



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**A importância da energia nuclear
dentro da matriz energética brasileira**

Jucleson Junio Diniz Gomes

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

João Monlevade-MG

2017

Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica

A importância da energia nuclear dentro da matriz energética brasileira

Jucleson Junio Diniz Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso orientado pelo Prof. Savio Figueira Corrêa, e coorientado pelo professor Welbert Alves Rodrigues submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

João Monlevade-MG

2017



ATA DE DEFESA

Aos 05 dias do mês de setembro de 2017, às 13:30 horas, no bloco H deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo aluno Jucleson Júnio Diniz Gomes, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Savio Figueira Corrêa, Welbert Alves Rodrigues, Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa e Cecilia Silva Monnerat. O aluno apresentou a monografia intitulada: A importânciada energia nuclear dentro da matriz energética brasileira. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela ATNOVAÇÃO do aluno, com a nota média 7,7, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presenta ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pela formanda.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca examinadora	Nota
Savio Figueira Corrêa	8,0
Welbert Alves Rodrigues	7,80
Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa	7,50
Cecilia Silva Monnerat	7,50
Média	7,7

João Monlevade, 05 de setembro de 2017.

Savio Figueira Corrêa (Orientador)

Welbert Alves Rodrigues (Co-orientador)

Carlos Henrique N. R. Barbosa (Convidado)

Cecilia Silva Monnerat (Convidada)

Jucleson Júnio Diniz Gomes (Aluno)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado
“ A importância da energia nuclear dentro da matriz energética brasileira ”
é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto,
material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida
citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 05 de Setembro de

JUCLESON JUNIO DINIZ GOMES

Sumário

1	Introdução	10
2	Objetivos	13
2.1	Objetivos Específicos	13
3	Revisão Bibliográfica	14
3.1	A Energia nuclear.....	14
3.2	Usina Termonuclear	15
3.3	O programa nuclear brasileiro	17
3.4	O Cenário do Setor Elétrico Brasileiro	21
3.5	Cenário Mundial	26
4	Metodologia.....	30
5	Análise Crítica	32
5.1	Critério Econômico.....	32
5.1.1	Subcritério Custos Globais de Geração.....	32
5.1.2	Subcritério TIR.....	33
5.1.3	Subcritério Payback.....	34
5.1.4	Comparação entre as três fontes.....	35
5.2	Critério Ambiental.....	38
5.2.1	Subcritério emissão de gases poluentes	38
5.2.2	Subcritério riscos em casos de acidentes	40
5.2.3	Subcritério armazenamento de rejeitos	42
6	Conclusão	45
7	Referência Bibliográficas.....	47

Lista de ilustrações

Figura 1 – representação da reação em cadeia ocorrida no reator.....	13
Figura 2 – usina termonuclear.....	14
Figura 3 – Construção de Angra I.....	17
Figura 4 – usinas de Angra I, II e III.....	19
Figura 5 – matriz elétrica brasileira	20
Figura 6 – capacidade instalada.....	21
Figura 7 – projeção da capacidade instalada para 2024.....	22
Figura 8 – percentual de geração de energia nuclear no mundo.....	26
Figura 9 – percentual de geração nuclear dentro da matriz energética.....	26
Figura 10 – organograma dos critérios utilizados na análise.....	28
Figura 11 – custos por fonte de geração.....	34
Figura 12 – % de emissão de GEE por fonte X Geração de eletricidade.....	38

Lista de tabelas

Tabela 1 – evolução da capacidade instalada por fonte de geração	23
Tabela 2 – estimativa de investimentos de geração de energia.....	24
Tabela 3 –países com o maior número de centrais nucleares e potência instalada no ano de 2007.....	25
Tabela 4 – custos por fonte de geração.....	34
Tabela 5 – custo e produção anual das usinas típicas brasileiras.....	35

Lista de símbolos

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
CDTN	Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisas
CPI	Comissão Parlamentar de Inquérito
CSN	Conselho de Segurança Nacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	Instituto de Energia Atômica
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPR	Instituto de Pesquisas Radioativas
MME	Ministério de Minas e Energia
ONU	Organização das Nações Unidas
PATM	Programa Autônomo de Tecnologia Nuclear
PWR	Reator de Água Pressurizada
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
TIR	Taxa Interna de Retorno
TNP	Tratado de Não-Proliferação de Armas Nucleares

Resumo

O setor de energia elétrica de um país é parte extremamente importante para garantia da sustentabilidade de seu desenvolvimento econômico. Uma avaliação prévia das tecnologias de geração que se possui, é fundamental para nortear as decisões estratégicas de investimento do setor. No entanto, é necessária uma averiguação macro dos aspectos de cada fonte geradora, afim de tomar decisões mais assertivas de investimento. E, neste cenário atual de crise econômica e de mudanças climáticas, faz-se necessário o esclarecer o quanto viável é cada tipo de geração pelo viés econômico e ambiental. O presente trabalho tem o objetivo de realizar um estudo da utilização da energia nuclear no país de forma crítica para uma análise de seu papel dentro da matriz energética brasileira.

Palavras-Chave: Energia nuclear. Matriz energética brasileira.

Abstract

The energy sector of a country is an extremely important part to guarantee the sustainability of its economic development. A prior assessment of existing generation technologies is fundamental to guide the sector's strategic investment decisions. However, a macro-survey of the aspects of each source is necessary in order to make more assertive investment decisions. And in this current scenario of economic crisis and climate change, it is necessary to clarify how viable each type of generation is by economic and environmental bias. The present work has the objective of conducting a study of the use of nuclear energy in the country in a critical way for an analysis of its role within the Brazilian energy matrix.

Keywords: Nuclear energy. Brazilian energy matrix

1 Introdução

Desde os primórdios das civilizações, a humanidade utiliza energia proveniente de muitas fontes. No início do período pré-industrial o homem conseguia utilizar apenas sua própria energia e a luz solar. Seguidamente, após o domínio do fogo passou também a utilizar a energia da queima de lenha, posteriormente passando para tração animal, força da água e do vento. Com a chegada da revolução industrial, em meados do século XVIII, e diante da necessidade de suprir um maior consumo e produção de bens, houve o surgimento de novas formas de aproveitamento energético, sendo a principal delas a queima de carvão mineral que tocava as máquinas a vapor. Essas, foram largamente utilizadas na produção das primeiras fábricas e nas locomotivas de trens de ferro que transportam vários materiais. (FLORES, 2014).

Após a invenção do motor de combustão interna e sua larga utilização em máquinas já nos meados do século XIX, a principal fonte de energia passou a ser combustíveis derivados de petróleo. Os motores à combustão interna estavam presentes em várias aplicações como em veículos, trens e inclusive em usinas de geração de energia elétrica. Esta nova energia era aproveitada inicialmente, quase que exclusivamente, para iluminação pública. E devido ao aumento das redes de distribuição e urbanização do mundo, houve um aumento no consumo de energia elétrica. Neste cenário, produzir energia elétrica através da queima de petróleo já não era tão lucrativo. E logo começaram a surgir as primeiras usinas hidroelétricas, que usavam a força das águas para gerar energia elétrica. Porém a maioria das usinas ainda eram termoelétricas. (FLORES, 2014).

Em se tratando de Brasil, os primeiros movimentos de geração de energia elétrica se deram pela iniciativa privada já no final do século XIX. As principais formas de uso dessa energia eram também na iluminação pública e nas atividades fabris, agrícolas e comerciais. Com o passar dos anos, na medida que o consumo de energia elétrica subia, subia também os investimentos em novas usinas de geração. E já na década de 1930, o país possuía uma capacidade instalada total de 779 MW. (GOMES e VIEIRA, 2009)

Nos anos seguintes os investimentos públicos e privados no setor continuaram avançando, e foram construídas várias termoelétricas deixando a matriz elétrica brasileira fortemente dependente de petróleo e seus derivados. Onde o país vivenciou este cenário por um longo tempo até a crise do petróleo na década de 1970, em que o alto custo do petróleo incentivou a busca de novas fontes de energias alternativas que suprissem as necessidades da sociedade daquela época. (FLORES, 2014).

O governo do Brasil, tentando encontrar uma solução para sair dessa crise e suprir a crescente demanda de energia elétrica do país que se urbanizava aceleradamente, resolveu agir em duas vertentes: uma com a implantação do programa Proálcool e a outra investindo na geração de energia nuclear. Porém, diante de uma estimativa de crescimento econômico completamente equivocada, o planejamento energético das décadas de 1970 a 1990 foi cruelmente ineficaz. As sucessivas superestimativas do crescimento econômico e da demanda de eletricidade a ele associada, provocaram uma descrença nas ameaças de escassez no suprimento de eletricidade. Esse relaxamento na execução dos planos energéticos foi um dos fatores chave que contribuíram para o desabastecimento ocorrido em 2001, conhecido como “apagão”. (ALVIN *et al.*, 2007).

Até o fatídico blackout ocorrido em 2001, grande parte do investimento brasileiro vinha sendo focado na geração de energia através de usina hidroelétrica, sendo esse tipo de geração responsável por aproximadamente 70% da energia fornecida. (EPE, 2015a). Com isso, diante da vulnerabilidade climática da matriz energética brasileira e visando reduzir a possibilidade de desabastecimento, novamente foi necessário um investimento maciço na diversificação das fontes geradoras de energia elétrica. Muito dessa diversificação só foi alcançada devido a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, com a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. (PROINFA, 2002). Esta lei tem como objetivos principais diversificar as fontes de geração de energia elétrica, de forma a aumentar a segurança no abastecimento; a valorização das características e potencialidades regionais e locais, com criação de emprego, capacitação e formação de mão-de-obra; e a redução das emissões de gases de efeito estufa. (MARINHO, 2011).

Sendo assim, é notória a necessidade de buscar novas alternativas para tentar diversificar a matriz energética brasileira. Uma proposta é a utilização de fontes energéticas consideradas “limpas” que são as que menos contribuem para emissão de gases que compõem o efeito estufa. A energia nuclear é uma fonte geradora de energia elétrica que pode contribuir muito para essa mudança por apresentar a vantagem de não emitir substâncias que contribuem com o aquecimento global. (SAPUNARU et al., 2014).

Nas décadas de 1990 e de 2000, das necessidades mundiais de consumo de eletricidade, as centrais nucleares geram 14%, produzindo mais eletricidade do que toda a população mundial consumiu na primeira metade do século XX. Dos aproximadamente 400 reatores nucleares em funcionamento hoje, a grande maioria foi construída entre os anos de 1970 a 1980. Depois disso, a expansão da energia nuclear decaiu drasticamente muito em função do acidente de Chernobyl em 1986. Durante algum tempo, parecia que a energia nuclear poderia ter um fim. Contudo, nos últimos anos, a situação mudou novamente, graças acima de tudo aos programas em grande escala de energia nuclear na China e outras nações asiáticas. Atualmente, 57 novos reatores nucleares estão em construção em todo o mundo, com capacidade de geração total de eletricidade de 57.555 MW. Além disso, 151 reatores adicionais estão previstos em 24 países. (SAPUNARU et al., 2014).

O presente trabalho tenta mostrar as vantagens e desvantagens do uso da energia nuclear, visto que pode ser uma fonte bem interessante para diversificar o panorama do parque energético brasileiro.

2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é realizar um estudo da utilização da energia nuclear no país de forma crítica para uma análise de seu papel dentro da matriz energética brasileira.

2.1 Objetivos Específicos

Para delineamento deste trabalho, os objetivos específicos são:

- descrição técnica e física do funcionamento de uma usina nuclear;
- análise da história de utilização de usinas nucleares no Brasil;
- análise do cenário energético brasileiro;
- análise do cenário da energia nuclear no mundo;
- análise de custos de projetos em geração de energia nuclear;
- análise dos impactos ambientais do uso da fonte de energia nuclear.

3 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo do presente trabalho, será apresentado de forma sucinta uma definição do que é a energia nuclear, um descritivo básico de funcionamento de uma usina termonuclear de geração de energia, um panorama sobre como o Brasil se desenvolveu nesta área e por fim, um apanhado do cenário mundial quando a esta questão.

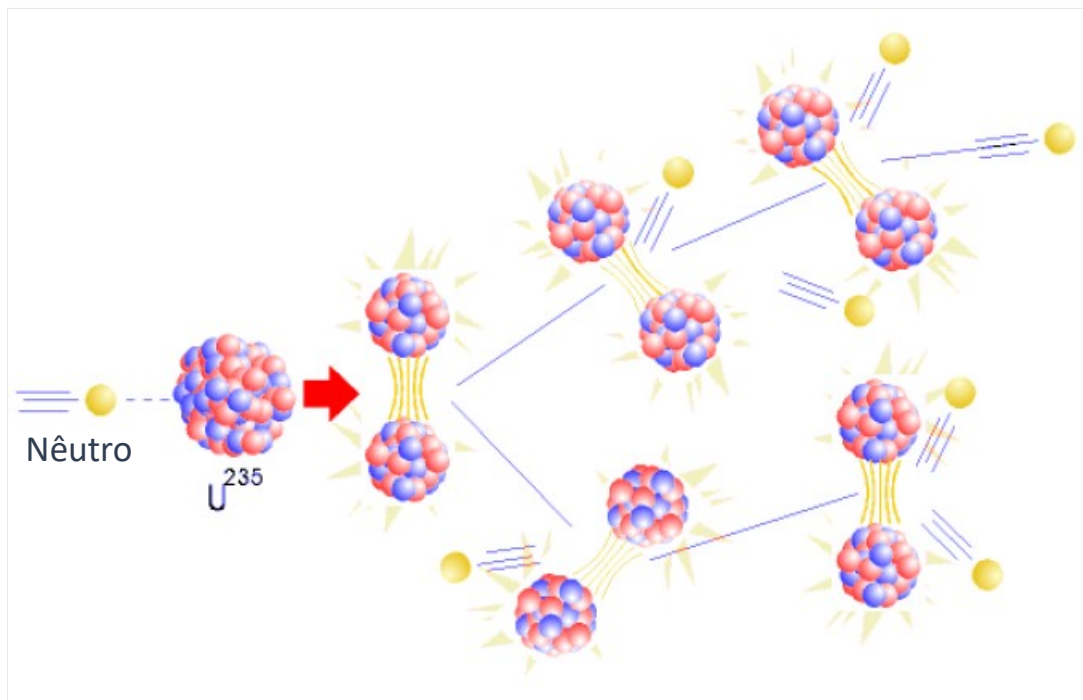
3.1 A Energia nuclear

Dá-se o nome de energia nuclear a energia que mantém prótons e nêutrons juntos no núcleo de um átomo mantendo a estrutura do mesmo. A forma encontrada para utilização dessa energia é baseada nas técnicas de fusão de hidrogênio e fissão nuclear de elementos como o e Urânio, (CARDOSO, 2012).

Nos reatores nucleares das usinas de geração de energia elétrica a fissão nuclear é a técnica mais utilizada para aproveitamento energético. O princípio de funcionamento desta se dá inicialmente quando uma fonte primária chamada bomba de nêutrons dispara um nêutron, e este, após acelerado colide com o elemento radioativo do reator. Esta colisão faz com que o átomo de Urânio fique instável e se divida em dois átomos menores, durante esta divisão acontece a liberação de energia. (CARDOSO, 2012).

A reação em cadeia de sucessivas quebras do Urânio dentro do reator, se dá começando pelo disparo do primeiro nêutron que se chocará com um átomo de Urânio, daí então acontece a quebra deste primeiro Urânio que se dividirá em 2 elementos diferentes, liberando energia e mais um nêutron livre que posteriormente se chocará com outros átomos de Urânio quebrando-os, liberando energia e mais 2 nêutrons, dando início assim a chamada reação em cadeia, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Representação da reação em cadeia ocorrida no reator



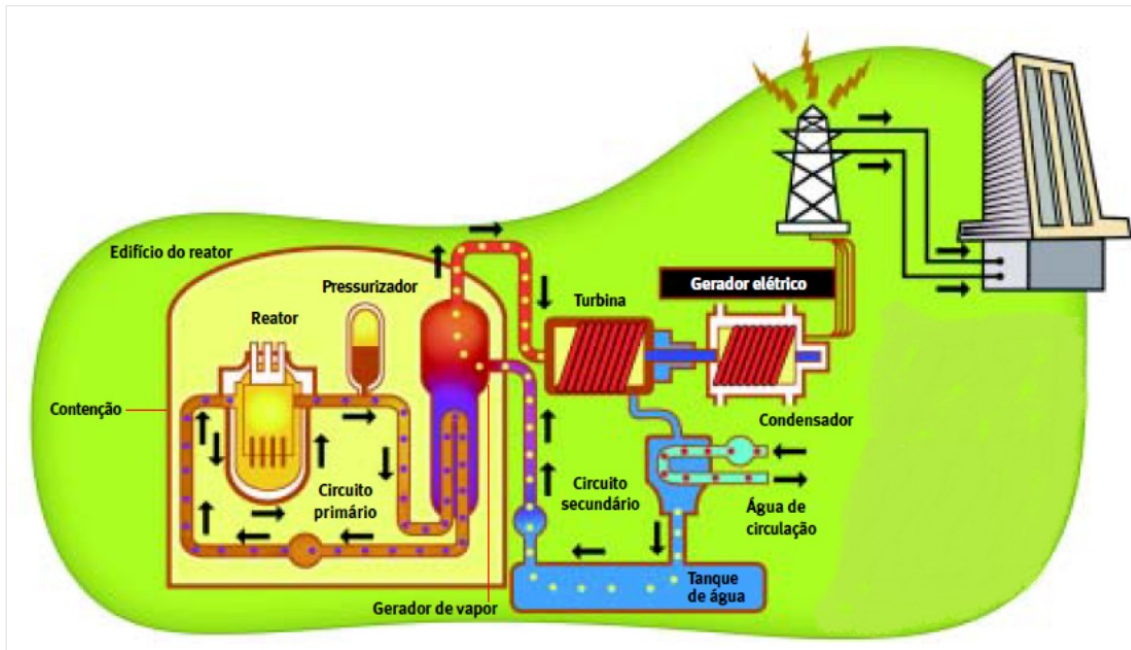
Fonte: (CARDOSO, 2012)

3.2 Usina Termonuclear

Usina termonuclear nada mais é que uma usina térmica a vapor de geração de energia elétrica, que não utiliza combustíveis fósseis ou carvão como fonte primária de calor, e sim a energia proveniente da fissão de elementos radioativos como o Urânio. Dentro do reator nuclear, centenas de varetas contendo material radioativo são fissionadas, liberando muito calor. Este calor irá aquecer a água (totalmente pura) que fica dentro do reator. Ela pode chegar à incríveis 1500°C a uma pressão de 157atm, (CARDOSO, 2012).

A Figura 2 ilustra a disposição de cada componente da usina e também indica como se dá o fluxo de água dos circuitos primário, secundário e de circulação.

Figura 2 – Usina Termonuclear



Fonte: (GONÇALVES e ALMEIDA, 2005)

Os principais componentes de uma usina termonuclear e suas funcionalidades são:

- Contenção e edifício do reator: obra civil que comporta toda instalação exposta a radiação;
- Reator: local onde ocorre a reação nuclear para geração de energia elétrica;
- Pressurizador: componente responsável por manter a pressão do circuito primário estável;
- Circuito primário: circuito fechado de água, composto por bomba d'água e tubulação, que transmite energia gerada do reator para a caldeira na forma de calor. Neste circuito a água é bombeada até o reator, chegando lá, a água é aquecida até aproximadamente 1500°C, daí é conduzida já na forma de vapor superaquecido até a caldeira que contem a água do circuito secundário. Neste reservatório, acontece a transferência de energia para a água do circuito secundário, o vapor superaquecido se

condensa, sendo guiado posteriormente para ser bombeado e recircular novamente dentro do circuito;

- Circuito secundário: circuito fechado de água, composto por bomba d'água e tubulação, que transmite energia na forma de calor da caldeira até a turbina. Neste circuito, a água é bombeada até a caldeira e nela é aquecida até aproximadamente 500°C, sendo conduzida então na forma de vapor superaquecido até a turbina. Após passar pela turbina e realizar trabalho mecânico sobre a mesma a água já apresenta uma redução na sua temperatura e é conduzida até o condensador na forma de vapor aquecido.
- Turbina: componente que recebe vapor superaquecido proveniente da caldeira e que realiza trabalho sobre o eixo mecânico do gerador elétrico;
- Gerador elétrico: máquina que converte energia mecânica proveniente da turbina em energia elétrica;
- Condensador: circuito de recirculação de água, que normalmente é um grande lago ou até mesmo o próprio mar, e que tem a finalidade de resfriar o vapor aquecido que sai da turbina, levando o mesmo ao estado líquido novamente para ser bombeado já no circuito secundário.

Como visto até aqui, o aproveitamento da energia nuclear na produção de energia elétrica exige a construção de uma usina/reator nuclear contendo componentes de alta complexidade tecnológica. Cujo desenvolvimento é provido por poucas nações do mundo.

3.3 O programa nuclear brasileiro

Com o início da era nuclear, por volta da década de 1940, o Brasil se mostrou com enorme vontade de dominar a energia nuclear para fins pacíficos, de usos militares científicos, médicos e industriais. Durante esse período foi

firmado um acordo de que o país se tornasse fornecedor de minerais atômicos para os Estados Unidos para que em troca o país norte americano transferisse tecnologias úteis que possibilitassem o Brasil desenvolver seu setor nuclear. Porém, esse acordo foi desfeito em 1950, em que o então Presidente Dutra, convocou o Almirante Álvaro Alberto para que propusesse medidas que definissem um Programa Nuclear Brasileiro. Em 1951, sob o mandato de Presidente de Getúlio Vargas, foi assinado um decreto que estabelecia um monopólio estatal sobre a pesquisa e exploração dos minerais radioativos, indo desde a lavra até a fabricação de combustível para abastecer reatores de potência. Também em 1951 foi criado a Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), que chefiado pelo mesmo Almirante tinha como objetivo a coordenação tanto do desenvolvimento da energia nuclear quanto do fortalecimento do setor científico, (PATTI, 2013).

Em 1953, sob influência do programa americano chamado Átomos para Paz, foi viabilizado a instalação do primeiro reator nuclear de pesquisas no Instituto de Energia Atômica (IEA). Em seguida foi criado o Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR), vinculado à Universidade Federal de Minas Gerais, que adquiriu um reator nuclear de pesquisas da empresa General Atomics, constituindo o segundo reator a ser instalado no Brasil, (SANTOS, 1992).

Em 1956, Juscelino Kubtschek juntamente com o Conselho de Segurança Nacional (CSN) adotaram uma mudança de plano para o setor nuclear que tentava reestabelecer a soberania nacional sobre qualquer matéria referente a energia nuclear. Esta mudança viabilizou a criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que estava ligada diretamente à presidência da República e tinha como princípio norteador supervisionar todas atividades ligadas à área nuclear e exercia papel importante na pauta de governo. Este direcionamento incluía o plano de metas de Kubtschek com altos incentivos a pesquisa e desenvolvimento da área nuclear no país, (PATTI, 2013).

Mesmo com vários planos de instalação de centrais termonucleares no país e contando ainda com o apoio de Juscelino, o final da década de 1950 e a metade dos anos 1960 tiveram atividades ligadas a energia nuclear resumidas apenas em pesquisas. Porém, não se pode dizer que não houve nenhum

desenvolvimento tecnológico para o Brasil nesse período. Já na segunda metade da década de 1960, o General Presidente Costa e Silva se mostrando fortemente contrário ao Tratado de Não-Proliferação de Armas Nucleares (TNP) da Organização das Nações Unidas (ONU) assinou acordo para aquisição de reatores da empresa norte-americana Westinghouse que, em conjunto com a comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos, forneceriam Urânio enriquecido e uma pequena central núcleo-elétrica. Desse acordo também ficou decidido que a primeira usina termonuclear brasileira seria instalada na praia de Itaorna, em Angra dos Reis no Rio de Janeiro, (PATTI, 2013).

Faz-se necessário enfatizar que o Brasil assinou um acordo comercial do tipo “caixa preta”, com a multinacional estadunidense, no qual o vendedor negocia pacotes tecnológicos fechados, sem a transferência de tecnologia. Onde na ocasião os cientistas brasileiros envolvidos no projeto tiveram o singelo papel de meros operadores das instalações da usina termonuclear Angra I, (SANTOS, 1992).

A figura 3 a seguir mostra imagem de uma fotografia retirada da época da construção da usina de Angra I.

Figura 3 – Construção de Angra I



Fonte: (VILELA, 2015)

No início da década de 1970, deu-se início pela Eletrobrás um programa de obras visando o atendimento do mercado de energia elétrica entre 1975 e 1990, chamado de plano 90. Este, baseava-se na expectativa de que a demanda de eletricidade cresceria a taxa anual de 8,7%, caso o mercado ficasse em baixa,

ou de 11,4% no caso do mercado em alta, além de prever o pleno esgotamento do potencial hidroelétrico da região sudeste em 1990, (MEDEIROS, 2005).

Com base nessas previsões, o referido plano alegava ser indispensável a instalação, no país, de uma capacidade de geração nucleoeletrica complementar através da construção de 6 a 8 usinas termonucleares de 1200 MW até 1990. Tal necessidade foi fator determinante para o país, após um ano de negociações secretas, nas quais a opinião da comunidade científica nacional não foi levada em consideração, firmar o Acordo de Cooperação para Usos Pacíficos da Energia Nuclear com a Alemanha, em 27 de junho de 1975. Esse acordo previa a instalação, no Brasil, de oito centrais termonucleares, cada uma com capacidade de 1.200 MW, uma usina de enriquecimento de urânio através do processo de jato centrífugo (jet nozzle), ainda em fase de experimentação, bem como de uma fábrica de reatores, a ser construída em Sepetiba (Rio de Janeiro) e cuja produção, com início esperado para o fim de 1978, possibilitaria a completa nacionalização dos equipamentos, (MEDEIROS, 2005).

Em 1976, FURNAS contratou a construção e o financiamento das Usinas de Angra II e III junto a empresa alemã KWU e bancos europeus. Em 1977 o antigo IPR foi transformado no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), em 1978 foi instaurado uma Comissão Parlamentar de Inquérito (CPI) no Senado Federal sobre o Programa Nuclear, diante dos atrasos nas obras de Angra I, II, III. Com base na tecnologia desenvolvida no Instituto de Pesquisas de Energéticas e Nucleares (IPEN) e no interesse da Marinha em desenvolver um submarino com propulsão nuclear, em 1979 foi deflagrado o Programa Autônomo de Tecnologia Nuclear (PATN). Porém este programa não era reconhecido pelos órgãos oficiais do governo, tal fato fez que a imprensa nacional no ano de 1986 chamasse o mesmo de programa paralelo, (MEDEIROS, 2005).

A figura 4 mostra as três usinas de Angra I, II e III (esta última ainda em construção, já na fase de conclusão da obra).

Figura 4 – Usinas de Angra I, II e III



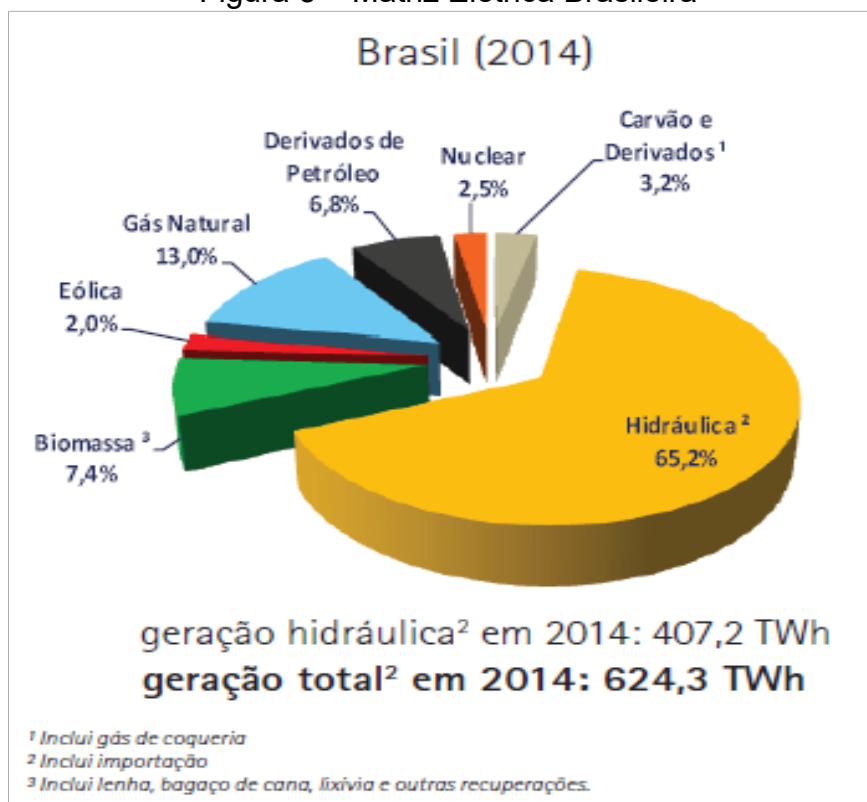
Fonte: Eletrobras-Eletronuclear

Com o fim do regime militar, em 1987, finalmente o Presidente José Sarney anunciou a existência do Programa Autônomo, e em 1988 foi inaugurado o Centro Experimental de Aramar em Iperó. Em 1990 durante a presidência de Collor, o PATN foi descontinuado e também foi fechado um campo de testes de explosivos nucleares da Aeronáutica localizado no Norte do Pará. Entre 1991 e 1994, o Brasil cedeu às pressões internacionais e aderiu plenamente a área latino-americana livre de armas nucleares. Finalmente, sob a presidência de Fernando Henrique Cardoso, o governo aderiu em 1998 ao TNP, (MEDEIROS, 2005).

3.4 O Cenário do Setor Elétrico Brasileiro

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é caracterizado por apresentar a geração hídrica, de forma predominante frente as outras fontes energéticas. No início de 2014, as hidroelétricas correspondiam a 65,2% da capacidade total instalada, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 – Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: (EPE, 2015a)

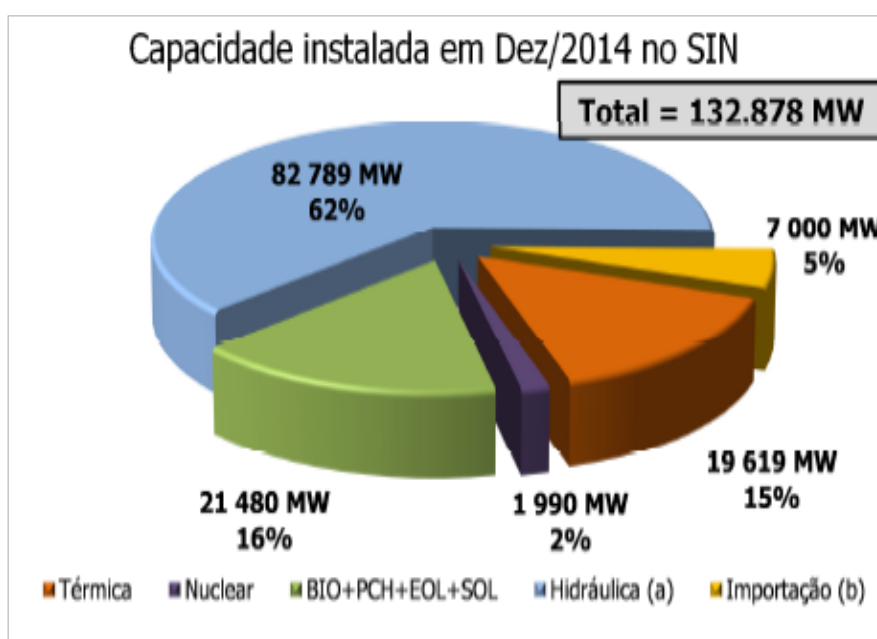
Contudo, suprir quase todo o sistema com energia hidráulica não é tarefa trivial, principalmente considerando o regime de chuvas irregular do país e sua marcada sazonalidade, onde tem-se na maior parte do território nacional chuvas concentradas entre dezembro e abril. Tal fato, mostra que o país tem vivenciado uma crise energética em virtude de um longo período de estiagem de chuvas que diminuiu o nível das barragens hidroelétricas. O Balanço Energético Nacional do ano de 2015 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que é ligada ao Ministério de Minas e Energia (MME), mostra que apesar do incremento de 3.177 MW na potência instalada do parque hidrelétrico, esse longo período de seca gerou um decréscimo da oferta de energia hidráulica de 5,6%. Então foi necessário acionar as usinas térmicas para suprir esse déficit de oferta da nossa principal fonte geradora, (EPE, 2015a).

Em um sistema de base hídrica com grande capacidade de regularização, como o sistema elétrico brasileiro, o uso das termoelétricas fica restrito aos anos de afluências desfavoráveis. Então, com o aumento da carga e com a redução gradativa da capacidade de regularização dos grandes reservatórios, as usinas térmicas foram despachadas com intensidade maior que as estimativas originais:

sendo preciso usá-las em todas as estações secas, o que não ocorreria se o sistema hídrico tivesse expandido sem perder a capacidade de regularização. Outro fato agravante é que como os custos de operação das termelétricas são elevados, os mesmos são transferidos para os consumidores na forma de bandeiras tarifárias para que se consiga fechar o balanço financeiro da produção de energia elétrica no país. (CASTRO, BRANDÃO e DANTAS, 2009).

O Plano Decenal de Expansão da Energia da EPE, revela que em dezembro de 2014, a potência total instalada no Sistema Interligado Nacional (SIN) do país, era de aproximadamente 133.000 MW, já incluso a energia importada do Paraguai. A Figura 6 mostra a representatividade de cada fonte geradora.

Figura 6 – Capacidade Instalada



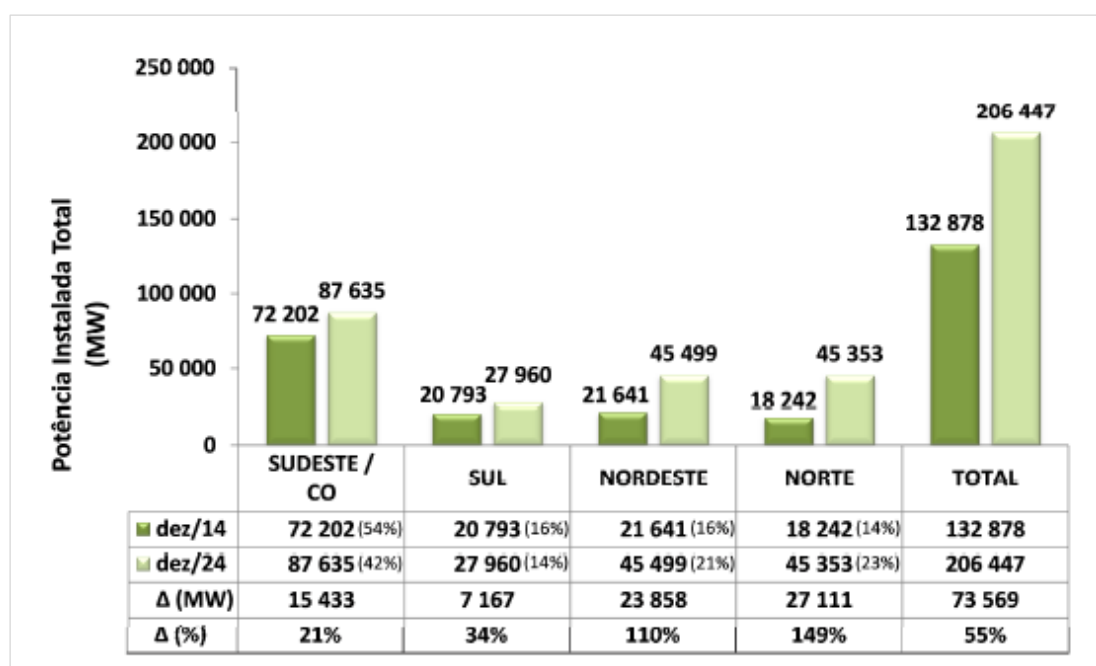
Fonte: (EPE, 2015b)

O referido Plano Decenal projetou também que o crescimento médio anual da carga de energia do SIN seria de aproximadamente 2,9 GW em média. Tal fato, representaria uma taxa percentual média de expansão do consumo de 3,8% ao ano, que totaliza um crescimento de mercado de 29 GW médios. Com isso, comparando demanda de crescimento médio até 2024 com a capacidade instalada do país, a geração de energia elétrica deveria se expandir para atender a um crescimento médio anual de cerca de 3.800 MW no SIN, o que representa

um acréscimo médio de aproximadamente 3,7% a.a., totalizando aproximadamente 38.000 MW de expansão da capacidade instalada.

Na Figura 7 são mostrados os valores referentes ao ano de 2014 e aqueles previstos para o final de 2024, resultantes dos estudos do planejamento decenal. Além dos valores em MW, é também indicada a participação percentual por região, onde observa-se que as regiões Norte e Nordeste receberão um considerável acréscimo em suas capacidades instaladas.

Figura 7 – Projeção da Capacidade Instalada para 2024



Fonte: (EPE, 2015b)

A Tabela 1 mostra um comparativo da evolução da capacidade instalada por fontes de geração durante o período de 2014 até 2024. Observa-se que as energias renováveis terão um acréscimo aproximado de 62 GW instalados no SIN, enquanto as não renováveis de aproximadamente 12 GW. Nota-se que a geração usando gás de processo não terá investimentos nos próximos anos, além disso, usinas que usam óleo diesel serão desativadas, reduzindo a participação dessa fonte na matriz energética do país. Nota-se ainda que das fontes não renováveis, terão altos investimentos, as termelétricas a gás natural, já as usinas de geração nuclear e as de carvão terão pequenas perspectivas de

investimento. Faz-se necessário destacar ainda que, percentualmente, a geração de energia elétrica por fontes renováveis representará 84% da totalidade na matriz energética brasileira em 2024 frente a 16% proveniente de fontes não renováveis. Demonstrando assim que o país terá destaque internacional na área ambiental pela não emissão de gases de efeito estufa para geração de energia elétrica, caso consiga cumprir essas projeções, (EPE, 2015a).

Tabela 1 – Evolução da Capacidade Instalada por fonte de geração

Fonte	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	Mega Watts										
Renováveis	111.269	118.380	127.866	135.485	142.972	145.177	145.560	151.554	158.102	165.460	173.417
Hidro	82.789	86.540	92.152	96.587	101.354	102.040	102.115	103.549	105.137	105.335	109.972
Importação	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
Biomassa+Éolica+PCH+Solar	21.480	24.840	28.714	31.899	34.618	36.137	36.445	41.005	45.965	51.125	56.445
Não Renováveis	21.609	21.913	22.082	22.092	22.493	26.714	28.230	29.430	30.630	31.830	33.030
Urânio	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	3.395	3.395	3.395	3.395	3.395	3.395
Gás Natural	11.043	11.317	11.486	12.026	12.427	14.903	16.419	17.619	18.819	20.019	21.219
Carvão	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064	3.304	3.304	3.304	3.304	3.304	3.304
Óleo Combustível	3.586	3.586	3.586	3.201	3.201	3.201	3.201	3.201	3.201	3.201	3.201
Óleo Diesel	1.239	1.269	1.269	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124
Gás de Processo	687	687	687	687	687	687	687	687	687	687	687
Total	132.878	140.293	149.948	157.577	165.465	171.891	173.790	180.984	188.732	197.290	206.447
Participação Relativa (%)											
Renováveis	83,7%	84,4%	85,3%	86,0%	86,4%	84,5%	83,8%	83,7%	83,7%	83,8%	84,0%
Hidro	67,6%	66,7%	66,1%	65,7%	65,5%	63,4%	62,8%	61,0%	59,3%	57,9%	56,7%
Outras	16,2%	17,7%	19,1%	20,2%	20,9%	21,0%	21,0%	22,7%	24,4%	26,0%	27,3%
Não Renováveis	16,3%	15,6%	14,7%	14,0%	13,6%	15,5%	16,2%	16,3%	16,3%	16,2%	16,0%
Urânio	1,5%	1,4%	1,3%	1,3%	1,2%	2,0%	2,0%	1,9%	1,8%	1,7%	1,6%
Outras	14,8%	14,2%	14,7%	14,1%	13,4%	12,5%	12,5%	13,0%	13,4%	13,7%	14,5%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: (EPE, 2015b)

A Tabela 2 apresenta uma estimativa de investimentos no setor elétrico até 2024. Ela mostra que serão necessários R\$ 268 bilhões em investimentos para que essa expansão se torne possível. Deste valor, estão inclusas as usinas já autorizadas com contratos assinados nos leilões de energia nova. Então, os investimentos em novas usinas não contratadas ou autorizadas (planejadas) serão da ordem de R\$165 bilhões.

Tabela 2 – Estimativa de investimentos de geração de energia

TIPO DE FONTES	Usinas contratadas e autorizadas	Usinas planejadas	TOTAL
	R\$ bilhões	R\$ bilhões	R\$ bilhões
HIDRO	18,3	54,8	73,1
PCH + BIOMASSA + EÓLICA + SOLAR	59,3	96,5	155,8
TEMELETRICA	26,0	13,6	39,6
NUCLEAR	11,0	-	11,0
GÁS NATURAL	12,7	13,6	26,3
CARVÃO	2,3	-	2,3
ÓLEO COMBUSTÍVEL/DIESEL	0,0	-	0,0
TOTAL	103,6	164,9	268,5

Fonte: (EPE, 2015b)

3.5 Cenário Mundial

No ano de 2014 os Estados Unidos foi o país que mais gerou energia elétrica por fonte nuclear, representando cerca de 33,13% da produção total deste tipo de energia no mundo. França com 17,34%, Rússia com 7,01 %, Coreia do Sul com 6,2%, China + Taiwan com 6,28%, Canadá com 4,09%, Alemanha com 3,81% e Ucrânia com 3,44%. O Brasil foi responsável por 0,58 % da geração de energia elétrica por fonte nuclear no mundo.(ELETROBRAS, 2016).

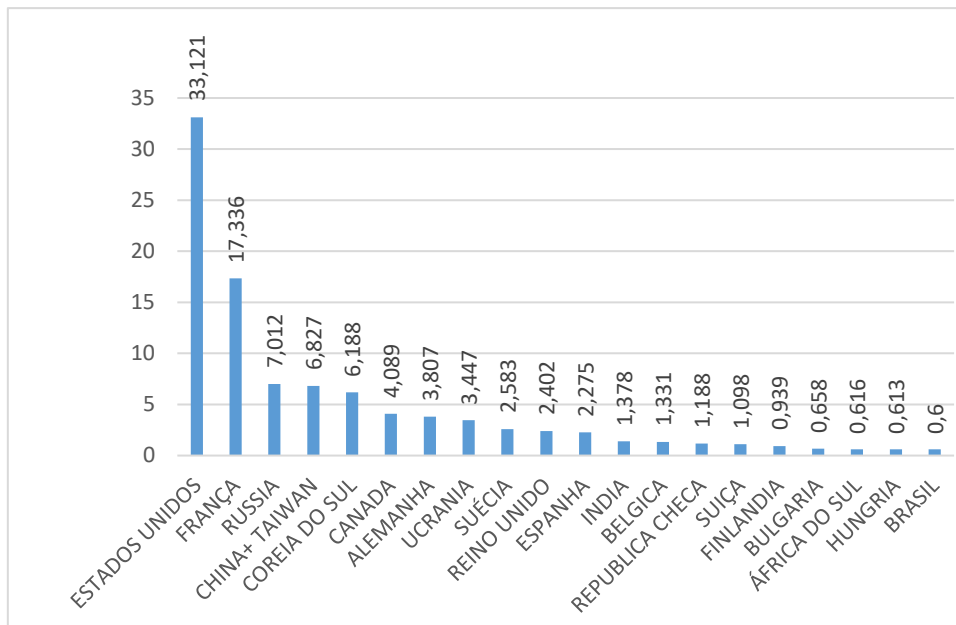
Segundo dados da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) reproduzidos no trabalho Panorama da Energia Nuclear da Eletronuclear no ano de 2008, os Estados Unidos possuíam 104 unidades de geração de energia termonuclear, sendo a nação com a maior quantidade reatores do mundo. Contudo, a França com 59 reatores, foi o país que demonstrou maior dependência da produção nuclear com 76,85% da energia total produzida por lá. A Tabela 3 indica o quantitativo de reatores e a potência gerada de alguns países, e a Figura 8 indica o percentual da geração de energia nuclear no mundo e já a Figura 9 mostra o percentual de geração nuclear na matriz energética dos seus respectivos países. (ELETROBRAS, 2016).

Tabela 3 – Países com o maior número de centrais nucleares e potência instalada no ano de 2007

	País	Unidades	MW
1º	Estados Unidos	104	100.582
2º	França	59	63.260
3º	Japão	55	47.587
4º	Rússia	31	21.743
5º	Alemanha	17	20.470
6º	Coréia	20	17.451
7º	Ucrânia	15	13.107
8º	Canadá	18	12.621
9º	Reino Unido	19	10.222
10º	Suécia	10	9.014
23º	Brasil	2	2.007
	Total	439	372.100

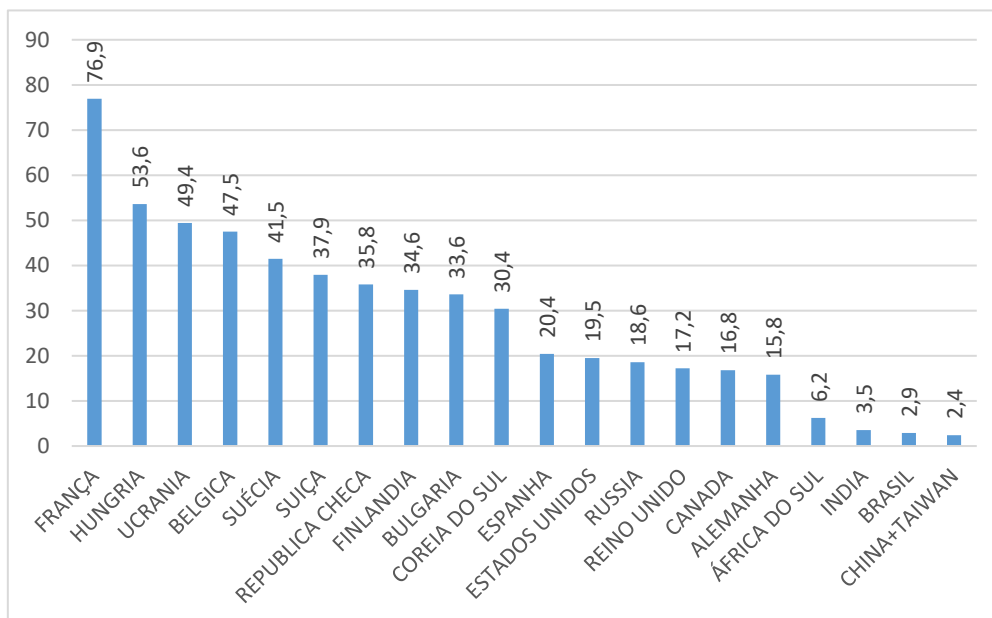
Fonte: (ANEEL, 2008)

Figura 8 – Percentual de geração de energia nuclear no mundo



Fonte:(ELETROBRÁS, 2016)

Figura 9 – Percentual de geração nuclear dentro da matriz energética



Fonte:(ELETROBRÁS, 2016)

Dezesseis países com representatividade da metade da população mundial, estão construindo 67 novos reatores nos próximos anos, com uma capacidade de produção de energia total líquida de 66,4 GW. Além disso, outros 45 países que não possuem tecnologia nuclear difundida, expressaram junto à AIEA interesse de construir reatores ou desenvolver a indústria neste sentido. (ELETROBRÁS, 2016).

Segundo o Atlas da Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2008) existem pesquisas sendo realizadas para melhorar o ciclo de vida das instalações nucleares, cujo padrão normal é de 30 anos. Estes estudos buscam avanços que melhorem a viabilidade econômica e reduzem o risco de acidentes nucleares das usinas.

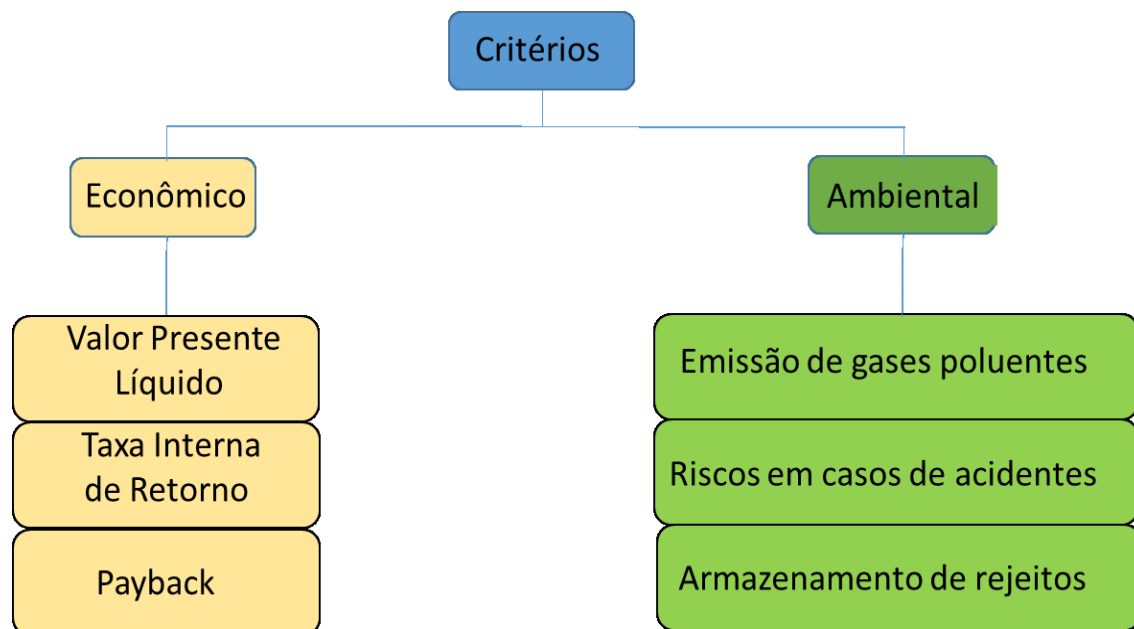
Outro fator de impulso à tendência de crescimento do setor nuclear nos próximos anos no mundo, é de caráter ambiental. Pois devido à necessidade de diversificação da matriz energética dos países, a energia nuclear vem sendo apontada como uma excelente alternativa de geração. Buscando assim atender ao consumo crescente de energia, poupando a queima de combustíveis fósseis enfrentando o tão temido aquecimento global. (ANEEL, 2008).

4 Metodologia

Neste capítulo será realizada a análise crítica proposta no objetivo do presente trabalho. Esta, foi delineada com base em pesquisas, artigos acadêmicos e dados levantados por agentes do setor elétrico e dos setores energéticos em geral.

A abordagem da análise foi pautada na elaboração de dois critérios, sendo eles: Econômico e Ambiental. A Figura 10 ilustra como estes foram dispostos para contribuir na referida análise. Foi proposta também uma comparação entre as três fontes de geração de energia elétrica: nuclear, hidráulica e térmica, para se poder concluir dessa forma, como a produção de energia elétrica utilizando a fonte nuclear pode contribuir ou não na matriz energética brasileira de forma positiva.

Figura 10 – Organograma dos critérios utilizados na análise



Fonte: Autor.

Uma breve definição dos subcritérios selecionados são:

- Critério Econômico
 - Payback: Tempo necessário para que os investimentos da construção da usina sejam retornados aos investidores;
 - Taxa Interna de Retorno (TIR): é uma medida relativa que demonstra o quanto rende um projeto de investimento, considerando o mesmo período de implantação do referido projeto.
 - Custo globais de geração: é um indicador de custos global de projetos de geração de energia elétrica, que determina o valor de investimento em função da produção de energia da usina geradora.

- Critério Ambiental
 - Emissão de Gases Poluentes: Refere-se à taxa de emissão de gases como NO_x, CO₂, CO, SO₂ e de partículas, tanto na geração quanto na construção dos componentes do sistema;
 - Riscos em casos de acidentes: Refere-se à probabilidade de acidente grave no circuito primário com fuga de radionuclídeos para meio ambiente em usinas nucleares;
 - Armazenamento de rejeitos: Refere-se à disposição de rejeitos finais da queima de combustíveis nucleares ou fósseis;

5 Análise Crítica

5.1 Critério Econômico

Neste capítulo, será exposto inicialmente a descrição teórica de três conceitos que indicam a viabilidade econômica de implantação de projetos, sendo eles: Custos Globais de Geração, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Tempo de Retorno de Capital (Pay-Back). Posteriormente será realizado um comparativo da viabilidade econômica de projetos de construção das três fontes de geração citadas anteriormente, a Hidráulica, a Térmica e a Nuclear.

5.1.1 Subcritério Custos Globais de Geração

Segundo (CPFL et. al, 2015), para um projeto de geração de energia, de qualquer tipo de fonte primária, o custo total de geração é estabelecido a partir de suas componentes básicas, que são: - custo de investimento, custo de operação e manutenção e custo de combustível. O primeiro custo básico, representa a parcela de despesas necessárias para aquisição de equipamentos e construção da usina. De forma simples a parcela relativa aos custos de investimento pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$CI = \frac{I}{PI \times FCM \times 8,760} \times FRC \quad (1)$$

Em que:

I = Investimento considerando os juros durante a construção;

PI = Potência instalada (MW)

FCM = Fator de capacidade da usina;

8.760 = número de horas no ano;

FRC = Fator de recuperação do capital.

O indicador de FCM é a proporção entre a produção efetiva da usina em um período de tempo e a produção total máxima neste mesmo período. Essa razão é representada na fórmula (1) mostrada na forma de valores percentuais.

Segundo (BRACIANI, 2011) dos custos globais de geração, cerca de 60% destes estão ligados a aquisição de equipamentos e construção de obras civis. O referido autor relata ainda que os custos de operação e manutenção compreendem os desembolsos realizados para cobertura dos custos com pessoal, material, serviços e outras despesas, necessários ao funcionamento dos equipamentos e instalações do sistema de produção.

Para os custos com combustível, as usinas hidroelétricas apresentam uma pequena vantagem competitiva por não apresentam estes, já para as térmicas e as nucleares, estes são regulados pelos preços de mercado e ainda sofrem influência da taxa de câmbio. Entretanto, segundo (Maués, 2008) para reatores nucleares típicos, dos quais são possíveis se obter 45 GWt-dia por tonelada de combustível, e considerando-se o custo de produção de um quilograma de urânio de aproximadamente US\$ 2425,00, o custo total efetivo gasto com combustível nesse caso é de US\$8,75/MWh.

Para as térmicas a carvão o custo total efetivo gasto com combustível é em torno de US\$10,94/MWh, já as demais térmicas apresentam este custo em torno US\$11,64/MWh, segundo (Maués, 2008).

5.1.2 Subcritério TIR

JÚNIOR, FILHO e COSTA (2006), definem a TIR como sendo a taxa de juros mínima aplicada pelo mercado financeiro, que faz com que um projeto seja rentável, levando-se em conta os recebimentos futuros do mesmo. A equação (2) apresenta a fórmula para cálculo da TIR.

$$VPL = 0 = I + \sum_{t=1}^n \left[\frac{R_t}{(1+TIR)^t} \right] + \frac{Q}{(1+TIR)^n} \quad (2)$$

Onde:

VPL – Valor Presente Líquido

I – Investimento de capital no início do projeto

R_t – Retorno depois de descontados os impostos

n – Prazo de análise do projeto

Q – Valor residual do projeto no final do prazo da análise

T – Tempo. (Anos)

TIR – Taxa Interna de Retorno

Um projeto é considerado viável se a TIR for maior que a menor taxa de juros aplicada no mercado financeiro para o capital a ser investido.

5.1.3 Subcritério Payback

Segundo MARQUEZAN (2006), o Payback, ou Payout, é um indicador que determina o tempo necessário para se recuperar um investimento. É utilizado para avaliar a atratividade de um investimento, não devendo ser o único considerado para definição de viabilidade de um projeto. No entanto a análise combinada deste com outros indicadores poderá demonstrar informações valiosas como a relação entre valor e tempo de retorno dos investimentos.

Pode-se calcular o indicador utilizando a equação (3):

$$PayBack = \frac{\text{Retorno por período}}{\text{Investimento Inicial}} \quad (3)$$

5.1.4 Comparação entre as três fontes

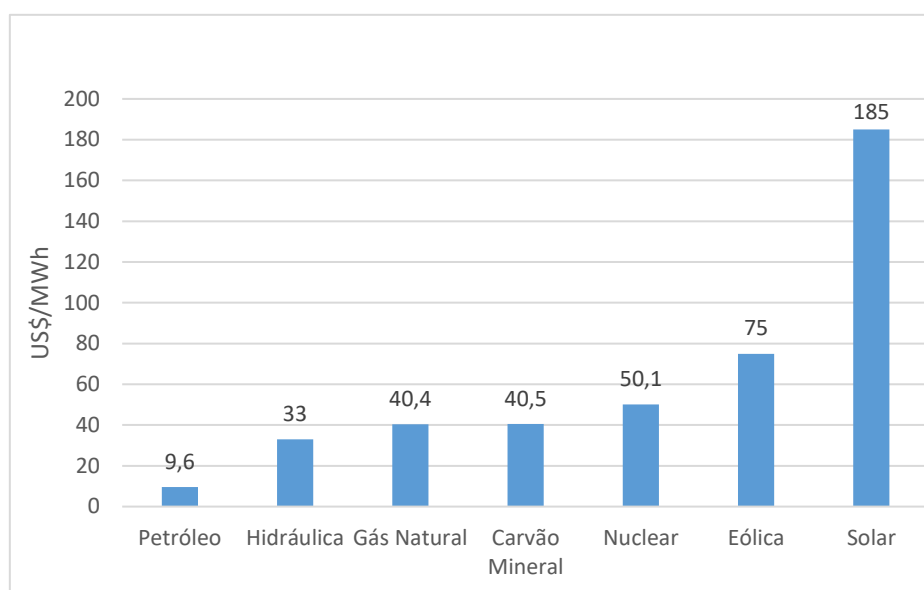
AGAPITO (2008), afirma que as formas de energia mais exploradas no mundo para a produção de energia elétrica são a hidráulica, o carvão mineral, o petróleo, através da utilização do óleo combustível ou do óleo diesel, o gás natural e os combustíveis radioativos. Essas fontes são conhecidas como fontes convencionais de energia.

Dessas fontes convencionais foi selecionado a hidráulica, térmica e a nuclear para se realizar um comparativo que se possa indicar qual a mais atrativa do ponto de vista do viés econômico.

É preciso salientar também que, devido as diferenças tecnológicas de cada fonte de geração, as mesmas possuem estruturas de custos diferentes. Outro ponto de destaque, é que as tecnologias hidráulica e térmica possuem abertura para receberem investimentos do setor privado. Já a cadeia de produção de energia nuclear é toda controlada pelo estado, sendo um setor estratégico de investimento financeiro governamental e de segurança nacional também.

BRONZATTI e NETO (2008), definem que o Petróleo é a fonte energética mais versátil e de menor custo, apresentando para época um custo de 9,6 US\$/MWh. A energia do gás natural e a hidráulica também apresentam custo por Megawatt-hora competitivo, possuindo 33 e 40,4 US\$/MWh respectivamente. Na Figura 11 é possível verificar que a energia nuclear, dentre as fontes primárias de geração, é a que possui um custo mais alto, estando ainda atrás de outras fontes secundárias como a eólica e a solar que possuem um custo mais elevado de 75 e 185 US\$/MWh respectivamente.

Figura 11 – Custos por fonte de geração



Fonte:(BRONZATTI e NETO, 2008)

ROSA (2007), relaciona alguns indicadores que podem nortear investidores quanto às perspectivas de custo de projetos de geração de energia elétrica no Brasil, comparando as três fontes primárias citadas anteriormente. Na Tabela 4 abaixo é possível verificar resumidamente que a energia nuclear apresenta baixo custo de combustível e taxa de retorno, entretanto a geração térmica apresenta alta taxa de retorno e um custo de combustível muito alto.

Tabela 4 – Custos por fonte de geração

	Hidro	Térmica	Nuclear
Investimento por kW	Alto	Menor	Muito Alto
Custo combustível	Nulo	Muito Alto	Baixo
Custo de Op. & Man.	Baixo	Alto	Muito Alto
Custo da energia	Baixo	Alto	Muito Alto
Tempo de construção	Grande	Menor	Grande
Tempo de vida	Grande	Pequeno	Médio
Importação	Pequena	Grande	Média
Taxa de retorno	Baixa	Alta	Baixa

Fonte:(ROSA, 2007)

(CARVALHO, 2012) afirma de acordo com a Tabela 5 que do custo global total efetivo com a produção de energia elétrica de usinas típicas brasileiras, as que possuem maior custo de geração são as térmicas a carvão, as nucleares e as térmicas movidas a gás natural. Porém se considerado uma ponderação destes custos em função da produção anual de energia, o custo benefício das nucleares se pagam.

Observa-se ainda que apesar de apresentarem um custo apenas 30% maior que às movidas a gás natural, elas produzem quase dez vezes mais energia quando comparamos as duas fontes de geração. Já se compararmos as nucleares com às térmicas a carvão, novamente a nuclear apresenta uma produção quase dez vezes maior e um custo de 16% menor. Além disso, elas apresentam um fator de capacidade de 87%, ou seja, elas conseguem permanecer 87% do tempo produzindo energia em suas capacidades máximas. Tais fatos, demonstram que a solução nuclear pode ser uma excelente saída para ser utilizada na complementaridade sazonal hídrica. Visto que as hidrelétricas são indubitavelmente as usinas que apresentam o menor custo e a maior produção no país.

Tabela 5 – Custo da energia e produção anual das usinas típicas brasileiras

PROJETO (Potência)	Custo da energia	Produção anual*
Carvão (350MW)	US\$ 134 / MWh	1.534.000 MWh
Nuclear (1345 MW)	US\$ 113 / MWh	10.258.000 MWh
Gás natural (500 MW)	US\$ 79 / MWh	1.315.000 MWh
Bagaço de cana (12MW)	US\$ 74 / MWh	63.000 MWh
Hidroelétrica (6450 MW)	US\$ 46 / MWh	28.270.350 MWh

*FC: Hidro=0,50; Nucleares=0,87; Gás=0,80; Carvão=0,50; Bagaço= 0,60

Fonte: (CARVALHO, 2012)

Portanto, pelos dados observados até aqui, nota-se que pela perspectiva de investimento econômico a energia nuclear, quando comparada às outras fontes primárias, é uma fonte que deve ser considerada pelo governo ao se

pensar em expansão do SIN. Pela alta disponibilidade que possui, por produzir energia de forma constante e pela não dependência de condições climáticas para garantia da produção de eletricidade.

5.2 Critério Ambiental

Neste capítulo foi realizada a análise proposta dentro do critério ambiental. Esta, será pautada na definição de três subcritérios conforme elucida a metodologia do presente trabalho, para que se possa realizar a comparação das três fontes primárias destacadas.

5.2.1 Subcritério emissão de gases poluentes

ROSA (2007), relata que pelo viés ambiental, a geração nuclear tem a vantagem de não emitir Gases de Efeito Estufa (GEE). As termelétricas que usam combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural emitem muito dióxido de carbono. As hidrelétricas já foram classificadas como um empreendimento com emissões consideradas quase nulas, porém estudos realizados nos reservatórios pelo grupo de pesquisas no Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais da UFRJ, mostraram que elas emitem metano e dióxido de carbono, em geral muito menos de que as termelétricas.

O gás natural é considerado o combustível fóssil menos impactante ao meio ambiente, quando comparado ao carvão mineral ou ao óleo combustível, comumente utilizados nas termoelétricas. Devido à baixa presença de contaminantes em sua composição e da elevada eficiência dos processos atuais de geração de energia, ele emite menor quantidade de GEEs e poluentes atmosféricos, além de não oferecer riscos diretos de contaminação de recursos hídricos. Sua natureza gasosa também reduz os riscos ambientais associados ao transporte e gerenciamento do combustível, que não precisa ser estocado e se dispersa rapidamente no ambiente em caso de vazamento. As termoelétricas

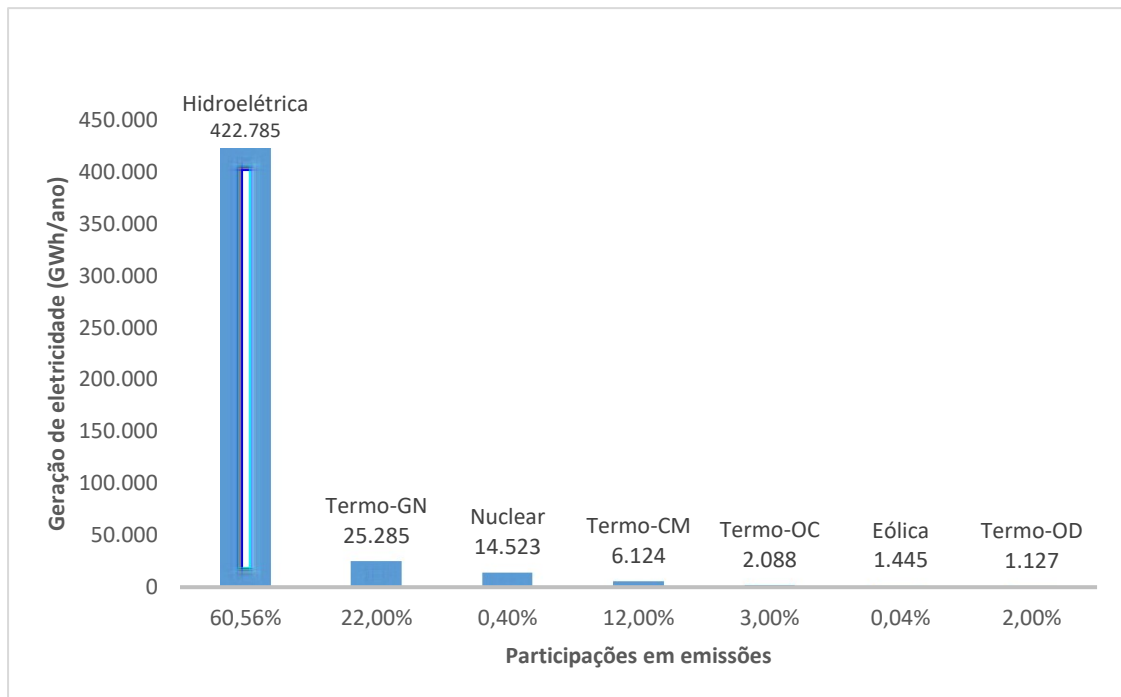
movidas a carvão mineral possuem como os principais aspectos e impactos ambientais a emissão de GEEs e poluentes atmosféricos, além da possibilidade de contaminação de recursos hídricos. (EPE, 2015a)

CARVALHO (2012), diz que a operação de uma central nuclear não provoca emissões de CO₂, mas que esse é emitido permanentemente, em todas as etapas do ciclo do combustível nuclear, da mineração de óxido de Urânio até a fabricação dos elementos combustíveis. E emite-se marginalmente, na construção e montagem das usinas nucleares inclusive.

MIRANDA (2012) pondera que na geração de eletricidade da matriz de energia elétrica do SIN no ano de 2010 as hidroelétricas foram responsáveis por emitir mais de 60% das emissões de GEE, as emissões geradas pelas termoelétricas somam um total de 39%, já as das usinas nucleares do país, emitiram apenas 0,4% do total de emissões, conforme mostra a Figura 12.

Portanto, diante do cenário demonstrado até aqui, é notório que do ponto de vista dos aspectos/impactos ambientais relacionados ao total de emissões de GEE, a geração de eletricidade por fonte nuclear é uma das que causa menos impactos, porém, faz-se necessário reavaliar as atividades de mineração e prospecção do combustível. Para que se possa minimizar ao máximo esses impactos. Feito isso, a cadeia de geração nuclear poderia ser classificada entre os empreendimentos considerados sustentáveis por emitirem uma quantidade bem pequena de poluentes na atmosfera quando comparada às outras fontes.

Figura 12 – Porcentagem de emissão de GEE por fonte X Geração de eletricidade



Fonte: (MIRANDA, 2012)

5.2.2 Subcritério riscos em casos de acidentes

No que tange quanto a probabilidade de acidente grave no circuito primário de usinas nucleares, CARVALHO (2012) afirma que esta é da ordem dos milionésimos. Afirma também que reatores utilizados em usinas como as de Angra ficam no interior de um vaso de pressão, que é isolado do meio ambiente por duas envoltórias. A envoltória interna, em aço ao vanádio, tem espessura de 2,5 centímetros e é estanque. A externa é de concreto armado e tem espessura de 1,5 a 2 metros. Assim, a probabilidade de acidente grave é mínima, mas não é desprezível.

CARVALHO (2012) destaca ainda que acidentes nucleares têm dimensões que os outros não têm. Um desastre de avião, por exemplo, atinge os passageiros e, por mais traumático que seja, é um acidente que termina no local e no instante em que acontece. Um acidente em central nuclear apenas começa no instante e no local em que ocorre. Alguns anos depois centenas de pessoas sofrerão males induzidos por exposição a radiações. Assim, na hipótese

de desastres graves, o risco (probabilidade versus gravidade) de danos a pessoas e a propriedades públicas e privadas é incalculável.

No que concerne aos reatores do tipo água pressurizada (PWR – Pressurized Water Reactor), os quais são utilizados nas usinas de Angra, segundo (ALVIN *et al.*, 2007) não foi registrado no seu funcionamento nenhum acidente com danos ambientais significativos no mundo. O acidente mais grave já registrado, foi o de Three Mile Island em 1979, que não teve consequências diretas ambientais, mas levou ao aperfeiçoamento desses tipos de reatores. (ALVIN *et al.*, 2007) destaca ainda que as maiores oportunidades de risco de contaminação ambiental estão no ciclo de produção do combustível nuclear. Porém observa que, esse tipo de acidente deve ser comparado aos acidentes nos demais ciclos de combustíveis, como os relacionados aos incêndios em instalações petrolíferas e no transporte de combustíveis líquidos ou gasosos, ou ainda na mineração do carvão. No Brasil, o tipo de dispersão de radiação que mais merece preocupação se relaciona com as atividades de mineração os afluentes podem gerar disseminação da radioatividade natural contida nos minérios.

Outro tipo de preocupação para nações que possuem usinas nucleares é a possibilidade de atentados terroristas a essas instalações. Pois diante desse cenário poderia ocorrer a proliferação do material radioativo do reator, obrigando governos a tomarem medidas extremas, como por exemplo desabilitar uma cidade inteira próxima ao local do atentado. Tal medida já foi aplicada diante do acidente nuclear de Chernobyl em 1986. Porém, segundo (CARVALHO, 2012) qualquer instalação industrial é vulnerável a esses ataques e as usinas nucleares não constituem exceção. Tudo depende do rigor com que as instalações são vigiadas e protegidas.

No que concerne as Hidroelétricas, o maior risco de acidentes que esta tecnologia está submetida e que impactaria na sociedade civil como um todo, seria o do rompimento das barragens que armazenam uma enorme quantidade de água. Porém, não foi encontrado relatos de acidentes de rompimento de barragens projetadas para geração de energia elétrica no Brasil.

Para as Termoelétricas movidas a gás, óleo, carvão e outros combustíveis fósseis o maior risco associado a esta tecnologia que poderia causar algum tipo de impacto para a população próxima à usina, seria o de incêndio ou explosão. Caso esses ocorram, dependendo da proporção dos mesmos, poderiam liberar no ar atmosférico uma concentração de gases tóxicos e cinzas que deixariam os habitantes correndo riscos de possíveis asfixias, devido má qualidade do ar respirado.

Portanto, como já mencionado, existe risco para qualquer tecnologia, e acidentes podem ocorrer, mas cabe à humanidade criar condições para que as vantagens superem de forma ampla e compensadora os riscos existentes. Isso é o que tem sido feito com a energia nuclear, onde simulados de desastres são feitos com frequência, para se aprimorar rotineiramente os procedimentos de segurança, garantindo assim a integridade de todos. Com isso, a energia nuclear tem se tornado cada vez mais presente e indispensável no cotidiano da sociedade moderna. (GONÇALVES e ALMEIDA, 2005)

5.2.3 Subcritério armazenamento de rejeitos

Para os aspectos/impactos referentes ao destino dos rejeitos produzidos nas usinas nucleares (ROSA, 2007) destaca ser o ponto de mais difícil equacionamento. Para ele, os rejeitos de baixa e média radioatividade, poderiam ser acondicionados em depósitos similares ao de Abadia, próximo a Goiânia, onde se colocou o material contaminado pelo acidente com o césio 137 em 1986. Porém, alerta que os rejeitos de alta radioatividade, não há solução consensual para eles no mundo. Nas usinas de Angra no estado do Rio de Janeiro, estão bem armazenados em piscinas junto aos reatores, mas essa solução tem prazo considerado curto comparado ao tempo duração dos reatores, que é de média de vinte anos. Mas a atividades radioativa dos rejeitos pode durar milhares de anos, por isso é preciso desde já estudar o que se fará depois da desativação dos reatores.

Dentre as formas de geração de energia, a nuclear é uma das que produzem menor volume de rejeitos e a que tem maior cuidado com o acondicionamento e guarda deles. Os rejeitos de baixa e média atividade correspondem ao maior volume de resíduo gerados, sendo que os mesmos podem ser utilizados pelas áreas médica e industrial. Os rejeitos de alta atividade, provenientes dos combustíveis já utilizados das usinas nucleares, são armazenados nas próprias usinas, que contam com local adequado para armazenar todo o volume produzido em sua vida útil, até que surja solução definitiva para o problema. Na tentativa de encontrar uma forma de deixar os rejeitos radioativos inócuos e inofensivos, milhões de dólares vêm sendo gastos em estudos e pesquisas. De modo a garantir a segurança dos depósitos de rejeitos radioativos, em todo o mundo, as agências reguladoras de atividades nucleares dos respectivos países geradores de resíduos devem, seguindo normas nacionais e internacionais, gerenciá-los e administrá-los através de políticas severas de vigia e segurança. (GONÇALVES e ALMEIDA, 2005)

Usinas a carvão são as que produzem maior quantidade de resíduos sólidos, dentre as termelétricas. Esses se dividem em cinzas leves ou secas, pesadas ou úmidas e lama do sistema de dessulfurização de gases, quando esse é utilizado. Resíduos sólidos de menor escala, são encontrados nos sedimentos do sistema de tratamento de efluentes líquidos e eventuais resíduos na preparação dos combustíveis. Esses resíduos podem causar alteração da qualidade do solo e cursos d'água. Para mitigar esses efeitos deve-se fazer gerenciamento dos resíduos sólidos, realizar tratamento e destinação adequados e priorizar, sempre que possível, o reaproveitamento. A geração de efluentes líquidos, é outro ponto a ser observado, que no caso de termelétricas são representados pela água de processo e pelo esgoto sanitário. A água de processo, principal descarga, corresponde às purgas do sistema de resfriamento e arrefecimento/purgas de caldeiras, entre outros. O lançamento da água de processo e esgoto sanitário sem o devido tratamento pode causar alteração da qualidade do solo e de cursos d'água. Estes efluentes devem ser tratados e dispostos adequadamente, de forma a mitigar esses impactos, respeitando-se os limites impostos pelos padrões de lançamento previstos na legislação ambiental. (EPE, 2016).

As hidroelétricas não apresentam geração de resíduos provenientes da geração de energia em si. Apenas produzem resíduos líquidos secundários, como esgoto sanitário e efluentes. Sendo necessário um tratamento prévio dos mesmos antes de depositá-los no ambiente, para que não possam contaminar o solo ou a água do rio do próprio reservatório.

Portanto, pelo viés do ponto de vista ambiental, a geração de energia elétrica por fonte nuclear apresenta vantagens e desvantagens como qualquer outra fonte de geração. Porém esta pode ter um papel estratégico fundamental no planejamento do SIN, por não depender de questões climáticas, como chuvas por exemplo, para se produzir energia na capacidade máxima de projeto das referidas usinas.

6 Conclusão

Pode-se concluir que, a demanda mundial por energia elétrica, faz a energia nuclear ser vista cada vez mais como a resposta para conter a emissão de gases do efeito estufa e reduzir nossa dependência de combustíveis fósseis. Além disso, a demanda energética projetada para os próximos dez anos, mesmo para crescimentos abaixo dos desejados e considerando algum esforço de investimentos em melhoria na eficiência do consumo de energia elétrica, é notório a necessidade de adicionar energia térmica à geração elétrica no SIN, hoje predominantemente hídrica. Onde a energia nuclear deve ter participação nessa geração, além disso, pode ser muito importante sua utilização para se conseguir realizar essa complementaridade sazonal das hidroelétricas.

De fato, cada tipo de geração possui suas vantagens e desvantagens, e uma conscientização abrangente do país na área energética, faz-se necessária. Para que se possa avaliar a geração de energia não utilizando apenas o preço como parâmetro. Ao se pensar em que o meio ambiente pode se tornar daqui algum tempo, a alternativa nuclear para horizontes futuros, pode apresentar um ganho considerável nas taxas de emissão de GEE, conforme mencionado anteriormente neste trabalho.

Observa-se também que, quanto aos riscos de grandes acidentes, estes estão diretamente ligados a falhas humanas. Sendo fortemente necessário, prevê-las com antecedência. Um fator imprescindível de cuidados para evita-las é a revisão de planos e procedimentos operacionais para tentar reduzir ao máximo a possibilidade de que grandes desastres ocorram.

Nota-se ainda que existe uma perspectiva de aumento do número de reatores no mundo, além do interesse de nações que não possuem o conhecimento difundido da energia nuclear de possuí-lo. Ratificando assim importância da energia nuclear no cenário mundial.

Por fim, dentre vários aspectos favoráveis, o desenvolvimento da tecnologia nuclear já trouxe ganhos importantes para o país que têm influência sobre outras áreas de atividade industrial. Como na pesquisa científica, nas

aplicações biomédicas, industriais e agrícolas e na propulsão naval. A manutenção dessas atividades impulsiona, por sua vez, o desenvolvimento próprio de tecnologias que sofrem restrições na importação de técnicas e equipamentos necessários a outros setores. E pelo fato de o Brasil estar em posição privilegiada no desenvolvimento e manejo responsável dessa tecnologia é necessário mantê-la ativa, já que certamente a energia nuclear fará parte de seu futuro energético.

7 Referência Bibliográficas

AGAPITO, C. Fontes renováveis de energia elétrica : Livros Grátis. 2008. Disponível em : <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a04v2159.pdf>>

ALVIN, C. F. *et al.* Energia nuclear em um cenário de trinta anos. v. 21, n. 59, p. 197–221, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a15v2159.pdf>>.

ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. v. Box 8 PIII, p. 117–128, 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap8.pdf>

BRONZATTI, F. L.; NETO, A. I. Matrizes energéticas no brasil: cenário 2010-2030. 2008. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiSyeSV7MPNAhVKHJAKHTTkDhEQFggcMAA&url=http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_S TO_077_541_11890.pdf&usg=AFQjCNHZZYdf_w_hNmpb2Fmqul7Sk4UvPw&sig2=MkKBjy8Z>

CARDOSO, E.M. Energia Nuclear – 3ª ed. – Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2012. (Apostila Educativa). Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/apostila-educativa-aplicacoes.pdf>>.

CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. A. A Competitividade da Bioeletricidade e a Metodologia dos Leilões de Energia Nova, 2009. Disponível em: <<http://www.xinguvivo.org.br/wp-content/uploads/2010/10/Estudos-UFRJ-sobre-inviabilidade-da-depend%C3%Aancia-brasileira-em-energia-hidrel%C3%A9trica.doc>>.

COMPANHIA PAULISTANA DE FORÇA E LUZ (CPFL). GRUPO DE ESTUDOS DO SISTEMA ELÉTRICO (GESEL). SUPERINTENDÊNCIA DE REGULAÇÃO ECONÔMICA (ANEEL). Relatório V – Formação de custos e preços de geração e transmissão. Janeiro 2015. Disponível em: <<https://www.cpf.com.br/energiassustentaveis/inovacao/projetos/Documents/PB3002/formacao-de-custos-e-precos-de-geracao-e-transmissao.pdf>>

ELETRONUCLEAR. Panorama da Energia Nuclear no Mundo Edição de 2016. 2016. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=SG_9CnL80wM=&tabid=406>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2015 - Ano base 2014: Relatório Síntese. 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Balan%C3%A7o%20Energ%C3%A9tico%20Nacional%20%E2%80%93%20BEN/EPedistribuicaoRelat%C3%B3rioFinaldoBalan%C3%A7oEnerg%C3%A9ticoNacional%E2%80%93BEN2014.aspx>>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024., 2015. 467 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Energia Termelétrica: Gás natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. 2016. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/Documents/Energia Termel%C3%A9trica - Online 13maio2016.pdf](http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-Online13maio2016.pdf)>.

ELETROBRAS – ELETRONUCLEAR. Angra 3: energia para o crescimento do país. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Aempresa/CentralNuclear/Angra3.aspx>>. Acesso em: 12 junho 2017.

FLORES, T. S. Um Breve Estudo Comparativo Entre as Energias Eólica e Nuclear. p. 8307, 2014. Disponível em: <<http://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/viewFile/18494/pdf>>.

GOMES, J. P. P.; VIERIA, M. M. F. O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002 *. v. 43, n. 2, p. 295–321, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rap/v43n2/v43n2a02>>

GONÇALVES, O. D.; ALMEIDA, I. P. S. A energia nuclear. p. 36–44, 2005. Disponível em: <<http://xa.yimg.com/kq/groups/22755666/617585716/name/Texto+2+A+energia+nuclear+e+seus+usos+na+sociedade.pdf>>.

JÚNIOR, P. C. A.; FILHO, D. O.; COSTA, D. R. Viabilidade Econômica De Produção De Lenha De Eucalipto Para Secagem De Produtos Agrícolas. v. 26, n. 1, p. 28–35, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30093.pdf>>

MARINHO, M. H. N. Oferta de Energia Através da Complementaridade Sazonal Hidro-Eólica no Estado de Pernambuco. p. 1–15, 2011. Disponível em: <http://www.poli.br/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=7812:artigo&id=24:institucional>.

MARQUEZAN, L. Revista Eletr. Revista Eletrônica de Contabilidade, v. iii, n. 55, p. 1–21, 2006. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/contabilidade/article/view/21/3644>>

MEDEIROS, T. R. Entraves ao Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear no Brasil: Dos Primórdios da Era Atômica ao Acordo Nuclear Brasil-Alemanha. Entraves ao Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear no Brasil: Dos Primórdios da Era Atômica ao Acordo Nuclear Brasil-Alemanha. 2005. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/036/39036339.pdf>.

MILANEZ, J. V.; ALMEIDA, R. D.; CARMO, F. S. Energia nuclear socialmente aceitável como solução possível para a demanda energética brasileira. v. 2, p. 1–10, 2006. Disponível em: <http://www.fisica.net/nuclear/energia_nuclear_socialmente_aceitavel_como_solucao_para_demanda_energetica_brasileira.pdf>.

PATTI, C. O programa nuclear brasileiro entre o passado e futuro, 2013. Disponível em: <<http://periodicos.unb.br/index.php/MED/article/download/9790/7388>>.

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 29 abr. 2002. Seção 1, p. 2, 2002.

ROSA, L. P. Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. Estudos Avançados, v. 21, n. 59, p. 39–58, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a04v2159.pdf>>

SANTOS, E. M. Retrospecto da política nuclear no brasil e perspectivas de utilização de pequenas nucleares - pcn's - no sistema elétrico brasileiro. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/25/031/25031985.pdf>.

SAPUNARU, R. A. *et al.* Por que Devemos Investir em Energia Nuclear? 2014. Disponível em: <<http://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/viewFile/18491/pdf>>.

VILLELA, G. Cercada de polêmica, a usina nuclear Angra 1 é construída durante a ditadura militar. Jornal O Globo. Disponível em: <<http://acervo.oglobo.globo.com/em-destaque/cercada-de-polemica-usina-nuclear-angra-1-construida-na-ditadura-militar-16997174>>.

WANG, J.-J. *et al.* Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier Ltd, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jiangjiang_Wang/publication/223061736_Review_on_multi-criteria_decision_analysis_aid_in_sustainable_energy_decision-making/links/54c3ba310cf256ed5a9233fd.pdf>.