



LUCAS RODRIGUES DE OLIVEIRA

**ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS
DO USO DE ENERGIA NUCLEAR NA MATRIZ
ELÉTRICA BRASILEIRA**

**LAVRAS – MG
2021**

LUCAS RODRIGUES DE OLIVEIRA

**ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS, E AMBIENTAIS DO USO DE
ENERGIA NUCLEAR NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Curso
de Engenharia Química, para a
obtenção do título de Bacharel

Prof (a). Dr (a). Lidja Dahiane Menezes Santos Borél
Orientador (a)

**LAVRAS – MG
2021**

LUCAS RODRIGUES DE OLIVEIRA

**ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DO USO DE
ENERGIA NUCLEAR NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA**

**TECHNICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE USE
OF NUCLEAR ENERGY IN THE BRAZILIAN ELECTRIC MATRIX**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Curso
de Engenharia Química, para a
obtenção do título de Bacharel

APROVADA em 17 de novembro de 2021
Dr.(a) Natália Maira Braga Oliveira - UFLA
Dr.(a) Zuy Maria Magriotis - UFLA

Prof (a). Dr (a). Lidja Dahiane Menezes Santos Borél
Orientador (a)

**LAVRAS – MG
2021**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a pessoa que tornou tudo isso possível, a professora Lidja, que desde a disciplina Projeto em Engenharia Química II sempre esteve disposta a ajudar, a estimular a fazer o melhor, disponível para as dúvidas e sugestões e sempre entendeu o lado e as dificuldades dos alunos. Só tenho a agradecer por todo empenho, disponibilidade, paciência, profissionalismo e confiança que teve desde o início e que tornou a realização desse trabalho possível e me tornou um profissional e pessoa muito melhor. Muito obrigado Lidja!

Gostaria de agradecer também a meus pais, família, amigos e professores que me acompanharam durante toda essa trajetória que se iniciou em 2016 e me ajudaram a tornar essa graduação possível. Muito obrigado!

RESUMO

O desenvolvimento das economias sustentado pela energia e a necessidade de se utilizar energias limpas coloca a energia nuclear como umas das fontes promissoras da atualidade. Para a produção de energia nuclear é necessário o domínio de várias tecnologias de ponta como a extração, beneficiamento e enriquecimento de urânio, operação de reatores e armazenamento de lixo radioativo. O Brasil domina todos esses ciclos e é considerado uma potência nuclear no quesito energia, por esse motivo é tecnologicamente viável um aumento substancial na produção de energia nuclear nas próximas décadas. Diante desse contexto, esse trabalho teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica do estado da arte relacionado a energia nuclear, realizar uma análise técnica dos processos nucleares e estudar aspectos econômicos e ambientais considerando um aumento de 3,5% na produção de energia no Brasil até 2050 com uma representatividade de 10% de fontes nucleares na matriz elétrica nacional. A análise bibliométrica dos termos “*nuclear energy*”, “*nuclear reactor*” e “*pressurized water reactor*” utilizando o *software VOSViewer* mostrou tendências de pesquisa nas áreas de cogeração de hidrogênio, dessalinização, pequenos reatores nucleares e reatores fluidizados. O estudo de análise técnica resultou no modelo de reator nuclear de Reator de Água Pressurizada (PWR) como o mais seguro, utilizado e em construção em todo mundo, apesar de ser mais caro e demorado na construção que seus pares. A análise econômica utilizando as Demonstrações do Resultado do Exercício de 2003 até 2020 de Angra 1 e Angra 2 forneceu dados para estipular as receitas, custos e lucros operacionais ao longo dos anos de 2022 até 2084 e construção de mais 17 reatores no modelo PWR com 1.400 MW de potência cada. O fluxo de caixa operacional demonstrou que a construção de centrais nucleares entre 2022 e 2049 seriam pagas pelos lucros no ano de 2053, a partir de então o lucro líquido retornaria para os acionistas. A análise ambiental utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) considerando várias etapas do ciclo de produção de energia nuclear, utilizando o *software OpenLCA* e a base de dados *Ecoinvent*, mostrou que o processo de produção de energia nuclear não é tão limpo como se imaginava, as fases de produção de lixo radioativo e armazenamento do mesmo no próprio meio reacional nas centrais nucleares emitem grandes quantidades de poluentes, utilizam significativas quantidades de aço e concreto para a construção das piscinas e são um potencial risco ao meio ambiente, gerando a radiação ionizante como principal impacto ambiental. Apesar dos riscos a utilização e expansão de centrais nucleares na matriz elétrica brasileira é essencial para um sistema mais robusto, confiável e menos dependente do clima.

Palavras-chave: PWR, Energia limpa, Análise Bibliométrica, Fluxo de caixa, Avaliação do Ciclo de Vida.

ABSTRACT

The development of economies supported by energy and the need to use clean energy places nuclear energy as one of the promising sources of today. For the production of nuclear energy, it is necessary to master several cutting-edge technologies such as the extraction, processing and enrichment of uranium, operation of reactors and storage of radioactive waste. Brazil dominates all these cycles and is considered a nuclear power in terms of energy. For this reason, a substantial increase in nuclear energy production in the coming decades is technologically feasible. In this context, this work aimed to carry out a bibliometric analysis of the state of the art related to nuclear energy, carry out a technical analysis of nuclear processes and study economic and environmental aspects considering a 3.5% increase in energy production in Brazil until 2050 with a 10% representation of nuclear sources in the national electricity matrix. Bibliometric analysis of the terms “nuclear energy”, “nuclear reactor” and “pressurized water reactor” using the VOSViewer software showed research trends in the areas of hydrogen cogeneration, desalination, small nuclear reactors and fluidized reactors. The technical analysis study resulted in the Pressurized Water Reactor (PWR) nuclear reactor model as the safest, most used and under construction worldwide, despite being more expensive and time-consuming to build than its peers. The economic analysis using the Income Statements for the 2003 to 2020 fiscal year of Angra 1 and Angra 2 provided data to stipulate operating revenues, costs and profits over the years 2022 to 2084 and construction of 17 more reactors in the PWR model with 1,400 MW of power each. The operating cash flow showed that the construction of nuclear power plants between 2022 and 2049 would be paid for by the profits in the year 2053, from then on the net profit would return to the shareholders. Environmental analysis using Life Cycle Assessment (LCA) considering various stages of the nuclear energy production cycle, using OpenLCA software and the Ecoinvent database, showed that the nuclear energy production process is not as clean as if imagined, the phases of radioactive waste production and storage in the reaction environment in nuclear power plants emit large amounts of pollutants, use significant amounts of steel and concrete for the construction of swimming pools and are a potential risk to the environment, generating radiation ionizing as the main environmental impact. Despite the risks, the use and expansion of nuclear power plants in the Brazilian electricity matrix is essential for a more robust, reliable and less climate-dependent system.

Keywords: PWR, Clean Energy, Bibliometric Analysis, Cash Flow, Life Cycle Assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de eletricidade por fonte, Mundo 1990 – 2018.....	15
Figura 2 – Geração de eletricidade por fonte, Brasil 1990 – 2018.....	16
Figura 3 – Ultracentrífuga.....	20
Figura 4 – Cascata de ultracentrífuga.....	20
Figura 5 – Reação de fissão nuclear em cadeia.....	22
Figura 6 – Reação nuclear controlada para a geração.....	23
Figura 7 – Esquema ilustrativo de um reator de água pressurizada.....	25
Figura 8 – Reator de água fervente.....	26
Figura 9 – Reator CANDU.....	27
Figura 10 – Reator do modelo AGR.....	28
Figura 11 – Etapas do ciclo de vida de um produto.....	34
Figura 12 – Processo simplificado da geração de energia nuclear.....	36
Figura 13 – Ciclo de vida da energia elétrica produzida em usina nuclear com destaque para o limite considerado limpo.....	37
Figura 14 – Esquema dos reatores a serem construídos.....	40
Figura 15 – Série histórica da receita e do custo operacional de 2003 até 2020 da Eletronuclear.....	42
Figura 16 – Etapas envolvidas a produção de energia nuclear que estão inseridas no limite do sistema.....	48
Figura 17 – Documentos publicados por ano referentes ao termo " <i>nuclear energy</i> " na plataforma Scopus.....	53
Figura 18 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave com termo de busca " <i>nuclear energy</i> " restrito ao Brasil na base Scopus em 2021.....	54
Figura 19 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave com termo de busca " <i>nuclear energy</i> " restrito à Engenharia Química na base Scopus em 2021.....	55
Figura 20 – Documentos publicados por ano referentes ao termo " <i>nuclear reactor</i> ".....	57
Figura 21 – Mapa bibliométrico de coocorrência e tendência de palavras-chave com termo de busca " <i>nuclear reactor</i> " restrito ao Brasil na base Scopus em 2021.....	59
Figura 22 – Mapa bibliométrico de coocorrência e tendência de palavras-chave com termo de busca " <i>nuclear reactor</i> " restrito à Engenharia Química na base Scopus em 2021.....	60

Figura 23 – Documentos publicados por ano referentes ao termo “ <i>pressurized water reactor</i> ”.....	63
Figura 24 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave com termo de busca “ <i>pressurized water reactor</i> ” restrito ao Brasil na base Scopus em 2021.....	64
Figura 25 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave com termo de busca “ <i>pressurized water reactor</i> ” restrito à Engenharia Química na base Scopus em 2021.....	65
Figura 26 – Fluxo de caixa descontado a valor presente com taxa mínima de atratividade de 10% dos reatores nucleares de 2022 até 2084.....	67
Figura 27 – Impactos ambientais causados pelas fontes de energia hidrelétrica, nuclear e solar em termos percentuais.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reatores nucleares em operação no mundo.....	29
Tabela 2 – Resumo das considerações feitas para estimativas de custos.....	44
Tabela 3 – Entradas dos produtos utilizado no <i>OpenLCA</i>	49
Tabela 4 – Saídas do produto utilizando no <i>OpenLCA</i>	50
Tabela 5 – Impactos ambientais avaliados para reatores nucleares.....	69
Tabela 6 – Entradas do sistema de fonte hidrelétrica.....	81
Tabela 7 – Saídas do sistema de fonte hidrelétrica.....	81
Tabela 8 – Entradas do sistema de fonte eólica.....	82
Tabela 9 – Saídas do sistema de fonte eólica.....	82

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Siglas

INB Indústrias Nucleares do Brasil

Símbolos

TWh Energia gerada em terawatt-hora
MtCO₂ Emissão em milhões de toneladas de dióxido de carbono
MW Potência em megawatt
km/s Velocidade em quilômetro por segundo
cm Comprimento em centímetros
mm Comprimento em milímetros
pH Potencial de hidrogênio
CO₂ Dióxido de carbono

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS ESÍMBOLOS.....	10
1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Matriz elétrica no Brasil e no Mundo.....	15
2.2 Energia nuclear no Brasil e no mundo.....	16
2.3 Tipos de radiação.....	17
2.4 Mineração de urânio.....	18
2.5 Enriquecimento de urânio.....	19
2.6 Fusão e fissão nuclear.....	21
2.7 Reatores de fissão nuclear.....	23
2.8 Destinação de material radioativo.....	30
2.9 Bibliometria.....	31
2.10 Aspectos econômicos.....	32
2.11 Avaliação do ciclo de vida (ACV).....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 Análise bibliométrica.....	38
3.2 Estimativas econômicas.....	39
3.2.1 Estimativa de custo de capital e operacional.....	39
3.2.2 Medidas de lucratividade.....	45
3.3 Estimativas do Ciclo de Vida.....	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1 Análise bibliométrica.....	52
4.2 Análise econômica.....	66
4.3 Análise ambiental.....	68
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
APÊNDICE A.....	81
APÊNDICE B.....	82

1. INTRODUÇÃO

A eletricidade é fundamental para o desenvolvimento de qualquer sociedade (IEA, 2021). Com a descoberta e aplicação da eletricidade no século XIX, a humanidade evoluiu em todos os aspectos a partir da disponibilização e distribuição massiva de eletricidade, tornando-se cada vez mais dependente de energia em todos os processos, como agricultura, pecuária, saúde, lazer, trabalho, comunicação, transporte, etc. Sendo assim, a disponibilidade de eletricidade obtida de fontes limpas é crucial para o desenvolvimento da sociedade e da economia, auxiliando na construção de um futuro mais tecnológico, sustentável e limpo.

Grandes economias mundiais consomem uma vultosa quantidade de eletricidade como China (6.573 TWh), EUA (3.830 TWh), Índia (1.311 TWh) e Japão (928 TWh). No Brasil, o consumo total de energia em 2020 foi de 476 TWh, sendo a indústria responsável por 166 TWh destes, e tendo o setor metalúrgico responsável por 24,4% do consumo da indústria, produtos alimentícios por 13,6% e químico por 10,3% (EPE, 2020).

Toda essa demanda mundial por eletricidade e apenas recente utilização em massa de fontes limpas faz com as fontes fósseis ainda sejam importantes. De 1990 a 2018, o crescimento da matriz elétrica mundial foi de 2,25 vezes, saindo de 11.847,9 TWh para 26.693,4 TWh de energia, sendo o carvão, petróleo e gás natural as principais fontes (64,03%) (IEA, 2018). A queima dos combustíveis fósseis para a produção de energia, em 2018, liberou 13.823,7 MtCO₂, um avanço de 1,8 vezes em relação a 1990, que foi de 7.588,2 MtCO₂ (IEA, 2018). É importante salientar que existe uma diferença fundamental em matriz elétrica e matriz energética, enquanto a matriz elétrica se diz respeito apenas as fontes geradoras de energia elétrica, já a matriz energética se diz respeito as todas as fontes de energia utilizadas em um país e pela indústria e que não sejam necessariamente eletricidade.

A crescente demanda de energia elétrica e por métodos de produção limpos fazem com que governos e empresas invistam cada vez mais em energias limpas, como a nuclear, solar, eólica, de biomassa, hidráulica, geotérmica, maremotriz e a base de hidrogênio. O Brasil tem recursos energéticos limpos abundantes e processos tecnológicos maduros e seguros que permitem a produção de energia por fontes limpas, por esses motivos a matriz elétrica brasileira é uma das mais limpas no mundo. Entretanto, existe uma dependência muito forte de recursos hídricos (63,8%), sendo a produção hidrelétrica condicionada ao clima por depender das chuvas ou que gera grandes impactos ambientais, por ter reservatórios que ocupam áreas enormes para deter o fluxo de água (IEA, 2018). Esses fatores têm consequências marcantes como a crise do abastecimento de energia em 2001. Outra possível crise semelhante em 2021, e em todos os períodos de seca, obriga o país a acionar usinas térmicas para manter o fornecimento de energia,

o que emite toneladas de gases poluentes na atmosfera, contribuindo para intensificar o aquecimento global e mudanças climáticas.

A demanda por eletricidade só aumenta ao longo dos anos, com um crescimento estimado de 3,5% ao ano até 2050 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020). Assim, o aumento da diversificação da matriz elétrica brasileira é premente, pois as mudanças climáticas estão cada vez mais intensas, principalmente para oferecer suporte à eletrificação da frota automobilística e de fornos a indução tanto na indústria como nas residências. Uma vez que o transporte é um dos principais meios de poluição, sendo responsável por liberar 196,5 MtCO₂ apenas em 2019 no Brasil (BARCELLOS, 2020), o uso de carros elétricos com energia proveniente de termoeletricas não contribui para uma economia de baixo carbono, por isso é tão importante a utilização de energias limpas que não emitem dióxido de carbono e outros poluentes.

As usinas nucleares funcionam por várias semanas independentemente do clima e necessitam de pouca manutenção programada que interrompa a operação. Dispositivos de segurança tornam a operação segura tanto para o meio ambiente quanto para o ser humano, os reatores nucleares ocupam uma área mínima para operação, não emite gases poluentes nem agridem diretamente o ambiente como as termelétricas nem indiretamente como as hidrelétricas e solar que precisam de grandes áreas. Assim, o processo de produção de energia é eficiente e o produto final do reator, o plutônio, pode ser futuramente utilizado para gerar mais energia.

O Brasil é considerado uma potência na produção de energia nuclear, pois tem solo rico para a extração de urânio e tório, com 244 mil toneladas descobertas por pesquisas e estimativas de mais de 300 mil toneladas apenas na região Norte. Além disso, o país domina todo o processo de extração e enriquecimento de urânio por ultracentrifugação, um dos métodos mais eficientes desenvolvidos até o momento (GOVERNO DO BRASIL, 2020). Esses fatores demonstram com que o Brasil tenha recursos nucleares que não são explorados em seu potencial máximo. A produção de energia por fonte nuclear no Brasil acontece somente em Angra 1 e Angra 2, e apenas essas usinas são responsáveis por 2,3% da matriz elétrica brasileira (IEA, 2018). No contexto global a energia nuclear representa 10,2% da matriz elétrica.

Diante do contexto apresentado, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar aspectos técnicos, econômicos e ambientais do uso de energia nuclear no Brasil considerando a participação de 10% na matriz elétrica (mesma porcentagem global) para atender a demanda nacional em 2050, segundo as projeções do Ministério de Minas e Energia (2020). Para isso, foram cumpridas as seguintes etapas:

- Proceder um estudo teórico aprofundado do fluxograma do processo de produção de energia elétrica a partir de usinas nucleares nos principais países produtores e pesquisadores;
- Coletar dados de pesquisa relacionados aos processos de fissão e fusão nuclear no Brasil e no mundo;
- Realizar uma análise bibliométrica sobre a geração de energia nuclear;
- Utilizar dados econômicos sobre a construção e operação de usinas nucleares baseado em Angra 1 e Angra 2 para a projeção de fluxo de caixa e calcular medidas de lucratividade;
- Efetuar uma avaliação ambiental dos impactos gerados no meio ambiente pela operação de usinas nucleares utilizando a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida.

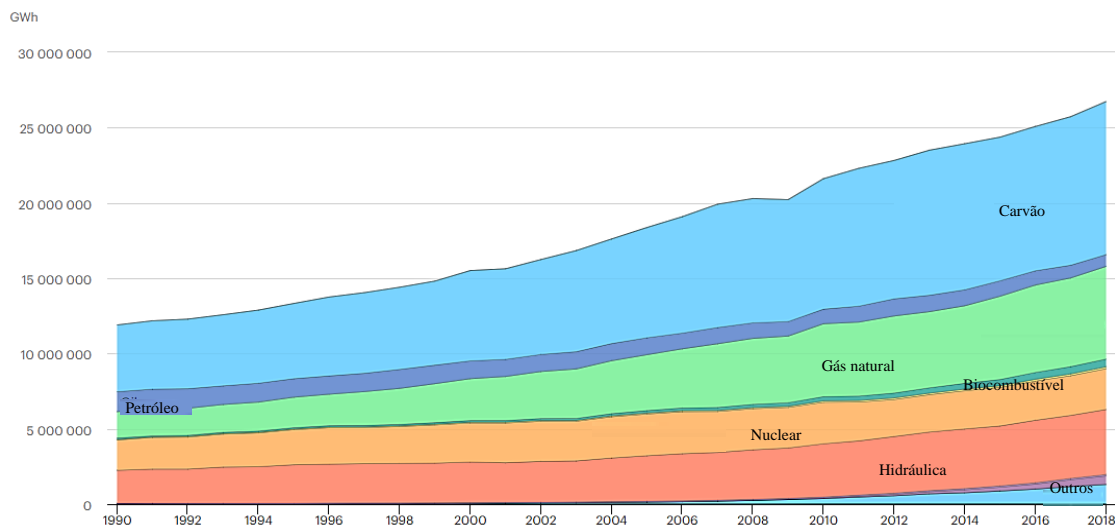
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Matriz elétrica do Brasil e do mundo

Com o passar dos anos, o mundo se tornou cada vez mais tecnológico e, conseqüentemente, mais dependente de energia e a tendência é que essa dependência se torne cada vez maior, impulsionado pela substituição das queimas de combustíveis fósseis por eletricidade.

Na Figura 1 é apresentada a geração de eletricidade no mundo por cada fonte de energia de 1990 até 2018. Como pode ser visto, apesar do aumento expressivo da produção, a matriz mundial não sofreu grandes alterações. Em 1990, a energia proveniente de carvão, petróleo e gás natural somadas representavam 63,3%, enquanto em 2018 era de 64,0%. Apesar da produção de energia nuclear ter aumentado 1,34 vezes, sua representatividade mundial saiu de 16,7% em 1990 para 10,15% em 2018 e as energias renováveis aumentaram de 19,7% para 25,8% (IEA, 2018).

Figura 1 – Geração de eletricidade por fonte, Mundo 1990 - 2018.

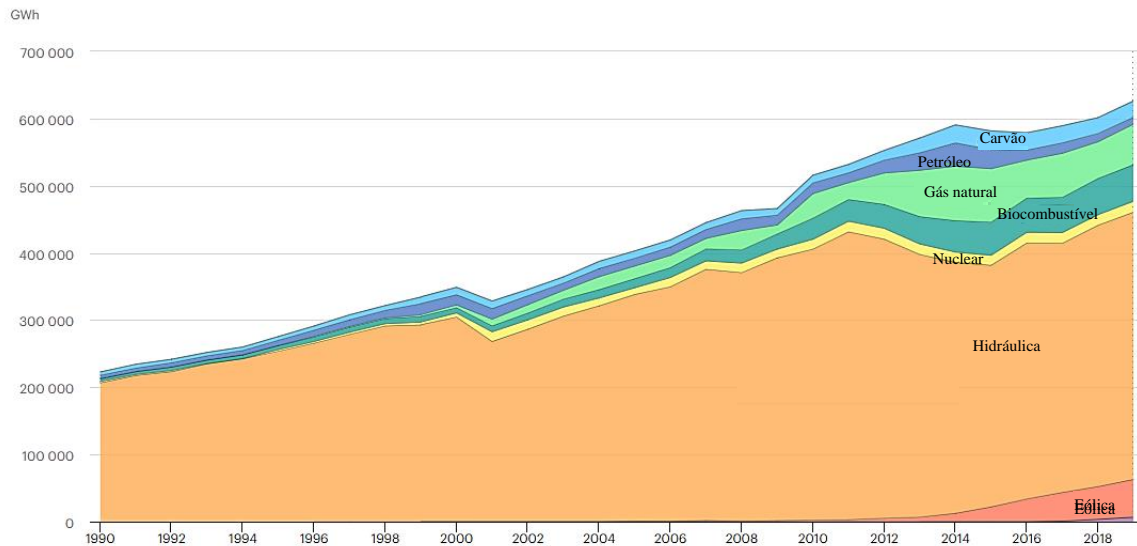


Fonte: Adaptado de IEA (2018)

Na Figura 2, apresenta-se a geração de eletricidade no Brasil entre os anos de 1990 a 2018. Nesse intervalo, a matriz elétrica cresceu 2,78 vezes, com 222,8 TWh em 1990 para 619,7 TWh em 2018. As fontes fósseis eram responsáveis por 4,5% da produção nos anos 90 e passou para 15,3% em 2018. A dependência hídrica diminuiu ao longo dos anos, saindo de 92,8% para

64,2%, mas ainda é a principal fonte de energia do país. Por fim, a energia nuclear aumentou a quantidade produzida em 7,2 vezes, representando 1,0% em 1990 e 2,6% em 2018 (IEA, 2018).

Figura 2 – Geração de eletricidade por fonte, Brasil 1990 - 2018



Fonte: Adaptado de IEA (2018)

A produção de energia elétrica por fontes limpas tem ganhado representatividade com descobertas tecnológicas importantes e viabilização de meios de produção, como painéis solares, pás eólicas e combustão de biomassa, porém a energia proveniente dessas fontes não é despachável, ou seja, não pode ser armazenada. Esse tipo de energia, apesar de limpa e renovável, enfrenta inúmeros problemas como incerteza em relação à disponibilidade energética, elevado montante de investimento, distribuição desigual dos potenciais de geração (instalação de usinas no mesmo local ocasiona diferentes gerações entre as usinas), falta de sincronismos, dificuldade de manutenção dos níveis de tensão dentro dos padrões, entre outros (IEMA, 2016). Por isso, investimentos em fontes despacháveis tais como nuclear, hidráulica e fósseis são importantes para manter o funcionamento e expansão da malha elétrica. Dentre as fontes despacháveis, limpas e que não sofrem com as mudanças climáticas, a energia nuclear apresenta ser uma fonte importante para a diversificação da matriz elétrica brasileira e mundial.

2.2 Energia nuclear no Brasil e no mundo

A energia nuclear representou 10,2% de toda energia elétrica produzida no mundo em 2018, cerca de 2.710,4 TWh (IEA, 2018). Existem países nos quais a representatividade dessa fonte de energia é maior, principalmente nos países europeus desenvolvidos e sem recursos

naturais a serem explorados. Na Europa, a energia nuclear representa 22,5% da matriz elétrica e na França ela representa 69,9% de toda eletricidade gerada (IEA, 2018). Nos Estados Unidos, os reatores nucleares representam cerca de 20% da matriz elétrica (EIA, 2021).

Em todo o mundo, existem até 2021 cerca de 442 reatores nucleares em operação em mais de 30 países, e cerca de 57 unidades sendo construídas principalmente da China, Índia, Rússia, Coreia do Sul e Europa (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021a). No Brasil, apesar da energia nuclear representar apenas 2,6% da matriz elétrica, existem apenas dois reatores nucleares em pleno funcionamento, Angra 1, com uma potência instalada de geração de 650 MW, e Angra 2, com uma potência de 1.360 MW. As duas usinas geraram, em 2019, 16,13 TWh, sendo Angra 1 responsável por 5,55 TWh e Angra 2 por 10,58 TWh. Há um reator denominado Angra 3, com potência instalada de 1.405 MW e capacidade de gerar aproximadamente 12 TWh/ano sendo construído, estima-se que esse reator irá entrar em funcionamento em 2026 (ELETRONUCLEAR, 2019).

O grande problema do processo de produção de energia nuclear é a originação, armazenamento e destino do lixo radiativo gerado durante o processo reacional. O lixo radioativo libera diversos tipos de radiação ao longo de vários anos, os principais tipos de radiação liberados são alfa, beta e gama. Vale ressaltar que a liberação dessas radiações é um efeito natural e acontece devido a átomos instáveis com mais energia que seu estado padrão e estável.

2.3 Tipos de radiação

Durante o processo de produção de energia nuclear as radiações alfa, beta e gama são liberadas ininterruptamente durante a reação no reator e por anos e anos nos locais de armazenamento de lixo nuclear.

A radiação alfa (α) acontece em átomos instáveis como urânio, plutônio, tório, e outros elementos mais pesados, nesse processo o átomo libera uma partícula contendo 2 prótons e 2 nêutrons. Essa emissão radioativa transmuta os elementos e tem baixo poder de penetração na matéria, não se propaga com facilidade no ar e na atmosfera, sendo nociva apenas se ingerida, inalada ou se entrar pelas vias oculares (PERUZZO, 2012).

A radiação beta (β) pode ser emitida por duas formas em elementos radioativos, a partir da emissão beta negativo e beta positivo, ocorrendo quando um elétron é expulso do núcleo. As emissões betas conseguem penetrar 2 mm em placas de chumbo e até 2 cm na pele humana, podendo causar alterações no DNA e nas estruturas celulares, sendo letal. A emissão beta

negativa acontece quando um nêutron se desintegra e dá origem a um próton e um elétron. Já a emissão beta positiva acontece quando um próton se desintegra originando um pósitron (elétron com carga positiva). Essa desintegração provoca a transmutação da matéria (PERUZZO, 2012).

A radiação gama (γ) não envolve a emissão de matéria. É uma radiação puramente eletromagnética de altíssima energia que, em geral, acontece ao mesmo tempo da emissão alfa e/ou beta. Esse tipo de radiação não tem carga nem massa sendo capaz de penetrar até 5 cm de chumbo, 30 cm de aço e atravessa o corpo humano por inteiro, causando danos celulares fatais (PERUZZO, 2012).

2.4 Mineração de urânio

Estima-se que existem mais de 6.147.800 toneladas de urânio a serem explorados em todo planeta, sendo as maiores reservas encontradas na Austrália, Cazaquistão, Canadá, Rússia, Namíbia, África do Sul e Brasil (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021c). No Brasil, as reservas estudadas e comprovadas passam de 244.000 toneladas, podendo o país ter reservas de mais de 576.000 toneladas de urânio (INB, 2019).

O beneficiamento físico do minério consiste em triturar e realizar a britagem com abatimento de poeira nas rochas, com o intuito de diminuir o tamanho da rocha para aumentar a área superficial e aumentar a eficiência do processo de lixiviação (SILVA, 2014). A lixiviação de urânio ocorre após o minério ser triturado e empilhado em montes de 5 a 30 metros de altura que são irrigados continuamente com uma solução ácida por vários dias e semanas (SCHULZ, 2017).

Após a lixiviação, o produto de urânio precisa ser clarificado para a remoção de sólidos suspensos. Após a retirada do material em suspensão, ocorre a extração de urânio com uso de solvente em módulos tipo misturador-decantador, em sistema contracorrente. O extrato pode sofrer uma reextração com solução de cloreto de sódio acidificada com ácido sulfúrico (MORAIS, 2005).

A solução ácida rica em urânio segue para a etapa de precipitação. Nela, o urânio é precipitado pela adição de neutralizadores. Posteriormente, o precipitado passa por um processo de filtração para isolar a parte sólida rica em urânio da parte líquida. Após essa etapa se origina o concentrado de urânio (*yellowcake*), que é seco por oxidação/combustão (SCHULZ, 2017).

A principal mina de urânio no Brasil se situa em Caetité no estado da Bahia, com capacidade máxima de produção de 800 toneladas por ano. Vale ressaltar que no Brasil, pela constituição, apenas a União Federal e órgãos criados por ela podem extrair e processar urânio

e quaisquer outros componentes radioativos. Assim, a Indústrias Nucleares do Brasil (INB) do Ministério de Ciência e Tecnologia pode exercer a atividade de exploração de urânio (SILVA, 2014).

Como o urânio é encontrado em todo planeta, ele também é encontrado diluído na água dos oceanos com pontos de alta e baixa concentração. A extração de urânio de água do mar de alta salinidade em concentrações baixas é uma tecnologia inovadora que pode contribuir para a utilização de energia nuclear de forma mais sustentável. O processo utiliza um método de extração assistida por fotocatalise, conduzida por luz do sol utilizando um material de nitreto de carbono bifuncional. Os íons de urânio presentes na água são capturados pelo material e em seguida depositados como nanopartículas de metastudita (peróxido mineral de urânio – $(\text{UO}_2)\text{O}_2(\text{H}_2\text{O})_2$) a partir de iluminação. O método se mostrou promissor na água do mar enriquecida e utilização de iluminação natural solar (LIU et al., 2021).

Outros métodos de extração de urânio da água dos mares estão sendo pesquisados. Estudos utilizando tiras de bambu amidoximizado de materiais naturais provaram ser possível extrair urânio de água salgada. A amidoximação do material de bambu ajustou o pH de absorção na faixa ideal e ajudou na hidrofobicidade, ocasionando uma melhor absorção do urânio presente na água do mar (WANG et al., 2021).

2.5 Enriquecimento de urânio

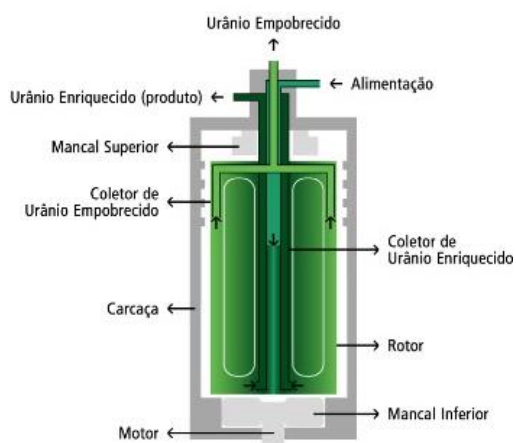
A transformação de urânio em combustível nuclear é um processo tecnológico que apenas poucos países dominam, o enriquecimento de urânio. No minério de urânio explorado, a concentração natural do isótopo físsil gira em torno de 0,7%, porém para ser usado em reatores, dependendo do tipo, sua concentração deve variar de 3% a 20%. Em jatos, porta-aviões e submarinos, a concentração de isótopos de urânio (urânio-235) varia de 50% a 90%. Acima de 90%, o urânio é destinado à construção de armas nucleares (PERUZZO, 2012). Denomina-se o material enriquecido aquele que contém maior quantidade de isótopos físsis de urânio e material empobrecido aquele que contém urânio não reacional.

O processo de enriquecimento via ultracentrifugação é a principal tecnologia para enriquecimento de urânio. O Brasil faz parte do seleto grupo de 13 países que domina esse processo. Comumente uma ultracentrífuga, como ilustrado na Figura 3, contém um rotor de 3 a 5 metros de altura e 20 cm de diâmetro e sua rotação varia entre 50.000 a 70.000 rpm. O gás hexafluoreto de urânio (UF_6) é alimentado em um conjunto de tubos a vácuo e com alta rotação, então as moléculas mais pesadas, de urânio-238, ficam concentradas na direção à borda externa

do cilindro, enquanto as moléculas mais leves, de urânio-235, se concentram no centro. O fluxo contracorrente nos tubos permite que o produto enriquecido seja extraído axialmente (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021d).

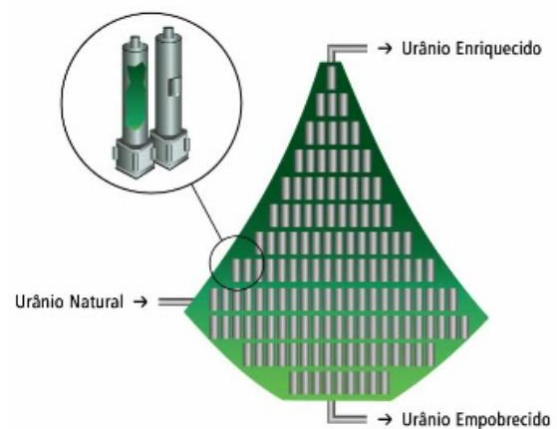
Os estágios da ultracentrífuga, como ilustrado na Figura 4, consistem em um grande número de ultracentrífugas em paralelo. Esses estágios são organizados em cascata, o que possibilita que o número de estágios seja de 10 a 20, em vez de mil ou mais como na difusão. O gás enriquecido é realimentado nos estágios subsequentes, enquanto o gás pobre esgotado retorna para o estágio anterior. A parede externa do cilindro giratório se move entre 400 e 500 metros por segundo (PERUZZO, 2012). Essa tecnologia, apesar de processar um volume menor, é bem mais eficaz na separação de urânio-235. As ultracentrífugas são projetadas para funcionar por cerca de 25 anos continuamente e não podem simplesmente ser desaceleradas ou desligadas e reiniciadas de acordo com a demanda (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021d).

Figura 3 – Ultracentrífuga



Fonte: Adaptado de MARTINS (2015)

Figura 4 – Cascata de ultracentrífuga



Fonte: Adaptado de MARTINS (2015)

Após o hexafluoreto de urânio ser enriquecido, ele passa por um processo de reconversão, no qual o urânio retorna para a forma de dióxido de urânio em pó. A reconversão acontece em um tanque de água aquecido contendo gás carbônico e gás amoníaco, formando tricarbonato de amônio e uranila, insolúvel em água. Após essa mistura ser seca, ela é aquecida a 600°C gerando o pó de dióxido de urânio que, por sua vez, é modelado em uma prensa rotativa, gerando os *pellets* combustíveis (PERUZZO, 2012).

2.6 Fusão e fissão nuclear

Existem duas grandes áreas dentro da produção de energia nuclear, a fusão nuclear e fissão nuclear. A fusão nuclear consiste em juntar núcleos de elementos leves formando núcleos de elementos mais pesados e liberar energia. A fusão acontece quando os átomos atingem velocidades extremamente altas, que consigam romper a repulsão elétrica existente entre os núcleos e aproximá-los o bastante para que as forças nucleares de curto alcance possam atuar e fundir os átomos em um novo elemento (PERUZZO, 2012).

As pesquisas recentes utilizam isótopos de hidrogênio, principalmente trítio e deutério. Os experimentos no Joint European Torus se iniciam em dezembro de 2021 e servirão como modelo para o Reator Termonuclear Experimental Internacional (*International Thermonuclear Experimental Reactor* – ITER) que entrará em operação experimental de reação de hidrogênio de baixa potência em 2025 e a partir de 2035 com uma mistura de deutério e trítio. Ambos os reatores nucleares de fusão podem chegar a temperaturas superiores a 50 milhões de graus Celsius (GIBNEY, 2021).

Apesar da potência dessa energia limpa, os desafios de engenharia ainda não foram completamente solucionados. A grande dificuldade é atingir a taxa de calor e pressão necessárias no plasma de hidrogênio para que a reação se torne autossustentável em termos energéticos, além de reatores e equipamentos que suportem tais condições continuamente.

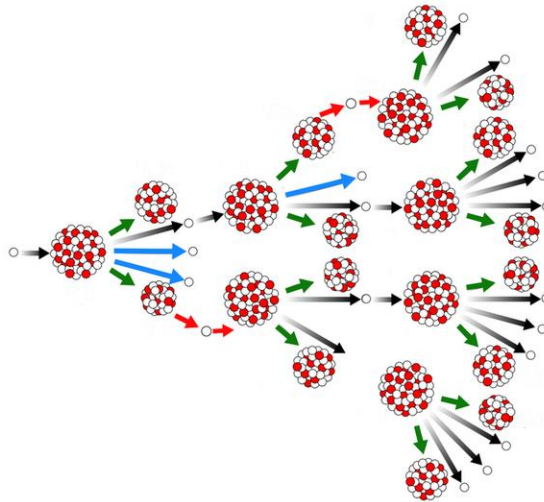
A fissão nuclear consiste em dividir núcleos de elementos pesados em núcleos de elementos mais leves e liberar energia. Esse processo foi descoberto por Lise Meitner e Otto Robert Frish, dois físicos austríacos que constataram a captura de nêutrons por átomos de urânio-235, resultando em um átomo de bário-140, um cripton-93, três nêutrons e 200 MeV de energia (PERUZZO, 2012), sendo uma quantidade de energia milhões de vezes maior que a liberada em processos químicos eficientes que liberam calor.

A reação atômica acontece pelo desequilíbrio entre a atração nuclear e a repulsão elétrica entre os prótons no núcleo. Na maioria dos átomos, a força de atração nuclear prevalece e mantém o átomo íntegro, mesmo recebendo outras partículas subatômicas. Porém, em elementos pesados, o equilíbrio dessas forças é mutável com o recebimento de novas partículas. O átomo de urânio-235, ao receber o nêutron, se estica, tendo uma forma mais alongada. Graças à força elétrica, esse alongamento se intensifica até um ponto crítico, em que as forças de atração nuclear são superadas pelas forças elétricas. Nesse momento, o átomo se parte e dá origem a novos elementos e partículas (PERUZZO, 2012).

A fissão de elementos radioativos ocorre em cadeia, ou seja, o produto da primeira reação possibilita que uma segunda e terceira reação aconteçam. Quando um átomo de urânio-235 recebe um nêutron, origina-se três nêutrons e outros elementos. Pelo fato de os nêutrons originados não terem carga, não sofrem nenhum impedimento ao transitar pelo reator e se chocar com outros núcleos de urânio-235. Assim, esses nêutrons reagem com novos átomos do combustível, sustentando a reação em cadeia (PERUZZO, 2012).

Se a taxa de produção de nêutrons no reator for igual à taxa de nêutrons que se perde e não reage, a reação é controlada, se a taxa de produção for maior que a taxa de perda, a reação é descontrolada, e se a taxa de produção for inferior à taxa de perda, a reação não se sustenta e termina. A Figura 5 exemplifica como acontece a fissão nuclear em cadeia sustentável incontrolada. Com combustível nuclear altamente enriquecido, essa reação em cadeia acontece de forma incontida e em velocidade exponencial, já nos reatores nos quais o enriquecimento de urânio é baixo, consegue-se controlar a reação.

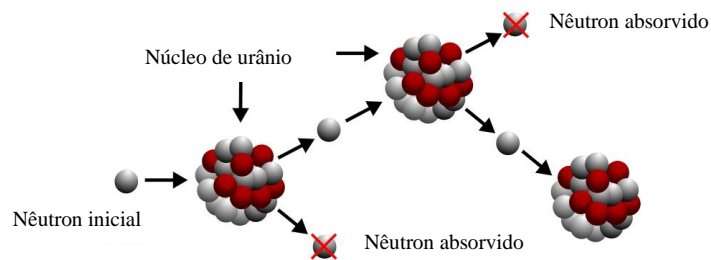
Figura 5 – Reação de fissão nuclear em cadeia



Fonte: Adaptado de MAGAZINE (2017)

Nos reatores nucleares ricos em urânio-238 é possível igualar as taxas de produção e perda de nêutron (PERUZZO, 2012). O urânio-238, ao receber um nêutron, não se torna físsil, e com o tempo, ele se transforma em plutônio-239. Os reatores são projetados para que a fissão do plutônio-239 aconteça de forma controlada, sendo que cerca de um terço da energia do combustível vem do plutônio (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021b). A Figura 6 mostra uma reação de fissão nuclear sustentável controlada que acontece nos reatores nucleares, o ambiente absorve os nêutrons, que em excesso, tornariam a reação incontrolável.

Figura 6 – Reação nuclear controlada para a geração



Fonte: Adaptado de ATOMIC ARCHIVE ([s.d.]

2.7 Reatores de fissão nuclear

Os reatores industriais utilizam pastilhas, ou *pellets*, de dióxido de urânio enriquecido. Essas pastilhas são sintetizadas em um forno a 1750 °C e, em seguida, são ajustadas e verificadas. O material, dentro dos padrões de 2 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro, é empilhado em tubos de zircaloy, uma liga metálica composta de zircônio e frações de estanho, ferro, cromo e níquel, que formam pequenas seções de choque que absorvem nêutrons. Esses tubos são agrupados em estruturas de 230 varetas posicionadas em uma estrutura metálica quadrangular. No meio da estrutura, colocam-se pastilhas de califórnio-98, esse elemento libera naturalmente nêutrons, o que dá início as reações de fissão (PERUZZO, 2012).

Em Angra 1, são usados 121 elementos de combustível de 28.435 varetas com 10.500.000 pastilhas empregando 411 kg de dióxido de urânio, e para Angra 2, 193 elementos de combustível com 45.548 varetas de 17.500.000 pastilhas, utilizando 543 kg de óxido de urânio. Uma pastilha contendo urânio-235 enriquecido a 3,5% produz a mesma quantidade de energia que 3 barris de petróleo, 1 tonelada de carvão ou 500 m³ de gás natural (PERUZZO, 2012).

Os reatores podem ser divididos em circuito primário e secundário (PERUZZO, 2012).

O circuito primário consiste em:

- Vaso do reator: local onde fica o combustível nuclear e onde ocorrem as reações.
- Combustível: urânio-235 ou plutônio-239, na forma de pastilhas.
- Moderador de nêutrons: tem a função de reduzir a energia dos nêutrons ao ponto de facilitar sua captura.

- Hastes ou barras de controle: são hastes feitas de boro e cádmio, que tem como finalidade controlar a quantidade de nêutrons no reator, controlando a reação e evitando acidentes.
- Refletor de nêutrons: compõem a parede ao redor do combustível e tem como finalidade impedir a fuga de nêutrons para o meio externo a reação.
- Fluido refrigerante: tem a função de resfriar o reator, mantendo a temperatura em níveis controlados e também atua como transmissor de energia térmica, retirando do reator e transferindo para o gerador de vapor.
- Gerador de calor: são trocadores de calor no qual o fluido refrigerante troca calor com a água, que por sua vez entra em ebulição e gira a turbina geradora de energia.
- Blindagem ou vaso de contenção: tem a função de absorver a radiação e os nêutrons que conseguem sair do vaso do reator. Essa estrutura é projetada para resistir a catástrofes como terremoto, inundações, explosão de bomba, etc.

O circuito secundário é composto por (PERUZZO, 2012):

- Turbina e gerador elétrico: tem a função de converter a energia mecânica em energia elétrica.
- Condensador: tem a função de resfriar a água logo após a passagem pela turbina. Utiliza água proveniente de um rio, mar ou pelas torres de resfriamento.

Durante a operação do reator e consumo de combustível deve-se fazer um reabastecimento das pastilhas para manter o equilíbrio entre as taxas de produção e perda de nêutron a fim de controlar a reação, de tal modo que não se precise remover todas as hastes controle. Isso é feito trocando um quarto ou um terço do combustível e substituindo por outro novo em intervalos de 12, 18 ou 24 meses (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021b). As barras retiradas são encaminhadas a uma usina de reaproveitamento onde o urânio não utilizado é reprocessado e inserido em novas pastilhas e os produtos da fissão são removidos, tratados e armazenados (PERUZZO, 2012).

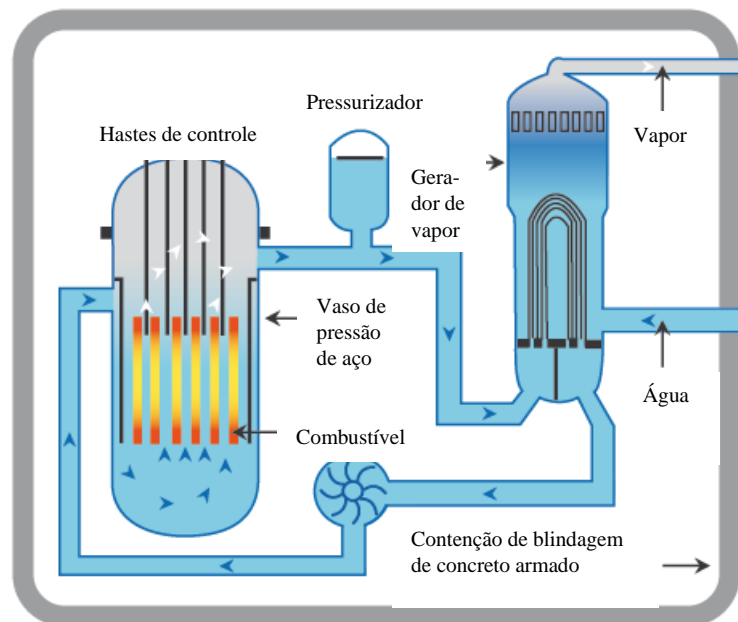
Existem diversos tipos de reatores nucleares. O reator mais utilizado no mundo é o Reator de Água Pressurizada (*Pressurised Water Reactor – PWR*) com mais de 300 unidades em funcionamento e a maioria em construção são desse modelo. Todos os reatores do Brasil são do modelo PWR.

Os PWR's utilizam água como refrigerante e como moderador da reação. Esses reatores utilizam dióxido de urânio levemente enriquecido na forma de pastilhas envoltos em varetas de zircaloy. Em um único reator, utiliza-se entre 200 e 300 varetas de combustível nuclear

colocadas de forma vertical no núcleo em conjuntos que variam de 150 a 250 e de 80 a 100 toneladas de urânio. A água de refrigeração não entra em ebulição, portanto fica condicionada a pressão 150 vezes maior que a da atmosfera, entrando no reator a uma temperatura de 290 °C e sai do meio reacional a 350 °C, seguindo para o gerador de vapor. Como a água também é o moderador da reação, caso ela entrasse em ebulição a taxa de fissão diminuiria e a reação não seria sustentável. Essa característica de modelo de reator faz com que exista um recurso de segurança adicional, além do desligamento secundário que consiste em adicionar boro ao circuito primário (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021b).

Nos PWR's, a água do circuito primário não entra em contato direto com a água do circuito secundário. Na Figura 7, apresenta-se um esquema simplificado do reator de água pressurizada. Nesses reatores o vaso de pressão do reator para uma usina de potência de 1000 MW, como Angra 2 e Angra 3, tem mais de 10 m de altura e mais de 450 toneladas. Além de ser necessária uma taxa de 1.200.000 litros de água por minuto entre o reator e o gerador de vapor (PERUZZO, 2012).

Figura 7 – Esquema ilustrativo de um reator de água pressurizada



Fonte: Adaptado de WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (2021b)

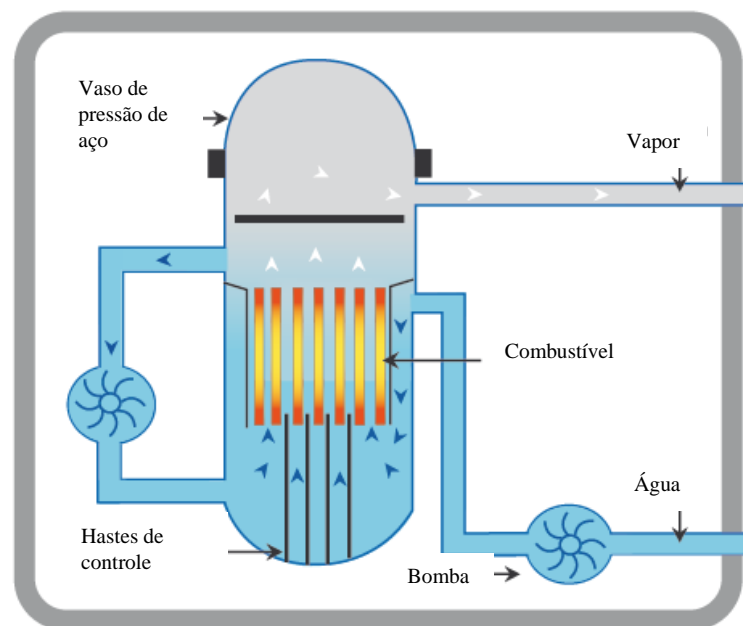
O segundo modelo de reator mais utilizado é o Reator de Água Fervente (*Boiling Water Reactor – BWR*). Nesse modelo, a água também atua como refrigerante e moderador do sistema reacional, semelhante ao PWR, porém há apenas um circuito com água a uma pressão de 75

vezes a da atmosfera e temperatura de ebulição a 285° C. Na Figura 8, é mostrado o esquema de um BWR, no qual as barras de controle ficam na parte inferior do reator.

Esses reatores operam de 12 a 15% com vapor de água na parte superior, diminuindo o efeito moderador da água e, conseqüentemente, aumentando a eficiência térmica. Após a geração de vapor, o mesmo passa por separadores de vapor acima do núcleo e são direcionados para as turbinas. As turbinas, nesse caso, são blindadas, o que aumenta os custos do reator e equilibra com o design simples. Nos BWR's utilizam-se de 90 a 100 barras de combustível com até 750 conjuntos no núcleo e 140 toneladas de urânio levemente enriquecido.

Nesses reatores, o sistema primário de segurança consiste em diminuir o fluxo de água no núcleo para que mais vapor na parte superior reduza a moderação e estagne a reação (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021b). No entanto, em caso de emergência, as barras controle dependem de energia para serem inseridas no núcleo gerando possíveis problemas, diferentemente dos PWR's, em que as barras caem por gravidade (PERUZZO, 2012).

Figura 8 – Reator de água fervente

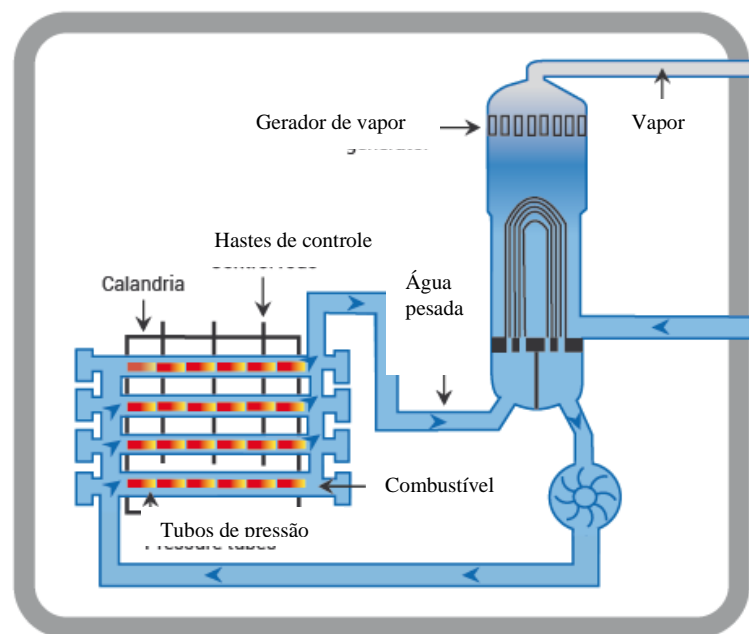


Fonte: Adaptado de WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (2021b)

Os reatores do modelo Reator de Água Pesada Pressurizada (*Pressurised Heavy Water Reactor* – PHWR), também conhecidos como Reatores Tipo Urânio-Deutério Canadense (*Canadian Deuterium Uranium* - CANDU), são operados principalmente no Canadá e Índia e utilizam urânio natural com cerca 0,7% de material físsil, sendo necessário aplicar como

moderador e refrigerante água deuterada para liberar mais nêutrons no meio reacional e aumentar a fissão. Na Figura 9 ilustra-se um reator CANDU convencional. O equipamento é constituído de uma calandria com centenas de hastes na horizontal, com pressão 100 vezes maior que a da atmosfera e temperatura de 290 °C, possibilitando que o reator seja abastecido durante a operação. Normalmente, os reatores CANDU têm 37 barras de combustível de 0,5 metros cada, com 12 feixes dispostos de ponta a ponta, além de hastes de controle na vertical em relação à calandria e um sistema de desligamento secundário de adição de gadolínio ao moderador (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021b).

Figura 9 – Reator CANDU



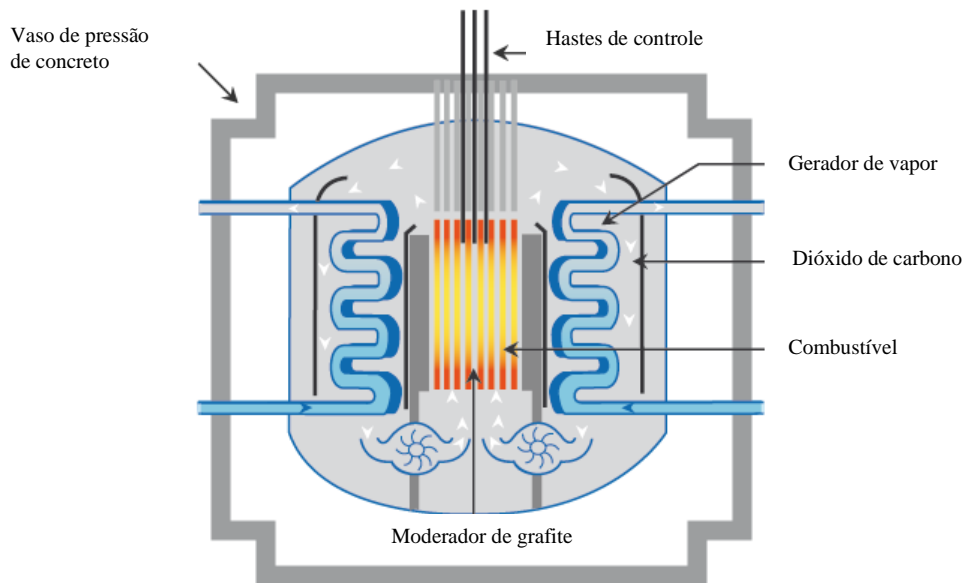
Fonte: Adaptado de WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (2021b)

Os novos modelos de PHWR permitem a utilização de urânio reciclado do reprocessamento de combustível dos reatores PWR's e BWR's, ou uma mistura com o urânio empobrecido das plantas de enriquecimento, assim como tório e plutônio (PERUZZO, 2012).

Os Reatores Refrigerados a Gás Avançado (*Advanced Gas-Cooled Reactor – AGR*) são reatores que utilizam grafite como moderador da reação e dióxido de carbono como refrigerante. Na Figura 10 é mostrado um modelo britânico do reator AGR. O combustível da reação são pelotas de óxido de urânio levemente enriquecido. O dióxido de carbono durante a reação circula a 650 °C entre os tubos de aço inoxidável que armazena o material físsil, o fluido refrigerante ainda dentro do vaso de pressão passa pelos trocadores de calor e depois retorna ao núcleo. As hastes de controle ficam na parte superior do reator e o desligamento secundário

consiste em despejar nitrogênio no meio reacional (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021b).

Figura 10 – Reator do modelo AGR



Fonte: Adaptado de WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (2021b)

O Reator de Alta Potência com Canais (*Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy* – RBMK), também conhecido como Reator Moderado de Grafite e Água Leve (*Light Water Graphite-Moderated Reactor* – LWGR) foi desenvolvido pela extinta União Soviética e é considerado o mais perigoso do mundo devido sua simples e barata construção e manutenção. Esses reatores não foram construídos fora da União Soviética e foram responsáveis pelo desastre em Chernobyl. São utilizados tubos verticais de 7 metros com urânio levemente enriquecido, utiliza-se moderador de grafite e como refrigerante água leve a 290 °C. Em um eventual excesso de ebulição no reator, a capacidade de resfriamento diminui sem inibir a absorção de nêutrons estimulando a reação de fissão (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021b).

Nos RBMK's não existe uma estrutura de contenção como nos demais, o reator fica alocado em uma cavidade de concreto e a parte superior é blindada por uma estrutura de aço. Um eventual aumento da pressão no reator, a tampa de aço pode ser deslocada pela pressão liberando gases e material radioativo como em Chernobyl. Além disso, esses reatores não funcionam de forma estável com potência inferior a 20%. Os RBMK's, diferentemente dos

outros, podem ser utilizados como produtores de plutônio, ou seja, a produção de plutônio para fins bélicos pode ser otimizada nesse modelo (PERUZZO, 2012).

Há ainda o Reator de Nêutrons Rápidos (*Fast Neutron Reactor – FNR*). Existem apenas 2 reatores FNR em desenvolvimento/operação na Rússia. Nesse modelo, utilizam-se nêutrons rápidos sem a necessidade de um moderador. O combustível utilizado é plutônio envolto de urânio-238 obtendo 60 vezes mais energia que em reatores convencionais. A construção desse modelo ainda é extremamente cara e não foi completamente desenvolvida. Os FNR também podem ser chamados de Reatores Reprodutores Rápidos (*Fast Breeder Reactors – FBR*) quando são utilizados para otimizar a produção de plutônio, gerando mais plutônio durante a reação do que consumindo (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021b).

Na Tabela 1, são apresentados os reatores nucleares em operação no mundo, sendo PWR's, BWR's e PHWR's responsáveis por 93,7% dos reatores produzindo energia. Os reatores AGR e RBMK são pouco utilizados ou estão em processo de desligamento no médio/longo prazo, já os FNR's estão em processo de desenvolvimento e devem entrarem em operação nas próximas décadas.

Tabela 1 – Reatores nucleares em operação no mundo

Tipo de reator	Quantidade	Combustível	Refrigerante	Moderador
Reator de água pressurizada (PWR)	304	UO ₂ enriquecido	Água	Água
Reator de água fervente (BWR)	62	UO ₂ enriquecido	Água	Água
Reator de água pesada pressurizada (PHWR)	49	UO ₂ enriquecido	Água pesada	Água pesada
Reator refrigerado a gás avançado (AGR)	14	U natural (metal), UO ₂ enriquecido	CO ₂	Grafite
Reator de grafite de água leve (LWGR)	12	UO ₂ enriquecido	Água	Grafite
Reator de nêutrons rápidos (FBR)	2	PuO ₂ e UO ₂	Sódio líquido	Nenhum

Fonte: Adaptado de WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (2021b)

Geralmente, nos reatores nucleares a potência térmica é 3 vezes maior que a potência elétrica instalada da usina. Com grandes investimentos em sistemas, estruturas, componentes e avanços tecnológicos, a vida útil de usinas nucleares passaram de 30 para 40 a 60 anos. Em alguns casos, as licenças de operação foram renovadas para 80 anos ou mais. Isso se deve à vida útil de cada equipamento de cada usina ser diferente e poder ser substituído por novos e mais tecnológicos, além da digitalização dos procedimentos e indicadores, que aumentou a segurança das operações e conseqüentemente a vida útil das usinas (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021b).

2.8 Destinação de material radioativo

Em um reator nuclear de potência, o combustível é usado até que a concentração de urânio-235 seja 1/4 da concentração inicial, isso acontece depois de 2 ou 3 anos de operação. O resultado do processo de fissão são isótopos radioativos com diferentes tempos de meia-vida, que variam de segundos até milhares de anos.

A maioria dos isótopos são solúveis em água e com o tempo se torna de média a baixa radioatividade. Depois que o lixo atômico é retirado do reator, ele é armazenado alguns meses ou anos em piscinas de refrigeração para diminuir a radioatividade. Após esse tempo, o lixo pode ser reprocessado para a extração de urânio e plutônio por meio de diluição ácida. A mistura reprocessada conhecida como MOX contém 25% de plutônio e 75% de urânio e pode ser utilizada novamente em usinas preparadas para ter a fissão desses materiais. Cerca de 33% do combustível nuclear é reprocessado em países como França, China, Rússia, entre outros (PERUZZO, 2012).

O combustível que não foi reprocessado por ser guardado para reprocessamento no futuro ou seguir para o armazenamento.

Assim armazenamento definitivo de urânio pode acontecer por duas formas: via úmida, utilizando água como refrigeração; ou via seca, utilizando ar como refrigerante. O armazenamento úmido consiste em deixar o lixo nuclear nas piscinas no próprio pátio de operação com contenções especiais de aço inoxidável e pré-requisitos de segurança. Depois de alguns anos, a radioatividade no material diminui e pode ser armazenado por via seca. A via seca utiliza ar refrigerante, metal e concreto como barreira de radiação ao invés de água. Esse processo é mais confiável e barato para o longo prazo.

No Brasil, o lixo nuclear originado em Angra dos Reis é guardado em recipientes adequados e depositado no fundo de piscinas dentro das próprias usinas. Lá o dejetos pode ficar por até 10 anos até seguir para locais de armazenagem. O armazenamento de substâncias radioativas é feito a partir do embalo dos recipientes com grossas paredes de concreto ou chumbo (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021d)

Em alguns países o armazenamento acontece em tambores metálicos, edifícios de concreto, poços concretados ou cascos metálicos de espessura e composição apropriados (PERUZZO, 2012). Em muitos países o armazenamento de lixo radiativo é feito de forma segura, mas de fácil acesso para que num futuro seja possível realizar o reaproveitamento do combustível ali armazenado.

2.9 Bibliometria

Devido ao grande crescimento da produção científica e da divulgação de seus resultados em escala global, principalmente no século XX e XXI, surgiu a necessidade de catalogar, analisar e avaliar os avanços científicos para mostrar para a sociedade os melhores métodos confiáveis descobertos, mapear os avanços nas diversas áreas do conhecimento e mensurar de forma qualitativa e quantitativa a relevância de cada produto científico (AMORIM, 2012). A análise bibliométrica veio exatamente para cumprir essas funções e gerar relações e classificações do conteúdo científico produzido.

A análise bibliométrica utiliza-se de diversas ferramentas para mensurar o estado da arte de determinado tema científico, tais como o fator de impacto de determinada pesquisa, H-index, número de citações, país e ano de origem, em quais revistas científicas o estudo foi publicado, alcance global da descoberta, entre outros fatores.

Uma das principais formas de se expressar os resultados da análise bibliométrica é através de *clusters*, essa ferramenta é um conjunto de itens incluídos em um mapa que relaciona palavras-chave e áreas principais de pesquisas. Nos *clusters* as diferentes cores indicam que aquelas palavras estão mais relacionadas e foram um *cluster*. O tamanho das representações gráficas e das letras que às acompanham quanto maior, mais aquele termo está vinculado ao termo de pesquisa principal.

2.10 Aspectos econômicos

Antes de se iniciar qualquer projeto, é fundamental que seja feita uma análise econômica para se determinar o custo de investimento, estimar as principais receitas e despesas e, assim, estipular o rendimento do empreendimento. O levantamento dessas informações ajuda na comparação do investimento e na tomada de decisão de utilização de recursos pelos administradores e acionistas.

O fluxo de caixa é a quantidade de dinheiro que entrou e saiu da empresa, seja na forma de financiamento, lucro, tributação, receita, custo operacional e de capital, depreciação, amortização, entre outras. De uma forma mais abrangente, a análise econômica utiliza duas técnicas bases para analisar a viabilidade do empreendimento. A análise de investimento consiste em analisar os processos baseado no fluxo de caixa, sendo essenciais estipular algumas variáveis como a taxa interna de retorno, valor presente e o tempo de retorno do capital. Já na análise de custos, todas as despesas são estimadas ao longo do tempo e o montante investido é repartido entre os custos. Com essas duas análises, é possível estimar de forma acertada a rentabilidade do investimento (VIEIRA, 2001).

A análise de investimento precisa que se tenha uma previsibilidade de todos os fluxos de entrada e de saída de capital ao longo da vida produtiva da instalação. Entre as principais medidas de análise de investimento, quatro se destacam como as mais importantes para se determinar os fluxos do sistema (VIEIRA, 2001):

- Tempo de retorno de capital, ou *payback*: é o tempo necessário para recuperar o valor gasto para a construção e funcionamento de projeto. Sendo assim, quanto menor for o tempo de retorno de capital, melhor o projeto é, com maior liquidez e menor risco. O *payback* simplificado não considera uma taxa de desconto nas entradas de capital futuro, já no descontado o dinheiro sofre com essa taxa de desconto para trazer a entrada de dinheiro para o valor presente. A Equação 1 apresenta como é calculado o *payback* descontado:
- Valor presente líquido (VPL): o VPL traz para valor presente os fluxos de entrada e saída do projeto ajustados por uma taxa de referência. Essa taxa de referência é a rentabilidade do dinheiro, caso ele fosse aplicado em outro projeto ou operação monetária. Para um empreendimento ser vantajoso, o VPL deve ser positivo e quanto maior, melhor o empreendimento.

- Taxa interna de retorno (TIR): definida como a taxa de desconto que torna o valor presente dos benefícios igual ao valor presente dos custos, ou seja, o VPL do projeto se torna nulo. Esse parâmetro é utilizado principalmente como tomada de decisão, pois a partir da TIR é possível comparar os custos de oportunidade de cada negócio.
- Rentabilidade: essa medida, apesar de simples, consegue transmitir informações importantes se um investimento é viável ou não. A rentabilidade mostra quanto de lucro líquido o investimento retorna, sendo calculada pela Equação 1 apresenta a fórmula de rentabilidade.

$$\text{Rentabilidade (\%)} = \frac{\text{Lucro líquido total}}{\text{Investimento total}} * 100 \quad (1)$$

Para realizar a análise de custos, algumas informações de fluxo de caixa precisam ser conhecidas, tais como (VIEIRA, 2001):

- Custo fixo total: é a soma dos diversos custos fixos requeridos pelo projeto, tais como seguro, impostos, depreciação, juros sobre capital empatado e mão de obra.
- Custos variáveis totais: é a soma de todos os custos que variam com o tempo, o que pode incluir mão de obra que realiza manutenção, limpeza, transporte, eletricidade, água, entre outros.
- Custo operacional: são as despesas relacionadas com insumos e depreciação do capital investido no empreendimento.
- Depreciação: ela demonstra a perda de valor do equipamento com o passar do tempo, até sua indisponibilidade para operar. Sendo necessário, depois de um tempo a substituição total do bem. Vale ressaltar que de acordo com a regra contábil do Brasil, o valor de depreciação dos bens pode ser colocado no fluxo de caixa como despesa com o intuito de diminuir a alíquota de imposto pago pelas empresas, entretanto ele não tem efeito caixa, sendo um valor que não sai realmente dos cofres das empresas.

2.11 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

A avaliação de ciclo de vida tem como objetivo estimar e estudar os possíveis impactos ambientais causados pela fabricação e utilização de determinado produto, serviço ou processo industrial. A ACV descreve quais matérias-primas são utilizadas em um determinado processo ou produto, as emissões geradas ao longo da vida útil de cada sistema, quais são os impactos ambientais gerados por aquela atividade, ou seja, todas as etapas da vida de determinado

produto da extração até a reciclagem e/ou reuso. Com esses dados é possível propor melhorias nos processos, diminuir a quantidade de matéria-prima utilizada, a quantidade de poluentes gerados e ter um panorama dos gargalos de produção. A Figura 11 traz todos os processos avaliados durante uma avaliação de ciclo de vida, desde a extração do recurso natural até o fim da sua vida útil.

Figura 11 – Etapas do ciclo de vida de um produto



Fonte: Adaptado de IBICT (2014)

Apesar disso, alguns fatores dificultam a aplicação da ACV, tais como a complexidade para se encontrar e analisar os dados, a credibilidade dos dados levantados, ser específica de produto e região e a segurança dos dados e análise.

Pelo fato de a ACV apresentar uma dinâmica iterativa entre os processos para coleta e análise de dados, algumas fases explicitadas abaixo podem sofrer modificações ao longo do estudo de ciclo de vida. As principais fases da ACV são (VALT, 2004):

- Definição de objetivo e escopo: nessa primeira etapa, são discutidas as principais razões de fazer a avaliação do ciclo de vida e o público-alvo. São definidos o sistema de estudo, as fronteiras e a unidade funcional selecionada como base.
- Análise de inventário: nessa etapa são realizadas as coletas e quantificações de todas as variáveis possíveis envolvidas durante o ciclo de vida do objeto. Os dados coletados são ajustados para se adequarem à unidade funcional escolhida, os dados também são

organizados e observados minuciosamente, pois essa é a etapa mais crítica do estudo por estar relacionada com a confiabilidade.

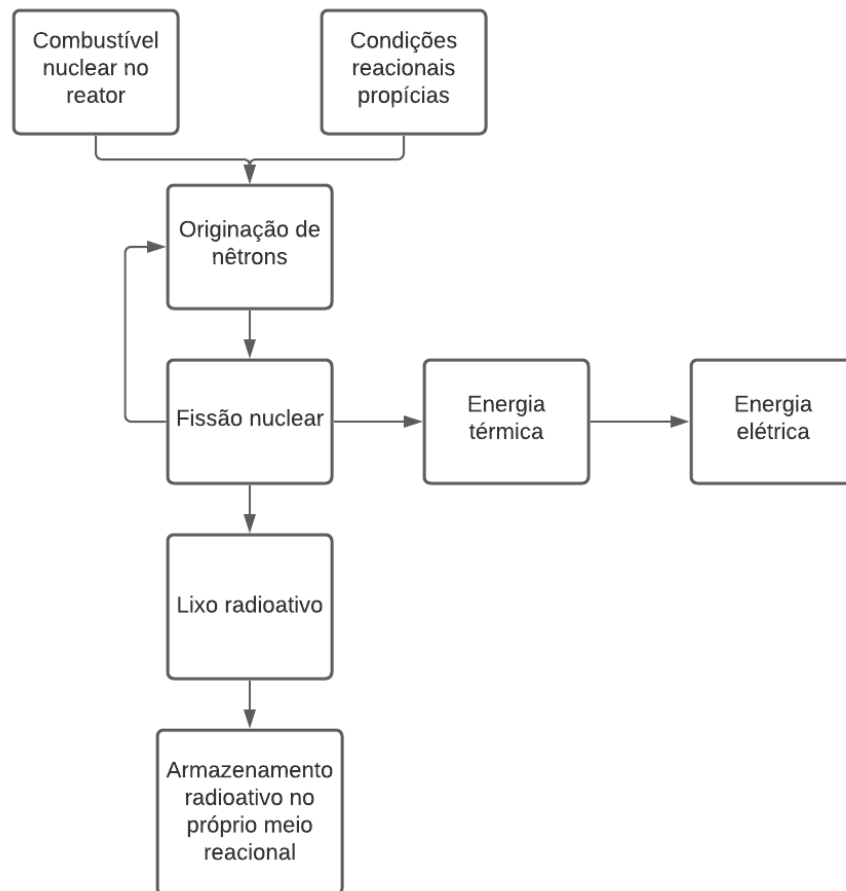
- Avaliação dos impactos: esse procedimento consiste em agrupar os dados em categorias de impactos e determinar a intensidade com que o processo/produto afeta o meio ambiente em cada categoria, ou seja, é analisado o impacto ambiental gerado pelas emissões, a quantidade de matéria-prima utilizada, entre outros fatores.
- Interpretação: por fim, os resultados obtidos a partir da análise de inventário e avaliação de impacto são estudados e analisados com base no objetivo e escopo escolhidos.

As conclusões geradas pelas quatro fases principais da avaliação do ciclo de vida possibilitam que os gargalos e desperdícios sejam encontrados, identifica os pontos críticos do ciclo de vida, do abertura para implementar estratégias de produção inovadoras e diferentes, e auxiliam na escolha de processos e sistemas que visam a preservação ambiental (VALT, 2004).

Uma avaliação do ciclo de vida das três fontes de energia limpas (eólica, hidrelétrica e nuclear) da matriz chinesa mostrou que os parques eólicos têm o maior potencial de aquecimento global, gerando $28,6 \pm 3,2$ g de CO₂ para cada kWh gerado ao longo do seu ciclo de vida. Em comparação, as fontes nucleares apresentaram emissão de $12,4 \pm 1,5$ g de CO₂ para cada kWh gerado ao longo da sua vida útil. O estudo avaliou os impactos de todo ciclo de vida, incluindo as fases de fabricação, construção, operação e descomissionamento. A fase de descomissionamento da usina foi a fase que mais contribuiu para a emissão de gases poluentes, sendo assim, a operação das usinas não gera poluentes, porém as outras fases emitem gases estufa (WANG et al., 2019).

A Figura 12 traz um processo simplificado da geração de energia nuclear e as principais etapas da produção. Com as condições propícias no reator juntamente com o combustível nuclear origina-se nêutrons no meio reacional, essa etapa estimula a fissão nuclear que libera energia térmica e posteriormente essa energia é convertida em elétrica. A fissão nuclear também origina mais nêutrons sustentando a reação em cadeia, e origina produtos radioativos que são depositados no fundo do leito reacional.

Figura 12 – Processo simplificado da geração de energia nuclear



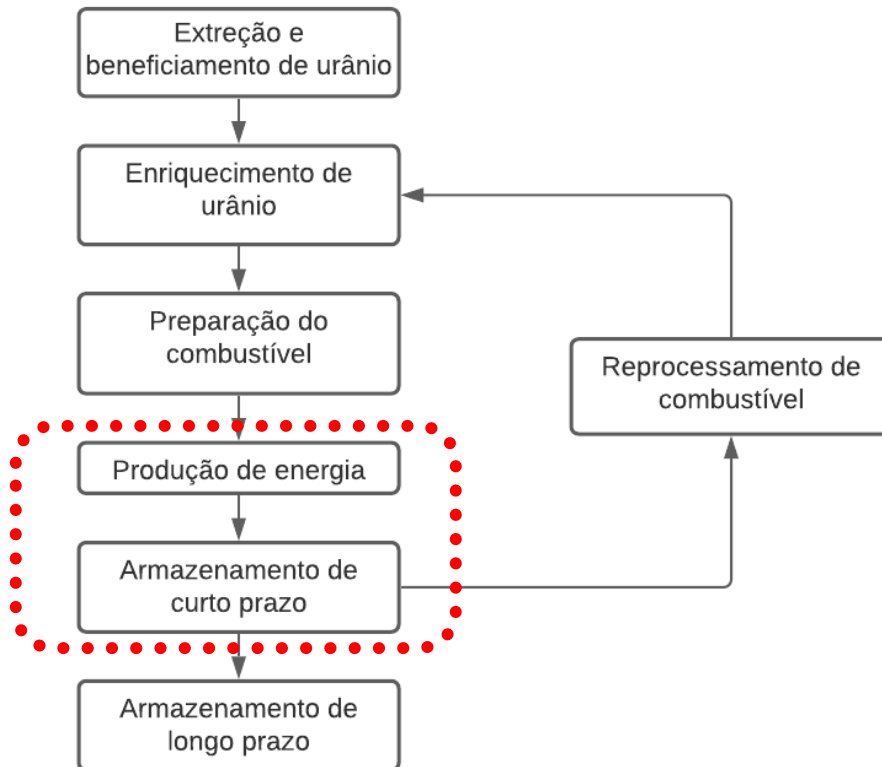
Fonte: Do autor (2021)

Uma avaliação do ciclo de vida de fontes que constituem a matriz elétrica do Canadá foi realizada e a energia nuclear se mostrou a fonte com menor impacto no potencial de aquecimento global, liberando apenas 3,402 g de CO₂ para cada kWh gerados, enquanto as hidrelétricas liberaram 15,20 g de CO₂ para cada kWh e os parques eólicos 12,05 g de CO₂ para cada kWh. Assim como no estudo relativo, a liberação de carbono pelas usinas nucleares causou maior impacto ambiental no descomissionamento das usinas. Os impactos ambientais avaliados foram potencial de aquecimento global, de acidificação, de eutrofização, de criação fotoquímica e toxicidade humana (SIDDIQUI; DINCER, 2017).

O México tem uma matriz elétrica majoritariamente a base de combustíveis fósseis (79,0%), as fontes renováveis geram 16,5% e a nuclear 4,8%. Uma avaliação de ciclo de vida mostrou que as fontes renováveis e as usinas nucleares foram responsáveis por apenas 1,1% da quantidade de CO₂ liberado na matriz elétrica. Além disso, o estudo comparou com diversos países como Itália, Portugal e Reino Unido, tendo uma boa concordância com os dados, Mostrando que a energia nuclear é uma fonte limpa e duradoura de produção de energia

(SANTOYO-CASTELAZO; GUJBA; AZAPAGIC, 2011). A Figura 13 apresenta o ciclo de vida da energia nuclear desde a extração do combustível nuclear até o armazenamento de curto prazo.

Figura 13 – Ciclo de vida da energia elétrica produzida em usina nuclear com destaque para o limite considerado limpo



Fonte: Do autor (2021)

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar aspectos técnicos, econômicos e ambientais do uso de energia nuclear no Brasil além de uma análise bibliométrica de termos relacionados a energia nuclear. Conforme descrito detalhadamente a seguir, a primeira etapa cumprida consistiu em uma análise da literatura publicada sobre a energia nuclear, com ênfase nas contribuições da Engenharia Química. Em seguida, fez-se uma análise econômica da construção de usinas nucleares, de modo a complementar a produção de energia elétrica para atender a demanda nacional de 2050 estimada pelo Ministério de Minas e Energia (2020). Por fim, os pontos críticos de impacto ambiental na produção de energia nuclear foram identificados através de uma avaliação do ciclo de vida.

3.1 Análise bibliométrica

A fim de executar uma análise bibliométrica, construiu-se um banco de dados com documentos coletados através de pesquisa dos termos de interesse ao campo na plataforma de busca Scopus (Elsevier). Os campos de busca selecionados para todas as palavras foram: título, resumo e palavra-chave.

Então foram utilizadas medidas como o número de publicações e citações por ano ou por constituinte de pesquisa (área de pesquisa, país etc) para efetuar uma análise descritiva do material bibliográfico com auxílio do *software* Excel. Após essa exploração, foi verificada lista dos trabalhos em ordem decrescente de classificação de relevância da base Scopus (número de ocorrências, seções do documento, posição do termo no documento entre outros).

Em seguida, o mapeamento do estado da arte foi feito pelo exame do conteúdo das publicações mediante análise de coocorrência de palavras-chave e a construção de mapas bibliométricos que possibilitam a visualização de redes, as quais permitem identificar e avaliar as relações existentes entre termos (DONTHU et al., 2021). Para isso, foi utilizado o VOSviewer, importando-se as publicações coletadas na base para avaliar as palavras-chave propostas pelos autores e, na sua ausência, palavras notáveis extraídas dos títulos de artigos, resumos e textos completos (DONTHU et al., 2021). Construíram-se então mapas com visualização de rede e visualização de sobreposição (*overlay visualization*), na qual os itens são coloridos de acordo com a data de publicação, permitindo identificar as tendências de pesquisa em cada campo.

Inicialmente, pesquisaram-se os termos “*nuclear energy*”, “*nuclear reactors*” e “*pressurized water reactor*”. Junto ao termo “*nuclear energy*”, outros termos foram adicionados

com base nas tendências identificadas a fim de refinar a pesquisa, são eles: “*desalination*”, “*life cycle analysis*” e “*economic assessment*”. Para o termo “*nuclear reactor*”, outros termos de tendência também foram incorporados, são eles: “*fluidization*”, “*steam reforming*” e “*small nuclear reactors*”.

3.2 Estimativas econômicas

A fim de realizar uma avaliação das vantagens econômicas da produção de energia nuclear para o Brasil, formulou-se um estudo de caso no qual devem ser construídas plantas nucleares para complementar a produção de energia elétrica no Brasil, a fim de atender a demanda projetada pelo Ministério de Minas e Energia para 2050, sendo 10% da demanda atendida por energia nuclear. Portanto, para proceder a avaliação, executou-se um levantamento dos custos envolvidos, para posterior cálculo de medidas de lucratividade.

3.2.1 Estimativa de custo de capital e operacional

A quantidade de energia a ser produzida foi estimada de modo a suprir a demanda nacional em 2050. Segundo Ministério de Minas e Energia, a demanda energética aumenta a uma taxa de 3,5% anualmente. Em 2015, a geração foi de 581.652 GWh de eletricidade, portanto em 2050 deve-se produzir 1.938.990 GWh de energia (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020).

Para complementar a produção, a fim de suprir essa demanda, considerou-se a construção de reatores com a mesma tecnologia alemã de Angra 2 e Angra 3, ambos com potência instalada de 1.400 MW do modelo PWR, seguindo a ilustração da Figura 11 abaixo.

Na Figura 14 os elementos 1,2 ,3 e 4 - são turbinas e geradores, 5 - reator, 6 - piscina de combustível utilizado, 7 - barreira de contenção de aço, 8 - barreira de contenção de concreto, 9 - sala de controle e 10 - administração.

Figura 14 – Esquema dos reatores nucleares a serem construídos



Fonte: Adaptado de ROSSI (2019)

Com os dados históricos (2003 – 2020) de produção de energia das usinas de Angra 1 e Angra 2, determinou-se que a média anual de geração de eletricidade destas usinas foi 14.283 GWh em uma potência instalada de 1.990 MW. Logo, em 2050 seria necessário a produção de 193.899 GWh de eletricidade para que as usinas nucleares contribuíssem com 10% da matriz elétrica brasileira e, portanto, uma potência instalada de 27.015,3 MW. Este valor foi calculado fazendo uma análise proporcional entre o valor de geração de Angra 1 e 2 (14.283 GWh), o valor de potência instalada destas duas usinas (1.990 MW) e o valor de produção de energia em 2050 (193.899 GWh).

Considerando que a retomada da construção da terceira usina brasileira (Angra 3) está prevista para 2022, ela foi incluída no cenário estudado. Então o número de reatores a serem construídos foi determinado de modo a complementar a produção dos reatores Angra 1, 2 e 3 em 2050, os quais devem somar uma potência total instalada de 3.395 MW. Assumindo que cada reator PWR a ser construído tem potência individual de 1.400 MW, para alcançar a potência instalada complementar de 23.620,3 MW, deveriam ser construídos 17 novos reatores nucleares. Estes 17 novos reatores em 2050 produziram 169.531,8 GWh de eletricidade.

Usualmente, os reatores nucleares são alocados em centrais nucleares que variam de 1 até 7 reatores. A distribuição destas centrais no território brasileiro foi pensada considerando que a localização deve atender a cinco critérios básicos: suprimento de água de refrigeração, população, ameaças sobre *habitats* de espécies importantes, áreas alagadas e movimentos vibratórios do solo. Assim, os locais apropriados para a construção de centrais nucleares identificados neste trabalho foram: Rio de Janeiro, Espírito Santo, Pernambuco e Minas Gerais, considerando-se também as malhas de transmissão já construídas nos locais e que a produção de energia nuclear requer áreas pequenas de construção. Assim, neste estudo, considerou-se que os reatores seriam distribuídos em 4 centrais de 5 reatores cada, sendo que 2 novos reatores seriam construídos no Rio de Janeiro na central nuclear já existente em Angra dos Reis. E em Minas Gerais, Pernambuco e Espírito Santo seriam construídas uma central nuclear em cada estado e cada central deteria 5 reatores.

Para estimar o custo de capital (CAPEX, do inglês *capital expenditure*), neste trabalho utilizou-se o dado fornecido no relatório de Custos Projetados de Geração de Eletricidade das Agência Internacional de Energia e Agência Nuclear de Energia em que são apresentados os custos para 2018 (CEPCI = 603,1), sendo a média de custo de capital de vários países do mundo, US\$ 3.606,00 para cada kW de potência elétrica instalada (IEA; NEA, 2020). Este valor foi então ajustado para o ano de 2020 (CEPCI = 596,2) a partir do CEPCI e da Equação (2).

$$C_{p,2020} = C_{p,2018} \left(\frac{CEPCI_{2020}}{CEPCI_{2018}} \right) \quad (2)$$

O Índice de Custo de Planta de Engenharia Química (*Chemical Engineering Plant Cost Index* – CEPCI) foi utilizado para reajustar o valor da construção do reator nuclear do ano de 2018 para o ano de 2020.

A conversão da moeda foi fixada no valor médio dos últimos 5 anos, US\$ 1 = R\$ 4,1065 (AASP, 2021) . Logo o custo de capital de cada reator foi de R\$ 20.494.070.622,65 em 2020.

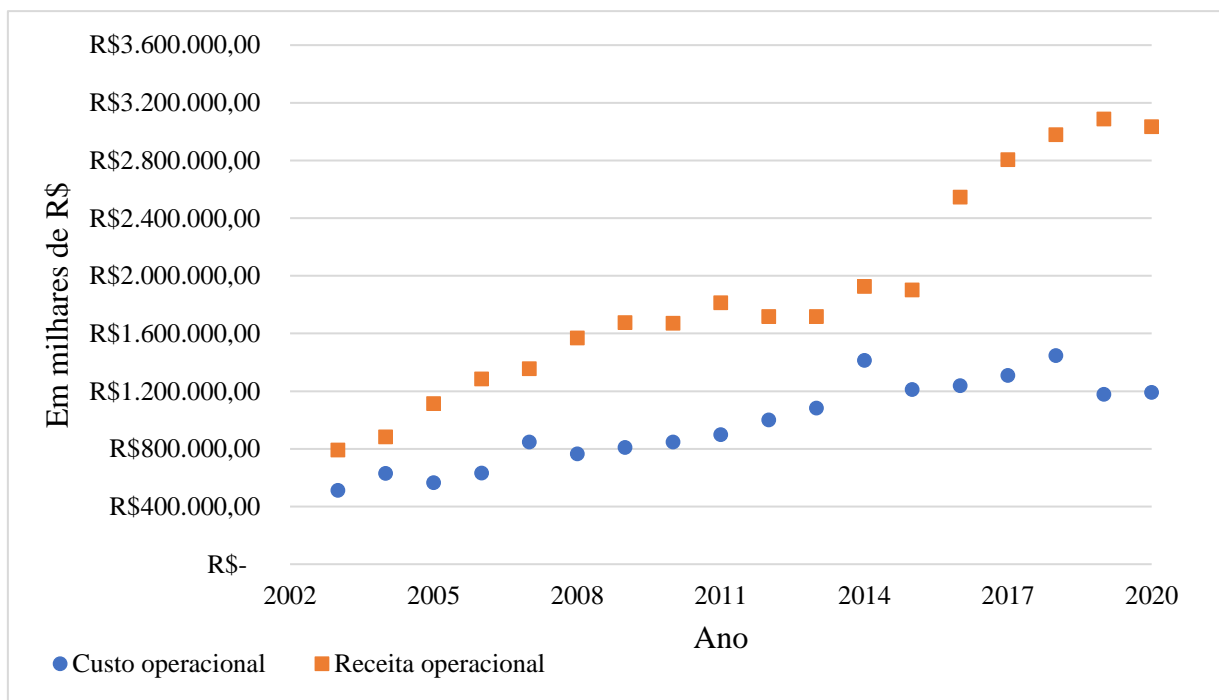
Para projeção do fluxo de caixa, considerou-se que a obra do primeiro reator seria iniciada em 2022 e que seriam gastos 7 anos para a construção (IEA; NEA, 2020). Portanto o início das operações ocorreria em 2029. Assumiu-se que o custo de capital de cada reator seria desembolsado no início das obras correspondentes a ele. Considerando a vida útil de cada reator em 40 anos, o descomissionamento do primeiro ocorreria em 2069.

Assim o fluxo de caixa foi projetado de 2022 até 2084, assumindo que a cada ano um reator entraria em operação. Para o início da obra de cada reator, o valor do CAPEX foi atualizado considerando a taxa de inflação média do Brasil nos últimos 20 anos, 5,91%, de

acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística de 2000 até 2020. Assumiu-se ainda que não haveria valor residual da etapa de descomissionamento.

Então procedeu-se o cálculo do OPEX (do inglês, *operational expenditure*). Os custos e as receitas operacionais foram calculados com base nos dados das Demonstrações dos Resultados dos Exercícios de 2003 até 2020 da Eletronuclear, detentora dos ativos Angra 1 e Angra 2, os quais são apresentados na Figura 15, respectivamente. Os custos operacionais contábeis nas demonstrações financeiras eram divididos em pessoal, material, matéria-prima – consumo de combustível nuclear, serviços de terceiros, depreciação e amortização, quotas de descomissionamento e outros custos (ELETRONUCLEAR, 2020). Com os dados anuais dos custos operacionais contábeis, subtraíram-se os valores de depreciação e amortização de Angra 1 e Angra 2 em todos os anos, encontrando os valores de custos operacionais reais do processo.

Figura 15 – Série histórica da receita e do custo operacional de 2003 até 2020 da Eletronuclear



Fonte: Do autor (2021)

Em 2020, o OPEX para Angra 1 e 2 foi de R\$ 1.193.041.000,00 e a receita de R\$ 3.035.846.000,00 para uma potência instalada de 1990 MW. Logo para cada reator, em 2020, a receita e o OPEX seriam R\$ 839.325.330,00 e R\$ 2.135.771.060,00, respectivamente. Então para atualizar os valores calculou-se, com base nos dados históricos da Eletronuclear, uma taxa de 6,00% de ajuste para os custos e de 8,65% para a receita. Assim para o primeiro reator de

1.400 MW operando em 2029 assumiu-se uma receita de R\$ 4.505.541.140,00 e custo operacional de R\$ 1.418.051.740,00. A receita e o custo do primeiro reator em 2029 foram calculados da seguinte forma, primeiro foi encontrado o valor de receita e custo do reator de 1.400 MW em 2020 fazendo uma análise de proporcionalidade entre a receita e custo da potência instalada de 1.990 MW. Encontrando o valor de receita de R\$ 2.135.771.060,00 e custo de R\$ 839.325.330,00, depois esses valores foram calculados para o ano de 2029, quando o primeiro reator entraria em operação, utilizando uma taxa de crescimento anual de receita de 8,65% e de custo de 6,00%.

Foram utilizadas as seguintes taxas para ajuste anual dos valores. Para o CAPEX desembolsado no início de cada obra o valor foi reajustado pela inflação média do Brasil nos últimos 20 anos no valor de 5,91% ao ano. Para o ajuste da receita operacional foi utilizado a taxa de 8,65% ao ano, calculada com base nos dados da Eletronuclear. Para o ajuste do custo operacional foi utilizada a taxa de 6,00% ao ano, calculada com base nos dados da Eletronuclear.

Despesas gerais e administrativas, provisões para contingência, reversão de contingência e outras foram denominadas despesas operacionais. Para estimar seu valor, dividiu-se o valor destes itens pela receita líquida de operação do período a fim de determinar a porcentagem da receita gasta. Assim determinou-se que as despesas operacionais consomem, em média, 9,11% da receita operacional líquida do período.

A depreciação, descontada do lucro bruto a partir do início das operações, foi calculada usando o Método linear. Para isso, considerou-se que o tempo de depreciação dos ativos ocorreria por 10 anos após o início das operações com uma taxa de depreciação anual de 10% (RECEITA FEDERAL, 2017). Para o primeiro reator com operação em 2029, o valor de depreciação foi calculado com base no CAPEX de 2022 e os valores de depreciação foram contabilmente cobrados a partir de 2029 até 2038. Utilizou-se a Equação (3) para o cálculo da depreciação linear.

$$D = \frac{CT}{T} \quad (3)$$

em que: D = depreciação dos ativos em R\$/ano; CT = custo total (custo de capital) dos ativos em R\$ e T = período de depreciação em ano.

Assumiu-se que o regime tributário seria de Lucro Real, a alíquota de Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ) utilizado foi de 25% e a Contribuição Social Sobre Lucro Líquido

(CSLL) de 9%, ambos sobre o sobre o lucro tributável. Para o lucro tributável foi empregado a Equação (4).

$$LT = RO - CO - DO - D \quad (4)$$

em que: LT = lucro tributável em R\$; RO = receita líquida operacional em R\$; CO = custos operacionais em R\$; DO = despesas operacionais em R\$ e D = depreciação dos ativos em R\$.

Para encontrar o lucro líquido foi utilizado a Equação (5).

$$LL = RO - CO - DO - D - CT \quad (5)$$

em que: LL = lucro líquido em R\$; RO = receita líquida operacional em R\$; CO = custos operacionais em R\$; DO = despesas operacionais em R\$; D = depreciação dos ativos em R\$ e T = tributação em R\$.

Por fim, para calcular o fluxo de caixa que entra no empreendimento, utilizou-se a Equação (6) para ver o fluxo de entrada no caixa ao longo dos anos.

$$FCL = LL + D \quad (6)$$

em que: FCL = fluxo de caixa livre em R\$; LL = lucro líquido em R\$ e D = depreciação dos ativos.

A Tabela 2 um resumo das principais considerações feitas neste trabalho para a estimativa de custo de capital e operacional.

Tabela 2 – Resumo das considerações feitas para estimativas de custos

Explicação	Consideração
Energia nuclear da matriz elétrica em 2050	10%
Aumento anual de geração de eletricidade 2015 - 2050	3,5%
Média anual de geração dos reatores Angra 1 e 2 de 1.900 MW	14.283 GWh
Potência em 2050 de Angra 1, 2 e 3	3.395 MW
Potência complementar a ser instalada	23.620,3 MW
Número de reatores nucleares a serem construídos	17 reatores com potência de 1.400 MW
Custo da instalação por kW de potência elétrica nuclear em 2018	US\$ 3.606,00

Continua

Explicação	Consideração
CEPCI 2018 / CEPCI 2020	603,1 / 596,2
Conversão fixa do dólar	US\$ 1 = R\$ 4,1065
Taxa de inflação utilizada para reajustar o valor dos reatores com o passar dos anos	5,91%
Taxa de crescimento anual de receita operacional	8,65%
Taxa de crescimento anual de OPEX	6,00%
Receita / OPEX do primeiro reator em funcionamento em 2020	R\$ 4.505.541.140,00 / R\$ 1.418.051.740,00
Porcentagem da receita operacional gasta com despesas gerais e administrativas	9,11%
Depreciação	10% ao ano por 10 anos
Tributação	25% de IRPF e 9% de CSLL
Lucro líquido	LL=RO-CO-DO-D-T
Fluxo de caixa	FCL=LL+D

Fonte: Do autor (2021)

3.2.2 Medidas de lucratividade

De posse do fluxo de caixa projetado, as medidas de lucratividade calculadas foram Valor Presente Líquido, Equação (8), com uma taxa mínima de atratividade de 10%, Taxa de Retorno Interno, Equação (9), *Payback* descontado, Equação (7) e lucratividade/margem líquida.

$$Payback = \frac{Investimento\ total}{Ganhos\ do\ periodo} \quad (7)$$

$$VPL = \sum_{n=0}^{n=N} \frac{Fc_n}{(1+i)^n} \quad (8)$$

em que:

VPL = valor presente líquido

Fc = fluxo de caixa

i = taxa mínima de atratividade

n = período de tempo

$$0 = \frac{Fc_1}{(1 + TIR)} + \frac{Fc_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{Fc_n}{(1 + TIR)^n} - I \quad (9)$$

em que:

Fc = fluxo de caixa

I = investimento inicial

n = o ano no horizonte de planejamento

3.3 Estimativas do Ciclo de Vida

A fim de avaliar aspectos ambientais envolvidos na produção da energia elétrica nas centrais nucleares e comparar os impactos com a produção em hidrelétricas e usinas eólicas, procedeu-se a execução de uma Avaliação de Ciclo de Vida da produção de energia elétrica com auxílio do *software* OpenLCA. A abordagem atribucional foi escolhida em virtude do objetivo desse estudo ser apenas identificar as principais fontes de poluição sem investigar consequências de alterações no sistema do produto.

O público-alvo dessa avaliação de ciclo de vida é a sociedade em geral e principalmente os representantes dos órgãos públicos para auxiliar no processo de tomada de decisão. A função do sistema foi gerar energia de alta voltagem para alimentar o Sistema Interligado Nacional e contratantes diretos, essa função foi aplicada para as energias nuclear, hidrelétrica e eólica. Para a energia nuclear a função do sistema também englobou o armazenamento de curto prazo do lixo radioativo.

Devido à complexidade de cada etapa do processo de produção de energia nuclear, a falta de dados confiáveis em relação à extração, beneficiamento e enriquecimento de urânio, e de armazenamento de lixo radioativo, o limite estudado nesse trabalho foi portão a portão do processo de produção de energia nuclear, originação e armazenamento de dejetos radioativos nas próprias piscinas dos reatores (armazenamento de curto prazo). O limite do sistema de produto tracejado de vermelho pode ser observado na Figura 12.

Para construção do inventário deste estudo, dados secundários, isto é, consultados em artigos científicos e documentos acadêmicos, foram coletados sobre a produção de eletricidade de alta tensão em um reator de água de pressão nuclear (PWR) conectado à rede na Alemanha em 2012. Assumiu-se que todos os equipamentos para reatores nucleares têm origem alemã, pois os reatores em operação no Brasil, e considerados nesse estudo, são reatores nucleares com tecnologia alemã. Logo, os consumos e as emissões dos equipamentos são baseados em reatores

alemães. Assim, utilizou-se o banco de dados da Ecoinvent: “*Ecoinvent 3.7.1 cutoff Unit Regionalized*”, no tópico “*Electricity Production, Nuclear, Pressurized Water Reactor/Electricity, High Voltage/Cutoff, U - DE*”, com licença concedida gratuitamente pela instituição, para estudantes e pesquisadores de instituições de ensino de países em desenvolvimento. No processo foi escolhida a opção “DE” que são parâmetros da Alemanha.

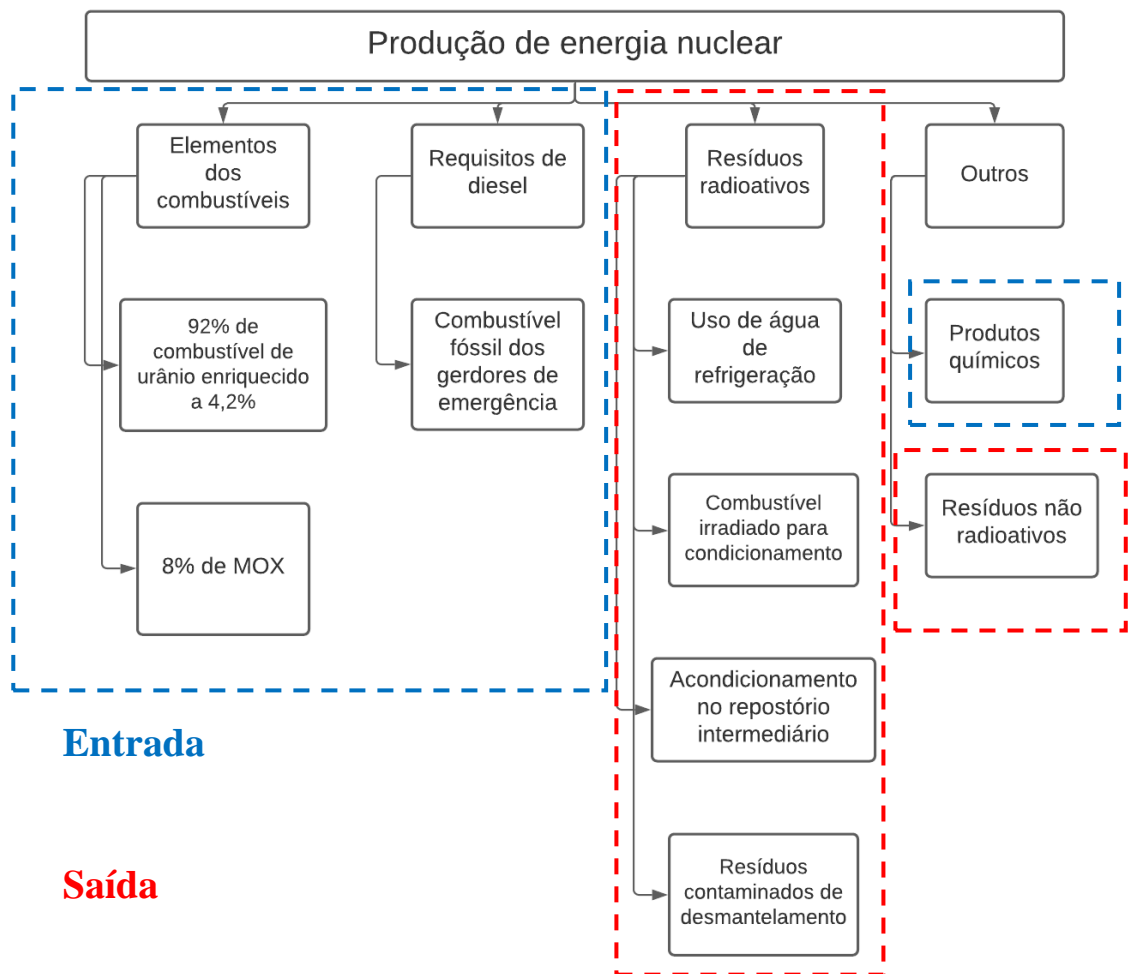
Na Figura 13, apresenta-se de forma sucinta como é o processo de produção de energia nuclear.

Os dados foram considerados assumindo uma vida útil de 40 anos por reator. Incluíram-se elementos dos combustíveis, produtos químicos e requisitos de diesel, bem como os requisitos de transporte relevantes. O uso de água para resfriamento foi incluído, mas nenhuma infraestrutura de torre de resfriamento. Os fluxos de resíduos radioativos considerados foram: combustível irradiado para condicionamento (sem reprocessamento); baixo desperdício operacional para acondicionamento no repositório intermediário; e, resíduos contaminados de desmantelamento. Resíduos não radioativos foram contabilizados. Estes fatores estão esquematizados na Figura 16.

Assim, quanto aos combustíveis, considerou-se a queima média correspondente a um enriquecimento médio de 4,2% urânio-235 para elementos combustíveis de urânio fresco. Ao longo da vida útil da planta, presumiu-se que 8% da energia foi produzida por elementos de combustível reprocessados contendo urânio e plutônio, denominado MOX. Do total de elementos de combustível, 92% assumidos como sendo de urânio fresco.

Os requisitos de diesel para o teste anual de geradores de emergência a diesel foram levados em consideração. A emissão alfa para a atmosfera foi descrita como “aerossóis, não especificados”. Os fluxos de rejeitos radioativos considerados foram: combustível irradiado para reprocessamento (40%) e acondicionamento (60%); baixo desperdício operacional para acondicionamento no repositório intermediário; e, resíduos contaminados de desmantelamento.

Figura 16 – Etapas envolvidas na produção de energia nuclear que estão inseridas no limite do sistema



Fonte: Do autor (2021)

Empregou-se a unidade funcional de 1 MWh de energia elétrica como produto de saída principal em todas as avaliações. A unidade funcional cumpre a função definida para o sistema de gerar eletricidade. O fluxo de referência utilizado para os reatores nucleares foi de $3,22 \cdot 10^{-9}$ reatores nucleares para a produção da unidade funcional de 1 MWh. Dentro do limite estabelecido, o inventário foi constituído dos fluxos de entrada e saída descritos na Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente. Todos foram retirados do banco de dados *Ecoinvent* e referenciados para a produção de 1 MWh de eletricidade de alta tensão.

Tabela 3 – Entradas dos produtos utilizados no *OpenLCA*

Entrada	Unidade	Valor
Acetileno	Kg	$3,78 \cdot 10^{-5}$
Resina aniônica	Kg	$6,75 \cdot 10^{-5}$
Líquido de argônio	Kg	$2,74 \cdot 10^{-2}$
Pó anidro de ácido bórico	Kg	$6,74 \cdot 10^{-5}$
Dióxido de carbono líquido	Kg	$1,75 \cdot 10^{-4}$
Ferro fundido	Kg	$1,35 \cdot 10^{-4}$
Resina catiônica	Kg	$6,75 \cdot 10^{-5}$
Cimento Portland	Kg	$9,64 \cdot 10^{-4}$
Cimento não especificado	Kg	$1,00 \cdot 10^{-3}$
Químico inorgânico	Kg	$2,45 \cdot 10^{-3}$
Químico orgânico	Kg	$1,45 \cdot 10^{-3}$
Concreto normal	m ³	$1,02 \cdot 10^{-5}$
Diesel dos geradores elétrico	MJ	$3,88 \cdot 10^{-1}$
Vidro plano revestido	Kg	$4,59 \cdot 10^{-3}$
Líquido de hidrogênio	Kg	$1,08 \cdot 10^{-2}$
Óleo lubrificante	Kg	$1,70 \cdot 10^{-3}$
Nitrogênio líquido	Kg	$6,48 \cdot 10^{-2}$
Combustão 4,2% U-235 e MOX	Kg	$2,53 \cdot 10^{-3}$
Usina de energia nuclear PWR	Item	$3,22 \cdot 10^{-9}$
Oxigênio líquido	Kg	$1,75 \cdot 10^{-2}$
Papel <i>woodfree</i> revestido	Kg	$6,75 \cdot 10^{-4}$
Aço reforçado	Kg	$4,90 \cdot 10^{-4}$
Hipoclorito de sódio a 15%	Kg	$1,81 \cdot 10^{-2}$
Aço de baixa liga	Kg	$1,70 \cdot 10^{-3}$
Água de resfriamento	m ³	$7,37 \cdot 10^1$
Água descarbonizada	Kg	$2,83 \cdot 10^3$

Fonte: Do autor (2021)

Tabela 4 – Saídas dos produtos utilizados no *OpenLCA*

Saídas	Unidade	Valor
Antimônio-124	KBq	$3,85.10^{-3}$
Antimônio-125	KBq	$5,62.10^{-4}$
Argon-41	KBq	$3,72.10^1$
Césio-134	KBq	$4,51.10^{-4}$
Césio-137	KBq	$1,76.10^{-3}$
Chromium-51	KBq	$9,18.10^{-4}$
Cobalto-58	KBq	$8,51.10^{-4}$
Cobalto-60	KBq	$5,04.10^{-3}$
<i>Eletricidade alta tensão</i>	<i>MWh</i>	<i>1,00</i>
Cinzas e lama do purificador	Kg	$2,29.10^{-3}$
Resíduos para incineração	Kg	$1,02.10^{-3}$
Hidrogênio-3 trítio	KBq	$1,58.10^3$
Iodo-131	KBq	$5,94.10^{-4}$
Kriptônio-85	KBq	$1,11.10^2$
Krptônio-85m	KBq	$6,43.10^{-1}$
Krptônio-87	KBq	$1,75.10^{-1}$
Krptônio-88	KBq	$5,22.10^{-1}$
Krptônio-89	KBq	$4,92.10^{-2}$
Lixo radioativo de baixo nível	m ³	$1,80.10^{-6}$
Resíduos radioativos de baixo nível para o repositório final	m ³	$2,98.10^{-5}$
Manganês-54	KBq	$7,39.10^{-5}$
Nióbio-95	KBq	$1,13.10^{-4}$
Espécies radiativas nuclídeos	KBq	$5,04.10^{-3}$
Espécie radioativas betas	KBq	$3,47.10^{-4}$
Prata-119	KBq	$1,23.10^{-3}$
Combustível nuclear gasto	Kg	$2,53.10^{-3}$
Estrôncio-89	KBq	$1,14.10^{-4}$
Estrôncio-90	KBq	$1,90.10^{-5}$
Óleo mineral residual	Kg	$1,71.10^{-3}$
Água	m ³	$7,66.10^1$
Xenônio-131m	KBq	$5,57.10^0$
Xenônio-133	KBq	$1,48.10^2$
Xenônio-133m	KBq	$9,70.10^{-1}$
Xenônio-135	KBq	$1,25.10^1$
		$1,25.10^1$
Xenônio-135m	KBq	$1,36.10^{-1}$
Xenônio-137	KBq	$5,99.10^{-3}$
Xenônio-138	KBq	$2,31.10^{-2}$

Fonte: Do autor (2021)

Para a avaliação de impacto foi utilizado o método ReciPe *MidPoint (H)*. Os parâmetros de impacto analisados foram ocupação de áreas de agricultura, mudanças climáticas, depleção fóssil, ecotoxicidade de água doce, eutrofização de água doce, toxicidade humana, radiação ionizante, ecotoxicidade marinha, eutrofização marinha, depleção de metal, transformação de terras naturais, depleção de ozônio, formação de material particulado, formação de oxidantes fotoquímicos, acidificação terrestre, ecotoxicidade terrestre, ocupação de áreas urbanas e depleção aquática.

Como forma de comparação, empregou-se o método de impacto ambiental ReciPe *MidPoint (H)* para analisar a mesma produção de energia nuclear a partir de fontes hidráulicas e eólicas.

Para fonte hidráulica, utilizou-se o banco de dados da Ecoinvent: “*Ecoinvent 3.7.1 cutoff Unit Regionalized*”, no tópico “*Electricity Production, Hydro, Reservoir, Tropical Region / Electricity, High Voltage / Cutoff, U - RoW*”, escolheu-se a fonte *RoW*, pois é a mais utilizada para países em desenvolvidos. O conjunto de dados utilizados (limite do sistema) considerou o volume ocupado pela barragem, estação de energia e lago, emissões de dióxido de carbono e metano, atividade e materiais de operação e manutenção das usinas como óleo lubrificante e massa de água que passa pelas turbinas. Não foram considerados dados de construção da barragem nem desativação das operações, sendo considerados apenas os itens descritos acima do processo de produção de energia elétrica. No Apêndice A, estão contidos os fluxos de entradas e saídas do sistema de produção hidrelétrica. O fluxo de referência para a unidade funcional de 1 MWh foi $4,04 \cdot 10^{-10}$ usinas hidrelétricas suíças com reservatórios superiores a 30 metros.

Para a produção de energia elétrica por fonte eólica, usou-se o banco de dados da Ecoinvent: “*Ecoinvent 3.7.1 cutoff Unit Regionalized*”, no tópico “*Electricity Production, Wind, >3 MW turbine, onshore / Electricity, high voltage / Cutoff, U - RoW*”, também foi utilizado dados do mundo todo. O conjunto de dados utilizados (limite do sistema) considerou a operação e manutenção da usina eólica e as mudanças de óleo lubrificante a cada ano. Para a fonte eólica, não foi considerada a construção nem desmantelamento da central eólica, sendo considerados apenas os dados descritos acima de operação dos geradores eólicos. No Apêndice B, estão contidas as entradas e saídas do sistema de produção eólica. O fluxo de referência para a unidade funcional de 1 MWh na geração eólica foi de $7,76 \cdot 10^{-6}$ aerogeradores com potência instalada individual de 4,5 MW.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise bibliométrica

Como mencionado na metodologia, inicialmente executou-se um levantamento bibliográfico e análise descritiva do mesmo. O primeiro termo pesquisado foi “*nuclear energy*”, para o qual foram encontrados 50.672 documentos.

O início da publicação de artigos sobre esse tema se deu com o artigo de Casimir (1930) sobre a expulsão de elétrons do núcleo atômico e a liberação de radiação por átomos de alta excitação com a conversão interna de energia nuclear. Na Figura 17, é perceptível que os principais acidentes nucleares fizeram com que as publicações nos anos subsequentes diminuíssem. Além disso, a pesquisa na área expandiu substancialmente dos anos 2000 até 2010, quando havia grande expectativa da expansão dos reatores nucleares no planeta. O ciclo de pesquisa reiniciou em 2013, mas foi duramente atingido nos anos de 2020 e 2021 provavelmente pelas limitações de locomoção e pelos *lockdowns*.

O artigo mais citado sobre o assunto, com 4.887 citações, foi escrito pelos autores Chu e Majumdar (2012) sobre energia limpa e acessível, relacionando uma série de aspectos nos setores de transporte e geração de eletricidade e discutindo caminhos para alcançar um futuro energético próspero, seguro e sustentável. Destaca-se que o artigo mais relevante para esta busca foi escrito pelos cientistas Rong e Liu (2020), que analisaram as tendências de desenvolvimento futuro da energia nuclear, de tecnologias avançadas de produção de energia nas principais organizações internacionais mundiais com ênfase nas tecnologias da China.

As áreas que mais publicaram sobre o termo foram Energia (26,5%), Engenharia (21,4%), Física e Astronomia (13,4%), Ciência Ambiental (8,4%), Ciência dos Materiais (6,0%) e Medicina (4,8%). Os países que estão na vanguarda sobre o tema são Estados Unidos (21,8%), China (12,3%), Japão (9,1%), França (5,3%) e Alemanha (5,2%).

Figura 17 – Documentos publicados por ano referentes ao termo "*nuclear energy*" de acordo com a busca na plataforma Scopus



Fonte: Do autor (2021)

Examinando apenas as publicações pelo Brasil, foram encontrados 469 documentos. O primeiro artigo, publicado em 1973, é um modelo de correção monetária de análises econômicas aplicadas aos custos da energia nuclear e comprova que a energia nuclear é 15% mais econômica quando comparada a eletricidade proveniente de combustíveis fósseis (MCGUIRE; MARTÍN, 1973).

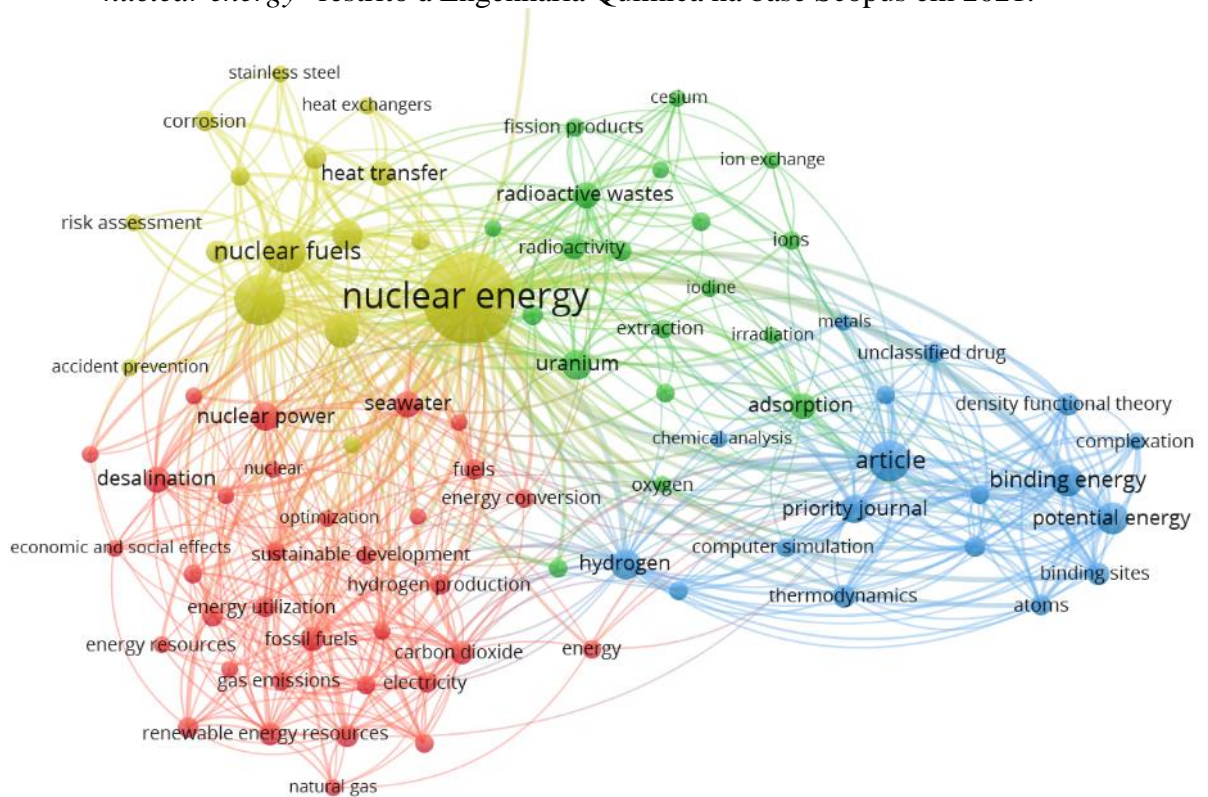
O artigo brasileiro mais citado sobre o tema, com 190 citações, é de 2004 e estudou as reações de isótopos de hélio com alvo em urânio-238 em energias próximas à da barreira de fusão nuclear. Os autores comprovaram que não existe aumento significativo de fusão nuclear em energias abaixo da barreira de fusão e que o aumento da fissão nuclear se deu pela transferência de nêutrons entre os átomos envolvidos (RAABE et al., 2004).

Já o artigo de maior relevância para esta busca teve um caráter mais educacional, os autores estudaram as aplicações de energia nuclear com alunos do ensino médio a partir de filmes 3D educativos, desmistificando a energia nuclear e elucidando os benefícios que ela pode trazer para a sociedade (LEGEY et al., 2013).

Na Figura 18 é mostrado o mapa de coocorrência de palavras-chave "*nuclear energy*" considerando apenas as publicações brasileiras. Para isso foi considerado o mínimo de ocorrência de 7 vezes, dando origem a 5 *clusters* diferentes. É possível notar que a pesquisa no Brasil sobre o assunto tem palavras-chaves variadas e relevantes no cenário global. As palavras de maior ocorrência nos artigos brasileiros são centrais nucleares, PWR e combustível nuclear.

Na Figura 19 é apresentado o mapa de coocorrência de palavras-chave “*nuclear energy*” considerando apenas a área de Engenharia Química, sendo considerado o mínimo de ocorrência de 20 vezes, dando origem a 5 *clusters* diferentes. Pode-se observar que o interesse da pesquisa nesta área se volta para tópicos como dessalinização, efeitos sociais e econômicos, água do mar, produtos da fissão, lixo radioativo e engenharia aeroespacial. As principais tendências de estudo são adsorção, radioatividade, desenvolvimento sustentável e teoria da densidade funcional.

Figura 19 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave com termo de busca “*nuclear energy*” restrito à Engenharia Química na base Scopus em 2021.



Fonte: Do autor (2021)

Para analisar as tendências identificadas no campo de pesquisa, foi pesquisado na base de dados os termos “*nuclear energy*” e “*desalination*” pois aparecem nas tendências da área. Foram encontrados 314 artigos. Os artigos mais relevantes para essa busca aliam a produção de energia nuclear juntamente com a dessalinização da água. Um dos artigos mais citados, 70, realizou a otimização termo econômica de um PWR de 1.000 MW acoplado a um sistema de dessalinização de destilação de múltiplos efeitos com compressor de vapor térmico, a planta de cogeração simultânea de energia e água doce (ANSARI; SAYYAADI; AMIDPOUR, 2010).

Outro trabalho importante, com 63 citações, reportou o status de pesquisa de reator de sal fundido que utiliza tório como combustível. As vantagens levantadas pelo autor incluem a pressão e temperatura nos quais o reator nuclear opera, a produção de energia elétrica eficiente frente a seus pares, possibilidade de dessalinização, incineração de actinídeos, produção de hidrogênio e outras aplicações do calor gerado (DOLAN, 2017).

Pesquisou-se também junto com “*nuclear energy*”, o termo “*life cycle analysis*”. Essa pesquisa resultou em 69 documentos. O artigo mais citado, com 443 citações, compara os resultados de análises de ciclo de vida das emissões de gases do efeito estufa com ênfase nas tecnologias fósseis, renováveis e nuclear. Os resultados mostraram que as tecnologias de energia hídrica, nuclear e eólica produzem energia com menos impacto no aquecimento global (WEISSER, 2007). Em outro artigo importante, com 350 citações, o autor examinou 103 estudos de ciclo de vida de emissões de gases poluentes por usinas nucleares, calculando o valor médio de emissão de 66 g de CO₂ para cada kWh gerado. Ele concluiu que a energia nuclear não emite poluentes durante os anos em que está operando. A emissão de poluentes acontece durante a construção da planta, mineração e enriquecimento de urânio e pelo descomissionamento da instalação (SOVACOOOL, 2008). O artigo mais relevante para esta pesquisa define melhor as saídas e entradas durante o processo de produção de energia nuclear, empregando-se balanços de energia em um sistema definido de geração nuclear. Chegou-se ao valor de emissão de carbono de 22,80 toneladas de CO₂ por GWh gerados (NIAN et al., 2014).

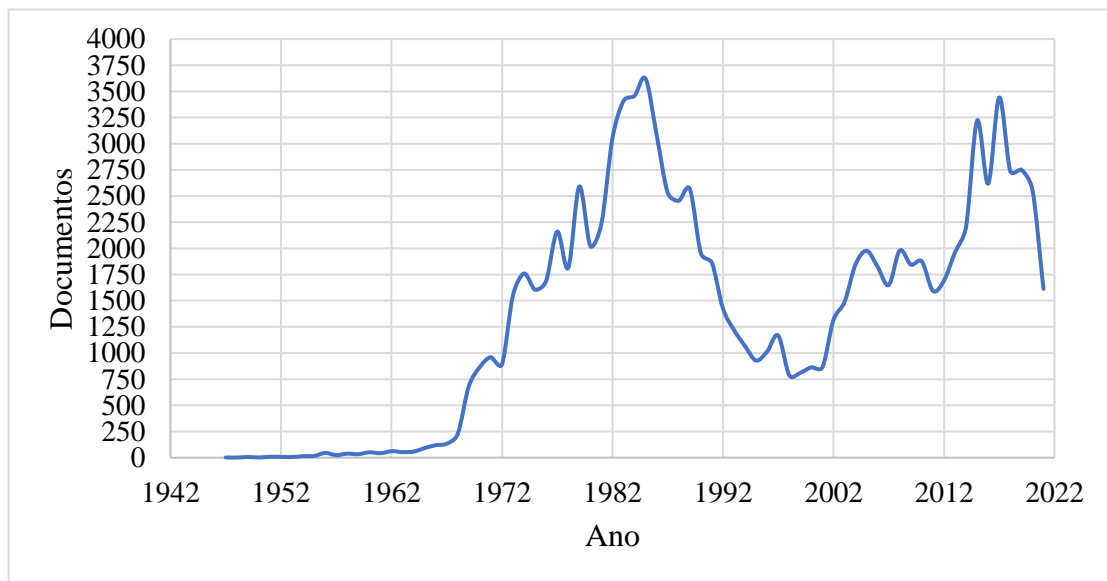
Por fim, associando o termo “*nuclear energy*” ao termo “*economic assessment*”, encontram-se 58 documentos das mais diversas avaliações econômicas. O artigo mais citado, com 39 citações, faz um estudo de cogeração de energia elétrica com outras funcionalidades como dessalinização de água do mar e aquecimento de residências durante a produção de energia nos reatores nucleares nos períodos em que a potência térmica da central nuclear está elevada (reator operando perto da potência máxima) e o consumo de energia não está demandando toda a potência produzida. O estudo propõe que as centrais nucleares continuem em potência térmica máxima e parte dessa potência seja direcionada para sistemas auxiliares como, aquecimento urbano, dessalinização e geração de hidrogênio, ambas as técnicas se mostraram economicamente viáveis no estudo (LOCATELLI et al., 2017).

Como mostrado na Figura 20, a publicação sobre “*nuclear reactor*” iniciou depois da Segunda Guerra Mundial e o lançamento das bombas nucleares. Os primeiros artigos datam de 1947, porém as pesquisas se intensificaram com o desenvolvimento dos programas nucleares pelo mundo entre 1968 e 1985. O principal estudo é sobre a dinâmica dos reatores nucleares do pesquisador Mandeville (1947). A dinâmica dos reatores foi avaliada em uma base elementar

em sistemas de eixos coordenados com correlações angulares, dispersões angulares e dispersões de alvo fino. Outro importante artigo foi publicado em 1948, sobre o reator de pesquisa do Laboratório Nacional de Brookhaven, no qual se estudou o momento magnético de nêutrons e prótons (BORST et al., 1948).

Após o acidente nuclear de Chernobyl em 1986, as pesquisas diminuíram substancialmente até 1999, quando se atingiu o mínimo de publicações desde 1968. A partir de 2000, o número de publicações sobre “*nuclear reactor*” voltou a se intensificar e aumentar até os dias atuais. Vale ressaltar que, em 2011, com o acidente de Fukushima, o número de publicações diminuiu pontualmente nesse ano, mas voltou a progredir daquele ponto em diante (Figura 20).

Figura 20 – Documentos publicados por ano referentes ao termo “*nuclear reactor*” a partir da base Scoups



Fonte: Do autor (2021)

A pesquisa do termo “*nuclear reactor*” resultou em 102.239 documentos publicados. O artigo mais citado, com 3.107 citações, é focado em tecnologias alternativas de energia, visto a representatividade dos combustíveis fósseis na produção de energia no século XXI. No estudo formularam-se políticas para implementação de alternativas de energia que são cientificamente possíveis, ambientalmente aceitáveis e tecnologicamente promissora tal como a energia nuclear e hidrelétrica (DRESSELHAUS; THOMAS, 2001).

As áreas que mais pesquisaram sobre o tema foram Engenharia (29,7%), Energia (24,4%), Física e Astronomia (15,9%), Ciência dos Materiais (8,7%), Ciências Ambientais

(7,3%), Medicina (3,5%) e Engenharia Química (1,9%). Os países que mais contribuíram com o desenvolvimento do termo foram Estados Unidos (18,4%), Japão (7,8%), China (6,5%), Alemanha (4,6%), Reino Unido (4,1%) e França (3,9%).

O Brasil contribuiu com 682 documentos sobre “*nuclear reactor*”, o primeiro artigo publicado dos autores McGuire e Martin (1973), e foi descrito neste trabalho. Um dos trabalhos brasileiros publicados no ano subsequente descreve um método digital que mede o período de um reator nuclear, sendo o instrumento capaz de processar o período a cada 8 segundos. O dispositivo foi desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1971 (MUNDIM, 1974). O artigo brasileiro mais citado, 338 vezes, foi sobre a primeira evidência experimental de um dos seis estados de bárions previstos e que contêm dois quarks, essas partículas subatômicas compõem os prótons, nêutrons, elétrons, entre outras e suas descobertas foram de grande ajuda para o entendimento do universo quântico (MATTSON et al., 2002).

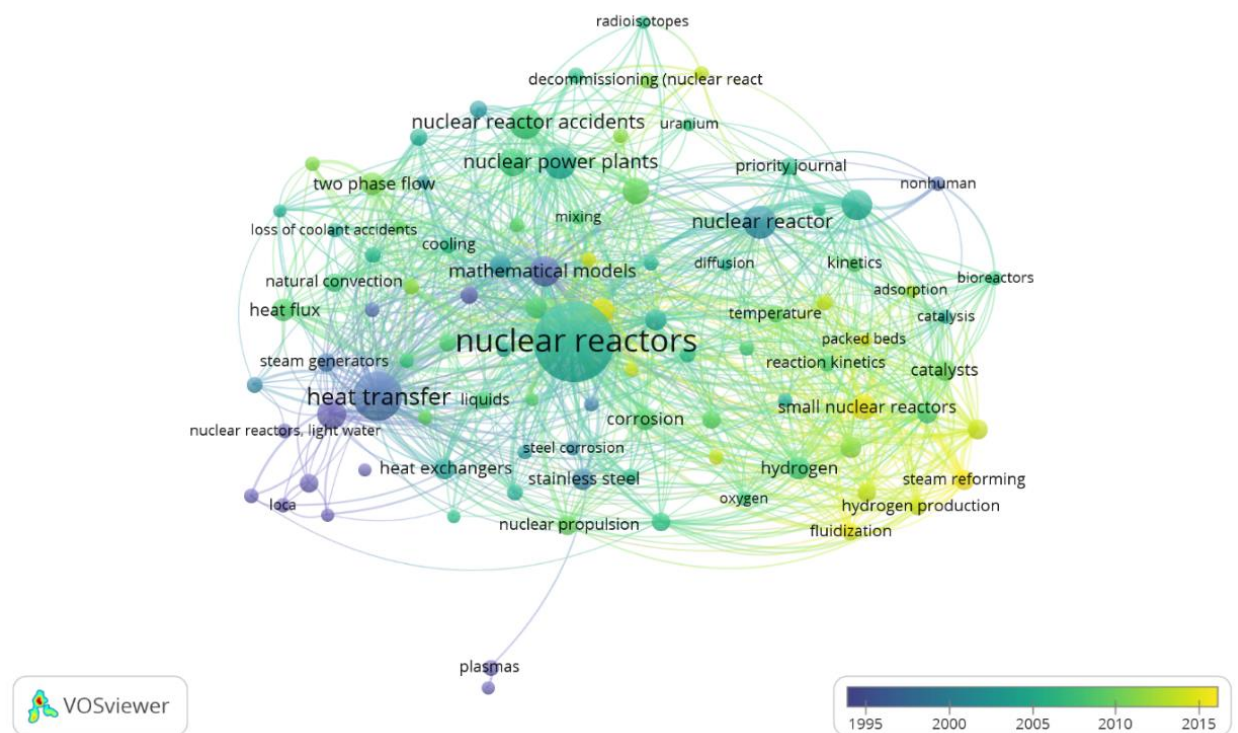
O artigo nacional mais relevante para esta busca estudou a estabilidade de um reator nuclear de leito fluidizado considerando a variação do fluxo na direção axial, aplicado a estados transientes de curto prazo e na teoria da bifurcação nos estados transientes de longo prazo. As conclusões preliminares indicaram que os reatores de leito fluidizado apresentam comportamento semelhante ao dos reatores convencionais quanto à estabilidade dinâmica (BORGES; VILHENA, 1995).

Na Figura 21, é apresentado o mapa de coocorrência de palavras-chave com base no termo “*nuclear reactor*” considerando apenas as publicações brasileiras em visualização de sobreposição (*overlay visualization*). Foi considerado o mínimo de ocorrência de 12 vezes, dando origem a 4 *clusters* diferentes. Nessa figura, os termos em amarelo são mais recentes.

Para o termo “*nuclear reactor*” nas condições descritas apresentaram termos de pesquisas interessantes e inovadores, tais como, detectores de partículas, pequenos reatores nucleares, descomissionamento de reatores, irradiação de nêutrons, métodos iterativos e geometria. Os pequenos reatores nucleares são estudados com o intuito de tornar essa geração de energia mais barata, versátil, segura e econômica no custo de capital, além de ocupar menores áreas de operação e descomissionamento.

Na Figura 22 é mostrado o mapa de coocorrência de palavras-chave “*nuclear reactor*” considerando apenas a área de Engenharia Química em visualização de sobreposição (*overlay visualization*). Foi considerado o mínimo de ocorrência de 40 vezes, dando origem a 5 *clusters* diferentes. É nítido perceber que nos últimos anos o interesse da Engenharia Química passou por uma transição de pesquisa. Até aproximadamente 2010, as pesquisas se concentravam mais em transferência de calor, fluxo de calor crítico, plasma, geradores de vapor e modelos de reatores de potência. Já nos últimos anos, as pesquisas se direcionaram para novas áreas, como pequenos reatores nucleares, reforma de vapor, fluidização, leito fluidizado e produção de hidrogênio.

Figura 22 – Mapa bibliométrico de coocorrência e tendência de palavras-chave com termo de busca “*nuclear reactor*” restrito à Engenharia Química na base Scopus em 2021



Fonte: Do autor (2021)

Pesquisou-se então o termo “*nuclear reactor*” em conjunto com outros termos de tendência, são eles: “*fluidization*”, “*steam reforming*” e “*small nuclear reactors*”.

Para a pesquisa de “*nuclear reactor*” e “*fluidization*”, foram encontrados 167 documentos. O trabalho mais relevante para esta busca foi uma análise de estabilidade de núcleo dinâmico de um reator nuclear de leito fluidizado. O estudo propõe um modelo teórico que descreve o acoplamento de neutrônicos, termo hidráulica e a fluidização de um reator de leito

fluidizado. As equações diferenciais não lineares simuladas próximas ao ponto de trabalho operacional do reator tiveram seus pólos da função com partes negativas para todo regime operacional, indicando um comportamento de estabilidade para as faixas de operação do reator em questão (GOLOVKO et al., 2000).

Para os termos “*nuclear reactor*” e “*steam reforming*”, houve um total de 262 publicações. Um dos artigos mais citados, com 150 citações, faz uma avaliação de ciclo de vida quantificando as emissões de dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio da eletrólise de alta temperatura para a produção de hidrogênio via energia nuclear. Os dados mostraram que as emissões de gases poluentes por esse método são menores que as dos métodos convencionais de reforma a vapor a partir de gás natural. Como a eletrólise de alta temperatura oferece maior eficiência energética que outros métodos de produção de hidrogênio, os reatores nucleares podem operar em temperaturas em que eletrólise acontece de forma mais rápida e eficiente. (UTGIKAR; THIESEN, 2006). O artigo mais relevante para essa busca faz uma avaliação do custo de produção de módulos de membranas seletivas de hidrogênio em vapor reformado a partir de gás natural ou hidrocarbonetos pesados utilizando reatores nucleares para o aquecimento do fluido para o aumento da eficiência do processo. A integração da tecnologia de reforma e módulos de membrana dentro de uma usina nuclear tornou a produção de hidrogênio 10% mais barata que os métodos convencionais e ocorreu uma diminuição de 28% de dióxido de carbono durante o processo (FALCO et al., 2008).

Por fim, a busca dos termos “*nuclear reactor*” e “*small nuclear reactor*” resultou no total de 2.081 documentos publicados, confirmando a tendência de pesquisa sobre o tema. Um dos artigos mais citados sobre essa pesquisa, com 185 citações, traz uma breve revisão da história nuclear em relação o tamanho das plantas dos reatores. Além disso, uma das conclusões foi que os reatores nucleares pequenos oferecem benefícios em termos de proteção, segurança, flexibilidade operacional e econômica, localidade, além de poderem ser utilizados para outros fins, não só para a produção de eletricidade (INGERSOLL, 2009).

Uma das publicações mais relevantes sobre “*pressurized water reactor*” foi utilizando uma análise hidrotérmica do núcleo de um reator nuclear pequeno utilizando uma abordagem comparativa com THEATR e Relap5 code. O estudo utilizou os códigos dos programas para lidar com os elementos de combustão nucleares do reator para realizar a análise hidrotérmica do objeto de estudo, a análise é importante, pois determina o projeto do reator (KHAN; PENG; KHAN, 2011).

O termo “*pressurized water reactor*”, apesar de não estar nas tendências futuras discutidas acima, foi selecionado pois é o modelo de reator mais utilizado no mundo e os

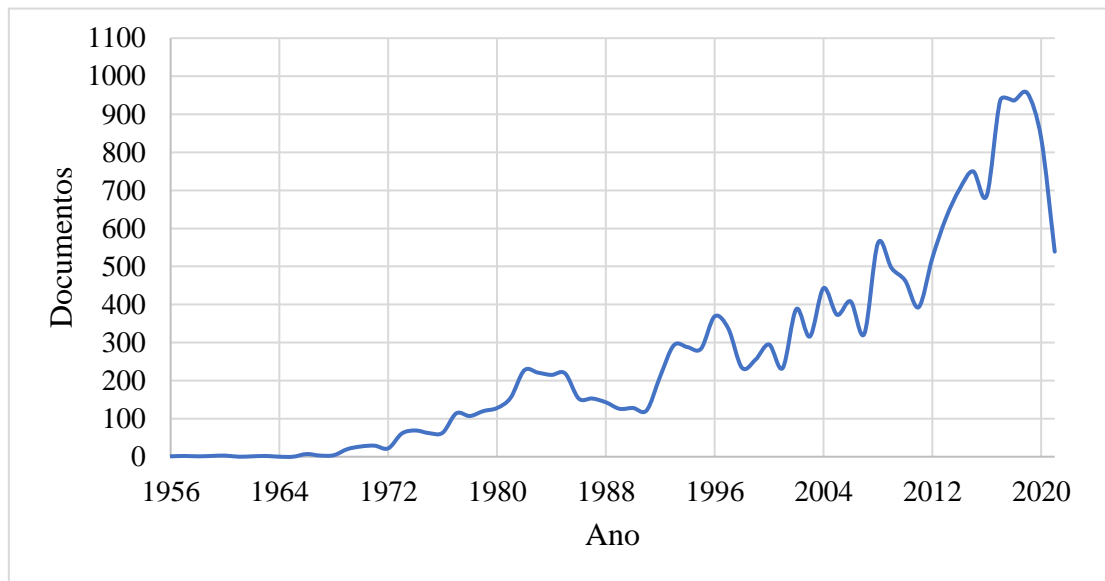
modelos de reatores nucleares de pesquisa e em Angra 1, 2 e 3 presentes no Brasil são desse modelo, no cenário global e nacional o modelo de reator PWR é muito importante e utilizado. Sendo assim, o termo foi publicado pela primeira vez em 1956, pela autoridade de energia atômica do Reino Unido na descrição das suas principais funções. Os braços de pesquisa e indústria da autoridade tinham a competência de explorar potenciais usinas nucleares e realizar estudos de projetos nos tipos julgados mais promissores. E em 1955 a agência juntamente com a Autoridade Central de Eletricidade fez um dos primeiros estudos sobre reatores nucleares de água pressurizada (COCKCROFT, 1956).

O total publicado sobre este termo totaliza 17.167 documentos. O artigo mais citado sobre o tema, com 656 citações, se trata de modelos básicos para sistemas de controle de velocidade de turbinas. Os modelos estudados e apresentados no artigo trazem representações adequadas para reatores nucleares de água pressurizada (IREPORT, 1973). A publicação mais relevante estudou o efeito do revestimento de nitreto de titânio no comportamento de incrustação de óleo cru no revestimento de combustível de reator de água pressurizada. As análises de microscopia eletrônica de varredura por feixe de íons focado e raios-X de dispersão de energia mostraram que o revestimento de nitreto de titânio reduziu de forma considerável a espessura de deposição bruta e ajudou a mitigar mudanças de energia induzidas pelo óleo cru (HAM et al., 2021).

Na Figura 23 é mostrado a evolução das publicações relacionadas ao termo “*pressurized water reactor*” e é possível notar que as publicações a cerca desse termo tiveram uma trajetória de longo prazo volátil e com tendência de crescimento, sendo duramente atingida nos anos de 2020 e 2021.

As áreas que mais publicam sobre esse tema são Energia (33,5%), Engenharia (25,6%), Física e Astronomia (15,0%), Ciência dos Materiais (9,6%) e Ciências Ambientais (7,3%). Os países que mais investem e publicam sobre o termo são Estados Unidos (21,1%), China (16,7%), França (10,1%), Coreia do Sul (7,4%), Japão (7,3%) e Alemanha (5,9%).

Figura 23 – Documentos publicados por ano referentes ao termo “*pressurized water reactor*”



Fonte: Do autor (2021)

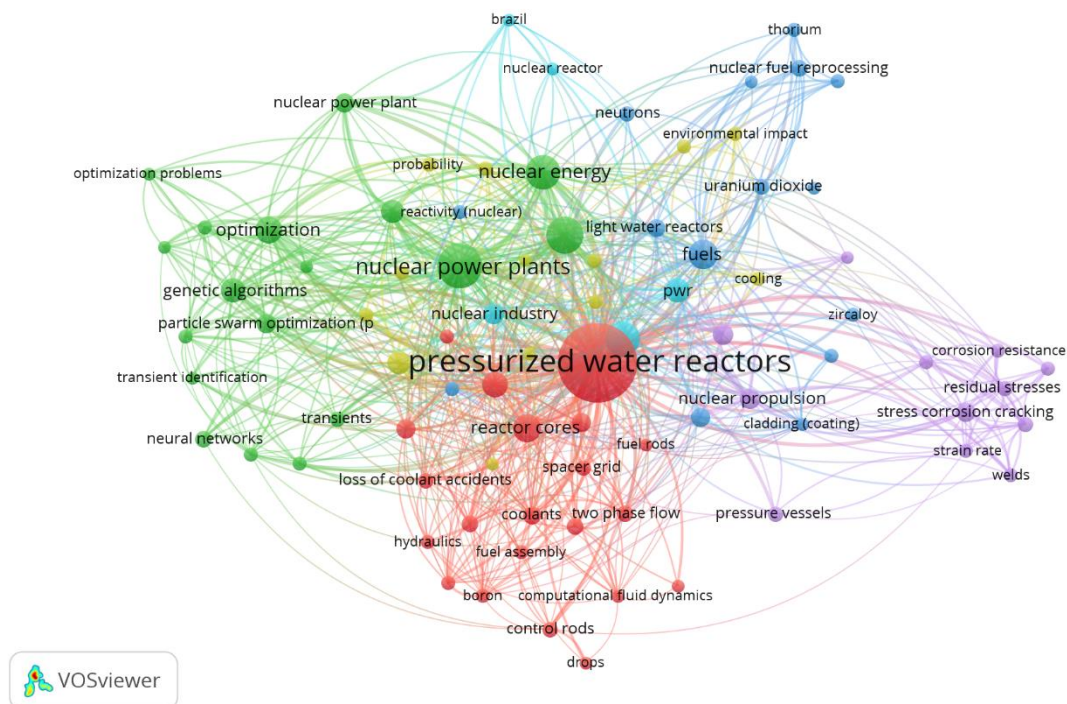
O Brasil contribuiu com 205 documentos sobre este termo. O primeiro artigo brasileiro data de 1994 e apresenta uma análise de tensões de uma estrutura de suporte de um reator de água pressurizada utilizando o programa ANSYS (CRUZ et al., 1994).

A publicação mais citada, com 126 citações, usa uma inferência difusa para avaliação de risco em sistemas de engenharia nuclear. A pesquisa apresentou um estudo de caso e os resultados demonstraram um potencial real do sistema de inferência substituir a análise de modos e efeito de falha em casos de envelhecimento (GUIMARÃES; LAPA, 2007).

O artigo brasileiro mais relevante publicado estudou a estratégias de combustível de óxido misto em um reator de água pressurizada. A comparação ocorreu com diferentes composições de combustível usando plutônio e urânio reciclados em um PWR. As composições de combustível estudadas atingiram uma duração de ciclo de combustível de 4 anos e os parâmetros principais de mostraram dentro das restrições de segurança (BETANCOURT et al., 2021).

Na Figura 24 é apresentado o mapa de coocorrência de palavras-chave “*pressurized water reactor*” considerando apenas as publicações brasileiras e o mínimo de ocorrência de 5 vezes, dando origem a 6 *clusters* distintos. As principais linhas de pesquisas nacionais são otimização de problemas, identificação transiente, redes neurais, fluidodinâmica, combustíveis nucleares, resistência a corrosão, tório, nêutrons, etc.

Figura 24 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave com termo de busca "*pressurized water reactor*" restrito ao Brasil na base Scopus em 2021.



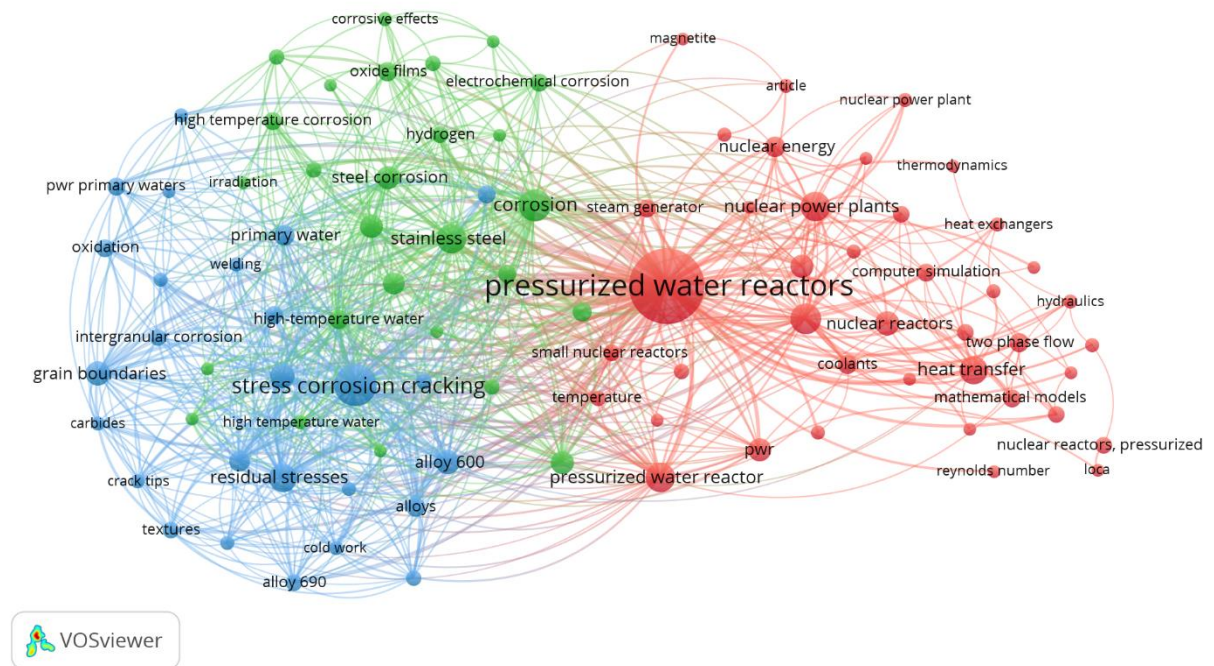
Fonte: Do autor (2021)

Na área de Engenharia Química foram encontrados 658 documentos sobre "*pressurized water reactor*". Um dos documentos mais citados, com 211 citações, expõe um estudo sobre a avaliação quantitativa dos submodos de corrosão sob tensão no lado secundário da tubulação do gerador de vapor em reatores de água pressurizada (STAEHLE; GORMAN, 2003, p. 1).

O artigo mais relevante sobre o termo na área de engenharia química faz um estudo sobre a corrosão por pite e suas contramedidas para tubos de gerador de vapor de reatores de água pressurizada. As conclusões do trabalho alertam que as principais contramedidas para mitigar a corrosão são substituição periódica das ligas de cobre, controle químico da água e limpeza química, sendo o último o mais eficaz contra a corrosão por pite (HUR et al., 2006).

Na Figura 25 é mostrado o mapa de coocorrência de palavras-chave "*pressurized water reactor*" considerando apenas o termo dentro da engenharia química, foi considerado o mínimo de ocorrência de 15 vezes, dando origem a 3 *clusters* distintos. As principais linhas de pesquisas dentro dessa área são corrosão sob tensão, transferência de calor, simulação computacional, alta temperatura de corrosão, efeitos de corrosão, geradores de vapor, corrosão eletromagnética, entre outros.

Figura 25 – Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave com termo de busca "*pressurized water reactor*" restrito à Engenharia Química na base Scopus em 2021



Fonte: Do autor (2021)

Apesar dos diferentes tipos de reatores nucleares existentes, é nítido perceber que os reatores de água pressurizada (PWR) são um dos mais seguros e eficientes, sendo o modelo mais utilizado em todo mundo e com várias linhas de tendência de pesquisa. A utilização de urânio levemente enriquecido, a robustez dos equipamentos utilizados e dos métodos de construção, a facilidade e segurança de se utilizar água como moderador da reação, o sistema de segurança primário ocorrer com a ebulição do próprio moderador e as hastes de controle serem alocadas no teto do reator fazem com o PWR seja o tipo de reator escolhido para o programa nuclear brasileiro e para este estudo em questão.

Além disso, a pesquisa bibliométrica sobre o tema demonstrou que os reatores nucleares podem vir servir para diversos propósitos além da geração de energia em um futuro não tão distante, sendo utilizados em programas espaciais, processos de dessalinização, geração de vapor e calor, eletrólise da água para a produção de hidrogênio, entre outros. Outras tecnologias interessantes e promissoras como os pequenos reatores nucleares, os reatores de leito fluidizado e reatores com nêutrons rápidos ainda são bastantes embrionárias e demandam muito mais estudo e investimentos para que possam ser aplicadas em escala industrial.

A pesquisa sobre reatores PWR é muito extensa e continua evoluindo com os anos, sendo descobertas cada vez processos mais eficientes e seguros, como na área de corrosão e na

utilização de nitrato de titânio para mitigar a incrustação e corrosão, e a utilização de limpeza química como melhor método de manter as tubulações e reatores livres de partículas indesejadas.

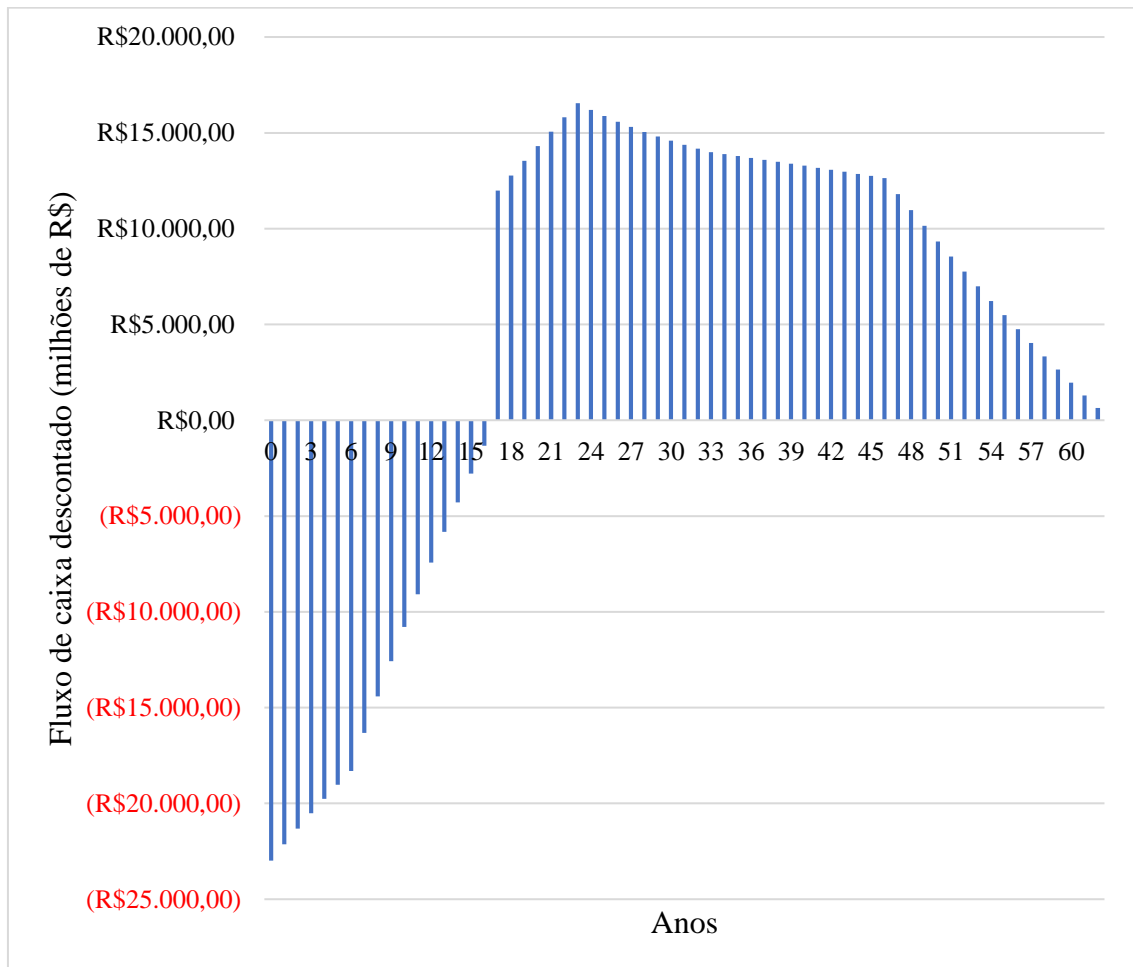
Cabe destacar que os principais acidentes nucleares já ocorridos até os dias atuais envolveram reatores do tipo BWR e LWGR/RMBK, Fukushima e Chernobyl, respectivamente. Na grande maioria dos casos os acidentes envolvendo PWR são de baixa gravidade e gerados por ineficiência humana, com a digitalização dos sistemas e a utilização de procedimentos mais claros e monitorados colocam o PWR como o principal modelo de reator utilizado no mundo e mais seguro, mesmo sendo mais caro que alguns pares.

Angra 1, 2 e 3 utilizam esse modelo de reator, o que faz com que os procedimentos e funcionamento já sejam conhecidos e testados. Além disso, todo o processo de extração e enriquecimento de urânio no Brasil foi projetado para fornecer combustível para reatores tipo PWR, economizando custos de pesquisa e desenvolvimento de novas plantas de extração e enriquecimento com diferentes tecnologias.

4.2 Análise econômica

A partir das estimativas de custo de capital, custo operacional, despesas operacionais, depreciação, tributação e dados do início e fim da operação dos reatores nucleares foi estipulado o fluxo de caixa para os 62 anos de todo processo, desde o ano de 2022 até 2084, conforme apresentado na Figura 26. Como o horizonte de tempo de análise do projeto é alto, o fluxo de caixa a valor presente é uma ferramenta mais adequada para ajudar no entendimento do fluxo de caixa gerado pelos reatores nucleares. Conforme pode ser notado na Figura 26, o fluxo de caixa trazido a valor presente utilizando a taxa mínima de atratividade demonstra que mesmo sendo uma fonte de energia intensiva em capital nos primeiros anos a energia nuclear se mostra bem lucrativa ao longo dos anos.

Figura 26 – Fluxo de caixa descontado a valor presente com taxa mínima de atratividade de 10% dos reatores nucleares de 2022 até 2084



Fonte: Do autor (2021)

O valor presente líquido calculado considerando uma taxa mínima de atratividade de 10% foi positivo e no valor de R\$ 289.526.500.000,00. Isso significa que o empreendimento é lucrativo ao longo dos anos e pode ser considerado como uma opção de investimento e utilização como fonte de energia.

A taxa interna de retorno do investimento em reatores nucleares calculada foi de 13,26%. Essa TIR encontrada demonstra que é viável realizar o investimento ao longo dos anos. A margem líquida da operação, ou seja, a lucratividade do investimento calculada foi de 50,90%, isso significa que a cada 100 reais de receita operacional 50,90 reais restam como lucro líquido. O *payback* utilizando o valor do fluxo de caixa descontado ocorreu em 31 e 6 meses. Apesar de ser um projeto com *payback* elevado, demora-se pouco mais de 30 anos para ter o retorno do capital, projetos de geração de energia eólica com vida útil de 20 anos tem *paybacks* em torno de 11 anos (TAVARES, 2016). Isso significa que um tempo de retorno de capital de

pouco mais de 31 para um projeto de 62 anos pode ser levado em consideração. Para a construção de um pequeno reator nuclear no Brasil com capacidade de 100 MW com um custo médio ponderado de capital 8,25% gerou um *payback* de 19,6 anos (ESCANHOELA, 2018) para uma vida útil do reator de 40 anos. Esses dados comprovam que as medidas de lucratividade de centrais nucleares demoram para ter o retorno de capital, pois o empreendimento é intensivo em capital nos primeiros anos.

Através dos dados de medidas de lucratividade, foi possível concluir que a implementação de novas centrais nucleares para a diversificação da matriz elétrica brasileira é viável economicamente, gerando lucro aos acionistas depois de certos anos de operação. A energia nuclear não é a fonte de energia limpa mais barata, porém no cenário brasileiro e sua dependência forte de fontes hidrelétricas, a alternativa se torna atrativa e viável.

4.3 Análise ambiental

A execução da ACV para a produção de eletricidade de alta tensão em um reator de água pressurizada permitiu analisar os impactos no meio ambiente da utilização de reatores nucleares. Na Tabela 5 são mostrados os impactos observados durante a operação das usinas nucleares ao longo dos anos estudados. Como pode ser visto, o maior problema das usinas nucleares é justamente a radiação ionizante emitida pelos produtos da fissão nuclear que dura milhares de anos para se decompor, sendo de $5,90 \cdot 10^2$ kg de Urânio-235.

O potencial de aquecimento global (mudanças climáticas) alcançou o expressivo valor de 6,17 kg de CO₂, esse valor elevado prova que as usinas nucleares emitem poluentes durante alguma parte do seu ciclo de vida. Esse processo de produção de energia apesar de ser considerado limpo, na prática devido a grande quantidade de cimento e aço utilizado para a construção e utilização das piscinas de armazenamento de curto prazo nas próprias centrais nucleares, são liberadas quantidades significativas de poluentes do efeito estufa, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Impactos ambientais avaliados para reatores nucleares

Impacto observado	Unidade	Valor
Ocupação de áreas de agricultura	m ²	4,61.10 ⁻¹
Mudanças climáticas	kg CO ₂	6,17.10 ⁰
Depleção fóssil	kg óleo	1,91.10 ⁰
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4 – DCB	5,89.10 ⁻¹
Eutrofização de água doce	kg P	5,16.10 ⁻³
Toxicidade humana	kg 1,4 – DCB	2,90.1 ¹
Radiação ionizante	kg U-235	5,90.10 ²
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4 – DCB	6,21.10 ⁻¹
Eutrofização marinha	kg N	5,01.10 ⁻²
Depleção de metal	kg Fe	4,51.10 ⁰
Transformação de terras naturais	m ²	9,75.10 ⁻⁴
Depleção de ozônio	kg CFC	5,12.10 ⁻⁷
Formação de material particulado	kg PM	3,88.10 ⁻²
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	3,74.10 ⁻²
Acidificação terrestre	kg SO ₂	3,41.10 ⁻²
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4 – DCB	3,71.10 ⁻³
Ocupação de áreas urbanas	m ²	1,88.10 ⁻¹
Depleção aquática	m ³	1,70.10 ⁻⁶

Fonte: Do autor (2021)

A ocupação de áreas agrícolas, ocupação de áreas urbanas e transformação de terras naturais totalizaram 6,65.10⁻¹ m². Esse valor é muito elevado se levado em conta o tamanho reduzido das centrais nucleares frente a outros tipos de fontes de energia como as hidrelétricas, o número chama atenção pela sua potência elevada em relação a unidade funcional, dando indicio de que o fator que o programa utiliza pode não ser aquele da vida real.

Já era esperado que os impactos de ecotoxicidade e toxidade fossem elevados pela conjuntura do processo em si, pois os principais produtos das fissões nucleares são justamente produtos radioativos que permanecem sob vigilância e segurança por longos anos. Devido a toda usina nuclear ser obrigado por lei e motivos de segurança a ter geradores a diesel auxiliares que entrem em funcionamento caso o reator pare de gerar energia para garantir o resfriamento do núcleo e essas ferramentas serem testados periodicamente os impactos de depleção fóssil, depleção de ozônio, formação de material particulado e outros impactos são intensificados por essa prática, pois mesmo nos testes a quantidade de diesel utilizada é elevada. Para uma comparação com outras fontes limpas de produção de eletricidade consideradas, foram

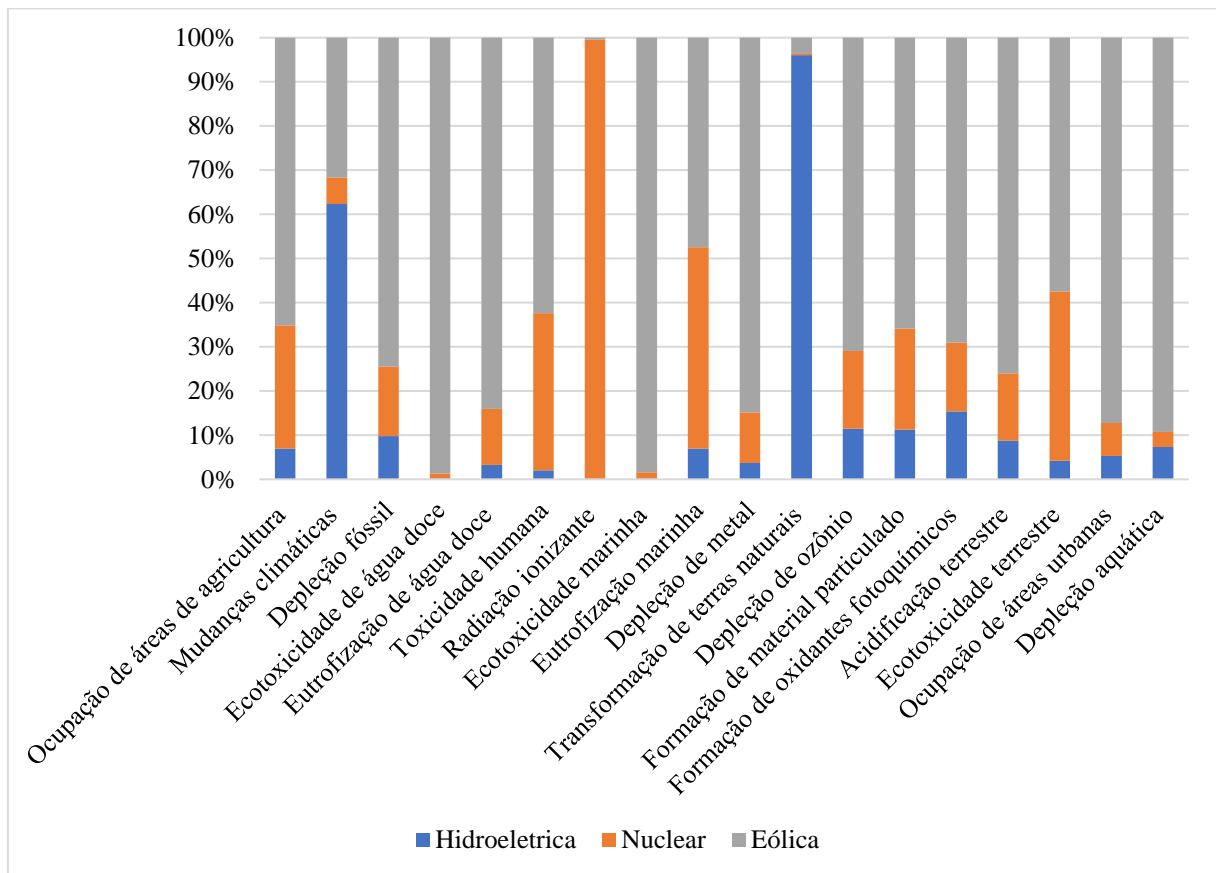
construídos mais dois sistemas de produto para a geração de energia por fonte hidrelétrica e eólica, apresentados na Figura 27.

Cada fonte de energia tem um impacto ambiental característico mais presente. No caso da nuclear é a radiação ionizante para cada MWh de energia gerada por causa do lixo radioativo gerado. Na hidroelétrica, é a transformação de terras naturais pela quantidade de terras alagadas para a construção dos reservatórios de contenção de água. Já a energia eólica polui mais quando se trata da ecotoxicidade de água e outros impactos devido a quantidade de lixo proveniente da troca de lubrificante nas partes que se movimentam para a geração de energia.

De forma geral, todo tipo de produção de energia polui e gera impactos ambientais, seja hidrelétrica, eólica ou nuclear, por isso a importância também ambiental da diversificação da matriz elétrica brasileira para que os impactos não sejam concentrados em apenas uma métrica, mas diluídos ao longo de vários tipos de impactos ambientais, que não comprometam definitivamente a vida humana, animal e vegetal.

Na Figura 27 é apresentado o gráfico de impactos ambientais de cada fonte de energia levando em consideração a participação percentual de cada fonte no impacto. É nítido perceber que a energia eólica é que mais gera impactos quando comparado com a nuclear e hidrelétrica. Ademais, a energia nuclear gera diversos impactos ambientais destacando-se a radiação ionizante como o principal. No contexto estudado, a energia mais limpa é a hidrelétrica, com destaque apenas para a transformação de terras naturais e as mudanças climáticas, devido ao tamanho da área dos reservatórios e da liberação de metano pela matéria orgânica decomposto no fundo do leito de água.

Figura 27 – Impactos ambientais causados pelas fontes de energia hidrelétrica, nuclear e solar em termos percentuais



Fonte: Do autor (2021)

Comparando-se os resultados obtidos com a literatura, tem-se o estudo de WANG et al. (2019) sobre fontes limpas de energia: hidráulica, eólica e nuclear na China. É possível perceber uma discrepância entre os dados do autor e os dados encontrados nesse presente trabalho. A energia hidráulica, de acordo com WANG et al. (2019), impacta apenas 3,5 kg de CO₂ por MWh de eletricidade gerado, enquanto pela avaliação de ciclo de vida a energia hidráulica polui 64,7 kg de CO₂ por MWh. A energia nuclear, de acordo com o estudo chinês, polui 12,4 kg CO₂ por MWh, enquanto encontrou-se 6,17 kg de CO₂ por MWh. Por fim, para a energia eólica os autores orientais calcularam o valor de 28,6 kg de CO₂ por MWh, enquanto utilizando o programa *OpenLCA* nesse trabalho o valor encontrado foi de 32,8 kg de CO₂ por MWh. Essa discrepância entre os dados pode ser explicada pelas premissas diferentes utilizadas em cada análise do ciclo de vida e dos dados coletados. Os autores chineses utilizaram dados primários de todo o ciclo de vida das fontes de energia incluindo as fases de fabricação, construção, operação e descomissionamento das centrais elétrica para realizar o estudo.

Enquanto no presente trabalho, utilizaram-se dados secundários disponíveis no Ecoinvent sobre a operação das usinas.

Essa discrepância entre as análises dos impactos do ciclo de vida também pode ser notada entre diferentes estudos de ciclo de vida. O estudo de Sovacool (2008) chegou à conclusão que ao longo da vida útil de um reator nuclear são gerados 66 kg de CO₂ para cada MWh gerado, diferindo dos valores encontrados pelos autores chineses e pelo presente estudo. A conclusão que se pode ter é que o processo de produção de energia nuclear, e diversas fontes de eletricidade, têm o título de serem limpas, entretanto quando se olha os impactos ambientais de cada uma nota-se que os impactos são reais e completamente limpa nenhuma fonte é.

Uma das principais formas das usinas nucleares de compensar os impactos ambientais gerados é construir usinas em áreas afastadas com o intuito de proteção da população e ao mesmo tempo para possibilitar a compra de uma grande área ao redor da usina para ser utilizado como preservação ambiental, realizar estudos e criação de espécies que vivem nas fontes de resfriamento dos reatores e ao redor das usinas como forma de aumentar as espécies nativas e mitigar a ação da operação, criação de piscinas de armazenamento de água e lixo radioativo extras e mais fundas para o armazenamento de resíduos em eventuais emergências e menor ocupação de área nativa, pois a radiação ionizante só causará danos se for expostas ao meio ambiente e em contato ao ser humano.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve o objetivo de mapear o estado da arte de como a energia nuclear se desenvolveu no tempo e quais são as principais linhas de pesquisa atualmente tanto de publicações brasileiras quanto de publicações envolvendo apenas a área de engenharia química. Foi possível perceber que o futuro da energia nuclear está caminhando para reatores nucleares de leito fluidizado, pequenos reatores nucleares, cogeração de energia elétrica, térmica e dessalinização de água do mar, geração de hidrogênio e reatores de nêutrons rápidos, além de pesquisas na área de fusão nuclear para sua utilização nos próximos 30 e 40 anos.

A análise técnica do processo de produção de energia nuclear desde a extração, beneficiamento e enriquecimento de urânio, produção de energia, modelos de reatores e armazenamento de lixo radioativo mostrou que poucos países dominam todo o ciclo de produção nuclear, sendo o Brasil um deles.

Os estados de Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Pernambuco apresentaram ser locais propícios para a construção de centrais nucleares devido a abundância de água e outros fatores determinantes para a construção de usinas.

Além disso, os reatores nucleares do modelo Reator da Água Pressurizada são os mais utilizados no mundo, com maior número de reatores sendo construídos, com maior segurança dos processos e eficiência. Apesar de ser um modelo caro frente a seus pares, os reatores PWR apresentaram tempo de vida útil elevado, podendo chegar a mais de 85 anos com manutenção e digitalização dos sistemas.

A análise econômica demonstrou que a produção de energia elétrica por fontes nucleares é intensiva em capital, demanda muito planejamento e tempo para sua operação. Os dados mostraram que centrais nucleares são operacionalmente viáveis, gerando lucro aos controladores ao longo dos anos. Para este estudo, o *payback* descontado foi de 31 anos e 6 meses para um projeto com duração total de 62 anos. O estudo mostrou que para a construção de 17 usinas nucleares no Brasil entre os anos de 2022 até 2049, o lucro operacional das usinas pagava o investimento inicial feito em 2053 e 2054. Assim o resultado operacional entre 2054 e 2084, quando as usinas seriam totalmente descomissionadas, seria retornado aos acionistas.

A análise ambiental apresentou que, apesar das energias nucleares terem o título de fontes limpas, a operação de produção de energia gera gases poluentes, principalmente pelo armazenamento de lixo radioativo recém gerado no reator. A quantidade da emissão de poluentes gera impactos aos seres humanos, vida marinha e terrestre, pois durante os processos são utilizadas grandes quantidades de concreto e aço para o condicionamento do lixo radioativo, que são responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa. Além do principal impacto de

radiação ionizante liberada no processo reacional e armazenada por vários anos. Entretanto, a análise ambiental apresentou também que outras fontes de energia consideradas limpas geram grandes impactos ambientais, como as fontes hidrelétricas e eólicas. As hidrelétricas pela transformação de áreas naturais e liberação de metano ocasionado pela construção do reservatório e a eólica pela quantidade de lixo de lubrificação ocasionado pela constante troca dos óleos que diminuem o atrito entre as partes dos aero geradores.

O estudo demonstrou que a utilização de energia nuclear é viável e importante para a diversificação da matriz elétrica brasileira. Além das hidrelétricas, as centrais nucleares são a única fonte de energia despachável que não utiliza combustíveis fósseis. É viável tecnicamente e economicamente para o Brasil e pode colocar o país na vanguarda do desenvolvimento e utilização de energia nuclear.

Para os próximos estudos relacionados ao tema, seria interessante uma análise econômica estipulando o preço de construção aqui no Brasil, sem a necessidade de recorrer a fontes internacionais. Uma avaliação de impacto econômico regional decorrente da implantação das usinas. Um estudo de avaliação de ciclo de vida utilizando fontes de pesquisa primária nos reatores aqui no Brasil, com dados da quantidade de concreto, aço e outros insumos para a produção de reatores e emissões geradas ao longo dos anos de operação. Por fim, um estudo mapeando a necessidade de investimento nas Indústrias Nucleares Brasileiras para o fornecimento de combustível nuclear seja na extração e beneficiamento de urânio até o preparo do combustível, além de uma avaliação ambiental desses processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASP. **Dólar**. Disponível em: <<https://www.aasp.org.br/suporte-profissional/indices-economicos/atualizacao-mensal/dolar/>>. Acesso em: 22 out. 2021.

AMORIM, J. DE. **Análise bibliométrica das dissertações defendidas entre os anos de 2005 a 2011 no PGCIN/UFSC**. Trabalho de Conclusão de Curso—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

ANSARI, K.; SAYYAADI, H.; AMIDPOUR, M. Thermoeconomic optimization of a hybrid pressurized water reactor (PWR) power plant coupled to a multi effect distillation desalination system with thermo-vapor compressor (MED-TVC). **Energy**, v. 35, n. 5, p. 1981–1996, 1 maio 2010.

ATOMIC ARCHIVE. **Controlled Nuclear Fission**. Disponível em: <<https://www.atomicarchive.com/science/fission/controlled-fission.html>>. Acesso em: 15 set. 2021.

BARCELLOS, F. **As emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos setores de Energia e de Processos Industriais em 2019**. IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2020. Disponível em: <<http://energiaeambiente.org.br/as-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-nos-setores-de-energia-e-de-processos-industriais-em-2019-20201201>>. Acesso em: 3 set. 2021

BETANCOURT, M. C. et al. Mixed-oxide fuel strategies in an integral pressurized water reactor. **Progress in Nuclear Energy**, v. 139, p. 103844, 1 set. 2021.

BORGES, V.; DE VILHENA, M. T. Dynamic Stability of a Fluidized-Bed Nuclear Reactor. **Nuclear Technology**, v. 111, n. 2, p. 251–259, 1 ago. 1995.

BORST, L. B. et al. Nuclear Reactor at Brookhaven National Laboratory. **Phys. Rev.**, p. 74, 15 dez. 1948.

CASIMIR, H. Internal Conversion of Nuclear Energy. **Nature**, v. 126, n. 3190, p. 953–954, 1 dez. 1930.

CHU, S.; MAJUMDAR, A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. **Nature**, v. 488, n. 7411, p. 294–303, 1 ago. 2012.

COCKCROFT, S. J. The United Kingdom Atomic Energy Authority and its functions. **British Journal of Applied Physics**, v. 7, n. 2, p. 43–51, fev. 1956.

CRUZ, J. R. et al. Aspects of design and stress classification of a PWR support structure. **American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP**, p. 103–108, 1994.

DE FALCO, M. et al. Reformer and membrane modules plant powered by a nuclear reactor or by a solar heated molten salts: Assessment of the design variables and production cost evaluation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 20, p. 5326–5334, 1 out. 2008.

DOLAN, T. J. Molten Salt Reactors and Thorium Energy. p. 815, 2017.

DONTHU, N. et al. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285–296, 1 set. 2021.

DRESSELHAUS, M. S.; THOMAS, I. L. Alternative energy technologies. **Nature**, v. 414, n. 6861, p. 332–337, 1 nov. 2001.

EIA. **U.S. nuclear industry - U.S. Energy Information Administration (EIA)**. Disponível em: <<https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/us-nuclear-industry.php>>. Acesso em: 6 set. 2021.

ELETRONUCLEAR. **Demonstração dos Resultados dos Exercícios**. Eletronuclear, 2012. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcgclclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.eletronuclear.gov.br%2FQuem-Somos%2FGovernanca%2FDocuments%2FDemonstra%25c3%25a7%25c3%25b5es%2520Financeiras%2520Trimestrais%2F2020%2F2%2520-%2520DEMONSTRA%25c3%2587%25c3%2595ES%2520FINANCEIRAS%2520ELETRONUCLEAR%25202020.pdf&cLen=245365>>. Acesso em: 29 set. 2021

ELETRONUCLEAR. **Relatório Anual Eletronuclear 2019**. Rio de Janeiro - Brasil: Eletrobras, 2019. Disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/Quem-Somos/Governanca/Documents/Relat%C3%B3rios%20e%20Balan%C3%A7os/Relatorio%20Anual%202019.pdf>>. Acesso em: 6 set. 2021.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020**. Brasil: Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2021.pdf>. Acesso em: 3 set. 2021.

ESCANHOELA, C. M. F. **ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO REATOR NUCLEAR SMART NO BRASIL**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018.

FLEISCHMANN, M.; PONS, S. Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium. **Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry**, v. 261, n. 2, Part 1, p. 301–308, 1989.

GIBNEY, E. Fuel for world's largest fusion reactor ITER is set for test run. **Nature**, v. 591, n. 7848, p. 15–16, 22 fev. 2021.

GOLOVKO, V. V. et al. Dynamic core stability analysis of a fluidized bed nuclear reactor. Proceedings of the PHYSOR 2000 - ANS International Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium. 2000.

GOVERNO DO BRASIL. **Brasil retoma produção de urânio. 2020**. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/12/brasil-retoma-producao-de-uranio>>. Acesso em: 3 set. 2021.

GUIMARÃES, A. C. F.; LAPA, C. M. F. Fuzzy inference to risk assessment on nuclear engineering systems. **Applied Soft Computing**, v. 7, n. 1, p. 17–28, 1 jan. 2007.

HAM, J. et al. Effect of TiN Coating on the Fouling Behavior of Crud on Pressurized Water Reactor Fuel Cladding. **Journal of Nuclear Materials**, v. 549, p. 152870, 1 jun. 2021.

HEO, J.-Y.; YOO, S.-H.; KWAK, S.-J. The Causal Relationship Between Nuclear Energy Consumption and Economic Growth in India. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, v. 6, n. 2, p. 111–117, 25 mar. 2011.

HUR, D. H. et al. Pitting Corrosion and its Countermeasures for Pressurized Water Reactor Steam Generator Tubes. **Corrosion**, v. 62, n. 10, p. 905–910, 1 out. 2006.

IBICT. **Manual do Sistema ILCD - Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos**. Brasília - DF: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2014. Disponível em: <<https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2016/01/Manual-ILCD-com-capa.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2021.

I. C. REPORT. Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-92, n. 6, p. 1904–1915, nov. 1973.

IEA. **Data & Statistics - IEA (International Energy Agency)**. IEA Paris, 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser>>. Acesso em: 3 set. 2021.

IEA. **Top ten electricity consuming countries, 2017 – Charts – Data & Statistics**. IEA Paris, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/top-ten-electricity-consuming-countries-2019>>. Acesso em: 3 set. 2021.

IEA; NEA. **Projected Costs of Generating Electricity**: Projected Costs of Generating Electricity. [s.l.] International Energy Agency - IEA and Nuclear Energy Agency - NEA, 2020. Disponível em: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/egc-2020_2020-12-09_18-26-46_781.pdf>. Acesso em: 26 set. 2021.

IEMA. **Prioridades para a integração das fontes renováveis variáveis no sistema elétrico**. São Paulo - Brasil: Instituto de Energia e Meio Ambiente IEMA, nov. 2016. Disponível em: <http://energiiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/01/NT_integracao_final.pdf>. Acesso em: 6 set. 2021.

INB. **Recursos**. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ur%C3%A2nio/Recursos>>. Acesso em: 8 set. 2021.

INGERSOLL, D. T. Deliberately small reactors and the second nuclear era. **Progress in Nuclear Energy**, v. 51, n. 4, p. 589–603, 1 maio 2009.

KHAN, S. U.-D.; PENG, M.; KHAN, S. U.-D. Thermal hydraulic analysis of small nuclear reactor core by using comparative approach of THEATRe and Relap5 code. **International Journal of Nuclear Energy Science and Technology (IJNEST)**, v. 6, p. 271–283, 2011.

LEGEY, A. P. et al. Dissemination of nuclear energy applications. n. 22, 2013.

LIU, S. et al. Sunlight-induced uranium extraction with triazine-based carbon nitride as both photocatalyst and adsorbent. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 282, p. 119523, 1 mar. 2021.

LOCATELLI, G. et al. Cogeneration: An option to facilitate load following in Small Modular Reactors. **Progress in Nuclear Energy**, v. 97, p. 153–161, 1 maio 2017.

MAGAZINE, S. **The Science Behind the First Nuclear Chain Reaction, Which Ushered in the Atomic Age 75 Years Ago**. Disponível em: <<https://www.smithsonianmag.com/innovation/the-science-behind-first-nuclear-chain-reaction-180967375/>>. Acesso em: 15 set. 2021.

MANDEVILLE, C. E. The dynamics of nuclear reactions. **Journal of the Franklin Institute**, v. 244, n. 5, p. 385–399, 1 nov. 1947.

MARTINS, F. **Combustível Nuclear**, 4 out. 2015. Disponível em: <<https://www.brasilemdefesa.com/2015/10/combustivel-nuclear.html>>. Acesso em: 11 set. 2021

MATTSON, M. et al. First observation of the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^+ . 2002.

MCGUIRE, S. A.; MARTÍN, J. G. A Monetary Correction Model of Economic Analyses Applied to Nuclear Power Costs. **Nuclear Technology**, v. 18, n. 3, p. 257–266, 1 jun. 1973.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2020. 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: 3 set. 2021.

MORAIS, C. A. DE. Obtenção de concentrado de urânio a partir de licor sulfúrico por extração por solvente utilizando sulfato de amônio como agente reextratante. **International Nuclear Atlantic Conference - INAC, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR - ABEN**. p. 6, 2005.

MUNDIM, S. G. A digital method for reactor-period measurement. **Nuclear Instruments and Methods**, v. 118, n. 1, p. 273–278, 1 jun. 1974.

NIAN, V. et al. Life cycle analysis on carbon emissions from power generation – The nuclear energy example. **Applied Energy**, v. 118, p. 68–82, 1 abr. 2014.

P. BASU; A. KULSHRESHTHA; D. MANDAL. Small modular nuclear reactor - A promising application of fluidized bed. 12th International Conference on Fluidized Bed Technology, CFB 2017. p. 603–609, 2017.

PERUZZO, J. **Física e Energia Nuclear**. 1ª edição ed. São Paulo: José Roberto Marinho, 2012. v. Único

RAABE, R. et al. No enhancement of fusion probability by the neutron halo of ^6He . **Nature**, v. 431, n. 7010, p. 823–826, 1 out. 2004.

RECEITA FEDERAL. **IN RFB Nº 1700 - 2017**. Disponível em: <<http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/link.action?visao=compilado&idAto=81268#1706802>>. Acesso em: 30 out. 2021.

RONG, J.; LIU, Z. Development and Prospect of Advanced Nuclear Energy Technology. **原子能科学技术**, v. 54, n. 9, p. 1638–1643, 20 set. 2020.

ROSSI, A. Tudo o que você precisa saber sobre as usinas nucleares de Angra 1 e 2, e por que são diferentes de Chernobyl. **BBC News Brasil**, 23 jun. 2019.

SANTOYO-CASTELAZO, E.; GUJBA, H.; AZAPAGIC, A. Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. **Energy**, v. 36, n. 3, p. 1488–1499, 2011.

SAVA, D. F. et al. Capture of Volatile Iodine, a Gaseous Fission Product, by Zeolitic Imidazolate Framework-8. **Journal of the American Chemical Society**, v. 133, n. 32, p. 12398–12401, 17 ago. 2011.

SCHULZ, W. W. **Uranium Processing - Leaching**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/uranium-processing>>. Acesso em: 8 set. 2021.

SIDDIQUI, O.; DINCER, I. Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: A life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 848–860, 2017.

SILVA, L. C. R. M. DA. **Produção de Urânio - Unidade de Concentrado de Urânio Caetité/BA** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 8 nov. 2014. Disponível em: <<http://www.nuclear.ufrj.br/semana2014/slides/12-08/5-Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20Ur%C3%A2nio%20-%20Lu%C3%ADs%20-%202014.08.11.pdf>>. Acesso em: 8 set. 2021

SOVACOOOL, B. K. Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. **Energy Policy**, v. 36, n. 8, p. 2950–2963, 1 ago. 2008.

STAEHLE, R. W.; GORMAN, J. A. Quantitative Assessment of Submodes of Stress Corrosion Cracking on the Secondary Side of Steam Generator Tubing in Pressurized Water Reactors: Part 1. **Corrosion**, v. 59, n. 11, p. 931–994, 1 nov. 2003.

TAVARES, E. **ENERGIA EÓLICA: VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICO-FINANCEIRA**. João Monlevade, MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

UTGIKAR, V.; THIESEN, T. Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, n. 7, p. 939–944, 1 jun. 2006.

VALT, R. B. G. **Análise do ciclo de vida de embalagens de PET, de alumínio e de vidro para refrigerantes no Brasil variando a taxa de reciclagem dos materiais**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004.

VIEIRA, G. ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE ARMAZENAGEM, A GRANEL, DE CAFÉ BENEFICIADO EM SILO METÁLICO MODULAR. p. 147, 2001.

WANG, L. et al. A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: A China study. **Applied Energy**, v. 249, p. 37–45, 2019.

WANG, Y. et al. Simple one-step synthesis of woven amidoximated natural material bamboo strips for uranium extraction from seawater. **Chemical Engineering Journal**, v. 425, p. 131538, 2021.

WEISSER, D. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. **Energy**, v. 32, n. 9, p. 1543–1559, 1 set. 2007.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Nuclear Fuel Report: Global Scenarios 2019-2040 - World Nuclear Association**. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/our-association/publications/publications-for-sale/nuclear-fuel-report.aspx>>. Acesso em: 6 set. 2021a.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Nuclear Power Reactors - World Nuclear Association**. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>>. Acesso em: 17 set. 2021b.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Uranium Supplies: Supply of Uranium - World Nuclear Association**. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx>>. Acesso em: 8 set. 2021c.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Uranium Enrichment | Enrichment of uranium - World Nuclear Association**. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx>>. Acesso em: 12 set. 2021d.

APÊNDICE A

- a. Tabela usada como fluxo de entrada para a avaliação do ciclo de vida do sistema contendo fonte hidráulica

Tabela 6 – Entradas do sistema de fonte hidrelétrica.

Entrada	Unidade	Valor
Potencial de energia (no reservatório hidrelétrico) convertido	MJ	$3,79.10^3$
Regiões não alpinas de Reservatório de usina hidrelétrica	Item	$4,04.10^{-10}$
Óleo lubrificante	Kg	$7,56.10^{-3}$
Lago de ocupação, artificial	m^2	$3,45.10^1$
Transformação da floresta não especificada	m^2	$2,30.10^{-1}$
Transformação para área industrial	m^2	$2,30.10^{-3}$
Transformação em lago artificial	m^2	$2,28.10^{-1}$
Volume do reservatório ocupado	m^2	$1,50.10^2$
A turbina de água usa o RoW de origem natural não especificado	M^3	$8,10.10^3$

Fonte: Do autor (2021)

- b. Tabela usada como fluxo de saída para a avaliação do ciclo de vida do sistema contendo fonte hidráulica

Tabela 7 – Saídas do sistema de fonte hidrelétrica

Saídas	Unidade	Valor
Dióxido de carbono, do solo ou estoque de biomassa	Kg	$2,85.10^1$
Eletricidade, alta tensão	MWh	$1,00.10^3$
Metano, não fóssil	Kg	$1,36.10^0$
Óleo mineral residual	Kg	$1,83.10^{-4}$
Óleo mineral residual	Kg	$7,38.10^{-3}$
Água	m^3	$2,92.10^5$
Água, RoW	m^3	$8,07.10^3$

Fonte: Do autor (2021)

APÊNDICE B

- a. Tabela usada como fluxo de entrada para a avaliação do ciclo de vida do sistema contendo fonte eólica

Tabela 8 – Entradas do sistema de fonte eólica.

Entrada	Unidade	Valor
Energia, cinética (no vento), convertida	MJ	$3,87 \cdot 10^0$
Óleo lubrificante	Kg	$5,50 \cdot 10^{-5}$
Conexão de rede de turbina eólica, 4,5 MW, em terra	Item	$7,76^{-9}$
Turbina eólica, 4,5 MW, em terra	Item	$7,76 \cdot 10^{-9}$

Fonte: Do autor (2021)

- b. Tabela usada como fluxo de saída para a avaliação do ciclo de vida do sistema contendo fonte eólica

Tabela 9 – Saídas do sistema de fonte eólica

Saídas	Unidade	Valor
Eletricidade, alta tensão	MWh	$1,00 \cdot 10^0$
Lixo de óleo mineral	kg	$5,50 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Do autor (2021)