

PERSPECTIVAS PARA A ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL

Caio Cesar Salgado Murayama – caiomurayama@hotmail.com

Fernando Pagnin Schmid – fe.mecatronica@bol.com.br

Profa. Dra. Sílvia Maria Stortini Gonzalez Velázquez (Orientador) –

silviamaria.velazquez@mackenzie.br

RESUMO

Os decretos instituídos pelo Ministério de Minas e Energia, dentro do Plano Nacional Energético de 2050, visam estratégias para o Sistema Elétrico Brasileiro quanto o aumento na demanda por energia elétrica, onde reforça-se a necessidade de maiores investimentos na dinamização da matriz elétrica brasileira, respeitando a questão ambiental pelo uso de fontes de energia com zero emissão de carbono. Este trabalho tem o propósito de abordar algumas considerações importantes quanto ao uso do fornecimento de energia nuclear para o Brasil, relatando a situação desta fonte de energia, assim como estudando o caso de Chernobyl como forma de compreender erros e analisando possíveis formas de melhorar a segurança e a eficiência dessa fonte elétrica. As perspectivas para a energia nuclear no Brasil foram analisadas quanto a aspectos de demanda, custos, socioambientais, tecnológicos e estratégicos.

Palavras-chave: Energia Nuclear. Chernobyl. Plano Nacional de Energia 2050.

PERSPECTIVES FOR NUCLEAR ENERGY IN BRAZIL

ABSTRACT

The decrees instituted by the Ministry of Mines and Energy, within the 2050 National Energy Plan, aimed at strategies for the Brazilian Electric System regarding the increase in the demand for electricity, which reinforces the need for greater investments in the dynamization of the Brazilian electricity matrix, respecting the environmental issue using energy sources with zero carbon emissions. This paper aims to address important considerations regarding the use of nuclear energy supply for Brazil, reporting the situation of this energy source, as well as studying the case of Chernobyl to understand errors and analyzing ways to improve the safety and efficiency of this electrical source. The perspective of Nuclear Energy in Brazil stands for its demand, costs, environmental, technological, and strategic aspects.

Keywords: Nuclear energy. Chernobyl. 2050 National Energy Plan.

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O Brasil é reconhecido mundialmente por sua grande riqueza em recursos naturais e biodiversidade. No que se refere à matriz de energia elétrica, o Ministério de Minas e Energia (MME), aponta que cerca de 85% da energia elétrica gerada no país provém de fontes renováveis, que possuem menores custos de operação e emitem pouca quantidade de gases do efeito estufa, sendo 76,9% geradas pelas usinas hidrelétricas (MME, 2021).

Apesar disso, informações da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético (SBPE), apontam que a forte dependência por parte das hidrelétricas, frente à ampliação das alterações climáticas, traz riscos ao país quanto às crises de racionamento de energia elétrica (SBPE, 2021). Ao lado, a implantação do modelo de desenvolvimento da Amazônia, baseado na derrubada de vegetação pela substituição por pastos e monoculturas, e a supressão dos mananciais de bacias hidrográficas, agravam os períodos de secas extremas em regiões importantes do país (SATO, 2016).

Atualmente, reforça-se a necessidade de maiores investimentos na dinamização da matriz elétrica, a fim de se combater os problemas enfrentados pelo Sistema Interligado Nacional quanto à escassez hídrica no país. Nesse contexto, a energia nuclear, uma fonte não renovável que não emite gases de efeito estufa, apresenta-se como opção viável para esses investimentos, tendo em vista suas características que podem propiciar seu uso em larga escala, como uma fonte complementar de energia elétrica (INB, 2020).

Segundo Alcântara *et al.* (2021), o uso da energia nuclear e o aperfeiçoamento de sua utilização em larga escala são viáveis no Brasil, dado que o país possui dominância integral sobre todo o ciclo do combustível nuclear e da fabricação de elementos combustíveis e da sua utilização nas usinas term nucleares, e detém a nona maior reserva de urânio do mundo, combustível necessário para abastecimento dos reatores nucleares (INB, 2020). Entretanto, não de ser observados os questionamentos sobre os aspectos socioambientais, econômicos e de segurança desta fonte geradora de energia elétrica, bem como as perspectivas para o seu uso mediante ao previsto pelo Plano Nacional de Energia de 2050 (PNE 2050).

2 METODOLOGIA

As fontes de pesquisa que fundamentaram os registros, compilações e consultas se distribuíram entre relatórios técnicos oficiais, literatura técnica específica – livros, dissertações de mestrado, teses de doutorado, artigos científicos, sites oficiais, anais de encontros do setor, artigos de revistas e periódicos, além de palestras promovidas por organizações nacionais e internacionais que tratam do tema. Estes estudos possibilitaram a criação de uma base consistente para discutir e compreender de forma clara o tema do trabalho.

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica da situação do setor elétrico e da matriz elétrica brasileira; aos meios de participação da energia nuclear no panorama elétrico brasileiro; às áreas relevantes na aplicação da tecnologia nuclear; à abordagem da tecnologia utilizada para a extração e enriquecimento do combustível de urânio; aos acidentes nucleares ocorridos no mundo; a política de descomissionamento das usinas e por fim, às perspectivas para a energia nuclear no Brasil em relação ao PNE 2050, na finalidade de identificar a implementação e viabilização da energia nuclear sob o aspecto dos impactos sociais, ambientais e econômicos por ela produzidos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO NO CENÁRIO DE ENERGIA MUNDIAL

Segundo Borges (2021), o setor elétrico brasileiro (SEB) é formado por sistemas de linhas de transmissão, usinas e ativos de distribuição, divididos entre um sistema principal, denominado de Sistema Interligado Nacional (SIN), que abrange a maior parte do território brasileiro, e subsistemas de menor porte, denominados de Sistemas Isolados (SI), concentrados na região Amazônica. Segundo Dutra (2021), ambos os sistemas são coordenados e controlados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), um órgão criado em 1998, fiscalizado e regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Com o planejamento do setor elétrico brasileiro fundamentado pela análise da disponibilidade dos recursos naturais e pelo controle de operação dos sistemas de transmissão que compõem a matriz elétrica brasileira (JUNIOR *et al.*, 2021), pode-se afirmar que o setor elétrico corresponde a um sistema de valor, composto por um conjunto de atividades nos segmentos de geração, de transmissão, de distribuição e de comercialização, constituído pelas instituições vinculadas ao poder executivo que atuam no setor, pelos agentes da indústria de energia e, ainda, pelos principais grupos de interesse do setor, divididos entre governo, investidores e consumidores (BEHR, 2021).

Dados da IEA (2019), apontam para o cenário da matriz energética mundial, que tem se moldado cada vez mais na ampliação da participação das fontes renováveis na produção de energia. A alta participação dessas fontes de energia no país tornou-se possível, devido a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, que teve como preocupação a redução do déficit energético e da emissão dos gases do efeito estufa.

Em relação ao cenário de consumo de eletricidade mundial, correspondido pela prevalência do uso de fontes não renováveis, tendo o carvão mineral como sua principal fonte energética, a participação das fontes renováveis representa apenas 25% da matriz elétrica global, com a participação de hidrelétricas como principal fonte geradora (IEA, 2019).

Nascimento e Alves (2021), afirmam que a participação das fontes renováveis como parte das fontes alternativas de geração de eletricidade da matriz elétrica brasileira, deverá aumentar em 23%, até 2030, através da Lei nº 13.576 de Política Nacional de Biocombustíveis (PNB). Esta lei trata do escopo do Acordo de Paris, que tem por objetivo melhorar a eficiência energética do país, em conjunto com a redução do consumo em cerca de 10% da geração total de eletricidade, equivalente a 106 TWh (*Terawatt-hora*) (BRASIL, 2017).

3.1.1 Cenário histórico e aplicações da energia nuclear no Brasil

Marcada historicamente por acidentes ocorridos em alguns países no mundo, como no caso de Three Miles Island, em 1979, de Chernobyl, em 1986, e de Fukushima, em 2011, a tecnologia nuclear no Brasil foi primordialmente desenvolvida com finalidades para atender os interesses do setor militar (KURAMOTO e APPOLONI, 2002). As primeiras pesquisas nucleares, iniciadas na década de 30, obtiveram maior enfoque em 1945, pós os efeitos causados pelas bombas atômicas lançadas na cidade de Hiroshima e Nagasaki, durante a segunda guerra mundial (SCHMIDT, 2014).

Com o surgimento do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), fundado em 1951, e representado pelo almirante Álvaro Alberto da Mota e Silva, a finalidade de promover e estimular o desenvolvimento da investigação científica e tecnológica autônoma no campo nuclear do país (INB, 2021), incitou à criação de órgãos fiscalizadores, tais como a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que tramitou acordos com a Eletrobrás, em 1968, para a construção das primeiras usinas nucleares de Angra 1 e Angra 2, e, com a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), em 1976, com a finalidade de coibir-se a utilização da energia nuclear para fins bélicos (SATO, 2016).

Em meio a embates políticos e tecnológicos, os acordos realizados entre Brasil, Alemanha Ocidental e Estados Unidos, marcaram a trajetória do setor nuclear rumo ao desenvolvimento de um plano nuclear próprio, denominado de Plano Nuclear Brasileiro (PNB) (CAMELO, 2015). Adquirindo, em 1971, seu primeiro reator de água pressurizada (PWR) por meio dos Estados Unidos, e em 1975, a transferência de tecnologia de enriquecimento do urânio pelo método de jato-centrifugação, pela Alemanha Ocidental, o Brasil domina, atualmente, toda a tecnologia do ciclo de combustível do urânio, com as chamadas Ultracentrífugas, presentes na Fábrica de Combustível Nuclear (FCN), em Resende (RJ), pertencentes à estatal Indústrias Nucleares do Brasil (INB) (WNA, 2020).

Outras áreas de aplicação da tecnologia nuclear, além do âmbito de geração de energia e de relevância para a sociedade, foram criadas posteriormente, como alega o quadro a seguir:

Quadro 1 – Aplicações secundárias da energia nuclear

Área	Características
Medicina	- emprego de radioisótopos e fabricação de rádio fármacos; - diagnósticos; - esterilização de equipamentos e materiais hospitalares;
Indústria	- controle de qualidade; - verificação de defeitos e rachaduras no corpo de peças da construção civil; - inspeção de soldas; - levantamentos geológicos e de aquíferos etc.
Propulsão Naval	- melhoria na autonomia dos submarinos movidos a energia nuclear; - novas bases navais e estaleiros para produção de submarinos nucleares; - programa de desenvolvimento de defesa internacional; - importância estratégica para desenvolvimento econômico brasileiro.

Fonte: Adaptado de MARTINS FILHO (2011) e CAMELO (2015)

3.1.2 Usinas nucleares brasileiras

Usinas nucleares são instalações industriais compostas de reatores nucleares, que possuem a finalidade de produzir energia elétrica a partir da fissão nuclear, pelo uso do decaimento dos elementos radioativos, que produzem energia térmica como resultado das reações nucleares, tendo como elemento combustível mais utilizado, o urânio enriquecido na forma de dióxido (UO₂) (NASCIMENTO, 2019).

Segundo Alcântara *et al.*, (2021), as diferenças entre os diferentes tipos de usinas nucleares baseiam-se no caráter de funcionalidade do reator nuclear para a produção da eletricidade, podendo ser classificados de acordo com os seguintes critérios: energia cinética dos nêutrons em que ocorre a maior parte das fissões; material físsil presente em meio ao combustível nuclear; configuração do conjunto combustível nuclear + moderador; tipo de moderador; tipo de refrigerante; finalidade a que se destinam.

Com 443 reatores nucleares em operação no mundo, cinco encontram-se em desativação e outros 52 estão em construção (AIEA, 2021), sendo agrupados entre dois tipos, denominados de reatores nucleares de potência e reatores nucleares de pesquisa. Os reatores de potência são projetados com a finalidade de gerar energia elétrica em escala comercial, enquanto os reatores de pesquisa servem como fontes de nêutrons e raios-gama para propósitos diversos, que abrangem desde experimentos em física nuclear básica até irradiações para produção de radioisótopos utilizados em atividades industriais, agrícolas e medicinais (CNEN, 2021).

Em meados da década de 60, o governo federal em conjunto com a União, iniciou o desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro (PNB), com a promulgação do acordo do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI), destinado a implantar no país a produção de energia

nuclear através da implementação da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), instalada no município de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro, e, constituída por três polos de usinas nucleares: Angra 1, Angra 2 e Angra 3 (ELETROBRÁS, 2019).

3.1.2.1 Angra 1

Em 1971, através de um acordo com os Estados Unidos, o Brasil adquiriu uma usina nuclear da empresa estadunidense Westinghouse, denominada Angra 1, que viria a se tornar a primeira unidade da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA). O contrato de compra, sob a forma *turnkey*, representava apenas uma simples aquisição de equipamento, sem qualquer transferência de tecnologia (ELETRONUCLEAR, 2019).

Com a operação feita através de um reator PWR, considerado o tipo de reator mais comum, com cerca de 230 unidades ao redor do mundo, a usina de Angra 1 tornou-se a primeira usina nuclear a vigorar no país, em 1985. Atualmente, sua capacidade de geração de potência é de 640 MW (megawatts) (ELETRONUCLEAR, 2020).

Apesar dos problemas que enfrentou durante os seus primeiros anos de operação, sua taxa de produção manteve-se alta, tornando seu funcionamento muito importante para o momento atual (ABEN, 2021). Atualmente, os acordos feitos entre as empresas da Eletrobrás e Westinghouse procuram estender a vida útil de Angra 1 de 40 anos para 60 anos (WNA, 2020).

3.1.2.2 Angra 2

Tendo iniciado suas operações comerciais em 2001, a segunda usina nuclear brasileira, Angra 2, conta com um reator PWR de tecnologia alemã, através da companhia Areva NP (Siemens), antigamente denominada Kraftwerk Union (KWU), capaz de atender ao consumo de uma cidade de 2 milhões de habitantes (ELETRONUCLEAR, 2020). Instituída através do acordo nuclear entre Brasil e Alemanha, assinado em 1975, a construção de Angra 2 propiciou transferência de tecnologia de jato-centrifugação, além da obtenção do reator nuclear PWR, o que levou o país a um desenvolvimento tecnológico próprio, do qual resultou o domínio sobre praticamente todas as etapas de fabricação do combustível nuclear (WNA, 2020).

Construída em 1981, o desempenho da usina tem sido exemplar desde o início de suas operações, sendo uma das principais usinas a contribuir com a economia de água dos reservatórios das hidrelétricas brasileiras, amenizando as consequências do racionamento de energia do país (INB, 2020). Atualmente, com uma capacidade de geração de potência de 1.350 MW, a unidade foi a trigésima terceira em produção de energia entre as 436 usinas em operação no mundo, no ano de 2009, ocupando a 21^a posição em comparação com as 50 melhores usinas americanas numa análise dos indicadores de desempenho da Associação Mundial de Operadores Nucleares (WNA, 2021).

De acordo com o Relatório Anual do ministério de Minas e Energia (MME), a operação cotidiana em máxima potência da usina de Angra 2, que obteve um fator de capacidade de 99,43%, com duração de 13 meses consecutivos, constituiu uma nova marca mundial ao Brasil (ABEN, 2021).

3.1.2.3 Angra 3

Com cerca de 67,1% das obras civis executadas, Angra 3, uma irmã gêmea de Angra 2, será a terceira usina da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA). Descontinuada, em 2015, devido às investigações feitas pelo desdobramento da operação Lava Jato, denominada Operação Radioatividade, na inspeção sobre atividades administrativas irregulares presentes no pleiteio do superfaturamento da usina, a usina se localiza na praia de Itaorna, em Angra dos Reis (RJ), e, atualmente estima-se que a nova unidade, com potência de 1.405 megawatts, será capaz de gerar mais de 12 milhões de *megawatts*-hora por ano (ABEMI, 2019).

Com energia suficiente para abastecer as cidades de Brasília e Belo Horizonte durante o mesmo período, a energia nuclear passará a gerar o equivalente a 50% do consumo do Estado do Rio de Janeiro (WNA, 2020). De acordo com Eletronuclear (2021), o progresso físico global do empreendimento, considerando todas as outras disciplinas envolvidas, é de 65%, e está sendo possibilitado por meio da Eletrobras, que se tornou responsável pelos empréstimos de recursos para a sua construção.

Quanto aos equipamentos e serviços contratados no mercado nacional, estes estão sendo custeados por meio de financiamento do BNDES, e, o financiamento para a aquisição de máquinas e equipamentos importados e a contratação de serviços externos está sendo feito mediante contrato com a Caixa Econômica Federal (ABEMI, 2019). Foram alocados ao empreendimento, em 2015, cerca de R\$ 5,3 bilhões de um total de R\$ 14,8 bilhões, de custos diretos, sendo que aproximadamente 75% desse valor serão investidos dentro do país (ELETRONUCLEAR, 2021).

3.2 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS NUCLEARES NO BRASIL

Inicialmente, as divisões das tecnologias de obtenção de combustíveis nucleares do país foram seccionadas em classes primárias, de extração de novas fontes radioativas, e secundárias, de enriquecimento do urânio. A demanda pelo minério de urânio (U), no entanto, é dependente da eficiência das plantas de mineração existentes, da prospecção quanto à extensão da vida útil das usinas existentes, da exigências das empresas termonucleares quanto ao enriquecimento do mineral, da eficiência no uso do combustível pelas novas plantas, e, finalmente, da tecnologia disponível nos reatores das usinas termonucleares (ELETRONUCLEAR, 2020).

Segundo Planas (2017), o funcionamento para a geração da energia nuclear ocorre em 4 etapas, definidas pela geração de calor por meio da fissão do urânio no núcleo do reator, pela

passagem da água em alta pressão dentro do circuito primário, que transporta a energia térmica para o gerador de vapor, pela conversão da água do circuito secundário em vapor, e por último, pelo acionamento da turbina, através do vapor quente gerado, que produz eletricidade. O ciclo de combustível nuclear é composto por etapas de preparo e enriquecimento do urânio para sua utilização como combustível nuclear.

3.2.1 Mineração do urânio

Segundo dados da WNA (2020), o minério de urânio mais comum e importante é a uraninita, composta por uma mistura de dióxido de urânio (UO_2) com octóxido de triurânio (U_3O_8), e pode ser encontrado a partir de outros minerais, como a euxenita, a carnotita, a branerita, a torbernite, e a coffinita.

Dados atualizados da INB (2020), ainda, apontam para os países com maiores reservas de urânio, ordenados em Austrália, Cazaquistão, Canadá, Rússia, Namíbia, África do Sul, China, Níger e Brasil. Representando a nona posição nesse setor, o Brasil tem capacidade de abastecimento e geração do elemento combustível por um período equivalente a 200 anos, e segundo dados da Eletronuclear (2021), cerca de 70% do território nacional ainda se encontra em condições de mapeamento de novas reservas, atentando a grandes condições de crescimento para a energia nuclear.

Os processos de mineração do urânio do país são realizados pela INB (Indústrias Nucleares do Brasil), na unidade de concentração de urânio (UCU), município de Caetité, no estado da Bahia (ELETROBRAS, 2020). Assim como se ocorrem em outros processos de mineração, que causam impactos ambientais, a mineração do urânio é precisa de um controle mediador de irradiação proveniente da liberação espontânea de radiação ionizante do urânio, representada em *milisieverts* dentro do Sistema Internacional (SI) (AIEA, 2020).

3.2.2 Conversão de U_3O_8 em UF_6 , ultracentrífuga e enriquecimento isotópico

A única usina de enriquecimento de urânio do Brasil fica na cidade de Rezende, no estado do Rio de Janeiro. O pó do octóxido de triurânio transformado, chamado *yellowcake*, sai da mina em uma forma gasosa de hexafluoreto de urânio (UF_6), em que o concentrado de urânio é dissolvido e purificado, passando por um processo de refinamento, até chegar à atual fase do enriquecimento (PLANAS, 2017).

Segundo Eletrobrás (2020), para que o combustível nuclear forneça energia nas usinas, é necessário um processo de enriquecimento do gás hexafluoreto de urânio, por meio do uso de ultracentrífugas, que submetem o gás de hexafluoreto de urânio em alta velocidade, fazendo com que os isótopos mais leves do urânio-235 ($U-235$) se separem dos isótopos mais pesados urânio-238 ($U-238$), até que a porcentagem dos isótopos leves passe de 0,7% para o valor de 5%.

Em média, para se gerar energia elétrica, é preciso obter-se cerca de 3% de urânio enriquecido, para o uso na medicina, é necessário 20%, e para a construção de uma bomba nuclear, é preciso 95% (INB, 2020), sendo necessário o uso inúmeras máquinas ultracentrífugas de tecnologia desenvolvida pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), com parceria com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) (INB, 2020).

3.2.3 Reconversão de UF₆ em UO₂ e Fabricação de Pastilhas

Após o processamento de enriquecimento, o gás de hexafluoreto de urânio (UF₆) é transformado em dióxido de urânio (UO₂) sob forma de pó que será utilizado na produção de pastilhas. A atividade é desenvolvida na FCN-Reconversão, na unidade da INB em Resende. (INB, 2020).

“Com o urânio enriquecido sob forma de pó (UO₂), são produzidas as pastilhas, que tem forma de um cilindro de aproximadamente um centímetro e de diâmetro. Após um processo de mistura com outros compostos de urânio, o pó de UO₂ é transportado para uma prensa rotativa automática, onde são produzidas as chamadas "pastilhas verdes", que são encaminhadas para um forno de sinterização e aquecidas a 1750°C para ganhar rigidez e adquirir a resistência necessária às condições de operação a que serão submetidas dentro do reator de uma usina nuclear” (INB, 2020).

Sendo necessárias apenas duas destas pastilhas para produzir energia suficiente para o abastecimento de uma residência média durante um mês, esta etapa da produção do combustível nuclear é realizada na FCN – Pastilhas, na unidade da INB em Resende/RJ (INB, 2020).

3.2.4 Fabricação Do Elemento Combustível

A etapa final consiste em pilhar as pastilhas de urânio em varetas de uma liga super-resistente, o zircaloy, que fornece uma redução significativa na oxidação no revestimento do combustível nuclear, especialmente em condições acidentais (BRACHET *et al.*, 2019). Os tubos de zircaloy tem suas medidas conferidas por testes de ultrassom e são minuciosamente limpos, e as pastilhas são acomodadas dentro das varetas sob pressão de uma mola afastada do urânio através de isolantes térmicos de óxidos de alumínio (MOURA, 2014).

“O elemento combustível permanece no reator durante três ciclos, ou seja, aproximadamente três anos. Após este período eles são armazenados dentro das usinas, nas piscinas de combustíveis usados” (INB, 2020).

3.3 CHERNOBYL NO ASPECTO DE SEGURANÇA DAS USINAS NUCLEARES

3.3.1 O acidente de Chernobyl

Em Pripyat, na usina de energia Vladimir Ilich Ulianov, comissionada oficialmente em 1977, e, popularmente conhecida como usina nuclear de Chernobyl, quatro reatores canalizados de

alta potência operacionais (RBMK-1000), capazes de gerar 1000 MW de energia elétrica, eram responsáveis pelo abastecimento de 10% de energia da Ucrânia (DE SOUZA *et al.*, 2014).

Segundo Knoglinger *et al.* (2015), o reator do tipo RBMK, criado em meados dos anos 1970, protagonizou o surgimento dos reatores nucleares comerciais de grande porte de segunda geração, utilizando elementos combustíveis físséis, como o urânio, para conversão da fissão nuclear em energia térmica, a partir da evaporação da água, em cerca de 270° C (celsius).

Além disso, este tipo de reator possui sistemas de arrefecimento refrigerados à água, baseados numa sequência de condensadores de troca sucessiva de temperatura de água quente ou vapor do calor, gerado dentro do reator por água resfriada, com canaletas individuais de combustível, que transitam em meio a blocos de grafite de 1700 toneladas, que, além de moderadores, atuam como elementos estruturais do núcleo do reator (ROCHA, 2020). Suas vantagens envolvem a *on-load*, que permitia o reabastecimento do reator sem a necessidade de desligá-lo, além do abastecimento de plutônio como subproduto da queima do urânio (KNOGLINGER *et al.*, 2015).

Contudo, em 26 de abril de 1986, durante a realização de testes de contingência para a melhoria de segurança, programados para coincidir com uma parada de manutenção emergencial do reator RBMK-1000 nº 4, Chernobyl protagonizou o maior acidente nuclear ocorrido no mundo, obtendo a classificação máxima (nível 7) na Escala Internacional de Acidentes Nucleares (EIAN) (SALGE E MILLING, 2006).

Segundo Pitta (2015), o teste, executado anteriormente com resultados negativos, seria conduzido durante o turno do dia, com funcionários instruídos sobre as condições operacionais do reator, e consistia em manter o funcionamento das bombas de refrigeração em um cenário de interrupção da fonte principal de energia, por meio da substituição do fornecimento a partir de geradores a diesel, os quais detinham um ligamento não imediato. Além disso, deveria avaliar se durante o intervalo entre o desligamento do suprimento principal de energia e o pleno funcionamento dos geradores, a rotação inercial das turbinas seria suficiente para manter o sistema de resfriamento.

Para Salge e Milling (2006), as causas do acidente relacionaram-se quanto a uma combinação de fatores, tais como: inconformidades com as normas de segurança, na qual os sistemas de segurança de emergência e de regulagem de energia foram intencionalmente desligados; alta fração de vazio nos circuitos de água, devido a formação de bolhas de vapor, dentro do sistema de resfriamento, que impedem a redução de velocidade de reação; e, de erros no projeto do reator, controlados por operadores on-line, que organizaram o núcleo de uma maneira contrária à lista de verificação para o teste, desencadeando a uma reação descontrolada.

Outra vulnerabilidade do projeto relacionou-se às hastes de controle, uma combinação de grafite, uma parte oca do tubo preenchido com água e carbono-boro, que possui propriedades efetivas de redução na velocidade da reação nuclear. O grafite na parte inferior acelera momentaneamente a reação durante o processo de inserção da haste de controle no núcleo, até que a parte superior com carbono-boro chegue à sua posição de completa inserção da haste de controle. O aumento na temperatura pode confundir quem não conhece tal comportamento, pois ao invés de reduzir, no início da colocação dessas hastes de controle a temperatura teria efeito contrário por um breve período (SALGE e MILLING, 2006).

A explosão do reator teve como consequência a liberação de 5% do material do núcleo do reator, ocasionando em primeira instância, o perecimento de 2 trabalhadores e outros 28 que faleceriam nas semanas subsequentes por envenenamento. Logo após a explosão, 237 pessoas foram diagnosticadas por contaminação por Iodo radioativo, sendo confirmados 134 casos (CASTILHO e SUGUIMOTO, 2014).

A população da Bielorrússia, Ucrânia e Rússia ficou exposta à radiação, havendo posteriormente 31.000 mortes diretas, 15.000 mortes indiretas até 2011, mais de 6.000 casos de câncer de tireoide, e cerca de 11.000 mortes fora da Ucrânia, devido a contaminação na Europa. Para evitar novos casos, o governo soviético transferiu, para outras localidades, 120 mil pessoas nas primeiras horas após o desastre e mais 240 mil nos anos seguintes (DE SOUZA *et al.*, 2014).

3.3.2 Aspectos de segurança em usinas termonucleares

Para que a implementação das usinas nucleares seja feita em larga escala no Brasil e no mundo, IEEE (2019), recomenda que os sistemas de energia nuclear devem ser projetados de forma que, durante operação normal e transientes antecipados, as margens de segurança das usinas sejam adequadas, acidentes sejam impedidos de ocorrer e situações anormais não levem a acidentes severos com fusão do reator nuclear.

O acidente de Chernobyl, apesar dos impactos socioambientais e político-econômicos, propiciou aumentos consideráveis de estudos, que levaram a melhorias significativas na segurança nuclear, incorporados nos reatores das gerações III, III+ e IV (ROCHA, 2020). Além disso, com o fenômeno da globalização, a maior competitividade, inovações tecnológicas e novas práticas de segurança dentro do ambiente de trabalho das empresas, promovem o aprimoramento de normas, de forma que se mantenham atualizadas e mais precavidas do que as regras anteriores (CHAVES, 2016).

Atualmente, as operações de segurança nas usinas requerem uma regulamentação efetiva, além do gerenciamento comprometido com a segurança e trabalhadores qualificados. Manter e ampliar a segurança e a confiabilidade da operação é prioridade essencial no desenvolvimento dos próximos sistemas nucleares (MESQUITA *et al.*, 2015). As metas de segurança e confiabilidade

preveem uma operação segura e confiável, melhor gerenciamento de acidentes e minimização de suas consequências, proteção ao investimento e redução na necessidade de responder a emergências fora da área onde a usina está instalada (CARVALHO, 2005).

“Expandir a energia nuclear requer aceitação pública para esse tipo de fonte. Rejeitos nucleares, segurança e custos são elementos críticos para o julgamento do público. Avanços tecnológicos para reduzir custos, melhorar a segurança e a disposição dos rejeitos podem ampliar o apoio. Educação é importante para ampliar a percepção do público sobre os problemas do aquecimento global, conectando o uso dos combustíveis fósseis aos gases do efeito estufa e à necessidade de fontes livres desses gases.” (TEIXEIRA *et al.*, 2008).

3.3.2.1 A Situação da Segurança nas Usinas Nucleares Brasileiras

Projetadas para resistir a eventos externos tais como terremotos, inundações, tornados, queda de aviões e incêndios, as usinas nucleares de Angra 1, 2 e 3, possuem sistemas de proteção que reduzem o impacto das ameaças internas e externas através da redundância, diversidade e independência dos sistemas de segurança (DA MATA *et al.*, 2021). No Brasil, segundo aponta Maria *et al.* (2006), 30 normas de segurança para instalações nucleares foram estabelecidas pela CNEN, em 1973.

Atualmente, a realimentação das normas, denominadas de salvaguardas, e novos projetos de pesquisa de reatores de geração III+ propiciam a uma mudança sobre a visão discriminatória sobre o uso da energia nuclear no país. Dentre os assuntos abordados pelas normas estão: licenciamentos (NN1,01; NE 1.04), relatórios de segurança (NE1.08 e NE 1.09), averiguação da saúde dos operários com exames constantes (N 1.06), relatórios do funcionamento das usinas nucleoeletricas (NN 1.14), manutenção de usinas nucleoeletricas (NE 1.21) e escolha para locais de instalação de reatores de potência (Res 09/69). Estes novos projetos incorporam o uso de sistemas inerentemente seguros, sendo mais robustos em termos dos aspectos de segurança transparentes (CNEN, 2021).

Divididos em 3 princípios básicos de segurança à radioproteção: o Princípio da Justificação articula que para toda atividade envolvendo radiação, há de ser justificada sua relação, meio a outras alternativas, com relação aos benefícios positivos para a sociedade; o Princípio da Otimização admite limites a exposições radioativas, em sendo reduzidas e sem grau de dificuldade elevado, levando em consideração fatores sociais e econômicos, na ideia de minimizar a magnitude das doses individuais de radiação e o número de pessoas contaminadas; e o Princípio da Limitação, também denominado de princípio da dose individual, limita a quantidade de doses individuais anuais de radiação aos funcionários, trabalhadores de 50 *milisieverts*, e aos moradores próximos à região de atuação nuclear, 1 *milisievert* (ALCÂNTARA *et al.*, 2021).

Dentro das usinas de angra 1, 2 e 3, a presença de um sistema de segurança físico, em torno do reator, consiste em 6 barreiras: estrutura cristalina das pastilhas *zircaloy*, tubo de revestimento

das varetas, sistemas estanque de refrigeração do reator, blindagem de concreto, esfera de contenção de aço e o prédio do reator de concreto. Também contam com sistemas de segurança passivos, tais como: sistema de defesa em profundidade, através dos sistemas operacionais, de segurança e de instrumentação e controle dos reatores PWR, que entram automaticamente em ação para impedir acidentes e, também, desligar e resfriar o reator em emergências.

3.3.2.2 Medidas para o aprimoramento da segurança das usinas

Segundo cita Salge e Milling (2006), a operação das usinas nucleares é um objeto de grande importância, tanto em relação ao funcionamento quanto à segurança. Através da observação de medições realizadas no sistema das centrais de controle, o monitoramento das usinas é realizado pelos operadores *on-line*. Contudo, a quantidade elevada de medições requer tempo elevado, para interpretação das medidas, e conseqüentemente, para obtenção de resposta.

Como meio de importâncias ao aprimoramento da captação sobre informações de segurança, o Sistema de Identificação e Classificação de Transientes (SICT) foi criado, para decifrar as medições da usina e responder aos operadores sobre a tendência de o estado atual evoluir para um estado diferente, denominado de estado transiente (ARONNE *et al.*, 2021).

Ao lado, a evolução e o desenvolvimento de novos métodos para o aprimoramento da segurança das instalações podem ser empregados pelo uso dos nano fluidos (em especial, as nano partículas de alumina Al_2O_3), como um novo elemento refrigerador, pois possui uma melhor troca de calor com o elemento do combustível nuclear em comparação com a água e, graças à melhor troca de calor, pode se alcançar melhores parâmetros de segurança e eficiência da planta (MACHADO, 2021).

Quanto ao uso de algoritmos mais sofisticados, o sistema OEP (Otimização do Enxame de Partículas), tem o dever de otimizar problemas sofisticados das recargas dos reatores PWR, quanto a seus complexos de análises combinatórias, permitindo a busca por soluções otimizadas e configurações para a recarga das pastilhas de combustível, mantendo as condições de segurança da tarefa estáveis (MORAIS, 2021).

Outros países vêm apresentando soluções para o armazenamento de seus rejeitos radioativos. Na Finlândia, no depósito de combustível nuclear de Onkalo, há a vigência de projetos, previstos para 2023, para a acomodação dos combustíveis usufruídos nos últimos 50 anos, além dos que serão produzidos até o ano de 2120. O enterro do combustível, em ciclo final, em túneis de 450 metros, aderidos à argila e cimento e revestidos por uma camada de cobre, tornou-se uma medida viável privada de danos ao meio ambiente e às pessoas (HILTUMEN, 2019).

No futuro, a utilização dos reatores de quarta geração, disponíveis em 2030, auxiliarão na melhoria de algumas características, tais como a utilização mais efetiva de urânio, a minimização da produção de rejeitos nucleares, a aplicação de sistemas de segurança passivo, resistência a

proliferação, aplicação em outras áreas além da geração de eletricidade e o comissionamento e descomissionamento das usinas nucleares (ROCHA, 2020).

3.4 ENERGIA NUCLEAR NO PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2050

O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) detém um conjunto de estudos e diretrizes que visam estratégias a longo prazo para o setor elétrico brasileiro, feito pelo Ministério de Minas e Energia, com o objetivo de atrair o foco de investimentos de empresas privadas e de parcerias com o governo federal, dentro das perspectivas do futuro de cada energia utilizada no território nacional (EPE, 2020).

As análises sobre a agenda estratégica do atual setor energético nacional, e as perspectivas feitas pelo Plano Nacional de Energia, aprovado conforme Portaria MME nº451, de 16 de dezembro de 2020, têm como objetivo auxiliar na tomada de decisões governamentais em relação à expansão do setor de energia (MME, 2020).

Entre as diretrizes previstas no PNE 2050, insere-se o investimento em cerca de 30 bilhões de reais, para a construção de seis usinas nucleares, previstas para 2050, que trarão cerca de 1GW de energia comercial ao SIN, e, a finalização da usina de Angra 3, que dará prosseguimento ao programa nuclear brasileiro, com prospecção de expansão em até 8 GW, até 2030, nas regiões Sudeste e Nordeste, regiões de estudo possíveis para implementação de novas centrais nucleares (ELETROBRAS, 2021).

Atualmente, a adoção da Medida Provisória nº 1.049, de 14 de maio de 2021, trouxe ao país a criação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), com sede e foro na cidade do Rio de Janeiro, e atuação no território nacional, sem aumento de despesa, por cisão da CNEN. Este marco legal, em conjunto com as estimativas geradas pelo PNE 2050, demonstra sinais de prospecção para a energia nuclear quanto ao quadro de políticas energéticas do país, anteriormente sustentada por uma visão monopolista e estatal, baseada na geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis (EPE, 2020).

Em detrimento às incertezas geradas pela atual crise global do novo coronavírus, o PNE 2050 servirá como norte na atual conjuntura da crise, dialogando com as condicionantes da política energética, a fim de edificar consensos nacionais em torno das grandes questões energéticas e suas interfaces com o desenvolvimento social, econômico e ambiental, deixando o sistema energético, como um todo, mais preparado para as diversas trajetórias possíveis quanto à demanda de energia ou eventos esporádicos adversos.

3.4.1 Prospecção sobre o futuro das usinas nucleares brasileiras

De acordo com Rocha (2020), a inserção da nova geração de reatores III+ e IV desenvolveu uma nova categoria de reatores, denominados de PRM (Pequenos Reactores Modulares), previstos

para início das operações em 2030, que possuem vantagens em diferentes aspectos, tais como: redução de investimento de capital; redução do tempo de construção; produção em série; isenção de descomissionamento; atendimento às demandas de geração flexível; e melhoria da segurança nuclear a partir do sistema de segurança passivos.

Com potência de geração estimada em 300MW, o sistema dos PRM utiliza forças naturais como gravidade e diferença de pressão para acionamento dos mecanismos de resfriamento do núcleo sem necessidade de intervenção humana ou energia elétrica e devem adotar o ciclo de combustível fechado e incorporar sistemas de segurança passivos já parcialmente adotados nos atuais reatores de Geração III e III+ (MIT, 2018).

Politicamente, um conjunto de decisões vêm sendo discutidas de modo a garantir a viabilidade econômico-financeira sobre a energia nuclear no Brasil. Segundo ABEN (2021), a entrada da iniciativa privada, como passo fundamental para o aporte de recursos, necessários à retomada da construção de Angra 3, está sob a decisão do Conselho do Programa de Parceria de Investimentos (PPI), e poderá resultar em um maior interesse de companhias estrangeiras, tais como as chinesas Spic e CNNC, a francesa EDF, a norte-americana Westinghouse e a russa Rosatom – uma das líderes mundiais no desenvolvimento de usinas nucleares.

Assim, de acordo com MME (2020), com a entrada do capital privado estrangeiro, as tarifas de consumo de eletricidade do consumidor tornar-se-ão mais baratas, de modo a reduzir o atual valor de referência tarifado (R\$ 480/MWh), definido em 2021, pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Os exercícios qualitativos relacionados às perspectivas de expansão das usinas term nucleares (UTNs) foram centrados em dois aspectos no horizonte do PNE 2050: efeito de reduções de custo (CAPEX e/ou OPEX) sobre as perspectivas de inserção de UTNs; uma política energética definindo a inserção de 8 GW a 10 GW de UTN. Portanto, o potencial de geração nuclear no Brasil dependerá de ações fundamentais na direção de padronização de projetos, redução de tempo de construção e avanço na curva de aprendizagem na construção de novos empreendimentos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As fontes de energias limpas e renováveis estão se tornando a cada dia, mais atraentes, por serem motivo de emissões zero de gases de efeito estufa e por terem suprimento de alta prospecção de mineração e reutilização.

Por serem eleitas como uma forma de geração que promovem a comercialização de créditos de carbono, recebem inúmeros incentivos para sua implementação. Além disso, a menor variação de preços sobre os combustíveis fósseis se distingue como condição favorável para a atração de investidores, sendo esses empreendimentos considerados de baixo risco.

Além disso, a utilização das usinas de geração III+ e IV, e a implementação dos reatores PRM em cidades satélites, tornará possível a oportunidade de recuperação do país na indústria da energia nuclear. A preocupação com todos os fatores positivos e negativos fizeram com que esse empreendimento se tornasse um modelo de implantação com baixo risco e excelentes expectativas de retorno financeiro.

Os resultados apresentados neste trabalho destacaram o potencial de crescimento da energia nuclear, face ao regimento proposto pelo PNE 2050. Os autores pesquisados confirmam que o ponto de vista econômico, aliado ao benefício ambiental, também pode ser visto como um fator relevante para o investimento neste tipo de fonte de geração de energia elétrica.

Por se tratar de assunto controverso e por estar gerando discussões acaloradas no mundo moderno, esse trabalho pretende dar oportunidades a novos estudos comparativos, onde os vários tipos de fontes energéticas renováveis e limpas são pesquisados e analisados no que diz respeito a sua implementação e viabilização sob o aspecto dos impactos sociais, ambientais e econômicos por elas produzidos.

A visão positiva dos impactos produzidos pela geração de energia elétrica, através da fonte de energia nuclear, pode ser amplamente discutida por outros artigos de relevância, tornando esse tema ainda passivo de muitas análises.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os custos de geração nuclear em MWh (*Megawatt-hora*) o fator de capacidade de produção e geração de eletricidade, o domínio de fabricação do elemento combustível, a política de descomissionamento sobre as usinas e os prospectos de utilização da tecnologia nuclear em diferentes setores para geração de empregos, indicam que a problemática deste tipo de energia resume-se na falta de uma reestruturação por parte do setor elétrico brasileiro, que apresenta uma estrutura oligopolizada com predominância estatal.

Para a elaboração de um plano de retomada de crescimento e ajuste do setor elétrico brasileiro, destacam-se o implemento de política energética de longo prazo para o Brasil e a reestruturação da matriz energética do setor elétrico brasileiro (existem poucas usinas térmicas baratas, ocasionando uma alta instabilidade e/ou volatilidade de preço, além das renováveis não colaborarem para a diminuição dos preços).

Com o objetivo de impedir a saída de investidores deste mercado e/ou diminuir o processo de desindustrialização do país, ampliar o grau de privatização do setor elétrico brasileiro ainda altamente estatizado ou garantir uma relevante injeção de capital privado, seria essencial, para uma completa reestruturação setorial, porém atualmente, cabe lembrar que, este importante segmento é refém de uma agenda de curto prazo, por parte do governo federal e seus principais atores.

REFERÊNCIAS

ABEN-Associação Brasileira de Energia Nuclear. **Angra 1 É Reconectada ao Sistema Interligado Nacional Após Parada de Reabastecimento.** 2021. Disponível em: <http://www.aben.com.br/noticias/angra-1-e-reconectada-ao-sistema-interligado-nacional-apos-parada-de-reabastecimento#noticia>. Acesso em 10/05/2021

ABEMI -Associação Brasileira de Engenharia Industrial. **Anúncio da retomada das obras de Angra 3 dá novo ânimo ao setor de energia nuclear.** 2019. Disponível em: <https://abemi.org.br/anuncio-da-retomada-das-obras-de-angra-3-da-novo-animo-ao-setor-de-energia-nuclear/>. Acesso em: 24/05/2021

ALCÂNTARA, Valéria Emiliana et al. Desenvolvimento de Metodologias e Aplicação de Técnicas de Análise e Gerenciamento de Riscos para Melhorias no Controle, Segurança e Licenciamento de Centrais Nucleares e Instalações Radioativas. **Brazilian Applied Science Review**, v. 5, n. 1, p. 417-428, 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BASR/article/view/24162/19342>. Acesso em: 16/04/2021

AIEA – AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No. 2, IAEA, **Vienna** (2020). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/14756/nuclear-power-reactors-in-the-world>. Acesso em: 25/05/2021.

AIEA – AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. **Radiotherapy.** 2020. Disponível em: <https://nucleus.iaea.org/sites/orpnet/resources/posters/Shared%20Documents/poster-radiotherapy-pr.pdf>. Acesso em: 20/05/2021

ARONNE, Ivan Dionysio et al. **Desenvolvimento de um sistema de identificação e classificação de transientes para um reator nuclear a água pressurizada integral.** 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-22062009-175149/publico/IvanDionysioAronne.PDF>. Acesso em: 17/11/2021

BEHR, Kim Rocha. **Oportunidades para os consumidores no mercado livre de energia.** 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/1938/TCC%20-%20Kim%20-%20Vers%C3%A3o%20biblioteca.pdf?sequence=1>, Acesso em: 01/04/2021

BORGES, Fabricio Quadros. **Estrutura Institucional do Setor de Energia Elétrica no Brasil e o Desenvolvimento Sustentável.** RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218, v. 2, n. 3, p. 198-212, 2021. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/160>. Acesso em: 28/04/2021.

BRACHET, Jean-Christophe et al. Early studies on Cr-Coated Zircaloy-4 as enhanced accident tolerant nuclear fuel claddings for light water reactors. **Journal of Nuclear Materials**, v. 517, p. 268-285, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat>. Acesso em: 20/05/21

BRASIL. Constituição. **Constituição da República Federativa do Brasil.** Brasília: Senado, 1988.

BRASIL. Lei nº 10.387, de 05 de junho de 2020. Altera o Decreto nº 8.874, de 11 de outubro de 2016, para dispor sobre incentivo ao financiamento de projetos de infraestrutura com benefícios ambientais e sociais. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 05 jan. 2020. Seção 1, p. 1.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 26 dez. 2017. Seção 2, p. 1.

BRASIL. Medida Provisória nº 1.049, de 14 de maio de 2021. Cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear e altera a Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, a Lei nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974, a Lei nº 8.691, de 28 de julho de 1993, a Lei nº 9.765, de 17 de dezembro de 1998, a Lei nº 6.453, de 17 de outubro de 1977, e a Lei nº 10.308, de 20 de novembro de 2001. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 26 dez. 2017. Seção 2, p. 1.

CAMELO, Ana Paula et al. **A construção social do risco e o controverso programa nuclear brasileiro: entre o científico, o político e o público**. 2015. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/287782/1/Camelo_AnaPaula_D.pdf. Acesso em: 18/05/2021

CASTILHO, Maria Augusta; DE LIMA SUGUIMOTO, Djmes Yoshikazu. **Chernobyl - a catástrofe**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 12, n. 2, p. 316-322, 2014. Disponível em: http://periodicos.unincor.br/index.php/revistaunincor/article/download/1506/pdf_209. Acesso em: 18/11/2021

CARVALHO, Paulo Victor Rodrigues de; VIDAL, Mario Cesar Rodriguez; CARVALHO, Eduardo Ferro de. **Análise de micro incidentes na operação de usinas nucleares: estudo de caso sobre o uso de procedimentos em organizações que lidam com tecnologias perigosas**. Gestão & Produção, v. 12, p. 219-237, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/SP83VG6G6c6yfKp7NfzVyVk/?format=pdf&lang=pt>.

CHAVES, Silvana; CAMPELLO, Mauro. A qualidade e a evolução das normas série ISO 9000. **Gestão pela qualidade**, v. 3, p. 19, 2016.

CNEN-Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Normas regulatórias**. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/normas-para-instalacoes-nucleares>. Acesso em 15/08/2021

CORDEIRO, Marinês Domingues; PEDUZZI, Luiz OQ. **Entre os transurânicos e a fissão nuclear: um exemplo do papel da interdisciplinaridade em uma descoberta científica**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 31, n. 3, p. 536-563, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2014v31n3p536>. Acesso em: 27/04/2021

COTTA, R.M. **LABGENE E DESSAL: perspectivas e oportunidades**. I Simpósio de Tecnologias Nucleares – Desenvolvimento Sustentável para o Brasil. Rio de Janeiro: Escola de Guerra Naval, 04 de setembro de 2017. CURY, C.R.J. Educação e Contradição: elementos metodológicos para uma teoria crítica. 2ª ed. São Paulo: Cortez, 1989, 181p.

DE MOURA, Jorge Costa. **Conflito entre Normas Constitucionais: Monopólio do Minério Nuclear e a Função Social da Propriedade no Brasil**. 2014. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/062/46062689.pdf. Acesso em: 25/10/2021

DE SOUZA, Daiane CB et al. **Chernobyl-state of the art; Chernobyl-o estado da arte**. 2014. Disponível:https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/034/46034422.pdf?r=1. Acesso em: 10/11/2021

DUTRA, Joisa; LOUREIRO, Gustavo Kaercher. **Necessária revisão da governança no setor elétrico: parte I-ONS1**. 2021. Disponível em: <https://ceri.fgv.br/sites/default/files/2021-01/conjuntura-jan-2021-energia.pdf>. Acesso em: 15/05/2021

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas; **Balço Energético Nacional 2019, ano base 2018**; Rio de Janeiro: EPE, 2019, 292p.

EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**-Ano base 2020. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 20/05/2021

ELETROBRAS. **INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DAS EMPRESAS ELETROBRAS**. 2020. Disponível em: http://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Documents/Responsabilidade-Socioambiental/Eletronuclear_inventario_GEE_port_297x210mm_v04%20-%20FINAL.PDF. Acesso em 06/05/2021

ELETROBRAS. **Eletronuclear Publica Edital Para Contratar Obra Civil de Angra 3**. 25 de fevereiro de 2021. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Paginas/Eletronuclear-publica-edital-para-contratar-obra-civil-de-Angra-3.aspx>. Acessado em 24/10/2021

ELETROBRAS. **Relatório anual 2019**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 2019. Disponível em: <https://www.eletronuclear.com/relatorio-sustentabilidade-2019/>. Acesso em: 17/05/2021.

ELETRONUCLEAR. **Angra 1**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 2020. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Angra-1.aspx>. Acesso em: 01/04/2021

ELETRONUCLEAR. **Unidade de armazenamento complementar a seco (UAS) de combustível irradiado da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA)**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 2020. Disponível em http://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Documents/Licenciamento%20Ambienta/Relat%C3%B3rio_Ambienta_Simplificado.pdf. Acesso em: 23/05/2021.

GOV - GOVERNO FEDERAL. **Governo Federal avança no processo da Eletrobras de Capitalização da Eletrobras**. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/noticias/2021/setembro/governo-federal-avanca-no-processo-de-capitalizacao-da-eletronuclear>. Acessado em: 5/10/2021

HILTUMEN, Ilmari. **Finlândia Enterra Lixo Nuclear**. Euro News. 2019. Disponível em: <https://pt.euronews.com/2019/01/15/finlandia-enterra-lixo-nuclear>. Acesso em: 28/09/2021.

IEA - *International Energy Agency*. **Explore energy data by category, indicator, country, or region**. IEA, Paris, 2019a. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/datatables?country=WORLD>. Acesso em: 27/04/2021.

IEEE - IEEE-USA Energy Policy Committee, *2014 IEEE-USA National Energy Policy Recommendations*, IEEE, 2019. Disponível em: <https://ieeeusa.org/wp-content/uploads/2019/11/NEPR1119.pdf>. Acesso em: 22/11/2021

INB- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **Ciclo do Combustível Nuclear**. 2020. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear>. Acesso em: 14/05/2021

INB- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **O Que é Beneficiamento?** 2020. Disponível em: <https://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/o-que-e-o-beneficiamento?Origem=1086>. Acesso em: 14/05/2021

INB- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **O Que é o Enriquecimento de Urânio? Como Ele é Feito na INB?** 2020. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/Detalhe/Conteudo/o-que-e-o-enriquecimento-como-ele-e-feito/Origem/1068>. Acesso em: 13/05/2021

INB- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **O Que é Yellowcake?** 2020. Disponível em: <https://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/o-que-e-o-yellowcake?Origem=1084>. Acesso em: 18/05/2021

INB- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **MINERAÇÃO.** 2020. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Minera%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 10/05/2021

INB- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **Produção de Pastilhas.** 2020. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Producao-de-Pastilha>. Acesso em: 12/05/2021

INB- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **Reconversão.** 2020. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Reconversao>. Acesso em: 17/05/2021

INB – INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL S.A. **RELATÓRIO DE ATIVIDADES 2007:** Ano Base 2007, **Brasil.** Acesso em: 13/05/2021

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **DESAFIOS DO DESENVOLVIMENTO.** História-Petróleo. 2010. Disponível em: http://desafios.ipea.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2321%3Aca&limitstart=5. Acesso em: 05/05/2021

JANNUZZI, G. D. et al. **Políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil.** 2012.

JUNIOR, Ricardo Abranches Felix Cardoso et al. **Critérios socioambientais no apoio à valoração ambiental de empreendimentos de transmissão de energia em âmbito estadual?** 2021. Disponível em: http://146.164.3.11/app/webroot/files/publications/04_cardoso_junior_2021_03_25.pdf. Acesso em: 20/05/2021

KNOGLINGER, E.; WÖLFL, H.; KALIATKA, A. Heat transfer in the core graphite structures of RBMK nuclear power plants. **Nuclear Engineering and Design**, v. 293, p. 413-435, 2015. Disponível em:

KURAMOTO, Renato Yoichi Ribeiro; APPOLONI, Carlos Roberto. Uma breve história da política nuclear brasileira. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. 3, p. 379-392, 2002.

KOTILAINEN, A. T. et al. Chernobyl still with us: ¹³⁷Caesium activity contents in seabed sediments from the Gulf of Bothnia, northern Baltic Sea. **Marine Pollution Bulletin**, v. 172, p. 112924, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X21009589>. Acessado em: 16/11/2021

MAIA, Vinicius de Souza Barbosa. Urânio depletado: **Vantagens e desvantagens de uma aplicação tecnológica.** 2017. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/5769>. Acesso em: 01/05/2021

MANTESSO-NETO, Virgínio; BARTORELLI, Andrea; CARNEIRO, Celso Dal Ré; BRITO NEVES, Benjamim Bley de. **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. [S.l.: s.n.], 2004. Acesso em: 05/03/2021

MARTINS FILHO, João Roberto. O projeto do submarino nuclear brasileiro. **Contexto Internacional**, v. 33, p. 277-314, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-85292011000200002>. Acesso em: 15/11/2021

MATHIAS¹, João Felipe Cury Marinho et al. **ATIVIDADE ECONÔMICA E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: UMA ABORDAGEM BASEADA NA PESQUISA INDUSTRIAL ANUAL DO IBGE**. 2015. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/338/319>. Acesso em: 22/05/2021

MACHADO, Luiz Carlos Aldeia. **Análise CFD Do Uso De Nanofluidos De Água/Alunina Como Refrigerante Para Reatores Nucleares**. 2021. Disponível em: Análise CFD do uso de Nanofluidos de Água/Alumina como Refrigerantes para Reatores Nucleares. (ufrj.br). Acessado em 28/07/2021.

MARIA, Ana Xavier et al. **Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2006. Disponível em:

MME- Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira - Ano base 2020: Relatório Síntese**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/ResenhaEnergeticaExercicio2020final.pdf>. Acesso em 18/09/2021.

MME- Ministério de Minas e Energia. **Portaria nº 451, de 16 de dezembro de 2020**. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=17/12/2020&jornal=515&pagina=138>. Acesso em: 20/10/2021

MESQUITA, MATA *et al.* **Estudos Científicos para Controle, Segurança e Licenciamento de Centrais Nucleares**. 2015. Disponível em: http://repositorio.cdtm.br:8080/bitstream/123456789/1322/1/mesquita.pdf?fbclid=IwAR3F8CFkHEqx3qL9pK3NbmCWRJ5YfDLw9C6dhJ29-cgyc-IPPLIkeE3_8M3E. Acessado em 15/10/2021

MIT- Massachusetts Institute of Technology. **The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World**. 2018. Disponível em: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2018/09/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World.pdf>. Acesso em: 27/11/2021

Morais. Matheus Roberto. **O Problema Da Recarga de Reatores Nucleares Do Tipo PWR Otimizado Pelo Algoritmo Particle Swarm Optimization**. 2021. Disponível em: Microsoft Word - ProjetoFinalMatheus.docx (ufrj.br). Acessado em 01/08/2021

NASCIMENTO, Raphael Santos; ALVES, Geziele Mucio. Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: Métodos e benefícios ambientais. **XX Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência**. Universidade do Vale do Paraíba, 2016. Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/0859_1146_01.pdf. Acesso em: 27/04/2021

NASCIMENTO. **Governo Estuda Construção de Seis Usinas Nucleares Até 2050**. 2019. Brasília. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2019-09/governo-estuda-construcao-de-seis-usinas-nucleares-ate-2050>. Acessado em 24/10/2021.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELETRICO. **Sistemas Isolados**. Brasil, 2017.

Disponível em: <http://www.ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados>. Acesso em: 24/03/2021

PLANAS, Oriol. **Reator de Água Pressurizada (PWR)**. 2017. Disponível em: <https://pt.energia-nuclear.net/operacao-usina-nuclear/reator-nuclear/tipos/reator-de-agua-pressurizada#:~:text=Reator%20de%20%C3%A1gua%20pressurizada%20>. Acesso em: 12/04/2021

PITTA, Terra. **Catastrophe: A Guide to World's Worst Industrial Disasters**. Vij Books India Pvt Ltd, 2015. Acesso em: 22/10/2021

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.

ROCHA, Pedro Luiz Dias. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE REATORES MODULARES (SMR) E REATORES DE ÁGUA PRESSURIZADA (PWR) A PARTIR DE ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SALGE, Markus; MILLING, Peter M. De quem é a culpa, o operador ou o designer? Dois estágios de falha humana no acidente de Chernobyl. Revisão da dinâmica do sistema: *The Journal of the System Dynamics Society*, v. 22, n. 2, pág. 89-112, 2006.

SAPUNARU, R. A. et al. **Por que Devemos Investir em Energia Nuclear?** 2014. Disponível em: <http://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/viewFile/18491/pdf>. Acesso em: 08/03/2021.

SBPE – Sociedade Brasileira de Pesquisa Energética. **Matriz energética brasileira: que caminho queremos seguir?** 2021. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/artigos/53096107/matriz-energetica-brasileira-que-caminho-queremos-seguir>. Acesso em: 25/09/2021.

SCHMIDT, Luísa; HORTA, Ana; PEREIRA, Sérgio. O desastre nuclear de Fukushima e os seus impactos no enquadramento midiático das tecnologias de fissão e fusão nuclear. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 4, p. 233-250, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/asoc/v17n4/a17v17n4.pdf>. Acesso em: 07/05/2021

SCLIAR, Claudio et al. **PERCEPÇÃO DE RISCO DOS TRABALHADORES DAS USINAS NUCLEARES DE ANGRA DOS REIS, RJ: ESTUDO PILOTO DE UMA REALIDADE EM SAÚDE**, 1999.

SORPRESO, Thirza Pavan et al. **Energia nuclear mediante o enfoque ciência, tecnologia e sociedade na formação inicial de professores de física**. 2013. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/254151/1/Sorpreso_ThirzaPavan_D.pdf. Acesso em: 15/04/2021

WNA - *World-Nuclear Association*. **Brazil**. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/brazil.aspx>. Acesso em: 27/03/2021

WNA - *World-Nuclear Association*. **Angra 1**. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/reactor/default.aspx/ANGRA-1>. Acessado em: 27/03/2021

WNA - *World-Nuclear Association*. **Angra 2**. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/reactor/default.aspx/ANGRA-2>. Acessado em: 27/03/2021