55.570 |
| Total | 443 | 385.273 | 65 | 64.010 |

Fonte: IAEA (2016).

Segundo Travassos (2015) ainda não há uma definição quanto à potência dos reatores a serem escolhidos, pois há opções em torno dos 1.000 MW (Quadro 9) ou reatores com potência acima dos 1.000 MW (Quadro 10).

Quadro 9 – Modelos de reatores evolucionários PWR ~1.000 MWe

| Modelo | ACPR-1000 | AP-1000 | ATMEA1 | VVR-1200 |
|-------------------------|-----------|-----------------------------|------------------|----------|
| <i>Design</i> | CGNPC | Mitsubishi/ Westinghouse | Areva/Mitsubishi | Rosatom |
| País | China | EUA/Japão | França/Japão | Rússia |
| Tipo | PWR | PWR | PWR | PWR |
| Potência térmica (MWt) | 3.500 | 3.200 | 3.150 | 3.200 |
| Potência elétrica (MWe) | 1.150 | 1.200 | 1.150 | 1.170 |
| Temperatura (° C) | 311 | 303 | 308,5 | 313,5 |
| Pressão (Mpa) | 15,6 | 15,5 | 15,5 | 16,2 |
| Eficiência térmica (%) | 33 | 32 | 36 | 33,9 |
| Combustível | Urânio | Urânio | Urânio | Urânio |
| Enriquecimento (%) | <5 | 4,8 | <5 | 4,79 |
| Vida útil (anos) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Ciclo Recarga (meses) | 18 | 18 | 24 | 18 |

Fonte: AIEA (2015).

Quadro 10 – Modelos de reatores evolucionários resfriados a água > 1.400 MWe

| Modelo | EPR | CAP-1400 | APR-1400 | APWR |
|-------------------------|--------|----------|---------------|------------|
| <i>Design</i> | Areva | SNCPC | KEPCO | Mitsubishi |
| País | França | China | Coreia do Sul | Japão |
| Tipo | PWR | PWR | PWR | PWR |
| Potência térmica (MWt) | 4.590 | 4.058 | 3.983 | 4.466 |
| Potência elétrica (MWe) | 1.750 | 1.500 | 1.400 | 1.540 |
| Temperatura (° C) | 312,6 | 304 | 307,2 | 307 |
| Pressão (Mpa) | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,4 |
| Eficiência térmica (%) | 36 | 34,5 | 35,1 | 34,4 |
| Combustível | Urânio | Urânio | Urânio | Urânio |
| Enriquecimento (%) | 4,95 | 4,95 | 4,09 | 4,5 |
| Vida útil (anos) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Ciclo Recarga (meses) | 24 | 18 | 18 | 24 |

Fonte: AIEA (2015).

Até 2015, os mais fortes concorrentes eram o AP-1000, da Westinghouse/Toshiba; o Atmea1, da Areva/Mitsubishi e o VVER-1200 da Rosatom russa, que já abriu um escritório no Rio de Janeiro, que comanda os projetos da empresa com a América Latina, assinou um acordo para a construção de usinas nucleares no Brasil com a construtora Camargo Correa em agosto de 2014. Mas também foi considerado o modelo chinês ACPR-1000.

O AP-1000 da Westinghouse/Toshiba (Estados Unidos/Japão) é um reator da terceira geração a água leve pressurizada, com 1.154 MWe de potência elétrica líquida, que utiliza urânio enriquecido como combustível. As principais vantagens são o sistema passivo de resfriamento, o projeto simplificado da planta, com relação à geração anterior e a construção modular, que permite ganho de tempo na construção (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015). As primeiras quatro unidades estão sendo construídas na China e outras quatro estão fase inicial de construção nos Estados Unidos. O reator foi selecionado

pela maioria das usinas planejadas nos Estados Unidos (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015).

Atmea é uma *joint-venture* da francesa Areva com a japonesa Mitsubishi. O Atmea 1 é um reator a água leve pressurizada com potência elétrica líquida de 1.100 MWe da geração III+. Assim como o EPR, permite o uso de vários tipos de combustíveis (UO₂ enriquecido até 5%, RU ou MOx). Seu ciclo de operação é flexível, entre 12 e 24 meses e a potência pode ser ajustada entre 1.100 MWe a 1.150 MWe (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015). Capaz de suportar abalos sísmicos, impactos provocados pela queda de um avião comercial e a probabilidade de danos ao núcleo é 10% menor que os modelos da segunda geração. Ainda não há reatores desse tipo em construção mas a agência reguladora francesa ASN (*Autorité de Sûreté Nucléaire*) certificou seus princípios de segurança (AREVA, 2014).

O AES-2006 (VVR-1200) é um reator do tipo PWR de terceira geração desenvolvido pela russa RosAtom, fruto da evolução dos reatores VVER (versão russa dos reatores PWR) fabricados pela mesma empresa. Seu principal diferencial é um sistema de remoção passiva de hidrogênio, diminuindo os riscos de explosão, em razão do aquecimento do núcleo. Existem cinco reatores desse modelo em construção, sendo duas unidades em Leningrado, duas unidades nos Países Bálticos e duas unidades na Bielorrússia. Baseados no mesmo projeto, outros dois modelos da RosAtom (o AES-91 e o MIR 1200) estão sendo construídos na China (dois AES-91) e na Checoslováquia (dois MIR 1200) (KOLCHINSKY, 2013).

O ACPR-1000 foi desenvolvido pela CGNPC (China Guangdong Nuclear Power Corporation), baseado no reator CPR-1000, cuja patente era da Areva. Os sistemas de segurança incorporaram os requisitos pós-Fukushima (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015). Estão sendo construídas três unidades na China.

Os estudos sobre a escolha da tecnologia de reatores estão sendo elaborados de forma sigilosa pela Eletronuclear. Mas se a escolha da localização das usinas tem impactos locais e regionais diretos a escolha da tecnologia de reatores pode afetar a soberania nacional, a depender do tipo de negociação com o fornecedor. Para o Nordeste e para a região do São

Francisco a tecnologia escolhida de reatores – até o escândalo da “Lava-Jato”¹⁴ envolvendo a construção de Angra 3 - não teria muita relevância. Se o Plano de Expansão Nuclear fosse implementado não haveria diferenças entre os reatores implantados no Nordeste ou em qualquer outra região.

A paralisação das obras de Angra 3 em outubro de 2015 por falta de verbas para sua finalização e a recusa de repasses por parte do governo federal para concluir a obra reabre a discussão sobre a participação do capital privado internacional na construção, operação - e financiamento - de usinas nucleares no país, atividades até então sob monopólio de Estado.

A flexibilização do monopólio para construção e operação de usinas nucleares com a possibilidade de participação de capital internacional não é uma ideia nova. Encontra-se em tramitação na Câmara dos Deputados, desde 2007, a PEC (Proposta de Emenda à Constituição) 122/2007 do ex-deputado Alfredo Kaefer, visando o fim do monopólio da União para a construção e operação de reatores nucleares. A flexibilização é desejada pelos dirigentes da Eletronuclear, interessados em atrair capitais estrangeiros para a construção das usinas nucleares no Brasil. Desejo este, compartilhado por empresas internacionais do setor elétrico e nuclear, como a estatal chinesa CNNC (*China National Nuclear Corporation*), a russa Rosatom e a francesa EDF, que pretendem além da construção e financiamento, participar na operação das usinas nucleares brasileiras.

A flexibilização ou o fim do monopólio modificaria completamente a escolha tecnológica dos reatores, cuja decisão está a cargo da Eletronuclear, com preferências pelo AP-1000 da Mitsubishi/Westinghouse, pois tanto a Rosatom quanto a CNNC projetam e constroem seus próprios modelos de reator do tipo PWR. A entrada de uma dessas empresas no mercado brasileiro de energia elétrica através do financiamento e operação de Angra 3 pode resultar na escolha de um reator russo ou chinês para as novas usinas a serem construídas no Nordeste.

¹⁴ Operação que investiga o desvio e a lavagem de dinheiro envolvendo dirigentes de empresas estatais, como Petrobras ou Eletronuclear.

4.5 ASPECTOS AMBIENTAIS

4.5.1 Os efeitos da radioatividade

Os efeitos da radioatividade no corpo humano são aqueles observados quando a radiação ionizante interage com o tecido vivo. Nessa interação ocorre transferência de energia, que pode provocar ionização e excitação dos átomos e modificações na estrutura das moléculas.

Há três tipos de efeitos:

- a) os físico-químicos, que acontecem instantaneamente;
- b) os biológicos, em intervalos de tempo que variam de minutos a anos; e
- c) os orgânicos, que são as doenças. A gravidade desses efeitos depende do tipo de radiação (alfa, beta e gama), da dose absorvida, da taxa de absorção e da radiosensibilidade dos tecidos.

A radiação alfa não consegue penetrar nem 0,1 mm da pele, mas sua inalação ou ingestão podem ser muito danosas; a radiação beta tem efeitos superficiais; a radiação gama, tem grande poder de penetração. A exposição pode ser externa ou interna. Esta última resulta da entrada de material radioativo no organismo por inalação, ingestão, ferimentos ou absorção pela pele. Os efeitos da radiação podem ser determinísticos, que resultam na morte celular ou estocásticos, que levam à transformação celular e não apresentam limiar de dose (AZEVEDO, [200-?]).

Os efeitos biológicos de uma exposição rápida são diferentes dos efeitos de uma exposição prolongada. No primeiro caso, a radiação provoca a morte celular e os efeitos se manifestam em algumas horas, dias ou semanas. No segundo caso, a exposição à radiação é melhor tolerada, pois parte das células lesionadas se auto-recupera. Doses fracas de radiação, incapazes de destruir células podem provocar mutações celulares cujos efeitos só serão observados anos depois. Uma mutação celular em células reprodutoras (germinativas), como espermatozoide ou óvulo, pode resultar no nascimento de uma criança portadora dessa mutação (AZEVEDO, [200-?]).

4.5.2 Riscos de exposição à radiação

Há controvérsias sobre o impacto da radioatividade emanada pelos efluentes de uma usina nuclear, pois os efeitos da radioatividade no longo prazo e em baixas doses são estocásticos, isto é, não há uma relação direta entre causa (exposição à radiação) e efeitos (câncer, mutações genéticas), apenas uma relação probabilística o que dificulta mensurar os verdadeiros impactos sobre a população circunvizinha.

A gravidade desses efeitos está relacionada com o tipo de radiação (alfa, beta e gama), com a dose absorvida, com a taxa de absorção, com o tipo de exposição (interna ou externa) e com a radio-sensibilidade dos tecidos. (AZEVEDO, [200-?]; CABRAL, 2012).

O temor dos riscos de contaminação radiativa incide apenas em certos usos da energia nuclear como a energia nucleoe elétrica, as bombas nucleares e o ciclo do combustível. No entanto, as fontes naturais são responsáveis pela maior parte da dose de radiação recebida pela população.

A dose individual média decorrente de fontes naturais representa 70%, enquanto a radiação resultante de fontes artificiais representa 30% da dose individual média de radiação recebida, das quais 0,006% decorrente da produção nucleoe elétrica (0,0002mSv¹⁵), 29,3% de diagnóstico médico (1,0 mSv), 0,06% ocupacional (0,002mSv) e 0,3% de explosões nucleares (0,1 mSv) (MAZZILLI; MÁDUAR; CAMPOS, [200-?] *apud* CABRAL, 2012).

Mesmo assim, a monitoração radiológica é necessária para detectar alterações anormais de radioatividade. No Rio de Janeiro, Eletronuclear desenvolve de um programa de monitoração ambiental permanente desde 1978 e dispõe de um Laboratório de Monitoração Ambiental, acompanhando os níveis de radiação nas regiões mais próximas da CNAAA, para o qual são coletadas regularmente amostras de água de chuva e ar e de ambiente marinho e terrestre cujos resultados, após análises laboratoriais, são comparados com os resultados do período pré-operacional de Angra 1 (ELETRONUCLEAR, 2014).

¹⁵ O Sievert é uma unidade de grandeza de dose equivalente. Corresponde ao antigo (rem) *roentgen equivalente man*. 1 rem corresponde a 10⁻²Sv.

O diagnóstico radiológico pré-operacional é de fundamental importância para avaliar os impactos de uma instalação nuclear, que variam segundo as condições do local. Em Caetité, a INB é constantemente condenada pela contaminação radiativa da água, em função da exploração de urânio. As cidades de Caetité e Lagoa Real encontram-se em uma região uranífera, onde são constatados índices de radioatividade mais altos que a média brasileira e, como uma análise radiológica pré-operacional não foi realizada, não há como provar se as alterações nos níveis de radioatividade decorrem da atividade da mineração ou das condições naturais da região (CABRAL, 2012).

A utilização de modelos computacionais para medir a qualidade da água pode servir para avaliar os impactos das descargas de efluentes de eventuais usinas a serem construídas no Sub-Médio ou no Baixo São Francisco na água, desde que existam medições pré-operação. Conhecendo-se a localização (e suas alternativas) da central nuclear a ser construída, o tipo e modelo de reator escolhido, o número previsto de usinas, as condições da região e o inventário de radionuclídeos liberado e seus limites de referência é possível simular o transporte e o destino dos radionuclídeos liberados (AGUIAR, 2011).

O IRSN (*Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire*) desenvolve na França pesquisas e disponibiliza *softwares* que permitem a modelização de situações de acidentes com liberação de radionuclídeos. Também mantém estações de observação, como o *Observatoire Permanent de la Radioactivité*, onde podem ser detectadas variações mínimas nos níveis de radionuclídeos (naturais e artificiais) na atmosfera e conhecer os mecanismos de transferências de modo a validar a modelização dos processos de transferência desses radionuclídeos e avaliar os impactos de descargas acidentais no meio ambiente e suas consequências para as atividades do homem (INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SURETÉ NUCLÉAIRE, 2014).

4.5.3 Impactos ambientais de uma usina nuclear em operação normal

Apesar dos riscos de acidentes inerentes à tecnologia nuclear, que não podem ser negligenciados, pouco se comenta sobre os impactos ambientais de uma usina nuclear em funcionamento normal.

A operação normal de usinas nucleares gera efluentes líquidos e gasosos, químicos e radioativos (além de rejeitos sólidos e combustível queimado de alta atividade), originários

de diferentes atividades, como manutenções, descontaminações, desativação de circuitos e mudanças na potência do reator. Em reatores refrigerados a água, como os PWRs, os efluentes gasosos radioativos são gerados, basicamente, no reservatório de controle dos desgaseificadores da cadeia de reciclagem do boro, enquanto que os líquidos resultam da filtragem de água do circuito primário. Os principais contaminantes são gases nobres, como o Xenônio (Xe) e o Kriptônio (Kr), outros produtos de fissão como o Césio 137 (^{137}Cs), o Estrôncio 90 (^{90}Sr) e o Trítio (^3H), além de produtos de corrosão, como Ferro (Fe), Cobalto (Co) e Manganês (Mn) (RADUAN, 1994). Esses efluentes são coletados, estocados e tratados, quando possível, sendo posteriormente descartados no ambiente (CABRAL; BARBOSA, 2014).

Dentre os elementos radioativos destacam-se o trítio (^3H), isótopo radioativo do hidrogênio, que emite radiação β (beta), com meia-vida de 12,3 anos, sem radiação gama associada; e o carbono 14 (^{14}C), emissor β , com meia-vida de 5.730 anos, ambos metabolizados pelos organismos vivos (SANCHES, 2001). Também a se considerar, outras substâncias químicas associadas a elementos radioativos como ácido bórico, hidrazinas, morfolina, fosfatos ou não associadas utilizadas nos tratamentos anti-incrustantes e biocidas (ELECTRICITÉ DE FRANCE, 2011).

No Brasil, os efluentes líquidos das usinas da CNAEA são lançados ao mar, permitindo uma diluição que minimiza seus impactos enquanto que os efluentes gasosos, são lançados por chaminés (ELETRONUCLEAR, 1998). Mas se os impactos dos efluentes são menos significativos quando lançados ao mar, esses impactos são maiores quando lançados em águas represadas e fluviais como as do rio São Francisco, agravados em situações de baixa afluência e baixo nível dos reservatórios.

Os limites da atividade de emissão de efluentes gasosos são determinados pela regulamentação de cada país. No Canadá, por exemplo, os limites variam para cada central nuclear. A atividade máxima da emissão gasosa de trítio vai de 130.000 TBq na central de Bruce-A a 440.000 TBq na central de Gentilly-2 e de Carbono-14 de 1.000 TBq em Bruce-A a 6.300 TBq em Pickering-A e Pickering-B. Esses limites anuais, são calculados em função da dose limite de 1mSv/ano, para a população em geral (COMMISSION CANADIENNE DE SURETÉ NUCLÉAIRE, 2012). Na França, os limites são estabelecidos por regulamentação, válidos para todos os reatores de um mesmo tipo e potência (GUIMARÃES, 2012). No Rio

de Janeiro, a Eletronuclear obedece as normas e diretrizes da Feema (Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente) e do Procon Água e a Resolução Conama 20, em seu artigo 20 (ELETRONUCLEAR, 2006), mas na Bahia, o Decreto nº 14.024, que regula a Lei 11.612 de 8 de outubro de 2009, não relaciona essas substâncias (^{14}C e ^3H) entre os poluentes (BAHIA, 2012). A Eletronuclear também segue normas de segurança internacionais limitando em 160 TBq a atividade do trítio e 2,2 TBq a de emissores $\beta - \gamma$ nos efluentes líquidos, baseado nos valores emitidos pelas centrais nucleares na França em 1989. A empresa estima que uma central nuclear com quatro reatores de 1.300MWe lance no ambiente apenas 45% do valor limite para o trítio e 6,5% para os radionuclídeos diferentes do trítio a exceção do potássio (^{40}K) e rádio (^{226}Ra) (GUIMARÃES, 2012). Os níveis de referência para a água do mar para ^3H , ^{60}Co e ^{137}Cs são, respectivamente $1,1 \times 10^6 \text{ Bq/m}^3$, $1,11 \times 10^4 \text{ Bq/m}^3$ e $1,85 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ (AGUIAR, 2011).

Estudos de simulação de dispersão de radionuclídeos (em grande parte de liberações atmosféricas) já foram realizados para usinas do CNAEA nas condições específicas da Baía da Ilha Grande, onde estão localizadas as usinas (AGUIAR, 2011). Seriam necessários estudos para aprofundar quais os impactos da emissão desses elementos na atmosfera, no curso de água e nas águas represadas, para o meio físico e biótico, e na saúde na bacia de um rio de usos múltiplos, como o rio São Francisco, que incluem irrigação, dessedentarização, pesca, e abastecimento urbano, e geração de energia elétrica e quais os limites aceitáveis, considerando as condições do local, anteriores à instalação da usina e adaptar a regulamentação da emissão de radioelementos específicos à atividade nucleoeletrônica. Além disso, o rio São Francisco possui várias hidrelétricas com seus respectivos reservatórios (CABRAL; BARBOSA, 2014).

Outro impacto nada desprezível é o aquecimento da água, em razão da liberação da água de resfriamento do reator, que a depender da temperatura ambiente, é expressivo. Na CNAEA, a descarga da água de resfriamento de Angra 1 e Angra 2 provoca um aumento da temperatura do mar em até $9 \text{ }^\circ\text{C}$ no verão (ELETRONUCLEAR, 1998). Esse impacto pode ser minimizado com a adoção de torres de resfriamento, em circuito fechado, que reduziria a vazão de descarga de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ para aproximadamente $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Esse sistema diminuiria o impacto na temperatura da água, no entanto, também diminuiria a eficiência energética do reator, que depende da temperatura da água de captação e da temperatura ambiente, além de

e elevar os custos de geração. Porém o principal inconveniente é que a água captada não é devolvida ao curso do rio, sendo o calor é liberado no ambiente em forma de vapor.

Na França, a regulamentação estabelece limites de variação de temperatura de descarga (depois da zona de mistura) que não podem ultrapassar 3 °C¹⁶ e limites para a temperatura da água em 28 °C, obrigando a usinas nucleares com circuito aberto de resfriamento a parar durante os períodos mais quentes (GUIMARÃES, 2010). No Brasil, a Resolução nº 430 do Conama limita a variação da temperatura do corpo receptor no limite da zona de mistura em 3 °C e a temperatura de descarga em 40 °C (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2011).

A adoção de torres de resfriamento reduz o impacto do aquecimento da água, mas eleva a emissão de efluentes gasosos químicos no processo de evaporação. Esse vapor emitido pode, por sua vez, mudar alguns aspectos do clima, modificando o regime dos ventos de baixa velocidade e favorecendo a formação de neblina, diminuindo conseqüentemente a radiação térmica (GUIMARÃES, 2012). O aquecimento da água não é um impacto exclusivo de usinas nucleares. As demais usinas térmicas com ciclo convencional de vapor provocam os mesmos impactos de aquecimento da água. Com eficiência térmica de cerca de 30%, o restante do calor é devolvido ao ambiente, seja em forma de vapor ou líquida.

No que concerne ao rio São Francisco, mesmo optando por torres de resfriamento, há de ser considerado o impacto no meio físico e no meio biótico das águas represadas do Sub-Médio e do Baixo São Francisco quando o nível dos reservatórios estiver baixo, ou – no caso da localização de usinas a jusante do reservatório de Xingó - com a defluência reduzida.

4.5.4 Água, energia nuclear e segurança

A primeira condição para manter a segurança de uma usina nuclear em operação é a disponibilidade de água em abundância. A falta de água para o resfriamento do reator é a principal causa de acidentes nucleares.

O baixo volume do rio São Francisco em 2014 e a prioridade para o abastecimento humano e dessedentação de animais, em detrimento de outros usos, preconizado pela Lei nº 9.433/97,

¹⁶ Para rios salmonídeos, a variação permitida do aquecimento é inferior a 1,5 °C.

permite a redução da vazão do rio, como ocorreu nesse ano, quando a ANA (Agência Nacional de Águas) reduziu a descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, para $1.100\text{m}^3/\text{s}$ (e posteriormente para $900\text{m}^3/\text{s}$) com a consequente queda na geração de energia hidrelétrica (CHESF, 2014). Todavia, se é possível adaptar a geração de energia hidrelétrica à oferta de água isso não ocorre na geração nuclear. A usina nuclear gera de forma constante e só é desligada para manutenção, em caso de acidentes ou incidentes que coloquem em risco a segurança, ou em paradas para recarga de combustível. Mesmo desligada, a usina nuclear demanda água para o resfriamento do núcleo e das piscinas de combustível usado. Questiona-se se haveria água suficiente para garantir a segurança de todas as usinas nucleares da central do Nordeste.

Os reservatórios instalados em cascata no rio São Francisco, em especial os três reservatórios de regularização (Três Maria, Sobradinho e Itaparica) permitem que a vazão natural do rio na foz se mantenha em $1.100\text{m}^3/\text{s}$ ao invés de $524\text{m}^3/\text{s}$, que seria a vazão natural do rio caso os reservatórios não existissem (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2014b), mas o contínuo assoreamento provoca uma série de alterações relacionadas com a deposição de sedimentos, que podem vir a afetar a tomada d'água dos sistemas de resfriamento das usinas nucleares ou causar enchentes prejudicando o funcionamento das usinas nucleares.

A segunda condição para manter a segurança de uma nuclear é dispor de fornecimento constante de eletricidade. De fonte externa ou alternativa, a eletricidade é indispensável para dar partida ao reator e para o funcionamento, desligamento e manutenção da segurança da usina enquanto estiver desligada (SANTOS, 2014). Uma interrupção de suprimento externo de energia elétrica pode resultar no desligamento do reator e acionamento de sistemas auxiliares, normalmente motores a diesel, que são limitados pela disponibilidade de combustível (em reatores de segunda geração como os PWR de Angra 1, 2 e 3). Uma interrupção no fornecimento de energia com duração superior à capacidade de prover energia elétrica oriunda de fontes alternativas pode colocar em risco a integridade do reator e, em caso de acidente com liberação de radioatividade, resultar no isolamento da área.

Os acidentes nucleares e o temor de que outros ocorram engendram uma série de inovações tecnológicas nos sistemas de segurança dos reatores. Se o fornecimento constante de eletricidade é uma condição necessária para garantir a segurança de um reator de segunda geração, sua importância decai (em caso de acidente) nos reatores de terceira geração e de

geração III⁺. A principal vantagem dos projetos da terceira geração é o sistema passivo de resfriamento, independentes dos sistemas motorizados e da eletricidade. O resfriamento em projetos de terceira geração serve-se de condições naturais de gravidade e de processos termodinâmicos. A introdução de sistemas passivos de segurança e de redundância permite que a usina, em caso de acidente, aumente o tempo de resposta para três dias, reduzindo a probabilidade de fusão do núcleo (WORLD-NUCLEAR, 2014). Um exemplo desse tipo de reatores é o AP-1000 da Westinghouse/Toshiba, que utiliza um sistema passivo de refrigeração e sistemas redundantes de segurança passiva, que não precisam de energia elétrica (ARAÚJO, 2009).

Do mesmo modo que a escolha da localização de uma usina nuclear é fundamental para assegurar água em abundância, necessária para garantir a segurança do reator, a escolha da tecnologia e do tipo de reator podem modificar a relação de dependência de eletricidade em situação de acidente ou incidente e mudar o modo como a implantação de uma termonuclear afeta o meio ambiente.

4.6 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

A implantação de usinas nucleares - assim como de qualquer obra de grande porte - gera não só impactos sobre o meio biótico mas, também, impactos no meio socioeconômico. Se a desocupação da população não é um impacto relevante na implantação de uma central nuclear em razão da pequena área do empreendimento, a migração de trabalhadores durante a construção é mais significativa, pois a construção de uma usina nuclear cria um grande número provisório de postos de trabalho. Segundo Costa (2012) foram empregados onze mil trabalhadores no pico da obra de Angra 1 e estima-se em nove mil postos de trabalho e vinte mil empregos indiretos para a construção de Angra 3 (MARIZ et al., 2012), Na fase de operação uma usina do porte de Angra 2 esse número cai para quinhentos postos de trabalho diretos e mil e quinhentos indiretos (GOVERNO DO RIO DE JANEIRO, 2014).

A explosão demográfica advinda da migração de trabalhadores provoca um aumento da pressão sobre os serviços de infraestrutura de saúde, transporte, educação e segurança pública, que precisam ser previamente estimados para equacionar seus efeitos, como ocorreu em Angra dos Reis, onde está instalada a CNAAA. A simples menção na mídia da retomada da construção de Angra 3 teve reflexos no fluxo migratório para a região. É certo que, com a

instalação de usinas nucleares, verificam-se também impactos positivos como a variação na arrecadação tributária, o desenvolvimento tecnológico e a variação de massa salarial, além de compensações socioambientais.

Um dos critérios para a escolha do município de Angra dos Reis, próximo à vila de Mambucaba – local inicialmente proposto para a construção a usina - foi a baixa densidade populacional da vila, à época, constituída de 600 habitantes. Sem a infraestrutura para abrigar o contingente de trabalhadores necessários para a construção da central, Furnas optou pela implantação de duas vilas residenciais para funcionários especializados (Vila Residencial de Praia Brava e Vila Residencial de Mambucaba) e dois conjuntos de alojamentos para operários das empresas de construção Vila Operária e Vila Consag) (Quadro 11) (PINHEIRO, 2010; ELETRONUCLEAR, 2014), mas como parte dessas instalações encontravam-se fora da área da CNAAA, o primeiro impacto a ser observado foi a especulação imobiliária e o loteamento de áreas antes consideradas rurais, modificando a estrutura local (PINHEIRO, 2010).

Quadro 11 – Vilas residenciais da Eletronuclear

| Equipamentos e moradias | Praia Brava | Mambucaba | Operária | CONSAG |
|--|-------------|-----------|----------|--------|
| Residências | 540 | 481 | 201 | 150 |
| Flats | | 72 | | |
| Suítes | 6 | | 84 | |
| Apartamentos | 69 | | | |
| Quartos | 31 | | 283 | |
| Leitos em repúblicas | | | 34 | |
| Escolas | 1 | 3 | | |
| Creches | 1 | 2 | | |
| Clubes | 2 | 1 | | |
| Campos de futebol | | 2 | | |
| Quadras poliesportivas | | 3 | | |
| Centro comercial | 1 | 3 | | 1 |
| Hospital | 1 | | | |
| Unidade médica da FEAM | | 1 | | |
| Centro de medicina de radiações ionizantes | | | 1 | |
| Restaurante | | | 1 | 1 |
| Churrasqueira | | | | 1 |
| Cine teatro | 1 | | | |
| Corpo de Bombeiros | | | 1 | |
| Centro ecumênico | 1 | 1 | | |
| Laboratório de monitoração ambiental | | 1 | | |
| Centro de treinamento com simulador | | 1 | | |

Fonte: Eletronuclear (2014).

Não se pode atribuir todos os impactos socioeconômicos em Angra dos Reis apenas à construção das usinas nucleares. Em razão da sua localização, entre as cidades de Santos e do

Rio de Janeiro, e do seu porto, Angra dos Reis participou de importantes movimentos econômicos ao longo de sua existência, como do ciclo da cana-de-açúcar, do tráfico de escravos, do ciclo do ouro e da economia cafeeira. Em meados do século XIX, no entanto, entrou em processo de estagnação, com a ampliação da estrada de ferro Pedro II, quando perdeu sua função portuária e foi excluída das rotas comerciais.

A construção da ligação ferroviária Angra dos Reis-Barra Mansa (RODRIGUEZ, 2004), ligando Angra dos Reis ao Vale do Paraíba e as obras do Porto de Angra, deram um novo impulso na economia local. Mais tarde, a construção do estaleiro Verlome, inaugurado em 1959, do Terminal Petrolífero da Baía de Ilha Grande (1974-1979) e da rodovia Rio-Santos nos anos setenta foram, juntamente com a construção de Angra 1 e Angra 2, responsáveis pela migração de trabalhadores para a região.

Será, portanto, difícil contabilizar os impactos isolados da implantação de usinas nucleares no Sub-Médio ou no Baixo São Francisco. Trata-se de uma região com uma dinâmica própria, cujo desenvolvimento está ligado ao represamento do rio São Francisco (Sobradinho, Itaparica, Xingó) e a construção de hidrelétricas em décadas anteriores. Esses investimentos federais de infraestrutura em irrigação e geração de energia elétrica permitiram a implantação de perímetros irrigados, que contribuíram para o desenvolvimento regional (CODEVASF, 2010).

Assim como ocorreu com a CNAAA, a baixa densidade populacional é também um critério para a escolha da localização da central do Nordeste, mas diferentemente de Angra, não se cogita a construção de moradias para os trabalhadores e sim aproveitar a infraestrutura disponível em cidades vizinhas como Petrolina e Juazeiro, para abrigá-los.

Cria-se então uma contradição entre as vantagens da baixa densidade demográfica para a localização de uma central nuclear e a explosão demográfica decorrente da construção da obra, que deverá ser gerida pelas autoridades locais uma vez decidida a implantação de usinas na região.

O plano inicial era a construção de uma central nuclear com capacidade de abrigar seis usinas nucleares, construídas duas a duas, com intervalo de um ano e meio. Supondo o tempo médio de construção de uma usina nuclear com reator do tipo PWR e potência de 1.000 MW em

sessenta e seis meses (GALLINARO, 2011) construídas em sequência, a permanência de trabalhadores especializados, como maior poder de compra, na região se estenderia em pelo menos 189 meses, ou seja, aproximadamente quize anos, tempo suficiente para modificar a dinâmica local.

A construção de usinas nucleares no Sub-Médio São Francisco não causará impacto direto sobre o emprego da população local a curto prazo. A mão de obra necessária é extremamente especializada (Quadro 12) e forçará uma migração de trabalhadores para a região pelo menos para a construção da primeira usina. O aumento da renda local devido a maiores salários dos trabalhadores contribuirá com um aumento da demanda de serviços e produtos existentes sobrecarregando os serviços de infraestrutura.

Quadro 12 – Perfil da mão de obra requerida para Angra 3

| | Local ¹ | Nacional | Internacional |
|--|---|---|--|
| Construção civil | Carpinteiros, pedreiros, montadores de andaimes, armadores, ajudantes | | |
| Montagem dos equipamentos | | Eletricistas, montadores, instrumentistas, encanadores, ajudantes, pintores | |
| Comissionamento de equipamento de sistemas | | | Suporte técnico de serviços específicos, supervisão de montagem e engenharia |
| Operação | | Operadores, mecânicos, eletricistas, instrumentistas, químicos, engenheiros e físicos | |

Nota: ¹ Com experiência na construção de usinas anteriores

Fonte: Eletronuclear (2016).

4.7 CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA NUCLEAR

Por serem intensivos em capital, os investimentos para a implantação de uma usina nuclear são importantes na composição do preço da energia elétrica gerada por essa fonte, porém não se sabe ao certo o verdadeiro custo de uma usina nuclear. Segundo Lovering, Yip & Nordhaus (2016), a literatura existente versa apenas sobre os custos das usinas nucleares na França e nos Estados Unidos nas décadas de 1970 e 1980 e as estimativas atuais são projeções desses custos. Para Atalla (2009c), há números para todos os gostos. O autor decompõe o custo total de uma construção nuclear em:

- a) custo EPC *overnight* (à vista);
- b) custo do proprietário, que é o EPC acrescido dos custos com os estudos de seleção do sítio, aquisição do terreno, licenciamento, infraestrutura, como tomadas e descargas de água e conexão à rede elétrica de transmissão;
- c) juros durante a construção (que podem chegar a 40% do custo total para uma obra de 5 anos);
- d) custos de materiais e serviços;
- e) custos de contingência e
- f) inflação.

e demonstra como a manipulação dos dados explica a discrepância nos custos de uma usina nuclear a depender do interlocutor.

Atalla (2009c), contudo, não cita os custos Foake (*First-Of-A-Kind-Engineering*), que representam uma compensação pelo custo do desenvolvimento tecnológico e que incide particularmente na primeira de uma série de usinas do mesmo tipo, podendo representar até 30% a mais no preço do primeiro reator a ser adquirido (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007). Os custos Foake explicam a tendência da Eletronuclear (empresa de economia mista responsável pela construção e operação de usinas nucleares, em optar por um único modelo de reator para equipar suas usinas, ao invés de diversificar os fornecedores.

No Brasil, a Eletronuclear, já arcou com parte dos custos de proprietário. Os estudos de localização dos sítios nucleares do plano de expansão custaram 4 milhões de reais (ELETRONUCLEAR, 2016).

Para a Eletronuclear (2016) uma usina nuclear com potência instalada de 1.350 MW (Angra 3) custa 5 bilhões de reais *overnight* (à vista), mais os juros de 15 anos. A empresa avalia que o tempo de retorno do capital investido na implantação de Angra 3, por exemplo, seria de 16,5 anos, considerando uma Taxa Interna de Retorno do acionista em 9,58%. A mesma empresa, em 2008, avaliou em 7,2 bilhões de reais os custos para a finalização da mesma usina.

A construção de Angra 3 ficou paralisada por mais de vinte anos, com um custo de manutenção do canteiro e estocagem dos equipamentos adquiridos no início da construção avaliado em vinte milhões de reais por ano. Com a retomada da construção de Angra 3, em 2010, os custos de aquisição, manutenção e dívidas foram considerados a fundo perdido. A Tabela 8 abaixo, detalha o orçamento estimado para finalização da usina naquele ano.

Tabela 8 – Angra 3. Orçamento estimativo (base: junho-2010)

| Etapas | montante (em milhões de reais) | Empresa |
|-------------------------------|---|-------------------|
| Licenciamento | 10 | |
| Compensações sócio-ambientais | 352,1 | |
| Engenharia nacional | 439,5 | |
| Engenharia estrangeira | 758,3 | |
| Suprimentos nacionais | 1.612,3 | |
| Suprimentos estrangeiros | 2.224,6 | Areva |
| Construção civil | 1.514,8 | Andrade Gutierrez |
| Montagem eletromecânica | 1.447,4 | |
| Despesas pré-operacionais | 19,9 | |
| Outras Despesas | 302,5 | |
| Reserva de contingência | 606,3 | |
| Carga inicial de combustível | 662,4 | |
| Total | 9.950,1 | |

Fonte: Travassos (2010).

Em junho de 2015, o total orçado para o empreendimento montava a aproximadamente a 17,03 bilhões a preços correntes. Os atrasos no tempo de construção devido a paralisações são responsáveis por uma grande parcela do aumento no custo da implantação de uma usina nuclear. Porém, além dos custos de implantação existem custos que não são contabilizados

pelas empresas construtoras e operadoras e que acabam sendo arcados pela sociedade civil, como os danos causados por um acidente nuclear, por exemplo.

Do ponto de vista econômico, há de se reter, que a indústria nuclear, à diferença de outras tecnologias não se beneficia de ganhos de escala, devido ao número reduzido de construções. Até 28 de março de 2016, foram construídas apenas 599 usinas nucleares no mundo das quais 442 são consideradas operacionais e 157 foram desativadas permanentemente, que juntamente com as 66 usinas em construção perfazem 665 unidades (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2016), como tampouco há ganhos de aprendizagem, pois sujeitas a normas de segurança cada vez mais exigentes, as usinas nucleares tornam-se cada vez mais caras (LÉVÊQUE, 2013). O autor compara a competitividade da energia nuclear frente a outras energias renováveis [como a eólica] onde o custo diminui com ganhos de escala e curva de aprendizagem.

A indústria nuclear tem procurado contornar a perda de competitividade com um esforço para ganhar economia de escala propondo reatores modulares e/ou de pequeno porte, uma tendência no mercado de reatores, de modo a reduzir o tempo e os custos de construção.

Uma das propostas para encurtar o tempo de implantação de uma usina nuclear é a simplificação do licenciamento. A Westinghouse/Toshiba (assim como a GE-Hitachi, para o ABWR) pretende que o Brasil adquira a usina com o projeto pré-licenciado, permitindo a fabricação dos componentes paralelamente à concretagem dos prédios “nucleares” no sítio, reduzindo assim o tempo de construção (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2015), mas contrariando o licenciamento atual brasileiro, que além do licenciamento da CNEN, exige o licenciamento do Ibama (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), com um processo mais longo de avaliação (OLIVEIRA, 2014).

O licenciamento ambiental do Ibama de uma usina nuclear pressupõe:

- a) a descrição do empreendimento;
- b) a elaboração do Termo de Referência;
- c) um estudo ambiental (EIA/Rima), que será avaliado pelo Ibama;

- d) a manifestação da sociedade a partir de audiências públicas, onde serão elencadas as condicionantes para a obtenção da Licença Prévia;
- e) o atendimento às condicionantes para a obtenção da Licença de Instalação;
- f) e após a construção da usina, a obtenção da Licença de Operação (OLIVEIRA, 2014).

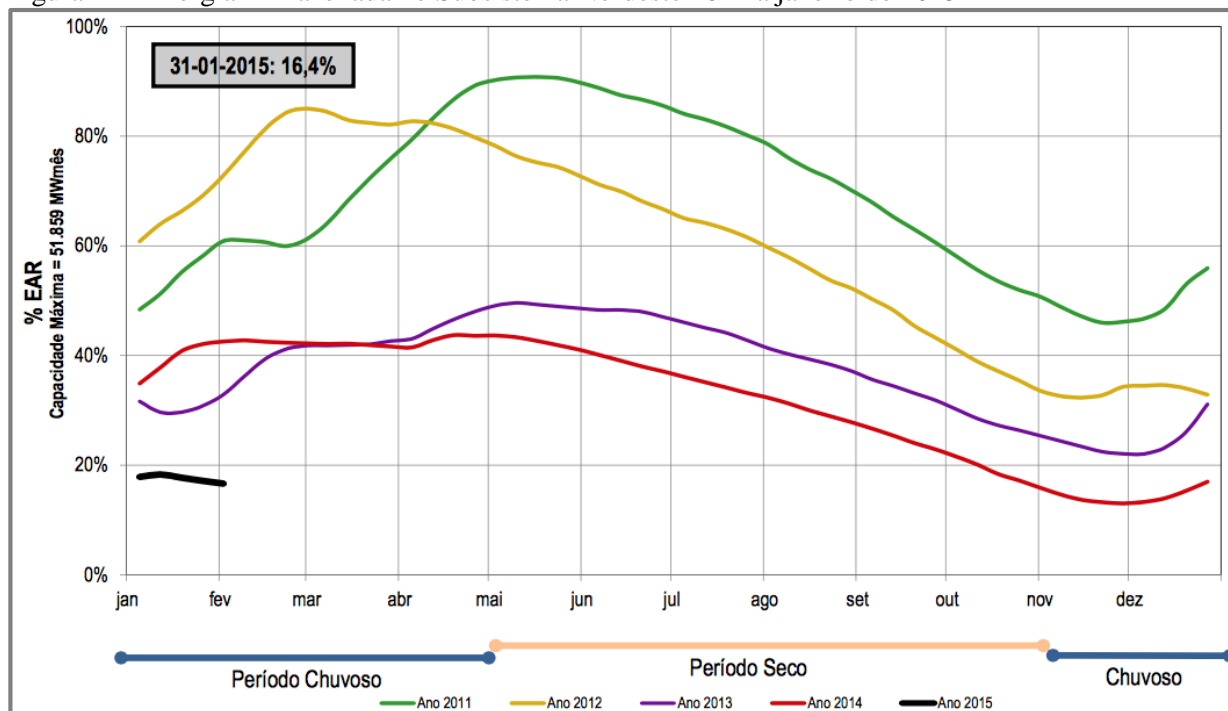
O longo processo de licenciamento, se por um lado, contribui para garantir “que a localização, construção e operação da usina nuclear não acarretará riscos para os trabalhadores, a população e o meio ambiente” (OLIVEIRA, 2014, slide 10), por outro encarece os investimentos de capital, sobretudo os custos financeiros.

A alta do dólar e a crise econômica encareceram o custo da implantação de usinas nucleares no Brasil, tanto no que concerne o custo *overnight*, quanto os juros e a inflação. A Eletronuclear enfrenta problemas financeiros para arcar com a finalização de Angra 3 e nas condições atuais não poderia prosseguir com seu plano de expansão, sem a participação do capital privado internacional.

4.7.3 Aspectos operacionais do subsistema Nordeste

As condições hidrológicas desfavoráveis desde 2012 vem diminuindo a energia armazenada nos reservatórios da Região Nordeste, que atingiu 5,06 % ao final do mês de novembro de 2015 e não consegue se recuperar nos períodos chuvosos. As mudanças climáticas afetam progressivamente a energia armazenada que diminuiu mais de 25% em relação a janeiro de 2001. Essa tendência é verificada em todos os subsistemas do SIN (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015) (Figura 19).

Figura 21 - Energia Armazenada no Subsistema Nordeste 2012 a janeiro de 2015



Fonte: Ministério de Minas e Energia (2015).

As baixas aflúências do rio São Francisco e a defluência reduzida, que afeta a geração hidráulica, obrigam o Subsistema Nordeste a importar energia dos Subsistemas N (Norte) e SE/CO (Sudeste/Centro Oeste), respeitando os limites de cargas das linhas de transmissão de 1.000 MW, do Sudeste para o Nordeste e de 3.300 MW, do Norte para o Nordeste (TOLMASQUIM, 2014) e as perdas técnicas, de modo a satisfazer a demanda de energia elétrica.

Em 2015, as importações do Subsistema Nordeste totalizaram 13.168,97 GWh, sendo 7.581,93 GWh do Subsistema N e 5.587,02 GWh da Região SE/CO, acima dos valores registrados em 2014 (12.140,22 GWh, sendo 2.529,28 GWh do SE/CO e 8.113,77 GWh do Subsistema N) (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2016).

A simplificação dos modelos computacionais usados pelo ONS para o planejamento da operação, que desconsideram várias restrições reais do sistema elétrico¹⁸, assim como o modelo de previsões de aflúências da região Nordeste, que superestima a quantidade de água

¹⁸ Restrições individuais e cascata hídrica e restrições de transmissão e segurança (STREET, 2015).

que chega na região afetam o planejamento do uso da água aumentando os riscos da operação do SIN (STREET, 2015) e a dependência do Subsistema Nordeste.

O expressivo crescimento da oferta de energia eólica no Nordeste, que passou de 2.954,22 GWh em 2013 para 15.694,08 GWh, em 2015, que correspondeu a 959,92 GWh a mais do que geraram juntas Angra 1 e 2 no mesmo período (14.734,16 GWh) (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, 2016), diminuiu um pouco a pressão sobre uso de hidroeletricidade, porém, além dos problemas relacionados ao atraso das linhas de transmissão¹⁹, a energia eólica tem limitações como a aleatoriedade dos ventos para o qual ainda não há estudos conclusivos que cubram períodos de vinte anos, que correspondem ao período operativo de um empreendimento eólico, assim como tampouco há estudos sobre os impactos dessa tecnologia no regime dos ventos, no longo prazo.

Embora haja uma complementariedade da sazonalidade eólica com a hídrica, restam os problemas da variabilidade da produção ao longo do dia e da dispersão da geração (também presentes na geração fotovoltaica). A variabilidade da produção de energia elétrica ao longo do dia é um dado a ser considerado ao se propor injetar blocos razoáveis de energia na rede de origem termonuclear - que pode chegar a 6.000 MW - devido à classificação das usinas term nucleares como inflexíveis no país²⁰. A inflexibilidade das usinas foi uma escolha operacional que se baseava na disponibilidade de unidades hidráulicas para realizar o controle de geração (FONSECA, 2006), que estão atualmente sendo compensadas com o despacho de térmicas, emissoras de CO₂ e intercâmbios regionais.

Do ponto de vista de segurança do sistema elétrico, a inserção de crescentes volumes de energia eólica e a introdução gradativa da energia solar no Subsistema Nordeste, nos últimos anos, demanda maior flexibilidade operativa para mitigar os efeitos da intermitência dessas fontes, que as usinas nucleares não oferecem. Com pouca capacidade de modulação de carga e operação em carga parcial as usinas nucleares contribuiriam para reduzir a perda de regularização dos reservatórios com energia de base, mas ainda seria necessário o despacho de usinas com atributos dinâmicos. Nessas condições, a implantação de usinas nucleares no Nordeste não evitaria o acionamento de usinas térmicas flexíveis, emissoras de CO₂, ou os

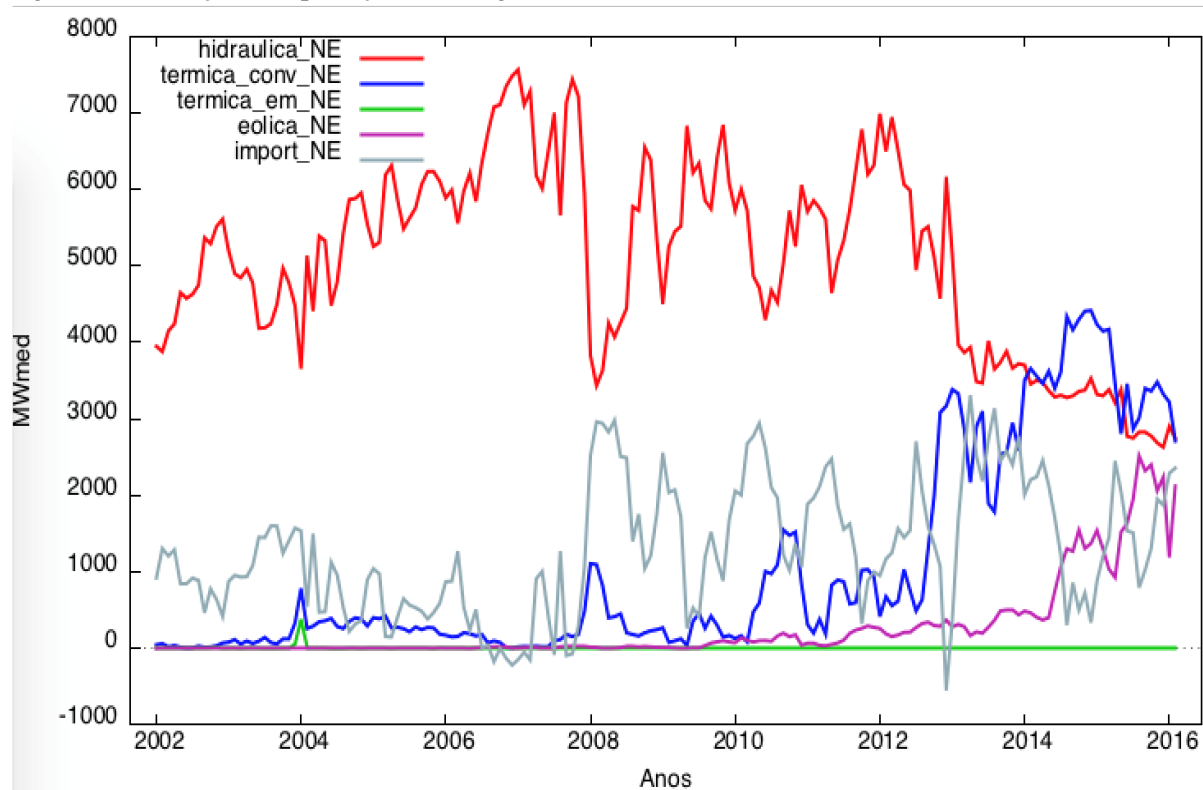
¹⁹ Que está sendo regularizada aos poucos.

²⁰ Que gira em torno de 80% para Angra 1 e Angra 2.

intercâmbios entre as regiões - outro modo de flexibilizar a operação - com as perdas relacionadas ao transporte e os riscos de falhas de equipamentos ou eventos da natureza (CAVADOS, 2015).

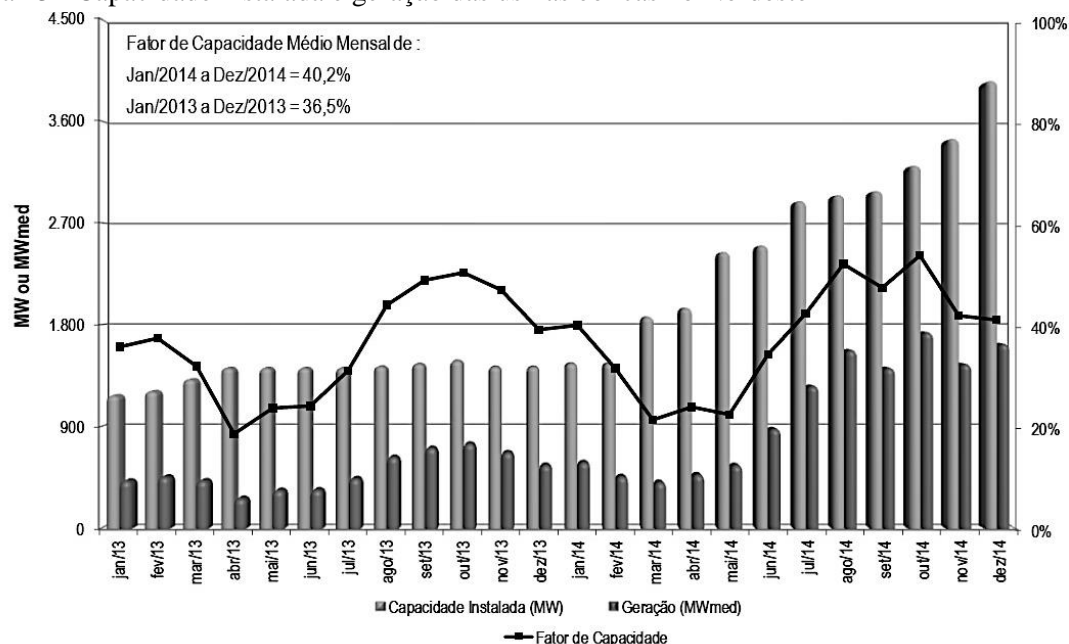
Apesar do significativo crescimento da geração eólica (Figura 20), a participação dessa fonte na geração de energia elétrica no Subsistema Nordeste, em 2015, representou 7,8% da geração total daquele ano, contra 49% da térmica e 43,3% da hidráulica, dada as diferenças nos fatores de capacidade das fontes (Figura 21).

Figura 22 - Geração e importação de energia elétrica no Subsistema Nordeste de 2002 a fev. 2016



Fonte: Elaboração própria, Dados: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2016).

Figura 23 - Capacidade instalada e geração das usinas eólicas no Nordeste



Fonte: MME (2015).

Espera-se, no entanto, um aumento da capacidade instalada em 42,69%, na região eletrogeográfica Nordeste, quando as 119 usinas em construção entrarem em operação (Tabela 9) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016), o que dará maior instabilidade ao sistema.

Tabela 9 – Usinas eólicas em operação e em construção por região eletro-geográfica em 27/03/2016

| Região eletro-geográfica | Nº de usinas em operação (unidades) | Potência outorgada (kW) | Nº de usinas em construção (unidades) | Potência outorgada (kW) |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| NE | 263 | 6.690.171,24 | 119 | 2.856.154 |
| N | 1 | 22,5 | 0 | 0 |
| S | 82 | 1814866,48 | 13 | 257.600 |
| SE/CO | 3 | 28.208 | 0 | 0 |
| Brasil | 349 | 8.533.268,22 | 132 | 3.113.754 |

Fonte: Aneel (2016).

Do mesmo modo que a eólica, outras fontes renováveis como a solar ou a biomassa têm surgido como opções à queima de combustíveis fósseis para gerar eletricidade mas, se do ponto de vista ambiental essas fontes auxiliam no controle da emissão de Gases de Efeito Estufa, nenhuma delas gera energia de forma constante, considerando que a maioria das

usinas térmicas a biomassa, na região eletro-geográfica Nordeste, são movidas a bagaço e palha de cana, cuja produção depende da sazonalidade da safra da cana de açúcar.

O uso de fontes alternativas, como o hidrogênio em células de combustível produzido, seja a partir da reforma do etanol ou do gás natural ou pela eletrólise da água usando a energia hidrelétrica não utilizada fora das horas de pico (CHESF, 2014), ainda encontra-se em estudo e longe de alcançar escala comercial.

A introdução de fontes alternativas intermitentes juntamente com a crise hídrica, que afetou o complexo hidrelétrico do rio São Francisco, modificou as condições favoráveis anteriores para a inserção de energia de origem termonuclear na região. Empreendimento de longa maturação (no mínimo oito anos, desde a decisão em construir até a entrada em operação comercial) e intensivo em capital, a energia nuclear cedeu lugar a outras fontes como a eólica, de construção menos complexa, mais rápida e mais barata.

A opção do planejamento energético em reforçar os intercâmbios inter-sistemas de modo a regular a flutuação da carga, intensificada pelo volume de energia intermitente, adiou a necessidade de implantar usinas nucleares no Nordeste. Considerando a perda global da capacidade de armazenamento do SIN, a implantação de usinas nucleares no Brasil ainda deve ser considerada, contribuindo para aumentar a energia de base no sistema elétrico como um todo, preferencialmente em subsistemas como o Sudeste/Centro Oeste.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O plano que previa a construção da Central Nuclear do Nordeste foi elaborado em uma época (entre 2004 e 2007) em que o Brasil e o Nordeste passavam por um ciclo de expansão econômica, que justificava novos investimentos em energia elétrica.

No âmbito internacional, a disparada dos preços do urânio em 2005 devido à proximidade do fim do acordo entre Rússia e Estados Unidos de recuperação de urânio altamente enriquecido de ogivas nucleares para abastecer usinas nucleares, o aumento da demanda de energéticos pela China e a inundação da mina de urânio de Cigar Lake (segundo maior depósito mundial de urânio de alto teor) em 2006, no Canadá, favoreciam a expansão da exploração nacional de urânio, limitada constitucionalmente pela demanda interna, reduzida a duas únicas usinas nucleares.

Internamente, a energia nuclear surgia como uma questão de segurança nacional. A retomada do Programa Nuclear Brasileiro contemplava a expansão da participação da energia nuclear na matriz de energia elétrica brasileira, a construção do submarino nuclear e o desenvolvimento em escala industrial do ciclo do combustível nuclear com todas as etapas nacionalizadas e o incentivo ao desenvolvimento tecnológico em outras áreas como medicina, indústria ou agricultura.

As margens do rio São Francisco banhadas por um rio de águas aparentemente inesgotáveis, com áreas pouco povoadas, opções de terreno não acidentado, próximos a linhas de transmissão de alta tensão e estrategicamente localizados entre grandes centros consumidores, pareciam ideais para a construção da Central do Nordeste.

A introdução de energia elétrica de origem termonuclear no subsistema Nordeste compensaria a perda de capacidade de regularização do sistema São Francisco, contribuindo com energia firme necessária para diminuir a dependência de importação de energia elétrica de outros subsistemas ou o despacho de térmicas emissoras de CO₂.

Essas condições favoráveis foram deteriorando-se ao longo dos anos por sucessivos incidentes. Em meados de 2007, a queda abrupta dos preços de urânio – com o anúncio de que o acordo de desarmamento nuclear iria continuar inundando o mercado de urânio

enriquecido de origem secundária, mais barato - inviabilizou a retomada de prospecções de novos depósitos e a exploração de já existentes de urânio e o interesse internacional em uma eventual exportação de urânio brasileiro; em 2008, a crise econômico financeira iniciada nos Estados Unidos atingiu a economia mundial afetando os investimentos no setor nuclear; em 2011, o acidente de Fukushima arrefeceu a expansão da geração nucleoeletrica e encareceu a construção de usinas nucleares, que incorporaram novos dispositivos de segurança.

O acidente de Fukushima e a crise econômico financeira concorreram com adiamento da implantação de um parque termonuclear no Nordeste, e favoreceram a expansão da energia eólica na região. A entrada dessa fonte intermitente no subsistema Nordeste, demandou uma maior flexibilidade operativa, que as usinas nucleares não poderiam suprir, relegando os planos de expansão nuclear nesse subsistema.

Entre 2012 e 2016, a crise hídrica que atingiu as regiões Nordeste e Sudeste colocou em dúvida a perenidade do rio São Francisco, cujas águas garantiriam a segurança das usinas. Em 2016, a alta dos preços da energia elétrica e a crise econômica reduziram drasticamente as previsões de aumento do consumo de energia elétrica na região, que juntamente com a alta do dólar inviabilizaram, a curto prazo, a aquisição de novas usinas nucleares. Por último, a corrupção revelada envolvendo membros dos Poderes Legislativo e Executivo, que atingiu inclusive a construção de Angra 3 afetou a credibilidade do setor.

A crise hídrica que se arrastou por quatro anos revelou a fragilidade ambiental da bacia do Rio São Francisco e alertou para a importância de outros usos consuntivos da água, sobretudo da água potável. O aquecimento da água do sistema de resfriamento em circuito aberto no ponto de descarga traria impactos diretos na qualidade da água e poderia prejudicar atividades econômicas como a pesca ou a piscicultura, sem mencionar o risco de descargas radiativas. O uso de torres de resfriamento, que reduziria a captação de água em seis vezes apresenta o inconveniente de que a água não retorna ao curso do rio senão que é liberada ao ambiente em forma de vapor (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2016).

O Brasil possui recursos energéticos suficientes adiar a expansão do parque nucleoeletrico, porém, a implantação de usinas nucleares no Brasil, hoje, é de fundamental importância para preservar o conhecimento tecnológico adquirido na área nuclear e sustentar atividades como a

mineração e beneficiamento de urânio, conquanto a aquisição de usinas estrangeiras preveja transferência tecnológica.

O Brasil não dispõe de um reator de potência nacional para ser aproveitado, no curto e médio prazos em um plano de expansão termonuclear e é obrigado a adquirir reatores com tecnologia estrangeira. Dentre os diferentes tipos de reatores, há uma preferência mundial pelos reatores refrigerados a água leve, do tipo PWR.

Para o Nordeste, a implantação de empreendimentos termonucleares na região teria poucos impactos no desenvolvimento regional, uma vez que todas as atividades da indústria nuclear de maior valor agregado estão localizadas no Sudeste do país.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, **Aproveitamento do potencial hidráulico para geração de energia**. Brasília: ANA, 2005.

_____. **Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Rio São Francisco**. Brasília, v. 11, n. 2, p. 1-15, fev. 2016.

_____. **Região Hidrográfica do São Francisco**. Disponível em: <www.ana.gov.br>. Acesso em: 24 maio 2014a.

_____. **Nota sobre a situação do rio São Francisco**. 2014b. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=12545>. Acesso em: 28 mar. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 2 mar. 2016.

_____. **Estudo da vida útil econômica e taxa de depreciação**. Brasília: Aneel, 2000.

AGUIAR, A. S. de. **Avaliação do impacto de acidente com liberação do refrigerante de reator PWR: estudo de caso Angra 3**. 2011. Dissertação (Mestrado)-IEN, Rio de Janeiro, 2011.

ARAÚJO, R. de O. P. de. **Metodologia para estudos de circulação natural em circuitos fechados**. 2009. Dissertação (Mestrado)-IEN, Rio de Janeiro, 2009.

AREVA. **The Reactors & Services Business Group**. Disponível em: <<http://www.areva.com/EN/operations-1669/reactors-services-nuclear-reactors-power-plant-services.html>>. Acesso: 13 maio 2014.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **History of Argonne Reactor Operation**. Disponível em: <<http://www.ne.anl.gov/About/reactors/History-of-Argonne-Reactor-Operations.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2015.

ATALLA, D. Energia nuclear: Oportunidades, riscos e desafios. Apresentação de slides. In: LAS/ASN SYMPOSIUM 2009. Rio de Janeiro: Eletronuclear, 2009a.

_____. **Os custos da construção nuclear**. São Paulo: DCI, 2009b.

_____. **Usinas nucleoeletricas**. Escolha de local. Rio de Janeiro: Abdan, 2009c.

AZEVEDO, A. C. P. de. **Radioproteção em serviços de saúde**. Rio de Janeiro: Fiocruz, [200-?].

BANDEIRA, Luiz Alberto Moniz. **As relações perigosas: Brasil - Estados Unidos**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2004.

BARROSO, D. E. G.. **A física dos explosivos nucleares**. São Paulo: Livraria da Física, 2009.

BONFIETTI, G. **Análise da confiabilidade do sistema de suprimento de energia elétrica de emergência de um reator nuclear de pequeno porte**. 2003. Dissertação (Mestrado)-USP, São Paulo, 2003.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/ConstituicaoCompilado.htm>. Acesso em: 2 abr. 2015.

_____. Lei nº 10.308, de 20 de novembro de 2001. Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências. Brasília: **Diário Oficial da União**, 2001.

CABRAL, A. D. **Rumo a uma nova percepção dos riscos nucleares**. 2012. Dissertação (Mestrado)- UFRB, Cachoeira, 2012.

CABRAL, A.; BARBOSA, D.. Reflexões sobre a implantação de usinas nucleares no rio São Francisco. **Revista Eletrônica de Energia**, Salvador: Unifacs, v.4, n. 1, 2014, 2014.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Mecanismo de Realocação de Energia - MRE**. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/mre_contab?_afLoop=1019972747321632#%40%3F_afrLoop%3D1019972747321632%26_adf.ctrl-state%3D14qffhd4ww_4>. Acesso em: 15 ago. 2015.

CANDU OWNER GROUP INC.. **Candu Reactors**. Disponível em: <http://www.candu.org/candu_reactors.html>. Acesso em: 2 mar. 2016.

CARAJILESCOV, P.. Energia nuclear. Apresentação. In: RIO, capital da energia. Rio de Janeiro, mar. 2014.

CARDOSO, E. *et al.*. **Aplicações da energia nuclear**. [2006]. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/aplica.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2014.

CARVALHO, C. E. C; GODIM FILHO, J.; SUGAI, M. R. V. B.. **Aproveitamento do potencial hidráulico para a geração de energia elétrica na bacia do rio São Francisco**. Brasília: ANA/GEF/PUNUMA/OEA, 2004.

CAVADOS, G. de A.. **Análise do impacto da introdução das fontes intermitentes no setor elétrico brasileiro**: estudo de caso da região Nordeste. 2015. Dissertação. (Mestrado)- Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Livro Azul. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 4., 2010, Brasília. **Anais...** Brasília: CGEE, 2010.

CHIPP, H.. ONS, o Operador Nacional do Sistema Interligado Nacional brasileiro. In: SEMINÁRIO DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA COLÔMBIA-BRASIL, 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2010.

CISNEIROS, S.. Estratégias conceituais da operação do Sistema Interligado Nacional. **O setor elétrico**, ed. 110, mar. 2015. Disponível em: <<http://www.osetoelettrico.com.br/web/a-revista/edicoes/1632-estrategias-conceituais-da-operacao-do-sistema-interligado-nacional.html>>. Acesso em: 14 ago. 2015.

CODEVASF. **Perímetros irrigados**. 2010. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br/principal/perimetros-irrigados>>. Acesso em: 30 out. 2014.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Energia Nuclear**. [2006]. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/ensino/energ-nuc.asp>>. Acesso em: 19 maio 2014.

_____. Gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. Norma CNEN NE 6.05 **D.O.U**, 17 dez. 1985.

_____. Descomissionamento de usinas nucleoeletricas. Resolução 133/12. **D.O.U**, 21 nov. 2012.

_____. Normas para escolha de Locais para Instalação de Reatores de Potência – Resolução CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear – 09/69 –**D.O.U**. 31 jul. 1969. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/mostra-norma.asp?op=169>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

DANTAS, V. A.. **Proposta de avaliação para sítios nucleares através da análise geoespacial de critérios de transporte**. 2011. Dissertação (Mestrado)- UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

DEGNAN, P.. A Global Perspective on Prospects & Challenges for the Development and Deployment of SMRs. In: LAS/ANS SYMPOSIUM, 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** 23 jul. 2014.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Siting Guide: Site Selection and Evaluation Criteria for Early Site permit Application**. Palo Alto: EPRI, 2002.

ELECTRICITÉ DE FRANCE. **L'utilisation de l'eau dans les centrales nucléaires**.

Disponível em:

<http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En_Direct_Centrales/Nucleaire/General/Publications/NOTE%20GESTION%20DE%20L%20EAU%202013.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2016.

ELETRONUCLEAR. **Central Nuclear Angra dos Reis**. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/AEmpresa/CentralNuclear.aspx>>. Acesso em: 20 abr. 2014a.

_____. **Central Nuclear do Nordeste**. Apresentação de slides. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=VYqhiUeb10%3D&tabid=347>>. Acesso em: 1 jan. 2016.

_____. **Eletrobras Eletronuclear inicia operação de substituição da tampa do reator de Angra 1**. 2013a. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Not%C3%ADcias/NoticiaDetalhes.aspx?NoticiaID=914>>. Acesso em: 10 mar 2016.

_____. **Em Caetité, INB define metas de produção de urânio**. 2013b. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Not%C3%ADcias/NoticiaDetalhes.aspx?NoticiaID=109>>. Acesso em: 29 abr. 2014.

_____. **Energia nuclear**. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/EspacodoConhecimento/Pesquisaescolar/EnergiaNuclear.aspx>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

_____. Geração elétrica nuclear. In: SEMINÁRIO SOBRE ENERGIA NUCLEAR., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Apimec, 2010.

_____. **Novas usinas: um futuro com muito mais energia.** Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/AEmpresa/NovosEmpreendimentos.aspx>>. Acesso em: 10 dez, 2014a.

_____. **Novas usinas nucleares.** Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequentes/Novasusinasnucleares.aspx>>. Acesso em: 2 mar. 2016.

_____. **Panorama da energia nuclear no mundo.** Edição 2014. Rio de Janeiro: Eletronuclear, 2014b.

_____. **Relatório de Impacto Ambiental – RIMA da usina de Angra 2.** Rio de Janeiro: Eletronuclear, 1998.

_____. **Relatório de Sustentabilidade 2013.** Rio de Janeiro: Eletronuclear, 2014c.

_____. **Segurança nuclear.** Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Seguranccedila/SegurancaNuclear.aspx>>. Acesso em: 9 mar 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Ações e programas.** Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/acessoainformacao/Paginas/acoeseprogramas.aspx>>. Acesso em: 24 mar. 2015c.

_____. **Análise do atendimento à demanda máxima de potência.** PDE 2021. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2012.

_____. **Balanco Energético Nacional 2015.** Rio de Janeiro: EPE, 2015a.

_____. **Plano Nacional de Energia - 2030.** Rio de Janeiro: EPE, 2007.

_____. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2015-2024).** Rio de Janeiro: EPE, 2015b.

EMPRESA METROPOLITANA DE ÁGUAS E ENERGIA. **Usina hidroelétrica Henry Borden.** Disponível em: <<http://200.144.28.204/conteudo.asp?id=Usina-Hidroeletrica-Henry-Borden>>. Acesso em: 20 maio 2014.

FONSECA, M. L. da. **Reflexos da manobrabilidade de usinas nucleares na operação de sistema elétrico.** 2006. Dissertação (Mestrado)-UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

GALLINARO, B.. **Avaliação do tempo de construção de usinas nucleares.** 2011. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do ABC, Santo André, 2011.

GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM. **Generation IV Systems.** Disponível em: <https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40465/generation-iv-systems>. Acesso em: 20 maio 2014.

GIADA, M. R.. **Determinação da reatividade do veneno queimável de Al₂O₃-B₄C em função da sua concentração no reator IPEN/MB-01.** São Paulo: IPEN, 2005.

GOLDEMBERG, José. **Energia nuclear para o Brasil: opção ou necessidade?** São Paulo: Naippe/USP, 2008.

GONÇALVES JÚNIOR, D.. **Reformas na indústria elétrica brasileira: Disputa pelas “fontes” e o controle dos excedentes.** 2007. Tese (Doutorado)-USP, São Paulo, 2007.

GUIMARÃES, L. dos S.. **Análise da Segurança de Sítios Nucleares.** Rio de Janeiro: ABDAN, 2010.

_____. **Futuro tecnológico da geração elétrica nuclear.** 2013. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/Arquivo/55/55.pdf>>. Acesso em: 7 maio 2014.

KOLCHINSKY, D.. AES-2006 – new design with VVER reactor and INPRO methodology, In: INPRO FORUM, 2013, Vienna. **Anais...** Vienna: AIEA, 2013.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **Fábrica de Combustível Nuclear-FCN.** Disponível em: <http://www.inb.gov.br/pt-br/WebForms/interna2.aspx?secao_id=102>. Acesso em: 28 ab., 2014.

INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SURETÉ NUCLÉAIRE. **La recherche.** Disponível em: <<http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Pages/Home.aspx>>. Acesso em: 3 nov. 2014.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Advanced Large Water Cooled Reactors.** A supplement to the IAEA’s Advanced Reactor Information System (ARIS). Venna: IAEA, 2015.

_____. **Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for de Period up to 2050.** Vienna: IAEA, 2013.

_____. **Nuclear Power Reactors in the World.** 2015 Edition. Vienna: IAEA, 2015.

_____. **Operational & Long Term Shutdown Reactors.** Vienna: AIEA, 2014.

JUNQUEIRA, F. A. R.; CHAN, P. D. S.. **PAVES** – Ferramenta para acompanhamento da utilização dos volumes de espera dos reservatórios das usinas hidrelétricas do sistema interligado nacional para controle de cheias, 2013. Projeto (Graduação)-UFRJ., Rio de Janeiro, 2013.

_____. **The Database on Nuclear Power Reactors.** Disponível em: <<https://www.iaea.org/pris/>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

KOLCHINSKY, D.. **AES-2006** – new design with VVER reactor and INPRO methodology. Vienna: IAEA, 2013.

LÉVÊQUE, F. **Nucléaire On/Off.** Analyse économique d’un pari. Paris: Dunod, 2013.

LIMA, C. et al. **A Prefeitura da Cidade São Paulo e a Associação Nacional dos Trabalhadores da Produção de Energia Nuclear – ANTPEN: “uma história de radiação ionizante e cidadania.”** São Paulo: Centro de Referência em Saúde do Trabalhador em Santo Amaro, 2008.

LOVERING, J. R.; YIP, A.; NORDHAUS, T.. Historical construction costs of global nuclear power reactors. **Energy Policy**. n. 91, p.371-382, 2016. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/Arquivos/436/436.pdf>>. Acesso em 10 mar. 2016.

MAI, L. A.. **Análise técnico-econômica do ciclo de combustível “Tandem”**. Um estudo do caso Brasil-Argentina. 1997. Tese (Doutorado)-USP, São Paulo, 1997.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **Política Nacional de Defesa e Estratégia Nacional de Defesa**. Brasília: MD, 2012.

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Urânio enriquecido pela INB entra na produção de combustível nuclear para Angra 1**. 2015. Disponível em: <http://www.mcti.gov.br/noticia/-/asset_publisher/epbV0pr6eIS0/content/uranio-enriquecido-pela-inb-entra-na-producao-de-combustivel-nuclear-para-angra-1;jsessionid=FD233EC3CFB257576F41DDF119B60678>. Acesso em: 2 mar. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim mensal de monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Brasília: MME, jan. 2015.

_____. Resolução CNPE nº 8 de 17 de setembro de 2002. Estabelece condições para a retomada do empreendimento de Angra III pela Eletrobrás Termonuclear S.A. - ELETRONUCLEAR. **Diário Oficial da União**. Brasília, 8 out 2002.

OLIVEIRA, J. R. de. **Programa computacional para estudo da estratégia de controle de um reator nuclear do tipo PWR**. 2002. Dissertação (Mestrado)- IPEN/USP, São Paulo, 2002.

OLIVEIRA, R.. Licenciamento ambiental e nuclear de Angra 3. Apresentação de slides. In: SEMINÁRIO SOBRE ENERGIA NUCLEAR, 3., 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto de Geografia da UERJ, 2014.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Avaliação das condições futuras da operação**. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: 24 mar. 2015.

_____. **Geração de energia**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia_out.aspx?area=>>. Acesso em: 2 abr. 2014.

_____. **Evaporações líquidas nas usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro: ONS, 2004.

_____. **Inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos**. Rio de Janeiro: ONS, 2012.

_____. **Plano de operação elétrica 2014/2015 PEL 2013**. Relatório executivo. Rio de Janeiro: ONS, 2013.

PERROTTA, J. A.. **Curso de introdução à engenharia do núcleo de reatores**. São Paulo: IPEN, 1999a.

_____. **Proposta de um núcleo de reator PWR avançado com características adequadas para o conceito de segurança passiva**. 1999. Tese (Doutorado)- IPEN/USP, São Paulo, 1999b.

- PESSOA FILHO, L. M. de N.. **Estudo da variabilidade e previsibilidade das chuvas e vazões sazonais na Bacia do Rio Iguaçu**. 2013. Dissertação (Mestrado)-UFPR,. Curitiba, 2013.
- PINHEIRO, F, C.. **A relação histórica da região de Mambucaba/RJ com a energia elétrica no Brasil**. 2010. Monografia (Especialização)-FCMP, Batatais, 2010.
- PROCURADORIA-GERAL DA REPÚBLICA. **Ação Direta de Inconstitucionalidade contra o parágrafo 8º do art. 232 da Constituição do Estado de Sergipe**. 2013. Disponível em: <<http://s.conjur.com.br/dl/adi-constituicao-sergipe.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2014.
- RABL, A.; RABL, V. A.. External costs of nuclear: Greater or less than the alternatives? **Energy Policy**. n. 57, p. 575-584, 2013.
- RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ. **Bilan électrique 2013**. Paris: RTE, 2014.
- RODRIGUEZ, H, S.. **A formação das estradas de ferro no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Memória do trem, 2004.
- ROSA, Luiz Pinguelli. **A política nuclear e o caminho das armas atômicas**. Rio de Janeiro: J. Zahar, 1985.
- SCOTT, D. S.. Nuclear energy, climate, hidricity, radiation and foolish mythologies. **Energy Strategy Reviews**, n.1, p. 272-276, 2013.
- SHIITAKE'S TUMBLR. 福島第 1 原発 : 沸騰水型の構造裏目に -... 2011. Disponível em: <http://diolefine.rssing.com/chan-1282608/all_p37.html>. Acesso em: 10 mar 2016.
- SILVA, C. A. M. da. Tecnologia dos reatores nucleares de potência e de pesquisa. Apresentação, In: I SENCIR, 2012, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2012.
- SOARES JÚNIOR, R. L.. **Projeto conceitual de uma turbina hidráulica a ser utilizada na usina hidrelétrica externa de Henry Borden**. 2013. Projeto (Graduação)-UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.
- SOARES, L.. Panorama do setor nuclear brasileiro para geração elétrica. In: 2014-LAS-ANS SYMPOSIUM ON SMALL *MODULAR* REACTORS FOR NUCLEAR POWER, 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** 2014. Apresentação de slides.
- _____. Pontos críticos de sucesso e fracasso dos projetos previstos no plano decenal de expansão de energia elétrica. In: 2008-LAS-ANS SYMPOSIUM, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** 2014. Apresentação de slides.
- STREET, A.. A crise energética de 2015. São Paulo: **Valor Econômico**, 24 fev. 2015.
- TOLMASQUIM, M.. **Planejamento energético brasileiro**. Rio de Janeiro: EPE, 2014.
- TRANJAN FILHO, A.. **Ações assecuratórias da segurança nuclear no processo produtivo da INB**. Rio de Janeiro: INB, 2011. Apresentação de slides.
- TRAVASSOS, R.. O futuro da energia nuclear no mundo e no Brasil. In: ENERGIA EM FOCO: ESTRATÉGIAS E DESAFIOS. Rio de Janeiro: FGV, 2015. Apresentação de slides.
- VICAUD, A.. **Les besoins d'eau de refroidissement des centrales termiques de production d'électricité**. Paris: EDF, 2007.

WASCHECK, C. de C.; FERREIRA, O. A.; ALENCAR, P. M. de (Org.). **Saiba como ocorreu o acidente**: a história, fatos e relatos. Disponível em: <<http://www.cesio137goiania.go.gov.br/index.php?idEditoria=3823>>. Acesso em: 26 mar. 2016.

WISE-URANIUM. **Uranium Radiation Properties**. Disponível em: <<http://www.wise-uranium.org/rup.html>>. Acesso em: 10 maio 2014.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Advanced Nuclear Power Reactors**. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Advanced-Nuclear-Power-Reactors/>>. Acesso em: 5 maio 2014.

_____. **Cooling Power Plants**. Disponível em: <<http://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx>>. Acesso em: 2 mar. 2016.

_____. **Nuclear Power in India**. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/India/>>. Acesso em: 3 ago.2015.

ANEXO A – ANGRA 1: INFORMAÇÕES GERAIS E DADOS BÁSICOS

| SITUAÇÃO ATUAL | EM OPERAÇÃO |
|---|--|
| 1. GERAL | |
| NOME DA USINA | ANGRA 1 |
| REGIÃO | ANGRA DOS REIS |
| ESTADO | RIO DE JANEIRO |
| COORDENADAS | |
| LATITUDE(Graus, Min., Seg.) | 23o 00' 30" ” SUL |
| LONGITUDE (Graus, Min., Seg.) | 44o 28' 26" OESTE |
| TIPO DE REATOR | ÁGUA PRESSURIZADA / PWR |
| FORNECEDOR DO SISTEMA | WESTINGHOUSE |
| PROPRIETÁRIO | ELETRONUCLEAR |
| OPERADOR | ELETRONUCLEAR |
| 2. POTÊNCIA DO REATOR | |
| TÉRMICA | NOMINAL: 1.882 MWt |
| ELÉTRICA (BRUTA) (*) | NOMINAL: 640 MWe |
| ELÉTRICA (LÍQUIDA) (*) | NOMINAL: 609 MWe |
| FAIXA OPERACIONAL CONTÍNUA | 80% -100% |
| RENDIMENTO TÉRMICO / <i>THERMAL EFFICIENCY</i> | 34.2 % (Temp. água do mar 27°C) |
| (*) Dados obtidos após troca de GVs | |
| 3. CARACTERÍSTICAS DO NÚCLEO DO REATOR | |
| MATERIAL COMBUSTÍVEL | URÂNIO ENRIQUECIDO-UO2 |
| NO. DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS | 121 |
| QUANTIDADE DE VARETAS COMBUSTÍVEIS POR ELEMENTO COMBUSTÍVEL | 235 |
| ENRIQUECIMENTO INICIAL DO COMBUSTÍVEL (MÉDIA) | 2.6 (WT%) |
| ENRIQUECIMENTO DO COMBUSTÍVEL NO RECARREGAMENTO | 4.0 (WT%) (ATUAL) |
| MATERIAL DO REVESTIMENTO | ZIRLO™ |
| ESPESSURA | 0.535 mm |
| INVENTÁRIO DE URÂNIO | 49,5 t U |
| DENSIDADE MÉDIA DE POTÊNCIA DO COMBUSTÍVEL | 37,9 (kW/kg U) |
| DENSIDADE MÉDIA DE POTÊNCIA DO NÚCLEO DO REATOR | 106,25 (W/cm ³) |
| POTÊNCIA LINEAR MÉDIA NOMINAL DAS VARETAS | 17.6 (kW/m) |
| IRRADIAÇÃO FINAL | 55.000 (MWd/t) (MÁXIMA média) |
| 4. MÉTODO DE CARREGAMENTO | |
| FREQUÊNCIA DE CARREGAMENTO (PROJETO) | APROX. 12 MESES |
| PARTES DO NÚCLEO RETIRADAS (Elem. Combustíveis) | APROX. 33% |
| MEIOS DE CONTROLE DE RADIOATIVIDADE | CONTROL, VENENO=BORO SILICATO, CHEMICAL SYSTEM |
| BARRAS DE CONTROLE | 33 |
| 5. SISTEMAS DA USINA | |
| VASO DO REATOR (MATERIAL BÁSICO) | SA 533 GRAU A CLASSE 2, SA 508 CLASSE 2 |
| MATERIAL DO REVESTIMENTO | AISI 304 / INCONEL |
| DESCRIÇÃO DO SISTEMA PRIMÁRIO | 2 "LOOPS" |
| NO. DE BOMBAS DO PRIMÁRIO | 2 |
| PRESSÃO DO PRIMÁRIO | 157.1 (kg/cm ²) |
| REFRIGERANTE | H2O |
| VAZÃO ATRAVÉS DO NÚCLEO | 35.958 (t/h) |

| | |
|--|--|
| TEMPERATURA MÉDIA | 302.7 (°C) |
| 6. GERADOR DE VAPOR | 2 |
| TIPO (Substituição concluída em Junho de 2009) | VERTICAL, TUBOS EM “U” COM ANEL DE ALIMENTAÇÃO |
| FABRICANTE | AREVA (NUCLEP) |
| MODELO | SG 72W / D3 |
| MATERIAL | SA-508 GRAU 3 CLASSE 2 |
| TUBOS | INCONEL 690 TT |
| 7. TURBINAS: | 1 |
| ESTÁGIOS | 1AP, 2BP / 1 HP, 2 LP |
| RPM | 1.800 |
| 8. CONDIÇÕES DO VAPOR NA ENTRADA DA TURBINA | |
| TEMPERATURA | 315 (°C) |
| PRESSÃO | 80 (kg/cm ²) |
| UMIDADE | 0.1 (%) |
| VAZÃO | 3.704 (t/h) |
| 9. TIPO DE REFRIGERAÇÃO DO CONDENSADOR | ÁGUA DO MAR |
| VAZÃO NA CAPTAÇÃO | 38,53 (m ³ /s) |
| 10. CONTENÇÃO DO SISTEMA DO REATOR | ENVOLTÓRIO DE CONTENÇÃO DE AÇO C/ ENVOLTÓRIO ADICIONAL DE CONCRETO |
| MATERIAL | ASTM A516 GR. 70 |
| 11. GERADOR ELÉTRICO | 1 |
| FABRICANTE | WESTINGHOUSE / SIEMENS |
| TIPO | HORIZONTAL, RESFRIADO A H ₂ |
| POTÊNCIA (A 75 psig H ₂) | 760 MVA |
| TENSÃO DE SAÍDA | 19 kV |
| NÚMERO DE FASES | 3 |
| FREQUÊNCIA | 60 Hz |
| FATOR DE POTÊNCIA | 0.9 |
| CLASSE DE ISOLAMENTO | B |
| RPM | 1.800 |
| 12. GERADOR DIESEL DE EMERGÊNCIA | |
| DG-1A / DG-1B (Originais) | 2 UNIDADES |
| FABRICANTE | FAIRBANKS MORSE (COLT INDUSTRIES) |
| POTÊNCIA NOMINAL P/ CADA CONJUNTO | 2.850 kW - 4.063 kVA |
| FATOR DE POTÊNCIA | 1 - 0.8 |
| FREQUENCIA | 60Hz |
| RPM | 900 |
| DG-3 / DG-4 (Transferidos de Angra 2) | 2 UNIDADES |
| FABRICANTE | KHD / SIEMENS |
| POTÊNCIA NOMINAL P/ CADA CONJUNTO | 5.400 kW - 6.600 kVA |
| FATOR DE POTÊNCIA | 1 - 0.8 |
| FREQUENCIA | 60Hz |
| RPM | 900 |

Fonte: ELETRONUCLEAR, 2016

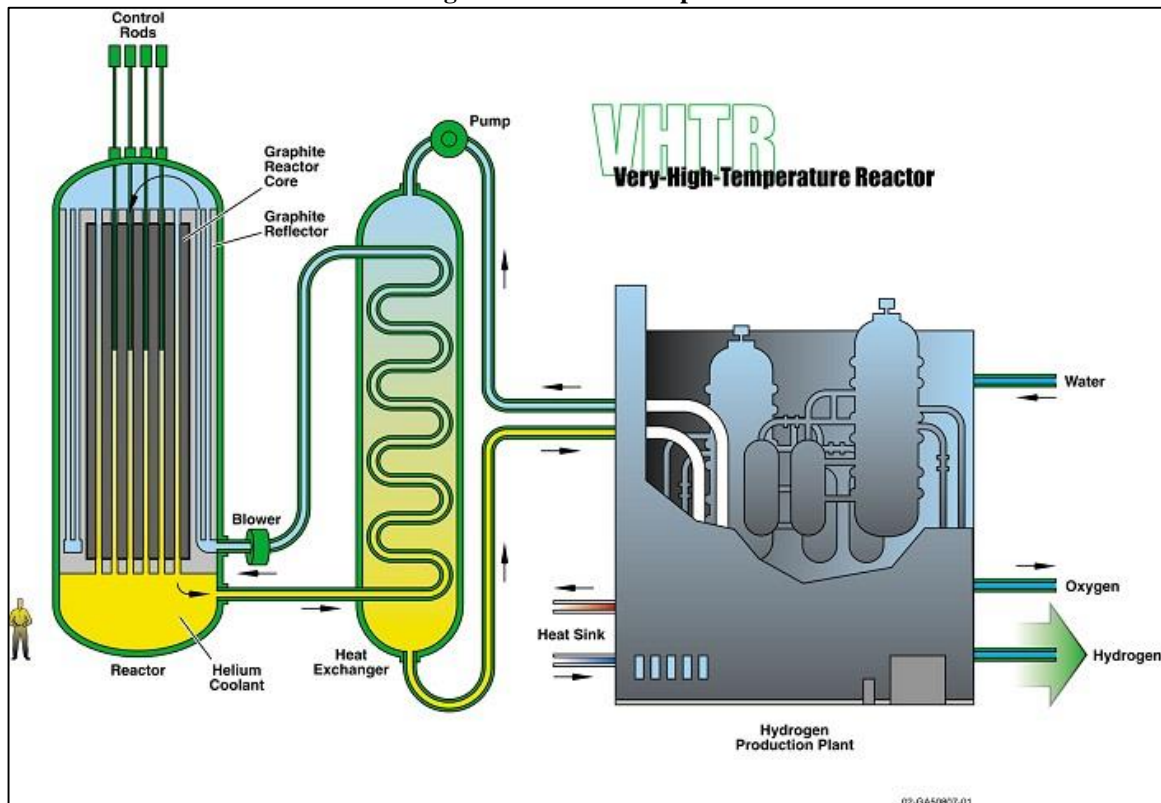
ANEXO B – ANGRA 2 - INFORMAÇÕES GERAIS E DADOS

| SITUAÇÃO ATUAL | EM OPERAÇÃO |
|---|---|
| 1. GERAL | |
| NOME DA USINA | ANGRA 2 |
| REGIÃO | ANGRA DOS REIS |
| ESTADO | RIO DE JANEIRO |
| COORDENADAS GEOGRÁFICAS | LATITUDE -23o 00' 30" SUL LONGITUDE -44o 28' 26" OESTE |
| TIPO DE REATOR | ÁGUA PRESSURIZADA / PWR |
| FORNECEDOR DO SISTEMA | SIEMENS/KWU |
| PROPRIETÁRIO | ELETRONUCLEAR |
| OPERADOR | ELETRONUCLEAR |
| 2. POTÊNCIA DO REATOR | |
| TÉRMICA | NOMINAL: 3.771 MWt |
| ELÉTRICA (BRUTA) | NOMINAL: 1.350 MWe |
| ELÉTRICA (LÍQUIDA) | NOMINAL: 1.280 MWe |
| FAIXA OPERACIONAL CONTÍNUA | 80% -100% |
| RENDIMENTO TÉRMICO | 35.8 % (Temp. água do mar 27°C) |
| 3. CARACTERÍSTICAS DO NÚCLEO DO REATOR | |
| MATERIAL COMBUSTÍVEL | URÂNIO ENRIQUECIDO -UO ₂ |
| Nº. DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS | 193 |
| QUANTIDADE DE VARETAS COMBUSTÍVEIS POR ELEMENTO COMBUSTÍVEL | 236 |
| ENRIQUECIMENTO INICIAL DO COMBUSTÍVEL | Regiões: 1 (69EC-1.9%); 2 (68EC-2.5%); 3 (60EC-3.2%) |
| ENRIQUECIMENTO DO COMBUSTÍVEL NOS CARREGAMENTOS | 3.6 % (INICIAL -2P1); 4.0 % (ATUAL - 2P6) |
| MATERIAL DO REVESTIMENTO | ZIRCALOY 4 (Zr) |
| ESPESSURA | 0.72 mm |
| INVENTÁRIO DE URÂNIO | 103 t U |
| DENSIDADE MÉDIA DE POTÊNCIA DO COMBUSTÍVEL | 36.4 (kW/kg U) |
| DENSIDADE MÉDIA DE POTÊNCIA DO NÚCLEO DO REATOR | 93.2 (kW/l) |
| POTÊNCIA LINEAR MÉDIA NOMINAL DAS VARETAS | 20.7 (kW/m) |
| IRRADIAÇÃO FINAL | 50.000 (MWd/t) (MÁXIMA) |
| 4. MÉTODO DE CARREGAMENTO | |
| FREQUÊNCIA DE CARREGAMENTO (PROJETO) | APROX. 13 MESES |
| PARTES DO NÚCLEO RETIRADAS | APROX. 33% |
| MEIOS DE CONTROLE DE RADIOATIVIDADE | CR, BP (Gd), CS1 |
| Nº. BARRAS DE CONTROLE | 61 |
| 5. SISTEMAS DA USINA | |
| VASO DO REATOR (MATERIAL BÁSICO) | 20 Mn Mo Ni 55 |
| MATERIAL DO REVESTIMENTO | DIN 1.4550 (AISI 316L) |
| DESCRIÇÃO DO SISTEMA PRIMÁRIO | 4 "LOOPS" (4 <i>LOOPS</i>) |
| Nº. DE BOMBAS DO PRIMÁRIO (BRR) | 4 |
| PRESSÃO DO PRIMÁRIO | 157.0 (kg/cm ²) |
| REFRIGERANTE | H ₂ O |
| VAZÃO ATRAVÉS DO NÚCLEO | 67.680 (t/h) |
| TEMPERATURA MÉDIA | 308,6 (°C) |
| 6. GERADOR DE VAPOR | |
| TIPO | VERT., TUBOS EM "U" COM REaquecedor e sep. de umidade |

| | |
|--|--|
| FABRICANTE | SIEMENS |
| MATERIAL | 20 Mn Mo Ni 55 |
| TUBOS | INCOLOY 800 |
| 7. TURBINAS: | 1 |
| FABRICANTE | SIEMENS |
| ESTÁGIOS | 1AP, 3BP / 1 HP, 3 LP |
| RPM | 1.800 |
| 8. CONDIÇÕES DO VAPOR NA ENTRADA DA TURBINA | |
| TEMPERATURA | 280 (°C) |
| PRESSÃO | 64.2 (kg/cm ²) |
| UMIDADE | 0.25 (%) |
| VAZÃO | 7.398 (t/h) |
| 9. TIPO DE REFRIGERAÇÃO DO CONDENSADOR | ÁGUA DO MAR |
| VAZÃO NA CAPTAÇÃO | 74.4 (m ³ /s) |
| MATERIAL | ASTM A-36 |
| TUBOS | TITANIO – (TIPO II) |
| 10. CONTENÇÃO DO SISTEMA DO REATOR | VASO DE CONTENÇÃO DE AÇO C/ ENVOLTÓRIO ADICIONAL DE CONCRETO |
| MATERIAL | WSTE 51 |
| 11. GERADOR ELÉTRICO | 1 |
| FABRICANTE | SIEMENS |
| TIPO: THFF 180/64-18 | HORIZONTAL, RESFRIADO A H ₂ |
| POTÊNCIA (A 75 psig H ₂) | 1.458 MVA |
| TENSÃO DE SAÍDA | 25 (+ 7.5; -10) kv |
| NÚMERO DE FASES | 3 |
| FREQUÊNCIA | 60 Hz |
| FATOR DE POTÊNCIA | COS ϕ = 0.9 |
| CLASSE DE ISOLAMENTO | B |
| RPM | 1.800 |
| 12. EXCITATRIZ PRINCIPAL | 1 |
| FABRICANTE | SIEMENS |
| TIPO: | ELP 115/88-18/12-40 |
| TENSÃO & CORRENTE / VOLTAGE & CURRENT | 480V & 12 200A |
| CLASSE DE ISOLAMENTO | B/F |
| 13. EXCITATRIZ PILOTO | 1 |
| FABRICANTE | SIEMENS |
| TIPO | ELP 100/35-18/28 |
| TENSÃO | 220V \pm 10% |
| FATOR DE POTÊNCIA | COS ϕ = 0.6/0.95 |
| CLASSE DE ISOLAMENTO | B |
| 14. GERADOR DIESEL DE EMERGÊNCIA | |
| SISTEMA 1: 1 -4XKA | 4 UNIDADES / 4 UNITS |
| FABRICANTE | KHD / SIEMENS |
| POTÊNCIA NOMINAL | 5.400 kW -6.600 kVA |
| FATOR DE POTÊNCIA | 1 – 0.8 |
| FREQUÊNCIA | 60 Hz |
| RPM | 900 |
| SISTEMA 2: 5 -8XKA | 4 UNIDADES / 4 UNITS |
| FABRICANTE | KHD / SIEMENS |
| POTÊNCIA NOMINAL | 860 kW -1.050 kVA |
| FATOR DE POTÊNCIA | 1 -0.8 |
| FREQUÊNCIA | 60 Hz |
| RPM | 1.800 |

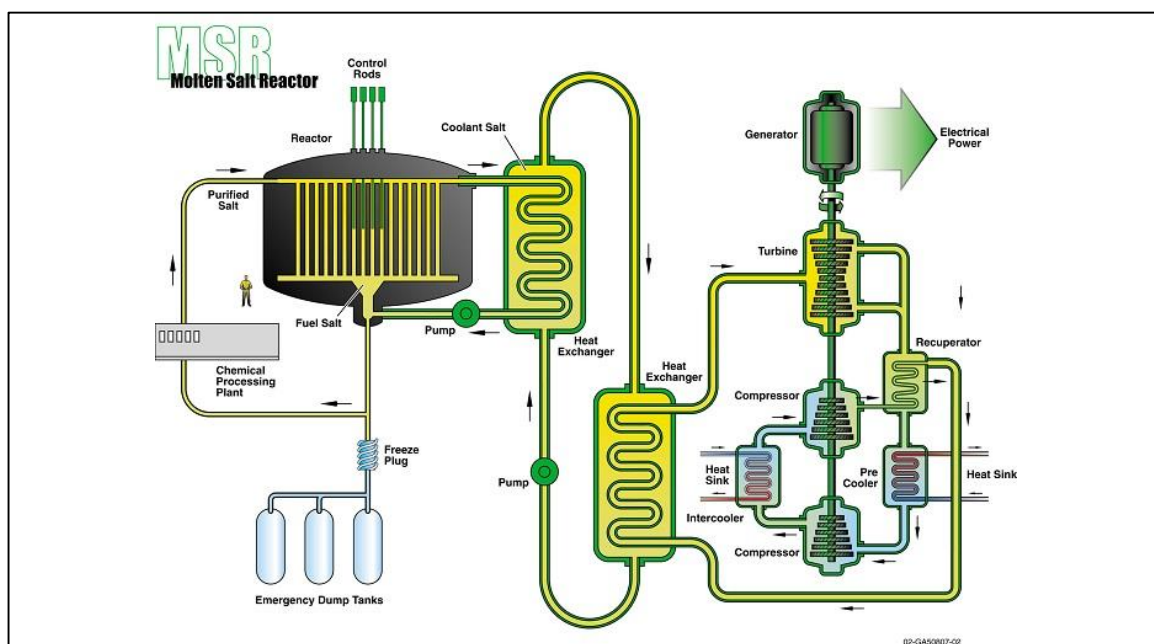
ANEXO C – IV GERAÇÃO DE REATORES

Figura 1 – Reator do tipo VHTR



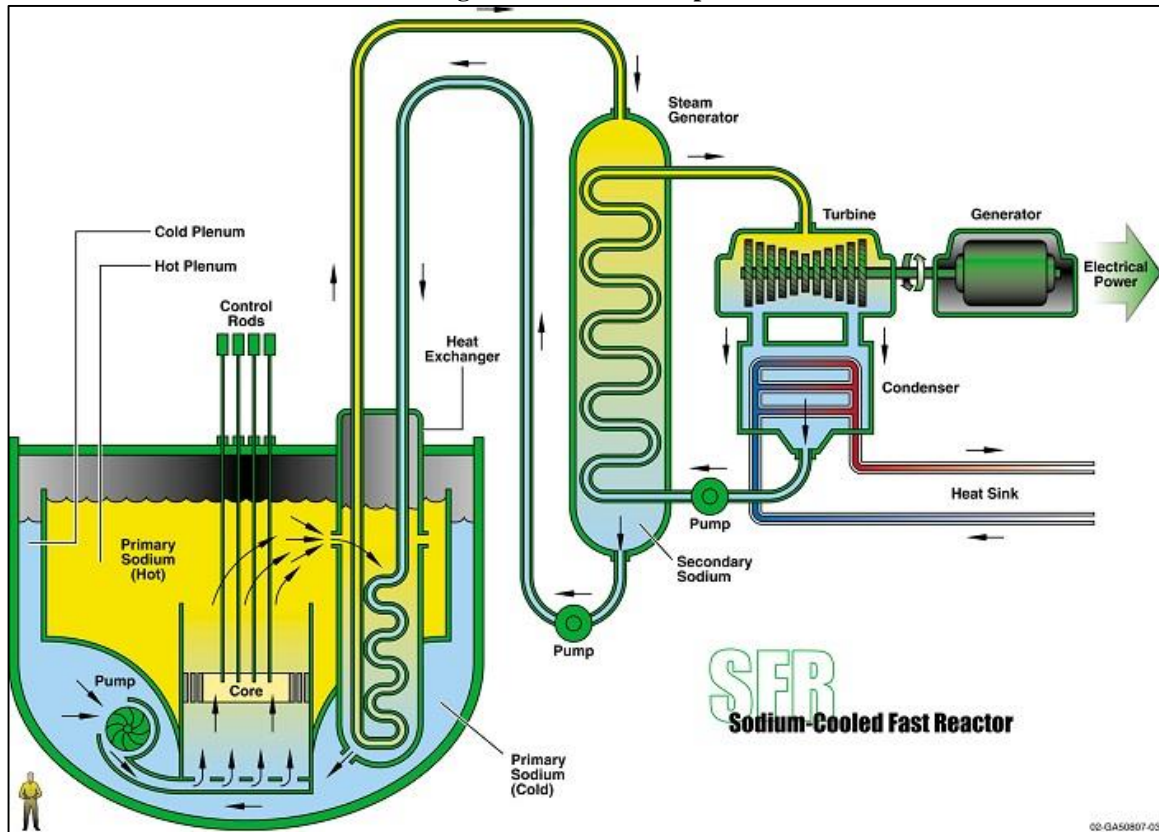
Fonte: Generation IV International Forum (2014)

Figura 2 – Reator do tipo MSR



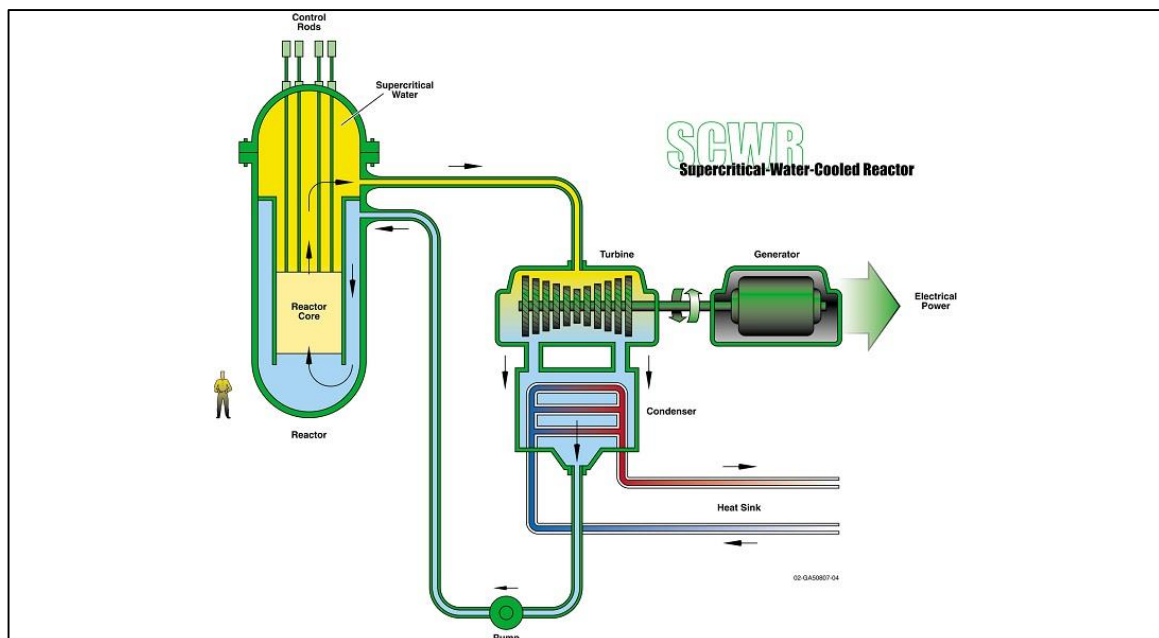
Fonte: Generation IV International Forum (2014)

Figura 3 – Reator do tipo SFR



Fonte: Generation IV International Forum (2014)

Figura 4 – Reator do tipo SCWR



Fonte: Generation IV International Forum (2014)

**ANEXO D - CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE SÍTIOS NUCLEARES DO EPRI
SITING GUIDE**

| CRITÉRIOS | ETAPAS | | | |
|--|--------|--------|--------|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 CRITÉRIOS DE SAÚDE E SEGURANÇA | | | | |
| 1.1 RELACIONADOS COM CAUSAS DE ACIDENTES | | | | |
| 1.1.1 Geologia/Sismologia | | | | |
| 1.1.1.1 Movimentos Vibratórios do Solo | EX | EX | AD | AD |
| 1.1.1.2 Falhas Capazes | EX, EV | EX, EV | AD | AD |
| 1.1.1.3 Falhas de Superfície e Deformação | EV | EV | AD | AD |
| 1.1.1.4 Perigos Geológicos | EV | | | |
| 1.1.1.5 Estabilidade do Solo | | EX | EX, EV | AD |
| 1.1.2 Requisitos de Sistema de Refrigeração | | | | |
| 1.1.2.1 Suprimento de Água de Refrigeração | EV | EV | AD | AD |
| 1.1.2.2 Temperatura Ambiente | EX | | | |
| 1.1.3 Inundação | EX | EX | AD | AD |
| 1.1.4 Uso Perigoso de Terras nas Proximidades | | | | |
| 1.1.4.1 Instalações Existentes | | EV | AD | AD |
| 1.1.4.2 Instalações Programadas | | | AD | |
| 1.1.5 Condições Meteorológicas Extremas | | | | |
| 1.1.5.1 Ventos | EX, EV | | AD | |
| 1.1.5.2 Precipitação | EX, EV | | | |
| 1.2 RELACIONADOS COM EFEITO DE ACIDENTES | | | | |
| 1.2.1 População | EX | EX | AD | AD |

| CRITÉRIOS | ETAPAS | | | |
|--|--------|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1.2.2 Plano de Emergência | | | AD | AD |
| 1.2.3 Dispersão Atmosférica | EX | EX | AD | |
| 1.3 EFEITOS RELACIONADOS COM EFEITOS DA OPERAÇÃO | | | | |
| 1.3.1 Água de Superfície – Caminho de Radionuclídeos | | | | |
| 1.3.1.1 Capacidade de Diluição | | | AD | AD |
| 1.3.1.2 Base de Dados de Cargas | | | AD | AD |
| 1.3.1.3 Proximidade de Uso para Consumo | | | AD | |
| 1.3.2 Caminho de Radionuclídeos por Águas Subterrâneas | EV | EV | AD | AD |
| 1.3.3 Caminho de Radionuclídeos por via aérea | | | | |
| 1.3.3.1 Efeitos Topográficos | | | AD | AD |
| 1.3.3.2 Dispersão Atmosférica | EX | EX | AD | |
| 1.3.4 Caminho de Ingestão de Alimentos - Ar | | | AD | |
| 1.3.5 Água de Superfície - Caminho de Radionuclídeos em Alimentos | | | AD | AD |
| 1.3.6 Segurança no Transporte | | | AD | |
| 2 CRITÉRIOS AMBIENTAIS | | | | |
| 2.1 EFEITOS RELACIONADOS A CONSTRUÇÃO SOBRE A ECOLOGIA AQUÁTICA | | | | |
| 2.1.1 Perturbação de Espécies e Habitats Importantes | EX | EV | AD | AD |
| 2.1.2 Efeitos da Ruptura de Sedimentos de Fundo | | | | |
| 2.1.2.1 Grau de Contaminação | | | AD | AD |
| 2.1.2.2 Tamanho do Sedimento | | | AD | AD |
| 2.2 EFEITOS RELACIONADOS A CONSTRUÇÃO | | | | |

| CRITÉRIOS | ETAPAS | | | |
|---|--------|----|--------|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| SOBRE A ECOLOGIA TERRESTRE | | | | |
| 2.2.1 Perturbação de Espécies, Habitats e Áreas Alagadas Importantes | | | | |
| 2.2.1.1 Espécies e Habitats Importantes | | | AD | AD |
| 2.2.1.2 Cobertura do Solo/ Habitat | | | AD | AD |
| 2.2.1.3 Áreas Alagadas | EX | EX | AD | AD |
| 2.2.2 Efeitos do Esvaziamento de Áreas Alagadas Adjacentes | | | | |
| 2.2.2.1 Profundidade do Lençol Freático | | | EV, AD | AD |
| 2.2.2.2 Áreas Alagadas Próximas | | | AD | AD |
| 2.3 EFEITOS OPERACIONAIS RELACIONADOS COM A ECOLOGIA AQUÁTICA | | | | |
| 2.3.1 Efeitos das Descargas Térmicas | | | | |
| 2.3.1.1 Efeitos Sobre as Espécies Migratórias | | | AD | AD |
| 2.3.1.2 Disruption of Important Species/Habitats | | | AD | AD |
| 2.3.1.3 Qualidade da Água | | | AD | AD |
| 2.3.2 Arrastamento/ Efeitos do Impacto | | | | |
| 2.3.2.1 Organismos do Arrastamento | | | AD | AD |
| 2.3.3 Dragagem/Efeitos da Disposição | | | | |
| 2.3.3.1 Fonte de Contaminação a Montante | | | AD | AD |
| 2.3.3.2 Taxas de Sedimentação | | | AD | AD |
| 2.4 EFEITOS OPERACIONAIS RELACIONADOS COM A ECOLOGIA TERRESTRE | | | | |
| 2.4.1 Efeitos do Acúmulo em Áreas Vizinhas | | | | |
| 2.4.1.1 Espécies Importantes/ Áreas de Habitats | | | AD | AD |

| CRITÉRIOS | ETAPAS | | | |
|---|--------|--------|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 2.4.1.2 Adequação da Fonte de Água | | | AD | AD |
| 3 CRITÉRIOS SOCIOECONÔMICOS | | | | |
| 3.1 EFEITOS SOCIOECONÔMICOS RELACIONADOS COM A CONSTRUÇÃO | | | AD | AD |
| 3.2 EFEITOS SOCIOECONÔMICOS RELACIONADOS COM A OPERAÇÃO | | | | AD |
| 3.3 JUSTIÇA AMBIENTAL | | | AD | AD |
| 3.4 USO DE TERRAS | | | | |
| 3.4.1 Efeitos Relacionados com a Construção e a Operação | EX | EX, EV | AD | AD |
| 4 CRITÉRIOS RELACIONADOS COM A ENGENHARIA E CUSTOS | | | | |
| 4.1 CRITÉRIOS RELACIONADOS COM A SAÚDE E SEGURANÇA | | | | |
| 4.1.1 Suprimento de Água | | | AD | AD |
| 4.1.2 Distância de Bombeamento | EV | EV | AD | AD |
| 4.1.3 Inundação | | | AD | AD |
| 4.1.4 Movimento Vibratório do Solo | | | | |
| 4.1.5 Estabilidade do Solo | | | AD | AD |
| 4.1.6 Recuperação Industrial do Sítio | | | AD | AD |
| 4.2 CRITÉRIOS RELACIONADOS COM O TRANSPORTE E TRANSMISSÃO | | | | |
| 4.2.1 Acesso Ferroviário | | | AD | AD |
| 4.2.2 Acesso Rodoviário | | | AD | AD |
| 4.2.3 Acesso Hidroviário | | | AD | AD |
| 4.2.4 Diferenças nos Custos de Transmissão e Preços | | | | |

| CRITÉRIOS | ETAPAS | | | |
|--|--------|----|----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| de Mercado | | | | |
| 4.2.4.1 Construção - Transmissão | | | AD | |
| 4.2.4.2 Diferencial de Preços do Mercado Elétrico | | | AD | AD |
| 4.3 CRITÉRIOS RELACIONADOS COM A QUESTÃO SOCIOECONÔMICA - USO DA TERRA | | | | |
| 4.3.1 Topografia | EX | EV | AD | AD |
| 4.3.2 Direitos Sobre a Terra | | | AD | AD |
| 4.3.3 Remunerações pelo Trabalho | | | AD | ADA |

Fonte: DANTAS, V. A.. **Proposta de avaliação para sítios nucleares através da análise geoespacial de critérios de transporte**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2011.

Notas: EX – Exclusão; EV- Evitação; AD – Adequação.