



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

Energia Nuclear no Brasil
Viabilidade Econômica, Segurança Energética e
Custo de Oportunidade na Conclusão da Usina
Termonuclear de Angra 3

Jair Rodrigues dos Anjos

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS - CCS

DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO

Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental
nos Setores Energético e Mineral

Brasília, maio de 2019.



Jair Rodrigues dos Anjos

Energia Nuclear no Brasil

**Viabilidade Econômica, Segurança Energética e Custo de
Oportunidade na Conclusão da Usina Termonuclear de Angra 3**

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral, apresentada ao programa de pós-graduação *lato sensu* em Administração da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de especialista em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral

Orientador: Rodrigo Flora Calili

Brasília

Maio de 2019.

“O fracasso não é o fim de tudo, mas uma nova oportunidade para começar de novo com mais inteligência e redobrada vontade.”

Henry Ford

Agradecimentos

Ao Deus Todo-Poderoso por me dar força interior para superar as dificuldades e por me mostrar o caminho correto nos momentos difíceis.

À minha família, que tanto amo, pelo carinho, apoio e incentivo.

A todos os professores e colegas do curso pelo convívio e aprendizado.

Resumo

ANJOS, Jair Rodrigues dos Anjos. CALILI, Rodrigo Flora. **Energia Nuclear no Brasil – Viabilidade Econômica, Segurança Energética e Custo de Oportunidade na Conclusão da Usina Termonuclear de Angra 3**. Rio de Janeiro, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral – Departamento de Administração. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A construção de novas usinas nucleares no Brasil, bem como a conclusão e manutenção daquelas já existentes, têm sofrido críticas ao longo do tempo em função dos riscos e dos elevados custos associados à obtenção de energia elétrica por meio desta fonte. Neste contexto, este trabalho busca analisar como a energia nuclear pode encontrar um papel estratégico no desenvolvimento nacional, mesmo que seu custo seja elevado comparativamente às demais fontes de energia, e, especificamente, quais seriam os condicionantes para a viabilidade econômica da conclusão UTN Angra 3. Para isto, foi desenvolvida modelagem analítica com base nas despesas e nas receitas projetadas, utilizando-se indicadores financeiros para determinação dos possíveis cenários.

Palavras-chave

Energia Termonuclear, Leilões de Energia, Custo de Oportunidade, Fontes Alternativas de Geração de Energia.

Abstract

ANJOS, Jair Rodrigues dos Anjos. CALILI, Rodrigo Flora. **Energia Nuclear no Brasil – Viabilidade Econômica, Segurança Energética e Custo de Oportunidade na Conclusão da Usina Termonuclear de Angra 3**. Rio de Janeiro, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral – Departamento de Administração. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The construction of new nuclear power plants in Brazil, as well as the completion and maintenance of those already existing, have been criticized over time due to the risks and high costs associated with obtaining electric power through this source. In this context, this work seeks to analyze how nuclear energy can find a strategic role in national development, even if its cost is high compared to other energy sources, and specifically, what would be the determinants for the economic viability of the conclusion UTN Angra 3. For this purpose, analytical modeling was developed based on projected expenses and revenues, using financial indicators to determine possible scenarios.

Key-words

Thermonuclear Energy, Energy Auctions, Opportunity Cost, Alternative Sources of Energy Generation.

SUMÁRIO

1. Introdução	9
1.1. Objetivos da Pesquisa	9
1.2. Estudos Anteriores.....	10
1.3. Metodologia de Pesquisa.....	12
2. Principais Características da Energia Nuclear.....	13
2.1. Esquema de Funcionamento de uma Usina Nuclear.....	13
2.2. Vantagens e Desvantagens da Energia Nuclear.....	15
2.3. Fontes Alternativas de Energia Elétrica.....	17
3. Panorama da Energia Nuclear no Mundo e no Brasil.....	21
3.1. Situação Internacional	21
3.2. Situação no Brasil.....	23
3.3. Energia Nuclear, segurança energética e decisões estratégicas.....	24
4. Viabilidade Econômica da conclusão de Angra 3.....	26
4.1. Principais aspectos técnicos.....	26
4.2. Principais custos vinculados à obra	27
4.3. Cálculo da tarifa mínima de atratividade e condicionantes para conclusão da UTN Angra 3.....	28
4.4. Preços da Energia Nova nos Leilões de Energia e a competitividade da Energia Nuclear.....	33
5. Conclusão.....	35
6. Referências	37
Apêndice	40

1 Introdução

Em que pese as múltiplas aplicações da tecnologia nuclear e suas contribuições para o desenvolvimento social e econômico, não há como negar que ela está estigmatizada pelos riscos associados ao seu uso e aos resíduos tóxicos que produz (HIRSCH, 2005). Eventos históricos marcantes como os acidentes nos reatores nucleares de Chernobyl, na Ucrânia, e de Fukushima, no Japão, bem como a aplicação da tecnologia nuclear no desenvolvimento de artefatos bélicos de destruição em massa estão entre as lembranças que embasam os argumentos prevaletentes da opinião pública no sentido de que seu uso em larga escala deve ser desincentivado e descontinuado. Por vezes, esta percepção generalizada acaba restringindo o espaço para discussões ponderadas sobre os riscos e benefícios dos investimentos em tecnologia nuclear e de sua aplicação na resolução de problemas da sociedade moderna.

Dentre os fins pacíficos da tecnologia, a geração de energia elétrica certamente é o mais amplamente difundido, mas nem por isto deixa de ser controverso. Além dos riscos inerentes associados ao uso da tecnologia nuclear, existem controvérsias em relação à viabilidade técnica e econômica do desenvolvimento, da instalação e da manutenção de reatores nucleares para a geração de energia elétrica. Especificamente em relação ao Programa Nuclear Brasileiro, estas controvérsias incluem os elevados custos decorrentes dos atrasos na construção das unidades das Usinas Termonucleares (UTN) localizadas em Angra dos Reis, no Estado do Rio de Janeiro, cujos cronogramas de construção tiveram de ser adiados por diversas vezes, gerando passivos que vem sendo suportados por todos os consumidores de energia elétrica participantes do Sistema Interligado Nacional – SIN (Ventura, 2018). Ainda no caso brasileiro, deve-se somar às controvérsias o elevado preço da energia gerada a partir fontes termonucleares na comparação com o preço pago por idêntico fornecimento oriundo de outras fontes alternativas de energia elétrica, especialmente num país com abundantes recursos naturais e ampla possibilidade de uso de fontes renováveis economicamente viáveis. (ANEEL, 2019)

1.1 Objetivos da Pesquisa

Dada a importância da expansão de longo prazo do setor energético brasileiro para eliminação dos gargalos existentes em nossa economia, que limitam nossa competitividade e produtividade na comparação internacional, e

considerando que a energia nuclear tem participação relevante e estratégica no nosso parque gerador elétrico, o objetivo geral da pesquisa é avaliar a viabilidade econômica da expansão da oferta de energia por meio da ampliação da participação da energia nuclear na nossa matriz energética, inclusive no que se refere às razões de natureza estratégica, mesmo que seu custo de oportunidade seja mais elevado na comparação com outras fontes alternativas de energia.

Adicionalmente, têm-se como objetivos específicos avaliar quais seriam as condições mínimas para a viabilidade econômica da conclusão da usina termonuclear de Angra 3 e as tarifas de equilíbrio que as atendam, para o caso de os formuladores do planejamento energético brasileiro entenderem que a conclusão da UTN deva efetivamente ser realizada.

Neste contexto, o presente estudo utiliza dados¹ e informações disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) Eletrobrás Eletronuclear S.A. (Eletronuclear) e Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás), para traçar um panorama das perspectivas do setor elétrico e, em especial, da energia nuclear para os próximos anos em relação ao planejamento energético nacional. Estes dados e informações são comparados com os resultados obtidos nos leilões de energia elétrica realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Para atingir esses objetivos, o trabalho está organizado da seguinte maneira: discussão teórica sobre as principais características da energia nuclear em sua aplicação à geração de energia; apresentação da metodologia de pesquisa e de tratamento dos dados; histórico e panorama atual da energia nuclear no mundo e no Brasil; síntese dos resultados; e, por fim, apresentação das conclusões e recomendações.

1.2 Estudos Anteriores

Existem vários artigos e estudos acadêmicos que tratavam do uso da tecnologia nuclear para fins de produção de energia elétrica no Brasil e no mundo, bem como experiências internacionais relacionadas à viabilidade econômica da energia nuclear em comparação a fontes alternativas de

¹ Para os fins da pesquisa proposta, são utilizados apenas os dados e informações de acesso público disponibilizados nos sítios eletrônicos na internet das empresas citadas, sob a forma de estudos, balanços, demonstrações, relatórios, pareceres e notas explicativas. Já os dados relacionados aos leilões de energia elétrica são disponibilizados pela ANEEL, também em seu sítio eletrônico.

fornecimento de energia elétrica. Contudo, nenhum desses estudos abordou a viabilidade econômica da energia nuclear juntamente com as vantagens estratégicas do domínio pleno da tecnologia nuclear. Ao analisar estes artigos, além da viabilidade econômica, uma questão importante é entender como o domínio da tecnologia nuclear pode atender outros interesses estratégicos do Estado. Sendo assim, pode-se destacar:

Tanaka (2013) analisando os possíveis efeitos do acidente em Fukushima e da decisão governamental de encerrar as atividades de todas as usinas nucleares instaladas do país, no curto prazo, fez previsões que indicavam que a rápida migração da matriz energética poderia jogar o Japão numa forte recessão econômica nos anos seguintes. Segundo o autor, isto poderia ocorrer em função do aumento dos custos para geração de energia, que passaria a depender, sobretudo, da geração oriunda de combustíveis fósseis, num momento em que as compras de petróleo e gás natural estavam concentradas em países em conflito permanente. Esta situação poderia gerar reflexos sobre a competitividade das empresas japonesas e levar o Japão ao *Big Bang* energético e financeiro, caso estes conflitos se transformassem em guerras.

Osório (2016), estudando o mercado de eletricidade da Suíça, encontrou indícios de que quotas cada vez maiores de energias renováveis e de carga variável, tais como a energia fotovoltaica e energia eólica, podem afetar a segurança do fornecimento de energia. Destaca os muitos benefícios da energia renovável, mas conclui que a rápida eliminação das usinas nucleares aumenta a necessidade de importação de energia de outros países, sobretudo no inverno, gerando dependência externa e insegurança no fornecimento.

Nakai (2018) realizou estudo para apoiar as discussões na busca de um consenso sobre sistemas de energia socialmente aceitáveis e tecnologicamente viáveis para o Japão. Usando uma pesquisa experimental, analisou as preferências do consumidor sobre o fornecimento de eletricidade na área de Tóquio e descobriu que os consumidores estão dispostos a pagar mais caro pela eletricidade oriunda de fontes renováveis, em detrimento de fontes nucleares. Contudo, destacou que a estabilidade do fornecimento coloca a energia nuclear em vantagem em relação às demais fontes de fornecimento.

Hannan (2018) estudou as políticas energéticas realizadas pela Malásia no enfrentamento da dependência excessiva de combustíveis fósseis, redução dos níveis de emissão de carbono e alcance do desenvolvimento econômico ambientalmente sustentável. A pesquisa utilizou quatorze indicadores de energia para o desenvolvimento sustentável na Malásia, através da identificação de

políticas de energia em áreas significativas, tais como confiabilidade, segurança, adequação e custo-efetividade do fornecimento de energia; aumento da eficiência energética; minimização do impacto ambiental; e melhora da qualidade de vida em termos de bem-estar social. Concluiu que, além de fontes de energia renovável, a Malásia deve incluir entre as opções futuras de energia um programa de energia nuclear, ressaltando que a energia nuclear é ecologicamente correta somente se os rigorosos protocolos de controle e de segurança foram adequadamente atendidos.

Schaffer (2014) estudando a dinâmica das escolhas de políticas públicas no fomento do uso de fontes de energia renováveis constatou que o consumo de grandes parcelas de energia de origem fóssil e nuclear no fornecimento nacional de energia, bem como a maior intensidade de emissões de CO₂ numa dada economia, não impedem que sejam implementadas políticas de apoio às energias renováveis na produção de eletricidade. Pelo contrário, a presença marcante dessas características numa sociedade aumenta a probabilidade de um país adotar políticas públicas associadas à adoção de energias renováveis. Outra constatação foi que o crescimento econômico e o crescimento na capacidade de produção de energia renovável tendem a reduzir o apetite político por reformas nas políticas existentes.

Desta forma, percebe-se a relevância e o caráter inovador do estudo desenvolvido neste trabalho, ainda que pesquisas futuras possam aprofundar a investigação do tema.

1.3 Metodologia de Pesquisa

A pesquisa pode ser caracterizada, segundo Beuren *et al* (2003), como descritiva quanto aos seus objetivos, visto que está restrita a análise de informações já existentes, sendo tão somente tabuladas e processadas pelo pesquisador, sem sofrer qualquer tipo de interferência quanto aos resultados. Visa identificar e expor as relações entre as variáveis de custos e de receitas que geram os resultados, a fim de identificar as tarifas que viabilizam os empreendimentos, dadas as restrições dos modelos matemáticos utilizados.

Quanto aos procedimentos, classifica-se em bibliográfica e documental, tendo em vista que utiliza material elaborado por outros autores, como também de dados disponibilizados pelas empresas envolvidas e pela ANEEL.

Quanto à abordagem do problema, classifica-se como quali-quantitativa, pois, mesmo sem a aplicação de instrumentos e testes específicos na análise,

foram utilizados métodos para quantificação visando o tratamento e a comparação dos dados.

Por meio do tratamento e análise das informações coletadas, pretende-se demonstrar que do ponto de vista estritamente econômico os investimentos em geração de energia a partir da tecnologia nuclear não se justificam. Contudo, razões de cunho estratégico justificam a manutenção e finalização das usinas existentes, especialmente para preservação da *expertise* de décadas de conhecimento acumulado e de investimentos de longo prazo realizados.

2 Principais Características da Energia Nuclear

A energia nuclear está entre as fontes primárias de energia elétrica desde os anos 60, consolidando-se durante as décadas de 70 e 80 com o rápido crescimento dos investimentos na construção de usinas nucleares ao redor do mundo (ANEEL, 2009). Em geral, a energia nuclear ou termonuclear é decorrente da divisão de átomos de um determinado elemento químico que é transformado em outros elementos após sua divisão, liberando parte da matéria que o compõe sob a forma de energia.

Na produção de energia elétrica destinada ao consumo, os melhores átomos para divisão são os átomos de urânio e de plutônio, com preferência pelo primeiro, por conta da quantidade de energia liberada e melhor aproveitamento da energia decorrente da divisão.

2.1 Esquema de Funcionamento de uma Usina Nuclear

As usinas nucleares utilizam o processo de fissão nuclear para gerar energia elétrica. Nesse processo, átomos pesados de urânio-235 são bombardeados por nêutrons e estes se dividem em átomos menores de bário e criptônio, liberando energia sob a forma de radiação de valor equivalente à diferença entre a massa atômica do átomo original e as novas massas atômicas dos átomos remanescentes. Ocorre o desencadeamento de uma reação em cadeia, na qual os nêutrons resultantes da absorção do nêutron que causou a fissão passam a fissionar outros núcleos de urânio-235, até que todo o material físsil seja consumido. (Brasil Escola, 2018) A equação da reação em cadeia correspondente pode ser definida, conforme figura 1.

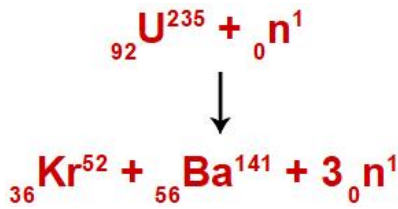


Figura 1: Equação que balanceia a reação em cadeia

Fonte: Brasil Escola, 2019.

No interior dos reatores nucleares a velocidade e a intensidade da reação em cadeia são estabilizadas por meio do uso de barras metálicas de cádmio que absorvem os nêutrons livres, formando isótopos, mantendo-se sob controle a quantidade de material físsil que deverá ser consumido ao longo do tempo e controlando-se a capacidade de geração térmica do reator nuclear.

Para transformação da energia nuclear em mecânica e da mecânica em elétrica, os reatores utilizam dois tipos de sistemas:

- a. Água pressurizada; e
- b. Água fervente.

Nos reatores que utilizam água pressurizada, dois circuitos trabalham em sintonia para gerar energia. No primeiro, circula a água que tem contato direto com o núcleo do reator em um circuito fechado, sendo aquecida até se tornar vapor de água. No segundo circuito, esta água aquece a corrente de água que passa pelo gerador de vapor, passa pela turbina elétrica e é novamente condensada e bombeada para o gerador de vapor. A turbina aciona o gerador elétrico que é responsável pela transformação da energia mecânica em energia elétrica. Para preservar a segurança, os dois circuitos são inteiramente independentes, evitando que o material radioativo tenha contato com a água do circuito secundário.

Já nos reatores de água fervente, existe um circuito único onde a água ferve no núcleo do reator e o vapor passa diretamente para os geradores elétricos (Eletronuclear, 2017). A figura 2 resume o desenho esquemático de uma usina nuclear.

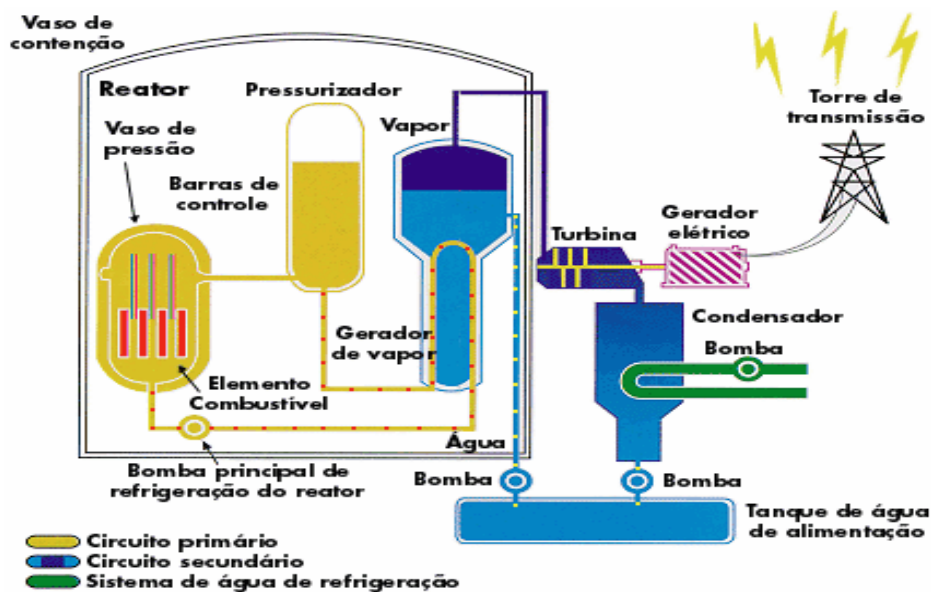


Figura 2: Desenho esquemático de uma usina nuclear

Fonte: Eletronuclear, 2019.

A grande vantagem do sistema com água pressurizada sobre o sistema com água fervente é que havendo falta de alimentação elétrica da usina, sua operação continua a contar com um grande volume de água dos circuitos independentes e dos geradores de vapor para gerar energia, permitindo o resfriamento do reator de forma natural até o restabelecimento da energia, evitando-se a necessidade do uso de bombas de refrigeração acionadas por energia elétrica.

2.2 Vantagens e Desvantagens da Energia Nuclear

Embora a tecnologia nuclear apresente diversas possibilidades de utilização, também apresenta grandes problemas. Por isso, torna-se importante avaliar as vantagens e desvantagens do uso para fins da obtenção de energia elétrica.

Vantagens

Por conta do baixo nível de emissões de CO₂ que, em geral, correspondem às emissões associadas à instalação das unidades fabris e da pequena quantidade de resíduos gerado, a energia nuclear é considerada por muitos como uma fonte de energia limpa, em especial, na comparação com fontes fósseis de fornecimento (EPE, 2019). No futuro, a utilização de créditos de emissão de carbono, a partir dos projetos de novas usinas, poderá ajudar a tornar a energia nuclear mais competitiva perante as demais fontes de energia. Além disso, tendo em vista que as reservas mundiais de urânio são

relativamente abundantes² para fins da pequena quantidade necessária à operação das usinas, esta fonte de energia também é considerada abundante.

Outra vantagem é que as unidades de produção exigem a ocupação de pequenas áreas para construção da usina, gerando uma relação GWh/área ínfima na comparação com qualquer uma das demais fontes de energia, exceto térmica. Ainda que as fontes fotovoltaicas³ e eólicas ocupem extensas áreas, em termos de comparação as barragens hidroelétricas são as melhores escolhas para ilustração. Embora muitas usinas hidroelétricas apresentem índices bem mais modestos, para comparação dos índices de eficiência de geração por unidade de área ocupada, pode-se utilizar uma usina com índices excelentes que é a usina de Itaipu, no Paraná, fronteira com o Paraguai, com cerca de 1.200 km² de lago e 12 GW de potência instalada, fornecendo uma relação de aproximadamente 10.000 kW/km². Nesse quesito, as usinas nucleares ocupam uma área pequena em relação à sua capacidade. Por exemplo, as usinas de Angra 1 e Angra 2 ocupam uma área um pouco maior que 1 km², possuindo capacidade instalada de aproximadamente 2.007 MW, que resulta numa relação potência/área de 2.007.000 kW/km², ou seja, em termos de eficiência de ocupação de área, este conjunto de usinas é mais de 200 vezes mais eficiente do que Itaipu.

Por fim, as usinas nucleares podem ser instaladas a distâncias relativamente curtas⁴ das unidades de consumo, barateando os custos associados à instalação das redes de distribuição da energia, e representam uma fonte de energia assegurada ou firme, pois realizam o despacho da energia independentemente de fatores climáticos como ventos, chuvas ou ausência de insolação.

Desvantagens

Entre as desvantagens da energia nuclear, pode-se citar o lixo nuclear radioativo deve ser armazenado em locais seguros e isolados por longos períodos, até que deixem de representar riscos para o meio ambiente; bem

² Estima-se que as reservas mundiais provadas possam suprir a demanda mundial por combustível nuclear por mais de um século. Brasil possui a 5º maior reserva e lidera em novas descobertas, com as reservas nacionais crescendo 357%, entre 2001 e 2011. (EXAME, 2016)

³ Para efeito de simplificação da análise, foram consideradas apenas as hipóteses de uso de áreas exclusivas para a geração de energia elétrica. Assim, por exemplo, foi desconsiderada a possibilidade de micro geração descentralizada a partir de células fotovoltaicas instaladas em telhados de casas ou prédios, que ocupariam espaços não utilizados para outros fins.

⁴ Ainda assim, por restrições de segurança, as fontes nucleares devem ser instaladas a distâncias relativamente maiores que as fontes eólicas ou fotovoltaicas.

como o preço mais caro na comparação com outras fontes de energia; os riscos de acidentes nucleares; e os problemas ambientais decorrentes.

Embora seja considerada por muitos como uma fonte limpa, a energia nuclear é classificada como não renovável, pois as reservas de urânio são finitas, apesar de atualmente abundantes. Além disso, as reservas comercialmente viáveis estão concentradas em um número pequeno de países, podendo sua disponibilidade se tornar um risco a mais no futuro.

Outro fator apontado como desvantagem da energia nuclear é o elevado custo de instalação e manutenção das instalações, que envolvem tecnologias com baixa disseminação e a necessidade de profissionais mais capacitados para operação.

Por fim, a tecnologia nuclear pode ser utilizada para a fabricação de artefatos bélicos, cujo poder de destruição representa uma ameaça à segurança mundial.

2.3 Fontes Alternativas de Energia Elétrica

A abundância de combustíveis fósseis e a alta competitividade das usinas hidrelétricas e termelétricas contribuíram durante muito tempo na estagnação das pesquisas do uso das fontes alternativas de geração de energia elétrica. Foram as crises do petróleo da década de 1970 e 1980, com o aumento dos preços decorrente, que despertaram governos e entidades internacionais para a necessidade da diversificação das fontes de energia, como forma de baratear custos e proporcionar segurança energética. Dali em diante, foram realizados investimentos para o desenvolvimento de novas tecnologias permitindo que fontes alternativas de energia concorram com as fontes tradicionais em termos de preço da energia gerada.

Energia Eólica

No Brasil, a tecnologia eólica mais difundida para a produção de energia elétrica se caracteriza pelo uso de turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH)⁵, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não flexível. Entre as inovações tecnológicas que permitiram o rápido

⁵ Existem outras tecnologias, como as que utilizam turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) que se encontra numa fase de rápido desenvolvimento e difusão, parecendo apontar para uma tecnologia com grande potencial (PURIFICAÇÃO, 2012).

crescimento do uso da tecnologia estão o controle do ângulo das pás e o uso do acionamento direto, com geradores sincronizados. Quanto ao porte, as turbinas classificam-se em pequenas (até 500 kW), médias (entre 500 kW e 1.000 kW) e grandes (maior que 1 MW) (ANEEL, 2009).

Sendo recurso abundante e amplamente disponível, pequenas centrais são capazes de atender sistemas isolados em localidades distantes dos centros urbanos, onde o acesso à energia elétrica pode não ser economicamente viável. Já grandes centrais eólicas podem concorrer com outras fontes de energia e conectar-se ao Sistema Interligado Nacional – SIN, inclusive, atuando como complemento à geração hidrelétrica em regiões com maior incidência de ventos, como a região nordeste, nos períodos de estiagem (ANEEL, 2009). Outra vantagem competitiva da energia eólica é o reduzido impacto ambiental dessas centrais.

Entre as desvantagens, pode-se apontar o ruído provocado pelos rotores; os impactos visuais nas grandes instalações; sombreamento de edifícios; efeito estroboscópico⁶; e eventuais interferências eletromagnéticas provocadas pelo material utilizado na fabricação (ANEEL, 2009).

Biomassa

Refere-se ao uso de fontes orgânicas para a produção de energia. Por meio da fotossíntese, as plantas capturam energia solar e a transformam em energia química. Esta energia armazenada pode ser transformada em energia térmica pela queima, em combustíveis líquidos como o álcool ou aplicados à geração de energia elétrica por meio de processos específicos.

⁶ **Efeito estroboscópico** ocorre quando uma fonte de luz pulsante ilumina um objeto em movimento, criando ilusão de ótica que cria efeito impossível ao movimento do objeto. Esta perturbação visual incomoda aqueles que estão expostos à visualização frequente, por isto pode gerar desvalorização imobiliária em áreas próximas às unidades de produção de energia eólica.

Em razão da baixa concentração espacial, os custos para obtenção de energia por meio da biomassa incluem aqueles relacionados com a coleta e o transporte para concentração do insumo. Por isto, utiliza-se em larga escala biomassa sob a forma de resíduos de culturas destinadas ao aproveitamento econômico para outros fins, tais como o bagaço de cana, palha de arroz, restos de árvores de serrarias e da indústria de celulose, bem como a coleta e tratamento do gás produzido a partir da decomposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários. Estes devem estar próximos das usinas processadoras para barateando dos custos.

A possibilidade de geração autônoma em indústrias que necessitam de energia térmica na forma de vapor para seus processos, como a da cana e a da celulose, é um dos atrativos do uso da biomassa, assim como o uso em conjunto com combustíveis complementares com vistas à geração de energia durante todo o ano.

Essa atratividade revela-se no fato de as maiores potências instaladas de empreendimentos termelétricos no Brasil proverem dos combustíveis bagaço de cana da indústria sucroalcooleira, onde as usinas produzem excedentes de energia a partir dos resíduos, vendendo-os para alimentação do sistema elétrico.

Já os biocombustíveis são os combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos derivados da biomassa, quer sejam de organismos vivos, quer através de seus processos metabólicos. A primeira geração de biocombustíveis engloba os derivados de matérias-primas, pela sua constituição em açúcar, amido e óleo, podendo ser misturados com gasolina ou diesel. A segunda geração trata dos produzidos pela biomassa celulósica de plantas herbáceas e perenes.

Entre as vantagens dos biocombustíveis, destaca-se os benefícios socioambientais, a fixação do homem no campo e a redução das emissões de CO². Entre as desvantagens estão a necessidade de alta disponibilidade de água para irrigação das plantas destinadas à transformação em combustíveis, além da competição com a produção de alimentos e a tendência de criação de empregos temporários e precários na época das colheitas.

Energia Solar

Considerando que a energia solar está disponível de forma abundante e absolutamente gratuita, argumenta-se que ela tem elevado potencial para ser uma das principais fontes de energia do mundo, tornar-se a grande solução para todos os problemas energéticos da nossa sociedade. Contudo, apesar de todas as vantagens aparentes a energia solar também possui desvantagens decorrentes do seu aproveitamento.

Para fins de obtenção de energia elétrica, pode-se dividir a energia solar em duas formas:

- a. Energia Solar Concentrada (*Concentrated Solar Power* – CSP);
- b. Energia Solar Fotovoltaica.

A energia solar concentrada consiste no uso de espelhos ou lentes para direcionar os raios solares a um receptor a altas temperaturas, em geral, na faixa entre 400°C e 1.000°C. Esse calor é transformado primeiramente em energia mecânica e em seguida em eletricidade (ANEEL, 2009).

Já a energia solar fotovoltaica é a tecnologia que converte a energia solar diretamente em energia elétrica, por meio de células fotovoltaicas especialmente projetadas para converter a energia radiante em energia elétrica decorrente do efeito fotoelétrico, que ocorre quando um elétron salta para uma órbita mais externa para outra em função da incidência de luz sobre a célula.

Entre as principais vantagens da energia solar está a baixa emissão de poluentes que, em geral, decorrente da fabricação dos equipamentos necessários para a construção dos painéis solares, e a possibilidade introdução de micro geração descentralizada na matriz energética, permitindo que pequenos empreendedores possam participar do mercado de energia. Além disso, as centrais necessitam de manutenção mínima e a tecnologia solar tem avançado para permitir que painéis solares sejam cada dia mais potentes e mais baratos.

Por outro lado, a potência entregue pela energia solar é instável, pois as quantidades de energia produzida variam de acordo com a situação climática, tais como chuvas e nevoeiros que prejudicam a incidência de insolação. Além disso, durante a noite não existe produção de energia,

gerando custos extras associados ao armazenamento da energia produzida durante o dia, processo que é pouco eficiente quando comparado ao custo de armazenamento de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) e a energia hidroelétrica (água), por exemplo.

3 Panorama da Energia Nuclear no Mundo e no Brasil

3.1 Situação Internacional

Uma das melhores sínteses do estágio atual da produção de energia elétrica no mundo pode ser encontrada no relatório **Nuclear Power Reactors in the World**, elaborado pela *International Atomic Energy Agency* — IAEA. Por meio deste relatório, são consolidadas e divulgadas informações sobre o uso da energia nuclear. Na edição de 2019⁷, o panorama da energia nuclear no mundo em relação aos reatores, pode ser assim resumido:

País	EM OPERAÇÃO		EM CONSTRUÇÃO	
	Reatores	Potência	Reatores	Potência
EUA	98	99 GW	4	5 GW
França	58	63 GW	1	2 GW
China	45	43 GW	13	13 GW
Japão	37	36 GW	2	3 GW
Rússia	35	28 GW	6	5 GW
Coreia do Sul	23	22 GW	5	7 GW
Índia	22	6 GW	7	5 GW
Brasil	2	2 GW	1	1 GW
Demais países	125	93 GW	18	21 GW
TOTAL	445	392 GW	57	62 GW

Em que pese o elevado número de reatores nucleares e sua concentração em relativamente poucos países, o seu número total tem se mantido relativamente estável ao longo do tempo desde meados da década de 1980, situando-se na faixa de 400 a 450 reatores em operação, conforme se vê na Figura 3.

⁷ Disponível para consulta em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>

Number of Operable Reactors Worldwide

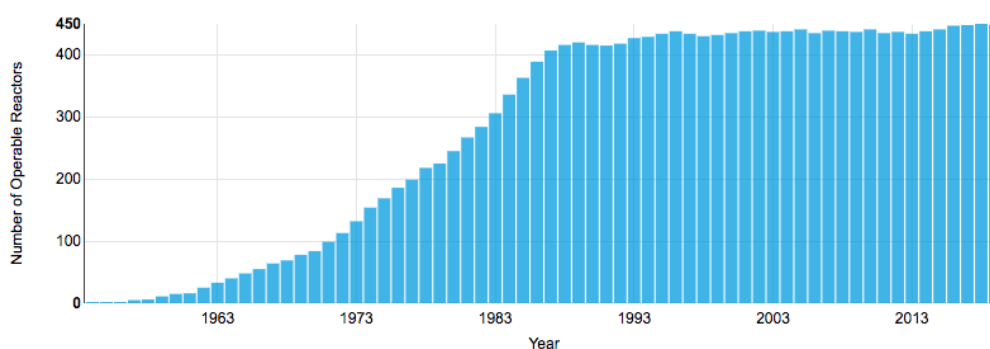


Figura 3: Reatores em operação ao redor do mundo
Fonte: IAEA, março de 2019.

Esta relativa estabilidade da matriz nuclear ao longo dos anos pode ser observada também na evolução da carga total gerada por fontes nucleares, que se manteve estável em torno de 2.000 a 2.700 TWh do início da década de 1990 em diante, inclusive nas participações relativas continentais, conforme demonstra a Figura 4 a seguir.

Nuclear Electricity Production

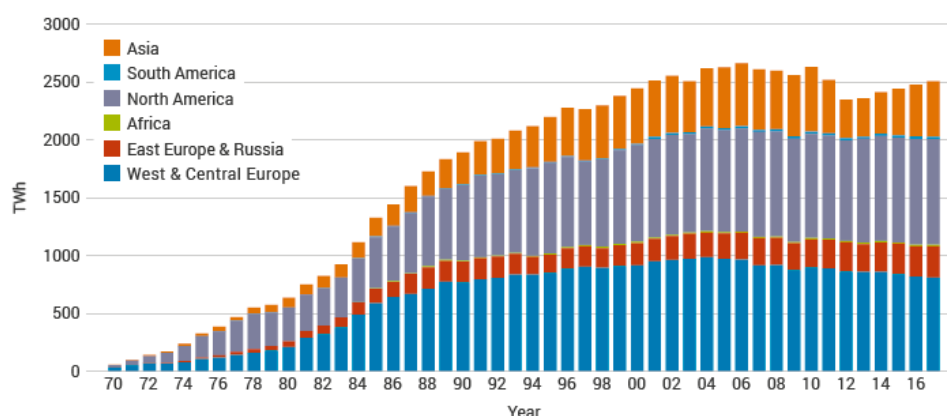


Figura 4: Produção de Energia a partir de fontes nucleares
Fonte: IAEA, março de 2019.

Esta situação parece indicar a inexistência de grandes ganhos de escala ou de eficiência energética na aplicação tecnologia nuclear à geração de energia elétrica; que os investimentos realizados da década de 1990 em diante tencionaram muito mais a manutenção do parque energético nuclear existente⁸ do que a ampliação da matriz nuclear; e que esta relativa estabilidade dos investimentos internacionais em geração nuclear não parece que será alterada nas próximas décadas.

⁸ China e Índia são exceções importantes, pois têm expandido seu número de UTN de forma consistente. Contudo, este aumento pode estar mais relacionado às estratégias de desenvolvimento de artefatos bélicos do que à real necessidade de geração de energia elétrica.

Em relação ao fornecimento total de energia, as fontes nucleares atenderam cerca de 11% (onze por cento) do total da demanda mundial no ano de 2018, percentual que pode ser bem superior para países que dispõem de parque nuclear amplo e consolidado, a exemplo da França que depende da energia nuclear para atendimento de mais de 80% (oitenta por cento) de sua demanda interna por energia. (AIEA, 2019).

3.2 Situação no Brasil

Em relação ao panorama nacional, o Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 traz importantes informações sobre o planejamento da expansão de longo prazo do setor energético brasileiro. No que se refere à expansão da matriz nuclear, o PNE 2030 recomenda a expansão do parque gerador com a manutenção do programa de expansão para a fonte nuclear, que deveria incluir, além da conclusão de Angra 3, mais quatro novas usinas termonucleares de 1.000 MW cada até 2030.

Destaca-se que a previsão da construção de novas usinas termonucleares constou de edições anteriores ao PNE 2030, que indicaram a necessidade de manutenção de um programa mínimo de expansão de usinas termonucleares para a manutenção do conhecimento tecnológico adquirido e da cadeia de produção nuclear, entre outros motivos (p.ex. PDE 2010, PDE 2015, PDE 2018, PDE 2026).

Sendo assim, verifica-se que a manutenção de um programa nuclear mínimo é diretriz que tem sido observada durante décadas no planejamento energético nacional, sob o argumento de se manter a fonte nuclear como uma opção disponível para atender ao crescimento da demanda de energia elétrica no longo prazo e para garantir que a indústria nacional mantenha a *expertise* adquirida ao longo de décadas nessa tecnologia.

Em relação à capacidade de geração e ao abastecimento do consumo nacional, as usinas Angra 1 e 2 respondem por 2,5% da energia consumida no país, ainda que respondam por 1,3% da capacidade instalada. A diferença entre capacidade instalada e consumo efetivo é resultado do fator de disponibilidade muito superior a outras fontes (BEN, 2018). Com a entrada em operação da UTN Angra 3, espera-se que a energia nuclear atenda 4% da demanda nacional e mais de 50% da demanda do Estado do Rio de Janeiro (Eletronuclear, 2018).

3.3 Energia Nuclear, segurança energética e decisões estratégicas

Em sua matriz energética, o Brasil dispõe de elevado número de alternativas para suprir sua demanda atual e futura por energia, com destaque para as fontes renováveis de energia, tais como hidráulica, solar, eólica e biomassa. Entretanto, para garantir a expansão do seu parque gerador nos próximos anos, todas as fontes devem ser consideradas, inclusive a fonte nuclear. Esta fonte não pode ser negligenciada, pois sabe-se que o nosso potencial hidrelétrico é finito; que a produção energética de usinas eólicas e solares é intermitente e que, por isso, dependem do desenvolvimento das tecnologias de armazenamento atualmente existentes⁹; e que existem compromissos assumidos pelo Brasil em relação à redução das emissões de gases que formam o efeito estufa. Sendo assim, em que pese seus desafios inerentes, a energia nuclear pode ser uma solução possível para vários dos inconvenientes das demais fontes de energia.

Nesse respeito, previu o PDE 2026 que Angra 3 deveria estar em operação somente em 2026, tendo em vista as incertezas associadas ao desenvolvimento do projeto. Este prazo permitiria que houvesse tempo hábil para a realização de novos leilões para substituir a oferta que viria a ser suprida pela usina, inclusive contemplando possíveis interrupções até a finalização e a entrada em operação do projeto. No entanto, deixar de concluir a UTN de Angra 3 pode representar o início da perda domínio da tecnologia nuclear, podendo implicar na restrição das opções disponíveis para a diversificação e ampliação da nossa matriz energética. No futuro, poderemos dispor de uma fonte energética abundante¹⁰ em nosso território, sem mais dispor da tecnologia necessária para o seu aproveitamento.

Num cenário de escassez de fontes de energia, poderíamos ter de recorrer às fontes sujas de fornecimento, expandindo nosso parque gerador por

⁹ Sobre as tecnologias de armazenamento de energia existentes, destaca-se, especialmente, os avanços no uso e barateamento das baterias eletroquímicas estacionárias.

¹⁰ Estima-se que as reservas nacionais provadas de Urânio poderiam suprir 12 (doze) usinas nucleares do porte de Angra 3 por no mínimo 80 (oitenta) anos, mesmo tendo sido prospectados apenas 30% do território nacional. (Brasil Escola, 2018)

meio de termelétricas a gás natural ou óleo diesel que seriam opções disponíveis para geração de base suprida pelas centrais nucleares. No primeiro caso, ficam prejudicadas as políticas redução das emissões de gases de efeito estufa, ao passo que no segundo, a expansão de centrais a gás natural implicaria no aumento da dependência externa do combustível, caso novas reservas nacionais não sejam economicamente viáveis.

Sendo assim, sob a ótica do planejamento energético, manter a fonte nuclear em nossa matriz energética parece ser uma decisão salutar na medida que dá maior flexibilidade ao planejamento e mais opções à expansão do sistema de geração, permitindo que os nossos recursos hídricos e a segurança energética sejam preservados.

Além da questão energética, outros aspectos devem ser levados em consideração na conclusão da construção de Angra 3. Entre eles estão a manutenção do conhecimento associado ao domínio da tecnologia nuclear, a manutenção cadeia de fornecimento existente, bem como as preocupações associadas ao setor de defesa.

De fato, na aprovação da Política e da Estratégia Nacional de Defesa¹¹ (PND), afirmou-se que “*desenvolver e dominar a tecnologia nuclear são necessidades estratégicas para o Brasil*”. Para atingir tal objetivo, o PND propôs que o Brasil continue projetando e construindo usinas nucleares, viabilizando que a tecnologia seja mantida sob domínio nacional, mesmo quando as plantas industriais sejam desenvolvidas em parceria com Estados e empresas estrangeiras (BRASIL, 2012). Dada a importância do tema, foi instituído o Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro (CDPNB)¹², colegiado ministerial de alto nível, tendo como finalidade “*estabelecer de diretrizes e metas para o desenvolvimento e acompanhamento do Programa Nuclear Brasileiro, a fim de contribuir para o desenvolvimento nacional e para a promoção do bem-estar da sociedade brasileira*”.

Assim, percebe-se que o desenvolvimento da energia nuclear e, em especial, a conclusão da UTN de Angra 3 estão inseridos no planejamento

¹¹ Lançada em 2008 e revista em 2012, quando foi aprovada a versão em vigor. Disponível em: <https://www.defesa.gov.br/estado-e-defesa/estrategia-nacional-de-defesa>.

¹² CDPNB foi criado por meio do Decreto datado de 2 de julho de 2008, alterado pelo Decreto de 22 de junho de 2017, quando passou a ser coordenado pelo Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República.

energético nacional, mas envolve outras questões relevantes, como as associadas à defesa nacional, à manutenção da cadeia industrial nuclear, bem como à formação e a manutenção de mão de obra especializada e capacitada de alto nível, pois são temas estratégicos e devem estar permanentemente sob à tutela do Estado.

4 Viabilidade Econômica da conclusão de Angra 3

4.1 Principais aspectos técnicos

No seu projeto básico, Angra 3 possui um reator de água pressurizada (PWR) de 1.405MW, originalmente projetado pela alemã *Siemens-KWU*, atual *Areva*, constituindo-se numa planta idêntica à Angra 2 que serve como planta de referência. Espera-se que Angra 3 repita o mesmo desempenho operacional de Angra 2, que tem um histórico bem-sucedido de vida operacional, tendo sido realizadas todas as principais modificações técnicas para mantê-la como uma planta de última geração (Eletronuclear, 2017).

Para efeito de comparação internacional, o reator PWR adotado em Angra 3 é o modelo predominante, sendo empregado em 277 dos 445 reatores em operação, bem como em 50 dos 57 reatores em construção (IAEA, 2019). Além disso, a UTN Angra 2, gêmea de Angra 3, está entre as melhores do mundo em termos de confiabilidade e disponibilidade, segundo dados da *World Association of Nuclear Operators* (Wano), batendo sucessivos recordes de produção de energia elétrica, em função da elevada disponibilidade que atende ao SIN. Na tabela 1, tem-se o resumo das principais premissas técnicas.

Tabela 1: Resumo das principais premissas técnicas da UTN Angra 3

Premissas	Valor de Referência
Potência Nominal Bruta	1.405 MW
Consumo Próprio	75 MW
Perda por disponibilidade não programada	3%
Perdas por transmissão	1%
Energia Elétrica Gerada	11.077.020 MW
Paradas Programadas durante vida útil	27 paradas
Dias por Parada Programada	25 dias

Fonte: Eletronuclear, 2019.

Estima-se que após sua conclusão as três usinas ocupem uma área em torno de 1,5 km², bem pequena na comparação com outras fontes de geração.

4.2 Principais custos vinculados à obra

Inicialmente, para fins da análise de viabilidade do projeto, a estimativa de custos efetivos da construção de UTN Angra 3 deve somar ao custo de conclusão todo o montante de investimento já realizado, mesmo que o atual cronograma de andamento da obra não esteja aderente ao custo afundado. Para isto, foram utilizados dados apresentados pela Eletronuclear, Eletrobrás, Empresa de Pesquisa Energética e outras fontes governamentais para estimar os investimentos realizados e os necessários à conclusão da UTN Angra 3.

Estima-se que os investimentos já realizados totalizam R\$ 10 bilhões desde que a obra foi retomada em 2010, e que os investimentos previstos a serem realizados até a conclusão da obra totalizam R\$ 15,5 bilhões, valores de janeiro de 2019. Em caso de cancelamento da obra, os custos para desmobilização e afundamento alcançariam R\$ 13 bilhões (Eletronuclear, 2019). Além disso, tomando-se por base o custo de manutenção de Angra 1 e Angra 2, o empreendimento ainda deve demandar R\$ 250 milhões anuais para operação e manutenção. A situação econômica do empreendimento é resumida na tabela 2.

Tabela 2: Situação do Empreendimento UTN Angra 3

Parâmetro	Valor
Tempo para conclusão	6 anos
Progresso atual do projeto (estimado)	62,3%
Investimento já realizado	R\$ 10 bilhões
Investimento a realizar	R\$ 15,5 bilhões
Custo de afundamento	R\$ 13 bilhões
Custo operacional	R\$ 250 milhões
Vida útil	40 anos

Fonte: Eletronuclear, 2019.

O montante já investido em Angra 3 representa cerca de 30% do custo total previsto com gastos, bem abaixo do progresso estimado apresentado de 62,50%. O tempo de construção da usina nuclear, em condições normais, pode ocorrer num prazo entre cinco a oito anos, mas considerando que o progresso estimado do empreendimento esteja de fato em 62,50% do total a conclusão da obra deve ocorrer em até seis anos.

4.3 Cálculo da tarifa mínima de atratividade e condicionantes para conclusão da UTN Angra 3

Na análise de viabilidade, foi desenvolvida uma modelagem simplificada de fluxo de caixa descontado, para aferição da tarifa viabilizadora do empreendimento, dadas as projeções de receitas, de custos, de juros e a remuneração mínima a ser paga aos acionistas.

Lembramos que, em relação ao resultado econômico do empreendimento, houve melhora expressiva das condições financeiras após a resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) decidir em outubro de 2018 pelo aumento da tarifa que remunera a energia gerada pelas usinas nucleares, como forma de atrair investidores externos. Assim, a tarifa passou de cerca de R\$ 240 por megawatts-hora (MWh) para R\$ 480/MWh. Segundo o CNPE, esta tarifa é considerada mais adequada ao padrão para empreendimentos mundiais do porte das usinas de Angra 1, 2 e 3 (Resolução CNPE nº 14, de 9 de outubro de 2018).

Inicialmente, o custo total do empreendimento foi fixado R\$ 30,5 bilhões, para incluir os custos já incorridos e aqueles destinados à conclusão da obra. Além disso, o empreendimento deveria remunerar os acionistas por uma taxa mínima de atratividade de 12% a.a., padrão nesse tipo de empreendimento e compatível com o que prevê a Eletronuclear em seu relatório de administração¹³.

No modelo, foi fixado o prazo de construção em cinco anos e meio, iniciando-se em julho de 2019 e terminando em dezembro de 2024, de forma que a UTN ficasse pronta a tempo de os pagamentos serem iniciados em janeiro

¹³ **Eletronuclear**. Relatório de Administração 2018, ano base 2017: “Dividendo prioritário, mínimo cumulativo de 10% ao ano, e participação, em igualdade de condições, com as ações ordinárias nos lucros que remanescerem depois de pago um **dividendo de 12% ao ano às ações ordinárias**.”

de 2025, por meio de contrato junto à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Em relação aos parâmetros gerais, tem-se na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros para conclusão da UTN Angra 3

Parâmetros	Valor de referência
Investimentos Afundados	R\$ 10 bilhões
Investimentos a realizar	R\$ 20,5 bilhões
Investimento Total	R\$ 30,5 bilhões
Custos de operação	75 R\$/MWh
Encargos de transmissão	4 R\$/kW
Impostos diretos	3,65% sobre a receita bruta
IR e CSSL	34% sobre a receita líquida
Capital de terceiros (empréstimo)	70% do capital investido
Capital Próprio	30% do capital investido
Sistema de depreciação	Linear
Conta de reserva (financiamento)	3 meses do serviço da dívida
Capital de Giro	1% do investimento
Fundo para descomissionamento	10% do investimento
Índice de cobertura da dívida	1,2 no mínimo
Tarifa Mínima	R\$ 480/MWh

Fonte: Eletronuclear, 2019.

Os arranjos para conclusão da obra foram estruturados no modelo de *Project Finance*¹⁴ sendo o financiamento feito a uma taxa real estimada de 7%

¹⁴ **Project Finance** é uma modalidade de estruturação financeira para a realização de projetos de grande porte, onde a principal fonte de receita para o pagamento do serviço da dívida de seu financiamento e do produto ou serviço resultante vem do fluxo de caixa gerado pela sua própria operação. Quando 100% dos recursos para o pagamento da dívida vem do fluxo do projeto, é chamado *project finance non recourse*, ou *project finance* puro. Esta característica de autofinanciamento permite a realização de projetos cujo porte seja superior ao de seu patrocinador. Por estas razões, *Project Finance* tem sido bastante utilizado nos projetos de expansão do setor elétrico nacional, onde a garantia da receita futura de comercialização da energia tem sido utilizada na alavancagem dos empreendimentos, possibilitando que a expansão seja realizada quase que inteiramente no 'pós-pago' pelos consumidores.

a.a. com amortização pela tabela SAC em 20 anos a partir do primeiro ano de operação. O capital próprio (*equity*) deverá ser colocado *upfront*, ou seja, todo em 2019. Adicionalmente, será captado um empréstimo ponte até que o financiamento final seja aportado no final de 2024, com custo de 10% a.a.

Com estes dados acima foram simuladas tarifas de equilíbrio, de tal forma que a Taxa Interna de Retorno (TIR) do Fluxo de Caixa Livre (FCL) seja igual ou superior a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 12%, definida como sendo igual ao Custo real do Capital Próprio.

No Fluxo de Caixa Livre (FCL) foi considerado todo o período do empreendimento, estimado em 46,5 anos, dos quais: 1 ano de atividades preparatórias, 5,5 anos de para conclusão da obra e 40 anos de operação comercial. A Demonstração de Resultados correspondente é resumida abaixo.

RECEITA OPERACIONAL BRUTA

(-) Deduções sobre Vendas (COFINS e PIS)

(=) RECEITA OPERACIONAL LÍQUIDA

(-) Custo do Combustível Nuclear (O&M)

(-) Encargos de Transmissão (TUSD)

(-) Custo Operacional (O&M)

(-) Fundo de Descomissionamento da Planta

(-) Depreciação

(=) LAJIR - LUCRO ANTES JUROS E IMPOSTO DE RENDA

(-) Remuneração do Capital de Terceiros (Juros)

(=) LAIR - LUCRO ANTES DO IMPOSTO DE RENDA

(-) Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL)

(-) Provisão para Imposto de Renda (IRPJ)

(=) LUCRO LÍQUIDO

FLUXO DE CAIXA DO PROJETO

(=) LUCRO LÍQUIDO

(+) Depreciação

(-) Amortizações dos Financiamentos (Principal)

(-) Investimentos

(+) Financiamentos (Moedas Nacional e Estrangeira)

(-) Juros de empréstimos

(=) FLUXO DE CAIXA LIVRE (FCL)

Considerando as premissas propostas, teremos uma Taxa Interna de Retorno (TIR) equivalente a 0,16%, conforme cálculo detalhado do Anexo I. Ou

seja, o empreendimento é inviável do ponto de vista econômico, já que todo o custo do investimento, incluídos os custos operacionais e impostos, é recuperado dentro da vida útil do empreendimento, mas o capital é remunerado com uma TIR inferior à taxa mínima de atratividade de 12%.

Tarifa mínima de atratividade

Dado que tarifa atual paga pela energia nuclear não remunera adequadamente os investimentos realizados, realizou-se a conta reversa para encontrar o valor da tarifa de equilíbrio que recuperaria os investimentos e garantiria a remuneração mínima de 12% aos acionistas. Mantendo-se todas as premissas propostas, inclusive de expectativa de investimento de R\$ 30,5 bilhões, buscou-se a taxa mínima de atratividade de 12% para a TIR por meio da alteração do valor da tarifa de geração de energia. Para o caso concreto, obteve-se como o valor mínimo de R\$ 917 MWh, conforme detalhamento do cálculo do Anexo II, que representa mais do que o dobro da tarifa atualmente cobrada.

Aporte da União e afundamento dos investimentos incorridos

Como uma terceira simulação, foi considerada a hipótese de que a União assumira os financiamentos atualmente suportados pela Eletronuclear relacionados à construção de Angra 3, de forma que a empresa possa considerar estes valores como aumento de participação no capital (*Equity*), baixando as obrigações do seu balanço financeiro. Lembrando que esta opção implicaria na assunção de mais de R\$ 10 bilhões de reais por parte União, dentro do ambiente de restrição fiscal severa atualmente enfrentado.

Mesmo neste caso, o empreendimento ainda se mantém inviável do ponto de vista econômico, dado que a TIR estimada é de 6,55%, mantendo-se a tarifa atualmente paga de R\$ 480 reais, conforme demonstrado no Anexo III. Para que o empreendimento se viabilize com uma taxa mínima de atratividade de 12% e considerando apenas o investimento destinado à conclusão da obra, a nova tarifa a ser paga seria de R\$ 649 MWh, conforme detalhado no IV.

Diluição do Capital Social e entrada de parceiro privado

Outra hipótese para viabilização do empreendimento seria diluir o capital da Eletrobrás, com entrada de um parceiro privado aportando recursos e se responsabilizando pela conclusão das obras de Angra 3, recebendo em contrapartida a remuneração própria de acionistas, via dividendos, e mais uma parcela da tarifa de geração de energia para ressarcimento dos investimentos.

Neste caso, existem vários problemas de natureza legal que deviam ser enfrentados, como exemplo da obtenção de autorização legislativa para venda das ações da empresa; flexibilização do monopólio constitucionalmente concedido à União nas atividades nucleares; e o direito de preferência dos acionistas minoritários na aquisição das ações negociadas em bolsa de valores.

Mesmo que todos estes obstáculos fossem superados, ainda assim o empreendimento não se viabilizaria do ponto de vista econômico, pois o valor máximo a ser angariado num possível leilão de ações seria de R\$ 6,6 bilhões de reais, conforme valor patrimonial das ações da Eletrobrás presentes no seu Relatório de Administração 2018, reproduzido na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5: Composição do Capital Social

Tipo de Ações	Quantidade de Ações	Valor do Capital	Relação (%)
Ordinárias	20.401.976.042	5.157.518.633,12	78,1051818527
Preferências	5.719.179.505	1.449.739.039,43	21,8948181473
TOTAL	26.121.155.547	6.607.257.672,55	100,00

Fonte: Eletronuclear, 2018.

Neste caso, considerando a hipótese de que existam empresas interessadas em aportar capital correspondente a 100% (cem por cento) do capital atual da Eletrobrás e de que a União assumirá os passivos relacionados aos investimentos realizados até o momento na UTN Angra 3 e atualmente suportados pela Eletronuclear, então a tarifa atual de R\$ 480 MWh seria capaz de ressarcir os investimentos adicionais necessários à conclusão da obra e ainda permitiriam que a empresa responsável pela finalização da obra fosse remunerada a uma TIR de 12,30%.

Síntese dos Resultados

Levando em consideração as hipóteses e análises efetuadas, o intervalo mais provável para se obter êxito finalização da UTN Angra 3 é entre R\$ 649 MWh e R\$ 917 MWh a depender das condições e das taxas de financiamento que serão impostas à companhia por ocasião da retomada das obras. Para efeito de comparação, considerando que a energia nuclear represente 4% da geração total do sistema, estes valores devem provocar um aumento entre 1,94% e 5,02% no custo da energia elétrica cobrada aos consumidores finais.

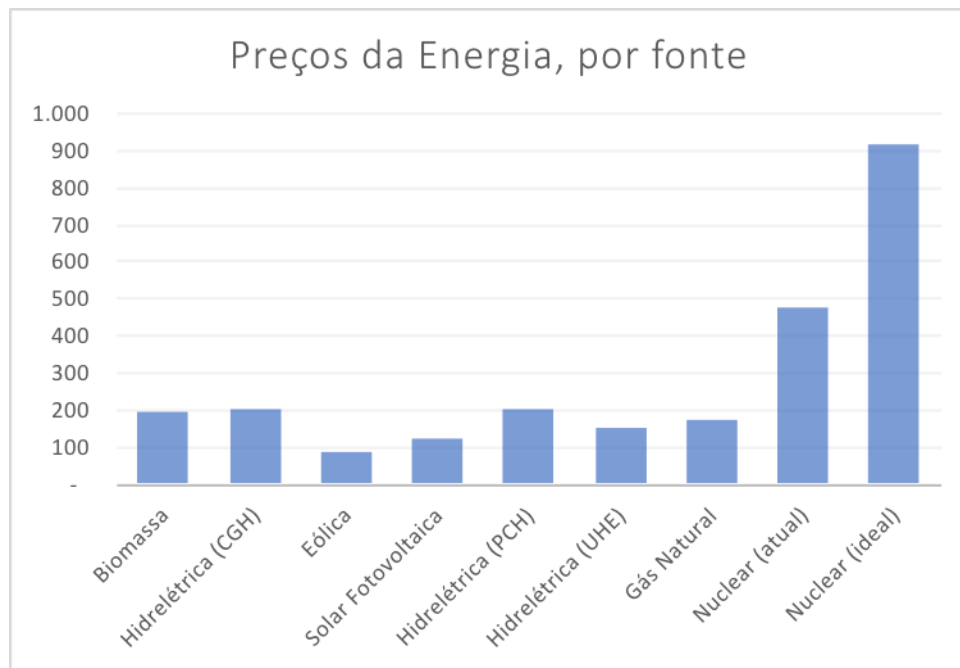
Em que pese o baixo impacto relativo da viabilização do empreendimento de Angra 3, sempre será desafiador convencer consumidores que pagando mais caro por um bem ou serviço estaremos numa situação melhor, em especial quando este bem ou serviço está estigmatizado por seus perigos e problemas.

4.4 Preços da Energia Nova nos Leilões de Energia e a competitividade da Energia Nuclear

No Brasil, os leilões de energia são a principal forma de contratação de energia. Por meio desse mecanismo, concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) garantem o atendimento à totalidade de seu mercado no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) (CCEE, 2019) A reponsabilidade pela realização dos leilões de energia elétrica é da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), por delegação da ANEEL.

Ainda existam muitas especificidades na oferta de energia, a definição do vencedor do leilão sempre utiliza o critério de menor tarifa ofertada, visando dar maior competitividade e eficiência ao leilão. Desta forma, todas as fontes de energia elétrica podem competir entre si, não importa se o fornecedor utiliza fonte eólica, biomassa ou hidroelétrica. Se há disponibilidade, qualquer fornecedor pode concorrer no leilão, ofertando o menor preço possível.

Para efeito de comparação com o custo da energia nuclear, utilizamos os dados divulgados pela CCEE sobre todos os leilões realizados em 2018 para determinar os preços médios, por fonte de energia. O resultado do levantamento é apresentado abaixo.



Fonte: Adaptado de CCEE, 2019.

Percebe-se que o preço pela energia nuclear é bem mais elevado que tem sido pago às demais fontes de energia elétrica, especialmente quando se compara estes preços com a tarifa de equilíbrio ideal de viabilização econômica do projeto da UTN Angra 3, calculada em R\$ 916,90 MWh.

Desta forma, levando em conta todos os custos, inclusive os já incorridos, entendemos que o empreendimento Angra 3 é economicamente inviável, perdendo terreno em termos de competitividade para todas as demais fontes de energia elétrica, em especial na comparação de preço da energia gerada pelos novos empreendimentos de grande porte projetados para geração e abastecimento de energia elétrica com idêntico prazo de finalização e de porte de potência.

No entanto, têm-se de analisar os investimentos em energia nuclear dentro de um contexto de desenvolvimento estratégico. Finalizar a UTN Angra 3 continuará a dar economia de escala ao ciclo do combustível nuclear e permitirá a manutenção e desenvolvimento da tecnologia nuclear no país e a diversificação de nossa matriz energética, também garantindo a geração de empregos num setor estratégico para nossa defesa e soberania. Além disso, têm-se de levar em conta as vantagens associadas à redução de emissões de carbono, redução de custos com distribuição de energia e a confiabilidade do fornecimento de energia.

5 Conclusão

A composição da futura matriz energética dependerá de muitos fatores, mas sabemos que a demanda por energia permanecerá crescente por muitas décadas e que o acesso a energia elétrica abundante continuará a ser um fator estratégico para o desenvolvimento das sociedades modernas.

Indiscutivelmente, haverá grande diversificação das fontes de geração de energia elétrica, para que não exista dependência exclusiva de uma única fonte e para o aumento da confiabilidade dos sistemas. Nesse respeito, nosso país tem recursos naturais abundantes, com destaque para as fontes renováveis, como os aproveitamentos hídricos, solares e eólicos, mas como as fontes renováveis também possuem suas deficiências, não podemos descartar as fontes firmes de fornecimento.

Em relação à energia nuclear, embora possua um custo relativamente maior na comparação com outras fontes de energia, esta fonte de energia não deve ser desprezada por razões de natureza estratégica, inclusive num país com abundantes recursos naturais e renováveis, como o Brasil. Como discutido ao longo deste trabalho, o valor agregado pelo domínio pleno da tecnologia nuclear vai muito além de seu uso para fins de geração de energia elétrica. Por isto, devemos envidar os melhores esforços para viabilizar economicamente esta importante cadeia industrial, mantendo o conhecimento conquistado a elevado custo.

Em que pese seus problemas, a energia nuclear continuará sendo amplamente utilizada pelos países desenvolvidos que requerem altas e crescentes demandas energéticas, e que não possuem configurações favoráveis para o emprego de energias renováveis. Os constantes aprimoramentos nas tecnologias das usinas nucleares podem oferecer uma melhora contínua da segurança dos reatores, embora permaneça o desafio relacionado com a destinação do lixo radioativo. Também colabora para o fortalecimento da energia nuclear o fato de os acordos de fornecimento de energia entre países serem cada vez mais raros, dada a necessidade estratégica de autossuficiência energética, situação desejada por todas as sociedades.

Neste trabalho, abordou-se como a energia nuclear pode encontrar um papel estratégico no desenvolvimento nacional, mesmo que seu custo seja elevado comparativamente às demais fontes de energia. Foi demonstrado que a energia nuclear, de fato, não tem como competir em termos de preços com outras fontes de energia, mas que as peculiaridades e vantagens específicas da

energia nuclear podem justificar seu custo mais elevado para o consumidor. Os argumentos apresentados podem servir para influenciar decisões e escolhas dos gestores públicos, que às vezes buscam soluções para os problemas atuais sem olhar atentamente para o futuro e vice-versa. Ainda que esta abordagem não tenha sido exaustiva, serviu como exercício de modelagem para futuros estudos.

Em relação à conclusão da UTN Angra 3, faz-se necessário que seja realizada a discussão sem paixões da conclusão da mesma. Não só em função dos investimentos já realizados, mas dentro de uma estratégia de diversificação de nossa matriz energética.

Nesse sentido, recomenda-se que os estudos de viabilidade econômica continuem a incluir todos os custos incorridos, além daqueles absolutamente necessários à conclusão dos empreendimentos em andamento, permitindo maior transparência às despesas públicas e maior responsabilização àqueles que criam despesas de longo prazo sem o necessário planejamento financeiro.

Por fim, reconhecemos que este trabalho não esgota o tema, podendo motivar novas pesquisas sobre a viabilidade econômica de projetos de investimento em energia elétrica e seus impactos no ambiente econômico e na segurança energética, talvez com a inclusão de um quadro mais dinâmico contendo simulações dos possíveis efeitos multiplicadores sobre outros setores da economia nacional ou, ainda, a análise econômico-probabilística dos retornos esperados (fluxo de caixa probabilístico), considerando a opção de abandono para monetizar de forma mais evidente os custos de afundamento do projeto. Aos interessados, incentivamos que estas questões façam parte de suas futuras pesquisas.

6 Referências

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. SEL – Secretaria Executiva de Leilões. **Leilões de Energia Elétrica.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/leiloes> Acessado em março de 2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas - Energia Nuclear.** Brasília, 2009. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap8.pdf Acesso em: março de 2019.

BEUREN, Ilse Maria *et al.* **Como elaborar trabalhos monográficos em contabilidade: teoria e prática.** São Paulo: Atlas, 2003.

BRASIL. **Estratégia Nacional de Defesa.** Brasília: dez. 2012. Disponível em: https://www.defesa.gov.br/arquivos/estado_e_defesa/END-PND_Optimized.pdf.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Sumário Executivo do Plano Decenal de Expansão 2027.** Brasília: dez. 2018.

BRASIL ESCOLA. **Fissão Nuclear.** Acesso em março de 2019. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/fissao-nuclear.htm>

ELETROBRÁS. **Energia Nuclear.** Acesso em março de 2019. Artigo disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/Energia-Nuclear.aspx>

ELETRONUCLEAR, 2017. **Atualização do padrão técnico e de segurança do Projeto de Angra 3.** Relatório. Acessado em abril de 2019. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/Artigos-e-Estudos.aspx>

ELETRONUCLEAR, 2019. **Estudo do Impacto Ambiental (EIA) da Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.** Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Documents/EIA/index.html> Acessado em abril de 2019.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2019. **Energia e aquecimento global.** Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/energia-e-aquecimento-global> Acessado em abril de 2019.

EXAME, Revista. **Quem são os 10 senhores mundiais do urânio.** Disponível em: <https://exame.abril.com.br/economia/os-10-senhores-mundiais-do-uranio-no-mundo/> Acessado em: março de 2019.

GIBELLI, Sonia M. O. *et al.* **Subsídios para a Melhoria da Aceitação da Energia Nuclear no Brasil.** Artigo. Acessado em março de 2019. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/go10anosdep/Cnen/doc/manu55.PDF>

HANNAN, M.A *et al.* **Review of baseline studies on energy policies and indicators in Malaysia for T future sustainable energy development.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 94, p. 551–564. Junho de 2018.

HARTWIG, Manuela; KOBASHI, Yohei; OKURA, Sae; TKACH-KAWASAKI, Leslie. **Energy policy participation through networks transcending cleavage: an analysis of Japanese and German renewable energy promotion policies.** Qual Quant 45, p. 1485–1512. Setembro de 2014.

HIRSCH, H. et al. **Nuclear Reactor Hazards: Ongoing Dangers of Operating Nuclear Technology in the 21st Century.** Greenpeace International, abr. 2005. Disponível em: <https://www.greenpeace.org/belgium/nl/rapport/1281/nuclear-reactor-hazards-ongoing-dangers-of-operating-nuclear-technology-in-the-21st-century/> Acessado em março de 2019.

IAEA – International Atomic Energy Agency. **Nuclear Power Reactors in the World.** Março de 2019. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx> Acessado em março de 2019.

KURAMOCHI, Takeshi. **Review of energy and climate policy developments in Japan before and after Fukushima.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 43, p. 1320–1332. Dezembro de 2014.

MOCHIZUKI, Junko; CHANG, Stephanie E. **Disasters as opportunity for change: Tsunami recovery and energy transition in Japan.** International Journal of Disaster Risk Reduction 21, p. 331–339. Janeiro de 2017.

NAKAI, Miwa; OKUBOA, Tatsuya; KIKUCHIA, Yasunori. **A socio-technical analysis of consumer preferences about energy systems T applying a simulation-based approach: A case study of the Tokyo area.** Energy Research & Social Science 46, p. 52–63. Julho de 2018.

O GLOBO. **Governo dobra tarifa de Angra 3 para viabilizar conclusão da obra.** Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/governo-dobra-tarifa-de-angra-3-para-viabilizar-conclusao-da-obra-23143953> Jornal. Acessado em abril de 2019.

OSORIO, Sebastian; ACKERE, Ann van. **From nuclear phase-out to renewable energies in the Swiss electricity market.** Energy Policy 93, p. 8–22. Março de 2016.

PURIFICAÇÃO, Luerles Silva da; FONTE, Rodrigo Borges Della. **Estudo de turbinas eólicas verticais com exemplo de dimensionamento de uma turbina eólica darrieus para aplicação em edifícios.** Dissertação. 2012. Acessado em maio de 2019. Disponível em:

http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/estudo_de_turbinas_eolicas_verticais_com_exemplo_de_dimensionamento_de_uma_turbina_eolica_darrieus_para_aplicacao_em_edificios.pdf

SCHAFFER, Lena Maria; BERNAUER, Thomas. **Explaining government choices for promoting renewable energy**. Energy Policy 68, p. 15–27. Janeiro de 2014.

TANAKA, Nobuo. **Big Bang in Japan's energy policy**. Energy Strategy Reviews 1, p. 243 – 246. Março de 2013.

VENTURA, Manoel. **Governo dobra tarifa de Angra 3 para viabilizar conclusão da obra**. O Globo Economia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 9 de outubro de 2018. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/governo-dobra-tarifa-de-angra-3-para-viabilizar-conclusao-da-obra-23143953> Acessado em: março de 2019.

YAMAZAKI, Masato; TAKEDA, Shiro. **A computable general equilibrium assessment of Japan's nuclear energy policy and implications for renewable energy**. Environ Econ Policy Stud 19, p. 537–554. Janeiro de 2017.

Apêndice

Anexo I

Anexo II

Anexo III

Anexo IV

Anexo V