



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



AMADEU JUNIOR DA SILVA FONSECA

**ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA UMA
TERMOELÉTRICA NO NORDESTE BRASILEIRO:
EVIDÊNCIAS ECONÔMICAS SOB CONDIÇÕES DE RISCO**

**JOÃO PESSOA - PB
2022**

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / Nº 94

AMADEU JUNIOR DA SILVA FONSECA

**ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA UMA TERMOELÉTRICA NO
NORDESTE BRASILEIRO: EVIDÊNCIAS ECONÔMICAS SOB CONDIÇÕES DE
RISCO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior
Orientador

**JOÃO PESSOA - PB
2022**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F676a Fonseca, Amadeu Junior da Silva.

Alternativas energéticas para uma termoelétrica no
Nordeste brasileiro : evidências econômicas sob
condições de risco / Amadeu Junior da Silva Fonseca. -
João Pessoa, 2022.

122 f. : il.

Orientação: Luiz Moreira Coelho Junior.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia renovável. 2. Energia - Economia. 3.
Energia - Fontes alternativas. 4. Termoelétrica - Óleo
combustível. I. Coelho Junior, Luiz Moreira. II. Título.

UFPB/BC

CDU 502.174.3(043)

AMADEU JUNIOR DA SILVA FONSECA

**ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA UMA TERMOELÉTRICA NO
NORDESTE BRASILEIRO: EVIDÊNCIAS ECONÔMICAS SOB CONDIÇÕES DE
RISCO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de Julho de 2022.

Prof. Dr. Dorel Soares Ramos

POLI/USP

Prof. Dr. Luiz Célio Souza Rocha

IFNMG


Dr. Roberto Castro

MRTS Consultoria e Engenharia


Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior
Orientador

**JOÃO PESSOA – PB
2022**

Pois Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas.
A Ele seja a glória para sempre! Amém.
Romanos 11:36

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais uma etapa concluída. À minha esposa, minha família e amigos por todo apoio.

Ao professor Dr. Luiz Moreira pela dedicação, paciência e orientação na condução deste trabalho. Ao professor Dr. Dorel Ramos e o Dr. Roberto Castro pela oportunidade de desenvolver este trabalho a partir do “P&D – O Futuro das Usinas Termelétricas com Perspectiva de Final de Contrato de Compra e Venda de Energia no Setor Elétrico Brasileiro”, financiado pela Centrais Elétricas da Paraíba S.A – EPASA. Sou grato por todos os ensinamentos que certamente contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

À Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia – FDTE, que por meio do incentivo financeiro, acolhimento e apoio, me proporcionou desenvolver esta pesquisa com dedicação exclusiva.

Por fim, à Universidade Federal da Paraíba – UFPB, por todo conhecimento adquirido ao longo de vários anos, e a todos os professores e colaboradores que fizeram parte da minha trajetória. Que Deus abençoe cada um de maneira única e especial.

RESUMO

Em virtude das metas globais de descarbonização, há constantes debates sobre o uso dos combustíveis fósseis, as fontes renováveis e o processo de transição energética. No início dos anos 2000 ocorreram leilões de contratação de termoeletricas a óleo combustível no Brasil, para garantir a manutenção e a segurança energética do Sistema Interligado Nacional (SIN). Na década de 2020 haverá o término destes contratos e muitas usinas térmicas enfrentarão o descomissionamento ou readequação do plano de negócio. Esta dissertação analisou a viabilidade econômica sob condições de risco de uma termoeletrica a óleo combustível em término de contrato de suprimento de energia no Brasil. Mais especificamente (i) realizou uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) a respeito das perspectivas das termoeletricas na transição energética, sob a ótica da economia circular; (ii) analisou o custo de capital sob condições de risco para termoeletricas no Brasil; (iii) Analisou a desmobilização sob condições de risco para uma termoeletrica a óleo combustível no Brasil, e; (iv) analisou a viabilidade econômica sob condições de risco de uma termoeletrica a óleo combustível no Brasil, visando a substituição do sistema de aquecimento dos tanques de armazenamento de combustível. Para a RSL utilizou a bibliometria e análise de conteúdo. Para as análises econômicas, levantou-se as demonstrações financeiras do estudo de caso e aplicou-se via Simulação de Monte Carlo (SMC) os indicadores de avaliação econômica como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), *Capital Asset Pricing Model* (CAPM), *Weighted Average Cost of Capital* (WACC), *Levelized cost of electricity* (LCOE) e *break even point*. Os principais resultados mostraram a importância das termoeletricas para a segurança energética, revelando os projetos de modernização, implantação, descomissionamentos, sistemas híbridos, além de aspectos da economia circular que visam elevar a eficiência das usinas e ao mesmo tempo reduzir impactos ambientais; O custo de capital estimado para as termoeletricas foi um WACC de 11,13% a.a., observado pelo cenário local, e 10,32% a.a., pelo cenário internacional. As chances do WACC local ser no máximo 11,13% a.a. foi de 68,30% e o do WACC global ser no máximo 10,32% a.a. foi de 48,21%. Por efeito do risco Brasil, o custo de capital local foi maior quando comparado ao cenário internacional; os cenários do descomissionamento da termoeletrica mostraram êxito de 100%, em que o VPL variou de R\$103,73 a 109,73 milhões e a TIR entre 13,55% a.a. e 13,68% a.a., superior ao WACC. Com as chances do VPL ser maior que zero, afastou-se a inviabilidade do empreendimento; no estudo econômico da modernização e substituição da caldeira, a receita de equilíbrio calculada variou entre R\$55,00 e R\$66,70 milhões para o uso da tecnologia Fresnel e entre R\$55,10 e R\$70,60 para o uso da caldeira. O VPL mostrou a aceitação de ambos os sistemas. Sob a perspectiva do CAUE e LCOE a tecnologia Fresnel foi economicamente superior, apesar do elevado custo inicial. Diante do resultado dos VPLs, foi mais satisfatório adquirir o sistema Fresnel. Conclui-se que foi possível estabelecer uma discussão mais realista nas análises econômicas, auxiliando na orientação de políticas públicas, investidores, contribuindo para a segurança energética e o futuro das termoeletricas a óleo combustível se a continuidade da operação for viabilizada.

Palavras-Chave: Economia da energia, fontes alternativas, tomada de decisão.

ABSTRACT

Due to the global decarbonization goals, there are constant debates about the use of fossil fuels, renewable sources and the energy transition process. In the early 2000s, there were auctions for the contraction of fuel oil thermoelectric plants in Brazil, to ensure the maintenance and energy security of the National Interconnected System (SIN). In the 2020s, these contracts will end and many thermal plants will face the decommissioning or readjustment of the business plan. This dissertation analyzed the economic viability under risk conditions of a fuel oil thermoelectric plant at the end of an energy supply contract in Brazil. More specifically (i) carried out a Systematic Literature Review (RSL) regarding the perspectives of thermoelectric plants in the energy transition, from the perspective of the circular economy; (ii) analyzed the cost of capital under risk conditions for thermoelectric plants in Brazil; (iii) Analyzed the demobilization under risk conditions for a fuel oil thermoelectric plant in Brazil, and; (iv) analyzed the economic feasibility under risk conditions of a fuel oil thermoelectric plant in Brazil, aiming at replacing the heating system of the fuel storage tanks. For RSL, bibliometrics and content analysis were used. For the economic analyses, the financial statements of the case study were raised and the economic evaluation indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Annual Cost were applied via Monte Carlo Simulation (SMC). Equivalent Uniform (CAUE), Capital Asset Pricing Model (CAPM), Weighted Average Cost of Capital (WACC), Levelized cost of electricity (LCOE) and break even point. The main results showed the importance of thermoelectric plants for energy security, revealing the projects for modernization, implementation, decommissioning, hybrid systems, as well as aspects of the circular economy that aim to increase the efficiency of plants and at the same time reduce environmental impacts; The estimated cost of capital for the thermoelectric plants was a WACC of 11.13% p.a., observed in the local scenario, and 10.32% p.a., in the international scenario. The odds of the local WACC are at most 11.13% p.a. was 68.30% and the global WACC was at most 10.32% p.a. was 48.21%. As a result of the Brazil risk, the cost of local capital was higher when compared to the international scenario; the thermoelectric decommissioning scenarios showed a 100% success, in which the NPV ranged from R\$103.73 to 109.73 million and the IRR between 13.55% p.a. and 13.68% p.a., higher than the WACC. With the chances of the NPV being greater than zero, the unfeasibility of the enterprise was ruled out; in the economic study of boiler modernization and replacement, the calculated break-even revenue ranged between R\$55.00 and R\$66.70 million for the use of Fresnel technology and between R\$55.10 and R\$70.60 for the use of the boiler. The NPV showed the acceptance of both systems. From the perspective of CAUE and LCOE, Fresnel technology was economically superior, despite the high initial cost. In view of the result of the NPVs, it was more satisfactory to acquire the Fresnel system. It is concluded that it was possible to establish a more realistic discussion in economic analyses, helping to guide public policies, investors, contributing to energy security and the future of fuel oil thermoelectric plants if the continuity of the operation is made possible.

Keywords: Energy economy, alternative sources, decision making.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	11
1.1 INTRODUÇÃO.....	11
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo geral.....	13
1.2.1 Objetivos específicos.....	13
2. ARTIGO 1 - PERSPECTIVA DAS TERMOELÉTRICAS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: UMA REVISÃO SOB A ÓTICA DA ECONOMIA CIRCULAR.....	14
2.1 INTRODUÇÃO.....	16
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
2.4 CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS	40
3. ARTIGO 2 - EVIDÊNCIA EMPÍRICA DO CUSTO DE CAPITAL PARA TERMOELÉTRICAS NO BRASIL SOB CONDIÇÕES DE RISCO.....	46
3.1 INTRODUÇÃO.....	48
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.2.1 Objeto de Estudo.....	50
3.2.2 Desenvolvimento do modelo.....	50
3.2.3 Identificação de risco (input).....	50
3.2.4 Identificação das variáveis de análise ou variáveis de saída (output).....	52
3.2.5 Simulação e Análises dos Modelos	54
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.4 CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS	62
4. ARTIGO 3 - ANÁLISE ECONÔMICA SOB CONDIÇÕES DE RISCO DO DESCOMISSIONAMENTO EM TERMOELÉTRICAS A ÓLEO COMBUSTÍVEL NO BRASIL	64
4.1 INTRODUÇÃO.....	66
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	68
4.2.1 Objeto de Estudo.....	68
4.2.2 Desenvolvimento do modelo.....	68
4.2.2.1 Demonstrações financeiras.....	68
4.2.2.2 Fluxo de Caixa Livre da Firma (FCLF).....	69
4.2.2.3 Plano de descomissionamento	70

4.2.3 Identificação de risco ou variáveis de entrada	72
4.2.4 Identificação das variáveis de análise ou variáveis de saída.....	73
4.2.5 Simulação e análise dos modelos	74
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.4 CONCLUSÃO.....	83
REFERÊNCIAS	84
5. ARTIGO 4 - ANÁLISE ECONÔMICA DE UMA TERMOELÉTRICA A ÓLEO COMBUSTÍVEL COM AUXÍLIO DE UM SISTEMA SOLAR TÉRMICO SOB CONDIÇÕES DE RISCO.....	86
5.1 INTRODUÇÃO.....	88
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	89
5.2.1 Objeto de Estudo.....	89
5.2.2 Desenvolvimento da revisão da literatura: Refletor linear Fresnel (RLF)	90
5.2.3 Desenvolvimento do modelo: Viabilidade econômica e técnica.....	90
5.2.4 Identificação das variáveis de risco (input)	94
5.2.5 Identificação das variáveis de saída (output)	95
5.2.6 Simulação e análise dos modelos	96
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
5.3.1 Revisão da Literatura: Refletor Linear Fresnel (RLF).....	97
5.3.2 Análise de viabilidade técnica e econômica.....	98
5.4 CONCLUSÃO.....	108
REFERÊNCIAS	109
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
REFERÊNCIAS	114

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO

As economias emergentes nas últimas décadas experimentaram um grande salto de crescimento. Em consequência, muitas dessas economias têm causado forte pressão sobre os recursos naturais e meio ambiente. Esse fato chamou a atenção para novas discussões, mudanças e estratégias que sejam capazes de mitigar os danos e degradação dos recursos, garantindo o bem-estar das gerações futuras (ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT - OECD, 2019).

Apesar disso, a produção de energia baseada em combustíveis fósseis continua sendo um grande contribuinte para poluição do ar e emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) em muitos países (OECD, 2019). Não obstante, o investimento em energias renováveis vem crescendo rapidamente, estimulando cada vez mais leilões de energias renováveis. Consequentemente, outro fator que aponta para redução dos combustíveis fósseis são as possíveis mudanças climáticas e falta de recursos hídricos (CRAIG et al., 2018). A diversificação da matriz energética é um elemento importante para a segurança do sistema elétrico (OECD, 2019). No Brasil, a matriz elétrica é composta por 74,5% de fontes renováveis (hidráulica, eólica e solar) e 25,5% de combustíveis fósseis. No detalhe, 64,9% da matriz energética é composta somente pela fonte renovável hidráulica. As demais fontes são distribuídas em: biomassa (8,4%), eólica (8,6%), solar (1%), gás natural (9,3%), derivados de petróleo (2%), carvão e derivados (3,3%) e nuclear (2,5%) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2020).

Atualmente no Brasil existem 25 usinas termoeletricas (UTE) a óleo combustível em operação, com autorização ou concessão, totalizando 3,5 GW de potência outorgada. Destas, 13 usinas, que correspondem a 52% do total, encontram-se no Nordeste, com uma participação de potência outorgada em 2,3 GW (Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, 2021). Após a crise do apagão em 2001, a contratação de energia das UTEs ocorreu em complementação à geração hidrelétrica para equilíbrio do balanço entre oferta e demanda de energia elétrica (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS, 2008). Criado em 1988, o ONS busca atender a otimização energética e a segurança energética do país. Desse modo, é realizada a gestão dos reservatórios das usinas hidrelétricas e a determinação dos despachos das termoeletricas em caso de necessidade (EPE, 2016).

Pela dificuldade de construção de novos reservatórios, devido à expansão das fontes renováveis não controláveis e intermitentes (eólica e solar fotovoltaica), surge um grande desafio para operação e segurança do Sistema Interligado Nacional (SIN). Fato este, que ressalta a importância da diversificação entre as fontes dentro da matriz energética nacional, de modo a garantir a confiabilidade e atendimento da demanda energética (EPE, 2016).

Outro motivo está associado ao planejamento estratégico do Governo, onde existe a projeção de evolução da matriz elétrica brasileira com intensificação da capacidade instalada de geração a partir de fontes renováveis (EPE, 2020). Lund e Mathiesen (2012) expõem que as termoeletricas ainda irão desempenhar papel relevante durante o processo de transição energética para garantir a segurança e estabilidade do sistema. Todavia, várias usinas movidas a combustíveis fósseis estão no final de seus ciclos operacionais de vida útil. Em um futuro próximo, tais empreendimentos enfrentarão a paralisação permanente e mesmo com novas instalações ou modernizações acabarão atingindo o desligamento definitivo (INVERNIZZI et al., 2019).

Nesse cenário, a pesquisa tem como objetivo mapear alternativas para as usinas termoeletricas a óleo combustível, em virtude de potenciais projetos de desmobilização, *retrofit* (conversão/reforma para outras fontes de geração), como também eventuais substituições de tecnologias para garantia da continuidade dos empreendimentos.

Esta dissertação foi desenvolvida no formato de quatro artigos. O primeiro artigo realiza uma análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura como referencial teórico, com ênfase na perspectiva das termoeletricas no contexto de transição energética, sob a ótica da economia circular, utilizando as bases de dados *Web Of Science* e *Scopus*, no período de 2010 a 2019. O segundo artigo analisa empiricamente o custo de capital da termoeletrica sob condições de risco. O terceiro artigo analisa a viabilidade econômica da desmobilização, sob condições de risco, observando o término de contrato de suprimento de energia. O quarto trabalho analisa a viabilidade econômica da substituição de um sistema de caldeira a gás natural para um sistema solar térmico, da tecnologia Fresnel.

Para as análises utilizaram-se os métodos: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Capital Asset Pricing Model* (CAPM), *Weighted Average Cost of Capital* (WACC) e Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), Custo Nivelado da Eletricidade (LCOE) (ASSAF NETO, 2014; BRANKER et al., 2011; (CASAROTTO e KOPPITKE, 2000; DAMODARAN, 2017; GUASTARROBA et al., 2009; GITMAN, 2010; LAPPONI, 2007; REZENDE e OLIVEIRA, 2008).

Para avaliar possíveis desvios nos resultados esperados, outros métodos são utilizados para analisar o risco na avaliação de projetos, entre eles, a Simulação de Monte Carlo (SMC), baseado em variáveis estocásticas cujos valores são gerados aleatoriamente dentro de uma distribuição de probabilidade que as representam (AQUILA et al., 2017; CORREIA NETO, 2009; LACERDA et al., 2020; LAMERS et al., 2015; SILVA et al., 2012).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade econômica sob condições de risco de uma termoeletrica a óleo combustível, em término de contrato de suprimento de energia, no Brasil.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Avaliar a perspectiva das termoeletricas na transição energética sob a ótica da economia circular, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL);
- b) Analisar as evidências empíricas do custo de capital sob condições de risco para as termoeletricas no Brasil, sob a ótica empresarial local e internacional, com base no CAPM e WACC;
- c) Analisar a viabilidade econômica do descomissionamento sob condições de risco em uma termoeletrica a óleo combustível no Brasil, e;
- d) Analisar a viabilidade econômica sob condições de risco de uma termoeletrica a óleo combustível no Brasil, visando a substituição do sistema de aquecimento dos tanques de armazenamento de combustível, no horizonte de 10, 15 e 25 anos.

2. ARTIGO 1 - PERSPECTIVA DAS TERMOELÉTRICAS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: UMA REVISÃO SOB A ÓTICA DA ECONOMIA CIRCULAR

RESUMO

O crescimento da população mundial fez aumentar a busca por políticas e alternativas para redução de externalidades ao meio ambiente. As termoelétricas tem sido alvo de debates e discussões sobre suas fontes convencionais e o modelo de transição energética para uma oferta de energia mais limpa, necessitando de mais investigação buscando mapear a fronteira do conhecimento. Desta forma, este artigo avaliou as perspectivas das termoelétricas na transição energética, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sob a ótica da economia circular. Utilizou-se a revisão bibliométrica e análise de conteúdo com as bases de dados mais difundidas no meio acadêmico, *Web Of Science* e *Scopus*. Os resultados contabilizaram 53 trabalhos, trazendo vários entendimentos para o âmbito de atuação das termoelétricas, a respeito de fontes alternativas, modelos de geração, abordagem da economia circular eecoinovação na estrutura dos empreendimentos, projetos de descomissionamentos (desmobilização) para usinas nucleares, modernizações (*retrofit*) voltadas para usinas movidas à combustíveis fósseis e projetos de implantação. A pesquisa contribuiu para exploração dos diversos temas que transpõem as usinas termoelétricas sob um olhar dos aspectos econômicos.

Palavras-chave: Termoelétricas, Economia circular, Bibliometria, Revisão sistemática.

ARTICLE 1 - PERSPECTIVE OF THERMOELECTRIC POWER IN THE ENERGY TRANSITION: A REVIEW FROM THE POINT OF CIRCULAR ECONOMY

ABSTRACT

The growth of the world population has increased the search for policies and alternatives to reduce externalities to the environment. Thermoelectric plants have been the subject of debates and discussions about their conventional sources and the energy transition model for a cleaner energy supply, requiring further investigation seeking to map the frontier of knowledge. In this way, this article evaluated the perspectives of thermoelectric plants in the energy transition, through a Systematic Review of the Literature (RSL) from the perspective of the circular economy. Bibliometric review and content analysis were used with the most widespread databases in the academic environment, Web Of Science and Scopus. The results accounted for 53 works, bringing various understandings to the scope of action of thermoelectric plants, regarding alternative sources, generation models, circular economy approach and eco-innovation in the structure of enterprises, decommissioning projects (demobilization) for nuclear plants, modernizations (retrofit) aimed at plants powered by fossil fuels and implementation projects. The research contributed to the exploration of the different themes that transpose thermoelectric plants from a perspective of economic aspects.

Keywords: Thermoelectric, Circular economy, Bibliometrics, Systematic review.

2.1 INTRODUÇÃO

Estima-se que a população mundial chegará a 10 bilhões de habitantes até 2050 e com ela, um conjunto de alternativas, políticas e compromissos que promovam a exploração dos recursos de modo sustentável. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Organização das Nações Unidas (ONU), compõem uma agenda prioritária até 2030 que visam melhorar a qualidade de vida da humanidade. Entre os 17 objetivos, destacam-se os objetivos, energia limpa e acessível (7), afim de garantir o acesso a fontes de energia sustentáveis para todos, e a ação contra a mudança global do clima (13), que perpassa a adoção de medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e os seus impactos (CRAIG et al., 2018; ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT - OECD, 2012; ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2022).

Nas últimas décadas, a dependência dos combustíveis fósseis e as externalidades causadas ao meio ambiente trouxeram reflexões sobre o modo de produzir e consumir energia. Atualmente, cerca de 80% do abastecimento de eletricidade no mundo é fornecido pelos combustíveis fósseis, utilizando o petróleo (4.497 Mtoe), o carvão (3.838 Mtoe) e o gás natural (3.282 Mtoe) (ESEN e YUKSEL, 2013; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2020; VAN et al., 2016). Zhou, Hanasaki e Fujimori (2018) estimaram o impacto das mudanças climáticas na economia global, com a redução na disponibilidade de água para geração hidroelétrica e perdas de 0,21% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial, entre 2070 a 2095.

A preocupação com as mudanças climáticas visa uma produção energética mais limpa para manter o desenvolvimento econômico em escala mundial. No processo de transição energética as termoeletricas irão desempenhar papel relevante para garantir a segurança e estabilidade do sistema elétrico. A transição de uma estrutura produtiva linear (produzir, consumir e eliminar) deve transformar-se para outra mais sustentável capaz de refletir todo o ciclo de vida das usinas, minimizando os impactos ambientais (LUND e MATHIESEN, 2012). Em sua essência, a economia circular promove a redução, reutilização e reciclagem dos produtos e materiais. Dentre os principais elementos estão a eficiência no uso dos materiais e energia; fornecimento e priorização da utilização de fontes renováveis; extensão do ciclo de vida dos produtos, trazendo novos modelos de negócios baseados em reutilização e esforços para minimização de resíduos (INSTITUT D'AMÉNAGEMENT ET D'URBANISME - IAU, 2013; JESUS et. al., 2018).

Na busca por alternativas energéticas economicamente viáveis, desde 1973, a participação do gás natural no fornecimento mundial de energia evoluiu de 16% para quase

23% (IEA, 2020). Com o progresso da tecnologia, esta fonte vem alcançando importantes ganhos de competitividade pela ótica dos preços (MELDRUM et al., 2013). Graus e Worrel (2009) atestam como a mudança do carvão para o gás natural na União Europeia contribuiu para redução de 920g CO_2/kWh em 1990 para 720 g/kWh em 2005. Na China, os incentivos do governo reforçam a transição energética mediante modernização (*retrofit*) das usinas movidas a carvão com implantação de óleo combustível (LIN; XU; XIA, 2019). A Alemanha inseriu o biogás para amenizar impactos na matriz energética (LAUER et al, 2017).

As energias eólica e solar ainda apresentam grandes desafios, pela variabilidade e qualidade dos recursos, que acabam cedendo espaço para utilização das termoelétricas, pela flexibilidade e confiabilidade na geração de eletricidade (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - DOE, 2015). Na União Europeia, a biomassa corresponde a aproximadamente 60% da geração de energia. Além de reduzir a dependência externa, faz parte da agenda 2030, que objetiva diminuir os impactos climáticos. A tecnologia de captura e armazenamento de carbono em usinas é objeto de pesquisa e desenvolvimento desde 2013, apesar da baixa escala e viabilidade econômica, o conjunto de tecnologias atribuída a capturar, transportar e armazenar evitam que o CO_2 chegue à atmosfera, sendo seu uso importante para redução dos gases (EUROPEAN COMMISSION - EC, 2021).

A identificação da relevância das termoelétricas no contexto de transição energética, traz a necessidade de estudos norteadores para pesquisadores, investidores, governantes, formuladores de políticas públicas e outros interessados. Diante disso, em busca de compreender a fronteira do conhecimento sob os aspectos econômicos das alternativas energéticas na geração térmica para alcançar as metas globais, este artigo avaliou as perspectivas das termoelétricas na transição energética, por meio de uma revisão sob a ótica da economia circular.

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) foi usada para identificar, avaliar e interpretar os trabalhos correlatos ao tema. Para filtragem das publicações empregou-se o método da abordagem qualitativa (SCHMIDT, 2008). A bibliometria contribuiu para o mapeamento dos trabalhos científicos, garantindo uma melhor análise das estruturas intelectual, social e conceitual da pesquisa científica de um determinado período. Mapeou a estrutura dinâmica das publicações desenvolvidas pelos indivíduos, instituições, países e avaliou o desempenho das mesmas (ZUPIC, 2015).

No âmbito de estudos sobre a economia circular, a RSL vem sendo empregada amplamente por vários pesquisadores, a fim de sistematizar estudos disponíveis em diversas

áreas do conhecimento (BEZERRA et al., 2020; CALZOLARI et al., 2021; WASSERBAUR et al., 2022).

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi organizada em três estágios conforme Tranfield et al. (2003): (i) planejamento, (ii) aplicação da metodologia, (iii) descrição e divulgação.

Estágio 1: Planejamento

Na fase exploratória, as palavras-chave apropriadas foram cruciais no processo de investigação. A análise das citações mede o impacto, demonstra influência e relevância para outros pesquisadores. A delimitação da área do objeto em estudo serve para verificar se há relevância do tema, reforçar se a pesquisa pode seguir de forma lógica e revelar a concentração de grupos de pesquisas ou não em uma determinada região. Tais grupos podem emergir, crescer ou desaparecer ao longo do tempo por questões diversas, trazendo questionamentos, olhar crítico e utilidade à pesquisa. Nesta etapa verificou-se a amplitude do tema pesquisado para ter uma visão geral nos próximos estágios da pesquisa (CHABOWSKI et al., 2013; TRANFIELD et al., 2003; ZUPIC, 2015).

Estágio 2: Aplicação da metodologia

Para o levantamento da amostra utilizaram-se as bases da *Web of Science (WOS)* e *Scopus*, no período 2010 a 2019. Associou-se à pesquisa em dois grupos: No “grupo 1”, utilizando os subcampos “título-título”, inseriu na “linha 1” os termos (*"THERMAL POWER PLANT*" OR "OIL POWER PLANT" AND "POWER GENERATION" OR "RETROFIT*" OR "MODERNIZA*" OR "DECOMMISSION*" OR "ANCILLARY SERV*" OR "HYBRID* SYSTEM*"*) e na “linha 2” (“ECONOM*” AND “VIABILIT*” OR “FEASIBILIT*” OR “EVALUA*” OR “ASSESSMENT”). No “grupo 2” com os subcampos “tópico-título”, utilizou-se a mesma “linha 1” do grupo 1 e na “linha 2” foram introduzidas as palavras (*"CIRCULAR ECONOM*" OR "INDUSTRIAL ECOLOG*"*).

Conforme Tranfield et al. (2003), para o tratamento dos dados e seleção dos estudos fez-se os procedimentos de tabulação e unificação das bases. No processo de filtragem e refinamento, utilizaram-se os critérios de inclusão e exclusão por: idiomas (português e inglês); tipos de documentos (artigos ou artigos de revisão); réplicas; publicações com acesso livre para

pesquisadores; categorias; leitura de títulos, resumos e palavras-chave. No tratamento dos dados observaram-se informações de títulos, resumos, autores, ano, número de citações, categorias, métodos, periódicos, fontes de energia e aderência com tema da pesquisa, chegando a uma amostra final. Fez-se uma análise de conteúdo, método largamente utilizado, flexível com abordagem sistemática sob uma abordagem quantitativa e qualitativa (WHITE e MARSH, 2006).

Estágio 3: Descrição e divulgação

Após compilação dos trabalhos, foi realizada a análise descritiva agregando categorias por autores, países que estão realizando mais pesquisas sobre a temática, o ano de publicação, os tipos de documentos, número de artigos publicados ao longo dos anos, quais revistas obtiveram maior relevância e quais métodos e linhas de pesquisa estão em evidência (TRANFIELD et al., 2003).

Com as informações extraídas os dados foram tabulados com o tema da pesquisa e seus resultados são apresentados a partir da análise bibliométrica e análise de conteúdo. A análise quantitativa foi empregada para evidenciar os estudos por meio de tabelas e mapas (KITCHENHAM, 2004; ZUPIC, 2015). Em suma, os dados quantitativos e qualitativos traduziram-se na criação de categorias e formação de grupos, representados na Tabela 2.1 com temas semelhantes ou outras categorias a fim de permitir melhor compreensão e ampliação do conhecimento sobre a temática (BOYACK e KLAVANS, 2010; ELO e KYNGÄS, 2008).

Tabela 2.1 Análise de conteúdo por grupos temáticos.

Grupo	Temática
Grupo 1	Modelo e fonte de geração
Grupo 2	Tipos de projetos
Grupo 3	Economia circular

Fonte: Autor (2022).

A representação espacial foi construída através de um mapa geográfico dos países, tabelas e figuras com o propósito de demonstrar a interpretação visual das análises realizadas nas etapas anteriores (KITCHENHAM, 2004). A exibição do mapa dos países de acordo com a quantidade de publicações foi produzida a partir do *Excel*, plataforma *Bing*, em escala de três cores. A distribuição espacial compreendeu o período da pesquisa, apresentada por valor mínimo, médio e máximo. A rede bibliométrica foi desenvolvida por meio do *software*

VOSviewer (versão 1.6.16), e teve o objetivo de identificar a co-ocorrência de palavras-chaves entre as publicações e suas conexões para formação de *clusters* temáticos, fornecendo uma visão ampla, além de possíveis lacunas para futuras pesquisas. Foram selecionadas as palavras-chave com no mínimo 5 vezes de ocorrência nos trabalhos.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2.1 mostra o processo de filtragem e refinamento da pesquisa no período de análise. Como resultado da busca inicial com uso das palavras-chave nas bases de dados WOS e *Scopus* foram encontrados 669 trabalhos.

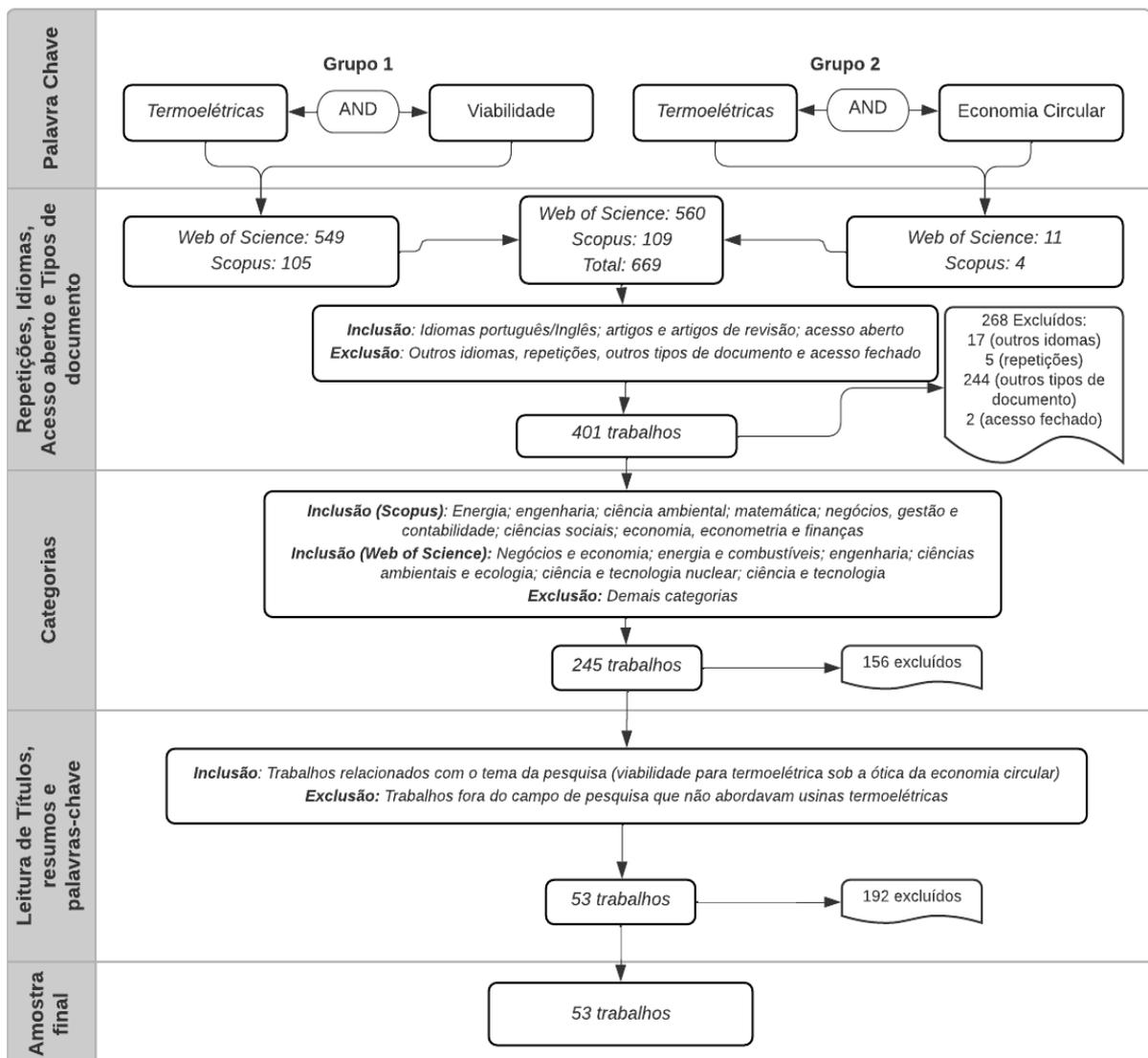


Figura 2.1. Refinamento da pesquisa para RSL, por meio das bases WOS e *Scopus*.

Fonte: Autor (2022).

Na plataforma WOS ao final da pesquisa no “grupo 1” foram encontrados 549 trabalhos, e no “grupo 2” foram descobertos 11 trabalhos, contabilizando 560 trabalhos. A plataforma *Scopus* retornou 105 trabalhos no “grupo 1” e 4 no “grupo 2”, totalizando 116 trabalhos. Na etapa seguinte de filtragem, foram mantidos 401 trabalhos sob os critérios de busca por repetições, idiomas (inglês e português), tipos de documentos e acessibilidade. A seleção por categorias associadas ao tema e área da pesquisa, contabilizou 245 trabalhos.

Após a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave refinando os artigos que verdadeiramente estavam compatíveis com a área de interesse da pesquisa, a amostra final teve 53 trabalhos. Durante a pesquisa apenas um trabalho foi identificado com relação direta entre termoelétricas e economia circular, onde observou-se a tendência de exploração do tema no contexto de transição energética das usinas termoelétricas, em virtude das preocupações com o meio ambiente, mudanças climáticas e aplicação dos conceitos da economia circular para melhoria de processos e competitividade no mercado.

A Figura 2.2 mostra a distribuição espacial das publicações por país em relação ao período da pesquisa, 2010 a 2019, a pesquisa abrangeu 19 países.

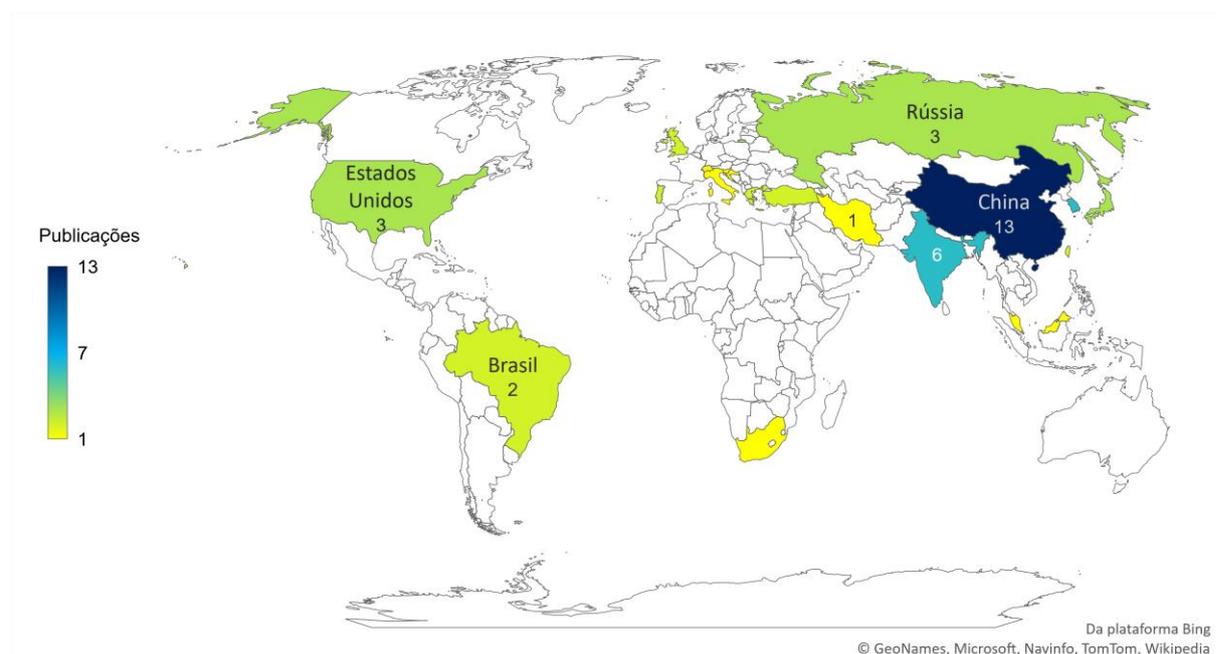


Figura 2.2. Distribuição espacial das publicações por país.

Fonte: Autor (2022).

A China foi o país com maior concentração, 13 trabalhos, equivalente a 25% do total. Índia e Coreia do Sul contabilizaram 6 trabalhos, concentrando 11%, cada um. No total, estes três países (China, Coreia do Sul e Índia) centralizaram 47% de toda pesquisa. Outros países

como Estados Unidos, Japão, e Rússia retornaram 3 trabalhos, cuja participação individual foi de 6%. Brasil, Grécia, Portugal, Reino Unido, Taiwan e Turquia retornaram 2 trabalhos, cada um deles, configurando 4%. Os países que obtiveram apenas 1 trabalho, com participação de 2% foram, África do Sul, Croácia, Eslovênia, Irã, Itália, Malásia e Suíça.

A Figura 2.3 apresenta a evolução anual e acumulada das publicações, artigos e artigos de revisão, e citações sob o campo de pesquisa. Dos 53 documentos, 50 eram artigos (94%) e 3 eram artigos de revisão (6%).

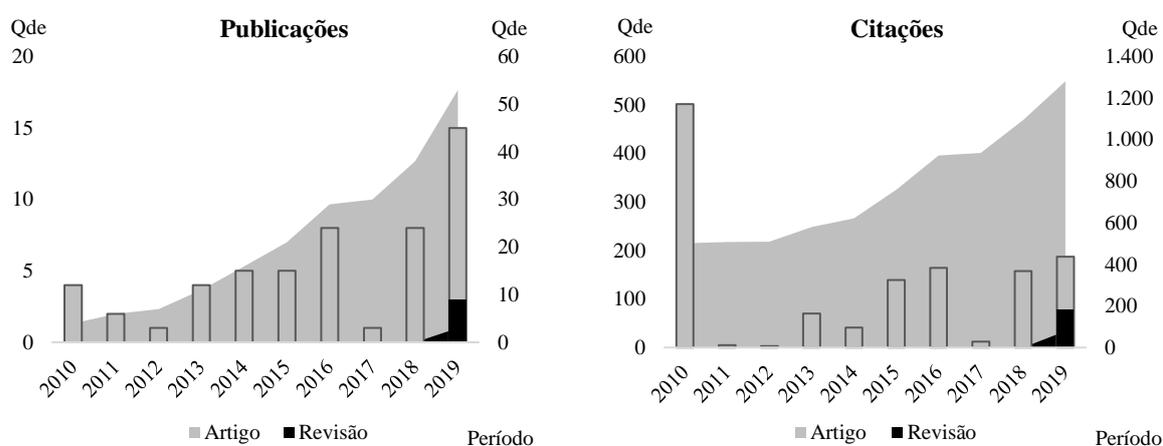


Figura 2.3. Evolução anual e acumulada de publicações e citações.

Fonte: Autor (2022).

Dos quatro trabalhos publicados em 2010, três foram de grande relevância na pesquisa, somando 492 citações, a maior da série histórica. Destaca-se o trabalho mais citado Park, Sarkis e Wu (2010), publicado pela *Journal of Cleaner Production*, sobre o tema economia circular, recebeu 199 citações. Investigaram os desafios e oportunidades de como as empresas e as organizações poderiam atingir um melhor equilíbrio em relação ao crescimento econômico e a gestão ambiental no contexto de ascensão da economia circular. O estudo foi realizado na China, sob a visão de modernizações e práticas sustentáveis. Mesmo sem fazer menção às termoelétricas, os autores forneceram uma importante base acadêmica para desenvolvimento e aperfeiçoamento das boas práticas de gestão em relação à cadeia de suprimentos sustentáveis para países emergentes e em desenvolvimento.

Suresh, Reddy e Kolar (2010) foi o segundo mais citado (164 citações), que analisaram a viabilidade econômica de introduzir a energia solar em usinas termoelétricas a carvão na Índia. Na matriz energética do país, a base de carvão no país representa 52,3% do total. Com a demanda por energia renovável crescente, os autores verificaram a possibilidade de uso da

energia solar como fonte complementar para redução de consumo de combustível e emissões de gases, além de promover segurança energética. Os resultados mostraram poucos efeitos do ponto de vista econômico, contudo, apresentaram significativa redução no consumo de carvão, contribuindo com a causa ambiental. Os autores ressaltaram que com os novos avanços tecnológicos, materiais e implantação em larga escala de coletores solares os projetos podem ter viabilidade atestada em futuro próximo.

O terceiro mais citado de Liu, Lin e Lewis (2010) totalizou 129 citações e avaliou nove das quinze usinas em Taiwan em relação a eficiência energética, foi aplicado a metodologia de Análise Envoltória de Dados (DEA). O resultado da pesquisa demonstrou que todas as usinas operavam de forma eficiente, destacando maior eficiência para usinas com ciclo combinado do que usinas a vapor e a gás.

Em 2018, outro trabalho sob a temática da economia circular intitulado “*Eco-innovation in the transition to a circular economy: An analytical literature review*”, contabilizou 108 citações, sendo o mais citado entre 2011 e 2019, publicado pela revista *Journal of Cleaner Production*. O trabalho mostra a relação entre economia circular eecoinovação, onde a mudança para um novo modelo econômico voltado para economia circular requer soluções específicas, direcionadas pelos princípios da ecoinovação, que reflete não apenas em mudanças tecnológicas, mas também envolvendo transformações dinâmicas, de serviços e novos formatos organizacionais (JESUS et al., 2018).

Jesus et al. (2018) descrevem que mesmo com os atuais níveis de preocupação com processos de reciclagem, a produção de resíduos continua em grandes proporções de desequilíbrio. Portanto, uma nova estrutura econômica baseada na inovação abrangendo toda cadeia de valor é tida como grande aposta para redução de desperdícios, em materiais e energia. Nesses moldes, todos os agentes econômicos, inclusive o setor energético (usinas termoelétricas) como um todo, deverão implementar mudanças e custear novos investimentos para atender às exigências da atualidade.

Na temática de viabilidade econômica, em 2015, um trabalho realizado nos EUA recebeu 89 citações, publicado pela revista *Environmental Science and Technology* analisou a viabilidade econômica sobre o reaproveitamento do calor residual gerado pelas usinas termoelétricas, cujo objetivo era melhorar a eficiência no uso de combustível para usinas a carvão, gás natural ou nuclear (GINGERICH e MAUTER, 2015). O trabalho considerou a realização de *retrofit* para as usinas, associando que o aumento da eficiência por meio da melhor captura de calor tem impacto positivo no meio ambiente. A aplicação do conceito circularidade

traz o reaproveitamento e reutilização do calor para aperfeiçoamento dos processos, além disso, produzir retornos econômicos.

Bricl e Avsec (2019) também estimaram alternativas economicamente viáveis para usinas térmicas no cenário da política da União Europeia de 2030, utilizando cálculos analíticos e dados numéricos para simular as operações e demonstrar a aceitação dos projetos de investimento pelo uso combinado com energia solar térmica. Em 2016, a pesquisa com maior quantidade de citações (50), publicado pela revista *Journal of Cleaner Production*, relatou o caso na China de usinas térmicas ecoindustriais visando promover a produção limpa e sustentável de carvão. O trabalho avaliou o desempenho por meio da análise de multicritérios. Os resultados mostraram que as usinas atingiram o melhor desempenho, através da reciclagem de resíduos e emissão de poluentes (LI e ZHAO, 2016).

No trabalho foram aplicados os conceitos de economia circular e sustentabilidade, contribuindo para eficiência energética e redução das emissões por meio dos princípios “3R” de “reduzir”, “reutilizar” e “reciclar”. As usinas térmicas assumem o compromisso de reduzir consumo de recursos e emissão de poluentes fazendo uso de estratégias e planos de ação, especialmente sobre o uso do carvão, principal matéria-prima para geração de energia no país. Nota-se a relevância da economia circular no ambiente estratégico das usinas, alterando processos, investimentos e aspectos institucionais (ZHOU et al., 2014).

A Tabela 2.2 mostra a classificação das revistas por quantidade de trabalhos em cada uma em ordem de citações computadas. A pesquisa englobou 29 revistas dos mais variados campos de pesquisa, cobrindo pesquisas transdisciplinares sobre produção mais limpa, políticas para fornecimento de energia, tomada de decisão para formuladores de políticas, organizações governamentais e não governamentais, ciência ambiental e tecnologia ambiental, incluindo políticas ambientais, desenvolvimento de tecnologias, produtos, inovação, tecnologias sustentáveis, processos térmicos, utilização e conservação de energia. Os períodos contribuíram com o escopo do trabalho pela convergência ao tema das termoelétricas, aspectos da economia circular e viabilidade dos projetos de um modo geral.

As cinco revistas mais citadas foram a *Journal of Cleaner Production*, *Energy for Sustainable Development*, *Energy Policy*, *Environmental Science and Technology* e *Energy*. A *Journal of Cleaner Production* foi a revista de maior impacto na pesquisa com 7 trabalhos, totalizando 474 citações. A segunda revista de maior impacto por citação foi a *Energy for Sustainable Development*, onde foram encontrados dois trabalhos, um deles totalizou 147 citações.

Tabela 2.2. Periódicos da amostra por citação e publicação.

Revista	Citações	Publicações
Journal of Cleaner Production	474	7
Energy for Sustainable Development	170	2
Energy Policy	149	4
Environmental Science and Technology	106	2
Energy	59	3
Energies	54	4
Energy Science and Engineering	49	1
Solar Energy	41	1
Clean Technologies and Environmental Policy	33	2
Applied Thermal Engineering	32	1
Aerosol and Air Quality Research	30	2
Energy Sources, Part A: Recovery, Util. and Env. Effects	23	3
Renewable and Sustainable Energy Reviews	20	1
Sustainable Energy Technologies and Assessments	19	1
Annals of Nuclear Energy	18	5
Journal of Energy Res. Technology, Trans. of the ASME	16	1
International Journal of Environmental Research	14	1
Thermal Engineering	12	1
Environment and Planning A	10	1
International Journal of Energy Economics and Policy	10	1
Outras Revistas	21	9
Total	1.360	53

Fonte: Autor (2022).

A revista *Energy* apresentou três trabalhos, ao todo somaram 59 citações. Dois trabalhos publicados trouxeram contribuições significativas para a pesquisa. O primeiro, publicado em 2016, com 31 citações, intitulado “*Have market-oriented reforms improved the electricity generation efficiency of China's thermal power industry? An empirical analysis*” investigou o efeito de um programa lançado em 2013 na China, focado em reformas para melhoria da eficiência das usinas térmicas movidas a óleo, carvão e diesel. Os resultados apontaram baixa eficiência das usinas, como consequência dos novos sistemas de aquecimento em edifícios e por falta de licitações de preços para despachos eficientes. Tais aspectos deveriam ser observados para garantia dos níveis de eficiência das usinas termoelétricas no país (MENG et. al., 2016). O estudo mostrou o impacto dessa medida como forma de reduzir drasticamente o consumo de carvão na China.

O segundo trabalho da revista também realizado na China em 2016, contabilizou 22 citações, concentrou-se em usinas a carvão, onde os autores supõem que o carvão ainda será o

grande protagonista na geração de energia pela sua abundância e baixo custo em relação a outros combustíveis fósseis. A pesquisa ressalta que a melhor forma para maximizar os ganhos de capital, é buscando alternativas para redução de consumo dos combustíveis na geração da energia térmica (MA et al., 2016). Mostraram que por meio da recuperação de calor dos gases de exaustão da caldeira a economia de carvão alcançado foi bastante significativa entre três processos (Economizador de Baixa Temperatura - LTE, Aquecedor de Ar - SAH e Tubo de Derivação - BPF). Contudo, o processo BPF, apresentou maior desempenho técnico-econômico.

A Figura 2.4 apresenta os *clusters* temáticos da análise espacial de palavras-chave associadas ao tema sob a ótica da economia circular, através do *software VOSviewer*. De um total de 712 palavras-chave, 19 atenderam ao limite mínimo, ao final, o mapa bibliométrico apresentou cinco agrupamentos. Sendo os *clusters* 1 e 2 mais fortes, com 5 itens cada.

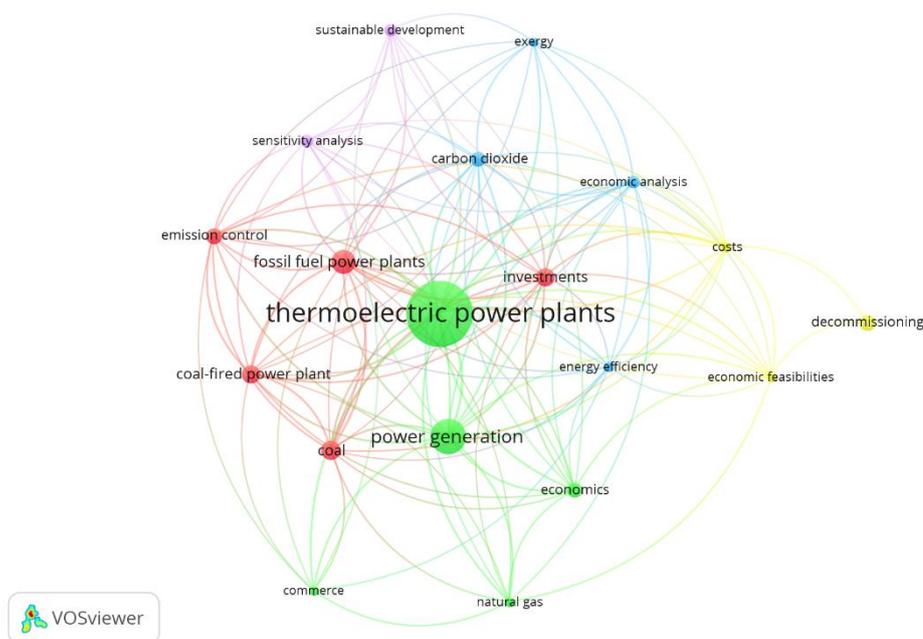


Figura 2.4. Rede de co-ocorrência de palavras-chave associadas às termoeletricas na transição energética sob a ótica da economia circular, no período de 2010 a 2019.

Fonte: Autor (2022).

Por se tratar de um tema amplo, a correlação das palavras-chave contribuiu para melhor entender as relações. Entre os 53 trabalhos, boa parte da amostra apresentou relação direta com as usinas termoeletricas. Destacaram-se a abrangência de diversas fontes utilizadas para geração

de energia, como o carvão, óleo, biomassa, calor, gás natural, células a combustíveis e os vários modelos híbridos.

O *cluster* 1, representado na cor vermelha, contém os termos e suas respectivas ocorrências “*fossil fuel power plants*” (13), “*coal*” (11) e “*coal-fired power plant*” (10), “*investments*” (10) e “*emission control*” (9), relacionados a grande quantidade de trabalhos que analisam usinas à carvão, investimentos para controle de emissões como meio de mitigação dos impactos ambientais.

Sobre o principal termo da rede, “*thermoelectric power plants*” (36), representado pelo *cluster* 2, cor verde no mapa, compreendeu conceitos relacionados a “*power generation*” (19), “*economics*” (8), “*natural gas*” (5) e “*commerce*” (5). Os artigos comportaram diversos estudos de geração com a transição para o gás natural. Outro estudo pontuou os desafios do comércio de gás natural no Brasil. Alguns trabalhos também abordaram questões climáticas e os principais impactos pela escassez de água dentro do setor energético.

O *cluster* 3, representado em azul, apresenta termos relacionados à “*carbono dioxide*” (8), “*economic analysis*” (7), “*energy efficiency*” (6), “*exergy*” (5), mostrando a concentração de temas ligados à poluição das termoeletricas, apresentando alternativas como o *retrofit* para melhoria de indicadores ambientais.

Sobre descomissionamento, o *cluster* 4, demonstrado em amarelo, contempla estudos sobre usinas nucleares, com o termo “*decommissioning*” (9) e outros relacionados, como “*costs*” (6) e “*economic feasibilities*” (5), representando publicações sobre viabilidade econômica, riscos humanos e impacto dos custos durante esse tipo de projeto. Apesar da concentração em usinas nucleares, foi possível extrair conceitos gerais e experiências que contribuem para projetos em outras fontes de energia.

O *cluster* 5 (roxo), com apenas dois termos “*sensitivity analysis*” (7) e “*sustainable development*” (7), correlaciona o método de análise de sensibilidade utilizado em diversas pesquisas de investimentos, custos, análises econômicas, além do desenvolvimento sustentável e controle de emissões.

Sob a ótica do tema economia circular, poucos trabalhos abrangeram o tema de forma específica para termoeletricas, contudo, contribuíram para o pensamento crítico de curto e médio prazo para formulação de estratégias e expectativas de mudanças para o longo prazo. O cenário de transição energética evidencia cada vez mais a necessidade de mudanças e novas diretrizes estratégicas para acomodação dos anseios de um bom uso dos recursos naturais.

A Tabela 2.3 apresenta o grupo 1 pela contemplação dos autores filtrados por estudos com fontes isoladas ou híbridas. Os trabalhos com modelo isolado no campo das energias renováveis retornaram três fontes energéticas: biomassa; geotérmica; e a captura e armazenamento de carbono (CCS). Estas, foram empregadas como alternativa para redução dos níveis de poluição, deram ênfase na viabilidade econômica e no apoio governamental para implementação dos projetos. Muitas pesquisas internacionais têm atuado na busca de alternativas focadas em reduzir as emissões de gases do efeito estufa, e conseqüentemente, mitigação de efeitos do aquecimento global. Diante desse cenário, surge como fonte valiosa e renovável, a biomassa, pelo forte potencial em substituir os combustíveis fósseis dentro da matriz energética. Além das preocupações com mudanças climáticas, surgem também o tema da segurança energética que deu grandes incentivos para exploração de fontes alternativas para geração de energia renovável diversificada.

Farouk et al. (2017), perceberam que vários países como Estados Unidos, Malásia e muitos da Europa realizaram grandes esforços para o aumento de atividades industriais pelo uso da biomassa. Os benefícios dos impactos ambientais e econômicos concentram-se em utilizar a biomassa de forma eficiente, através do menor custo, aperfeiçoamento logístico e demais processos para conversão em energia. Dentro da conjuntura de usabilidade surgiram diversos estudos sobre a biomassa em várias frentes. As principais, concentraram-se na base florestal, agrícola, estrume animal, oleaginosas, plantas, etc.

Sagani, Hagidimitriou e Dedoussis (2018) mostram o potencial uso da biomassa agrícola na Grécia como alternativa para reduzir o uso dos combustíveis fósseis, além da geração de emprego e renda para a comunidade. Outro estudo realizado por Mayer et. al. (2015) no Brasil avaliou a partir do uso da casca de arroz as vantagens comparativas do país para investir nessa fonte de energia, com potencial de gerar de 479,5MW a 322,7GWh por ano.

A energia geotérmica também é vista com grande capacidade para geração elétrica, no contexto de transição energética para fontes renováveis. Procesi (2014) mostra que o potencial não explorado no Chile, tem capacidade para fornecimento de 10.200 GWh/ano, podendo chegar à proporção de 30% da matriz energética. Na trajetória atual de transição energética Franki, Višković e Šapić (2019) avaliam a viabilidade de modernização de uma usina à carvão para *Carbon Capture and Storage* (CCS). A pesquisa revelou a viabilidade técnica, contudo ainda não é economicamente possível. Fatores cruciais como apoio governamental, ambiente regulatório e incentivos de mercado são apontados como meios de fomento à implementação de tais projetos.

Tabela 2.3. Tabela resumo dos trabalhos encontrados por modelo, fonte, autores, publicações e citações.

	Fonte	Autores	Publicações	Citações
Isolado	Não Renovável	Almeida et al. (2018), Bhangu, Pahuja e Singh (2015), Bylkin et al. (2011), Gupta e Tewari (2011), Guttikunda e Jawahar (2018), Jeong et al. (2014), Jeong et al. (2014), Jeong et al. (2016), Jeong et al. (2016), Jeong et al. (2019), Katsaprakakis et al. (2015), Khankari e Karmakar (2016), Khattak et al. (2018), Kiliç, Acarkan e Ay (2013), Li e Zhao (2016), Li et al. (2018), Li, Ma e Yang (2018), Ma et al. (2016), Miara et al. (2019), Park et al. (2016), Wang, Yan e Komonpipat (2019), Zhang et al. (2012), Zhang, Xia e Li (2014)	23	205
	Renovável	Franki, Višković e Šapić (2019), Mayer et al. (2015), Procesi (2014), Sagani, Hagidimitriou e Dedoussis (2019)	4	54
Híbrido	Não Renovável	Ahmadi et al. (2019), Aminov et al. (2016), Gingerich e Mauter (2015), Lin, Xu e Xia (2019), Liu, Lin e Lewis (2010), Liu, Lin e Lewis (2013), Mahmoudi et al. (2019), Meng et al. (2016), Reddy, Kaushik, e Tyagi (2014), Sethi (2015), Veselov et al. (2017), Wang et al. (2019), Xie et al. (2019), Ye, Sun e Huang (2019)	14	468
	Renovável	Cardoso, Silva e Eusébio (2019)	1	54
	Renovável e Não Renovável	Amirabedin e McIlveen-Wright (2013), Bricl e Avsec (2019), Cui e Zhao e Wu (2018), Fan et al. (2019), Heller e Gauché (2013), Liang et al. (2010), Semin et al. (2019), Suresh, Reddy e Kolar (2010), Zhou, Hanasaki e Fujimori (2018)	9	272

Fonte: Autor (2022).

Entre os estudos isolados com fontes não renováveis Li e Zhao (2016) apresentam o modelo de usinas térmicas ecoindustriais na China. Estas, empregam conceitos sustentáveis para reduzir poluentes e produzir energia mais limpa. A análise apontou para a eficácia do modelo e destacou o excelente desempenho das usinas dentro dessa nova perspectiva de atuação. Sob a ótica da sustentabilidade os trabalhos concentraram-se em métodos para avaliar os níveis de desenvolvimento sustentável das usinas, usando indicadores econômicos e a Análise Hierárquica (AHP).

Guttikunda e Jawahar (2018), avaliaram o impacto das usinas a carvão na saúde dos indianos. Devido à forte necessidade de expansão da capacidade energética no país, as emissões causarão impactos substanciais ao meio ambiente e à saúde humana. Os autores sugerem um cronograma de exigência para implementação de novas tecnologias para controlar os níveis de emissões.

Miara et al. (2019) mencionam a importância do gás natural no contexto de transição, mudanças climáticas e possíveis restrições à água. Enquanto outras termoelétricas a carvão e nucleares deixarão de existir, pelo uso intensivo de água, a implantação de plantas de ciclo combinado são mais promissoras e eficientes, fornecendo capacidade para reservas e geração flexível, complementando as fontes renováveis. Por ser uma fonte não renovável considerada como alternativa energética com notório destaque mundial, o gás natural deve ser um dos grandes protagonistas em políticas de incentivos governamentais que visam a redução das emissões, demonstrando bons indicadores de viabilidade econômica para usinas termoelétricas.

Katsaprakakis et al. (2015), propuseram estudar a viabilidade da introdução do gás natural em Creta, na Grécia, só a partir de 2011 quando os preços dos combustíveis siliciosos tiveram um aumento de aproximadamente 35%, em razão de um imposto estadual, a instalação de gás natural se tornou economicamente viável. Com isto, o custo anual de produção de eletricidade foi reduzido em 38%. Quanto aos benefícios ambientais, houve uma diminuição nas emissões anuais de gás carbônico em 54% em relação aos níveis existentes em 2013. Outro benefício advindo da introdução do gás natural seria a criação de novos postos de trabalhos, especialmente durante as obras de construção das instalações, aumentando a renda da população.

Almeida et al. (2018) analisaram a necessidade de se implementar o armazenamento de gás subterrâneo no Brasil, dado a grande volatilidade da demanda de gás do setor de energia, uma vez que a demanda de gás é maior do que a produção doméstica líquida, e por consequência depende fortemente de importações.

Os trabalhos com abordagem em modelos híbridos, têm recebido vários destaques pelo uso combinatório de fontes renováveis, não renováveis ou ambos para melhoria da eficiência técnica, econômica e produção de energia mais limpa. Cardoso, Silva e Eusébio (2019), analisaram economicamente uma usina de biogás com uso de biomassa florestal, como a perspectiva de produzir energia mais limpa. O estudo empregou VPL, TIR, Payback e realizou uma simulação de Monte Carlo para estimar o risco do projeto. Os resultados revelaram a viabilidade do projeto, contudo o desempenho econômico depende fortemente das vendas de energia.

Aminov et al. (2016) avaliaram a eficiência de uma usina convencional para o ciclo combinado a gás. Como resultado da modernização, houve melhoria no uso dos combustíveis, redução de emissões e a eficiência do modelo proposto foi de 58,28%, enquanto o ciclo convencional teve eficiência de 34,5%. Liu, Lin e Lewis (2010) também mostraram que usinas de ciclo combinado são mais eficientes quando comparadas a outras com modelo de energia a gás e a vapor.

Mahmoudi et al. (2019) avaliam o desempenho das usinas termoelétricas no Irã para conter problemas econômicos e ambientais. Como resultado, os autores sugerem a instalação de novos sistemas para elevação da capacidade de geração e redução de custos. As iniciativas tornam as usinas mais eficientes e reduziram as emissões que configuram um grande marco na avaliação de boas práticas sustentáveis. Wang et al. (2019) também enfatizam a necessidade de avaliação e otimização de sistemas operacionais para modernização das termoelétricas considerando o papel significativo na condição de transição energética.

No âmbito dos trabalhos híbridos com uso de fontes renováveis, não renováveis ou ambos se destacaram Suresh, Reddy e Kolar (2010) com uma avaliação de desempenho operacional de usinas termoelétricas em Taiwan com uso de carvão e energia solar térmica, sendo que em todos os modelos estudados houve melhoria da eficiência, reduzindo o uso de combustíveis fósseis no processo de geração. Em todos os casos, os estudos também se concentram na redução de emissões de gases e melhoria da relação com o meio ambiente.

Heller e Gauché (2013) avaliaram o sistema de armazenamento de uma usina térmica de ciclo combinado para aperfeiçoamento. Apesar da escassez de dados a planta de Concentração de Energia Solar (CSP) de ciclo combinado mostrou resultados favoráveis. Fan et al. (2019) realizaram duas análises de modernização para uma usina a carvão na China, que atualmente é o maior emissor de dióxido de carbono no mundo. O trabalho consiste em verificar a viabilidade de modernização pelo uso das fontes CCS versus a energia solar fotovoltaica, sob

a perspectiva das projeções para reduzir emissão de gases poluentes. O primeiro respalda-se na geração ambiciosa de energia limpa, o segundo na diversificação na distribuição de energia e redução do uso dos combustíveis fósseis predominante, o carvão. Os resultados mostraram certa vantagem na utilização da CCS pelo efeito de incentivos e a atual tarifa de eletricidade. Contudo, no longo prazo, a energia fotovoltaica tende a se tornar mais barata do que a energia a carvão com CCS. O uso combinado da biomassa e o carvão também se mostrou economicamente viável e aplicável para diversos tipos de termoelétricas. Em comparação com outras fontes de energia renováveis, de um modo geral, a biomassa demonstrou ser mais atrativa em relação ao aspecto financeiro (AMIRABEDIN e MCILVEEN-WRIGHT, 2013).

Diante do cenário global de incertezas ambientais, as pesquisas apontam o fortalecimento da matriz energética pela diversificação das fontes de energia, sem abandonar totalmente as usinas térmicas. O trabalho encontrou várias pesquisas que contribuem citando fontes estratégicas para o desenvolvimento e até mesmo lançamento de novos projetos de usinas termoelétricas. Uma das questões levantadas por Aminov et al. (2016) apontam que 30% das termelétricas convencionais sofrem de ineficiência. Portanto, avaliaram a eficiência energética de turbina a gás de ciclo combinado em usinas convencionais, com o objetivo de quantificar a redução de gases poluentes. De acordo com os autores, o ciclo combinado de três pressões é desenvolvido em modos diferentes. A eficiência do ciclo convencional foi de 34,5% enquanto o ciclo combinado foi de 58,28%, e conseqüentemente, verificou-se uma redução anual de poluição ao meio ambiente.

A Figura 2.5 apresenta o ranking das fontes investigadas, destacando o carvão e o gás natural como principais na concentração de esforços para substituir, aperfeiçoar e tornar mais eficiente o uso dos combustíveis fósseis frente ao estímulo das fontes renováveis e melhor uso dos recursos naturais. Quanto ao uso do carvão, vem crescendo os estudos sobre o uso das unidades de dessulfurização de gases de combustão. A tecnologia permite remover dióxido de enxofre melhorando a qualidade do ar. Estudos mostram a importância dos investimentos e os resultados práticos que são observados pela técnica utilizada. Contudo, reforçam que os investimentos dependem de novas legislações e condições macroeconômicas do países para levar adiante os projetos (KILIÇ et al., 2013).

Outra possibilidade para geração de eletricidade a carvão é o uso combinado com a tecnologia de CCS (UNDERSCHULTZ et al., 2017). Considerando as incertezas, um estudo realizado analisou a tomada de decisão no processo de risco para investimentos nesse tipo de usina. Li, Ma e Yang (2018) utilizaram o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) para

mensurar tais incertezas e a viabilidade do projeto, custos iniciais, previsões de receita e a taxa de desconto da usina para melhor tomada de decisão. O modelo apresentou condições satisfatórias para análise de investimento em usinas termoelétricas. Cuis et al. (2018) analisaram o caso de *retrofit* em usinas termoelétricas a carvão e usinas fotovoltaicas. Mostraram que os projetos CSS tem maior aderência aos projetos de energia fotovoltaica, contudo, o custo também é um fator limitante, o que mostra a forte necessidade de incentivos governamentais para redução dos custos e garantia de elevados graus de mitigação das mudanças climáticas de longo prazo.

O grupo 2 da pesquisa, Figura 2.6 e Tabela 2.4, classificou os trabalhos de acordo com os tipos de projetos: implantação, expansão, modernização ou desmobilização. De um modo geral, observou-se três tipos de projetos: desmobilização (18%); implantação (27%); e modernização (55%). As diversas finalidades, levam em consideração o tempo de vida útil das usinas em fim de atividade nos casos de descomissionamentos, investimentos para novas adequações técnicas e os impactos econômicos para os casos de modernização, e fatores cruciais para implantação de novas termoelétricas.

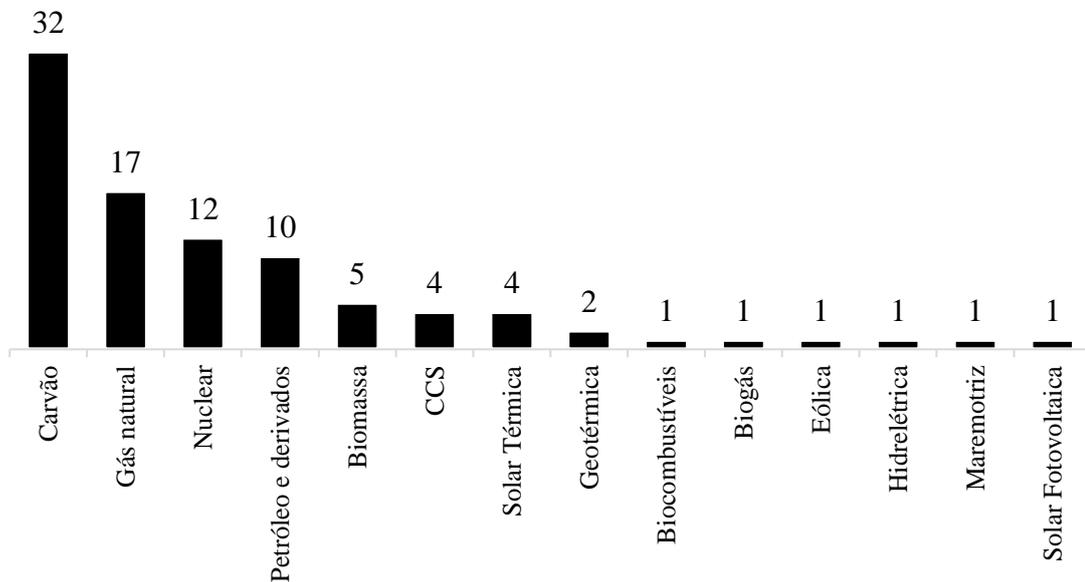


Figura 2.5 Análises econômicas associadas às fontes energéticas das termoelétricas, de 2010 a 2019.

Fonte: Autor (2022).

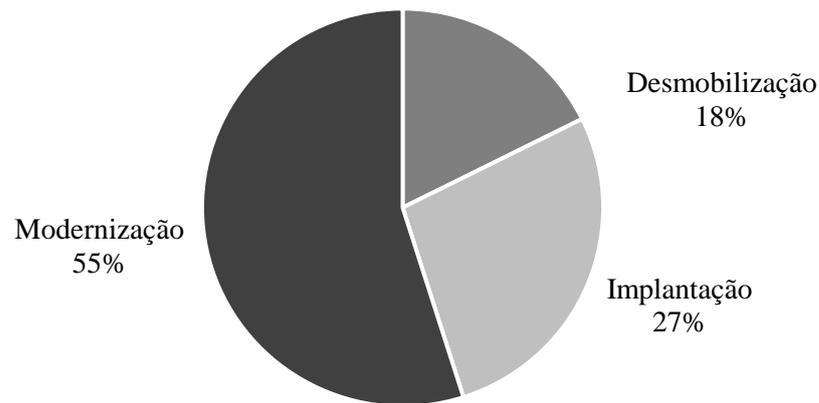


Figura 2.6. Proporção de trabalhos por tipo de projeto, no período de 2010 a 2019.

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 2.4, os investimentos em modernizações abrangeram 27 pesquisas, recebendo 822 citações. Os estudos concentram-se em alternativas para as usinas tradicionais com uso de fontes não renováveis (18), renováveis (2), e ambas (7). Os projetos não renováveis, devem continuar em ritmo de crescimento, à medida que muitas termoelétricas implementam mudanças para continuar operando no mercado de energia (AHMADI et al., 2019; GINGERICH e MAUTER, 2015; LIU, LIN e LEWIS, 2010; SURESH, REDDY e KOLAR, 2010).

Entre as fontes de geração, percebeu-se que muitos estudos direcionaram as pesquisas para o carvão, principalmente, pela necessidade de modernização para suprimir os efeitos nocivos ao meio ambiente. Sobre as fontes renováveis, apenas dois trabalhos dos autores, Cardoso, Silva e Eusébio (2019), que analisaram o biogás e biomassa, e Franki, Višković e Šapić (2019), que avaliaram a viabilidade técnica e econômica de modernização para uma usina à carvão para CCS. Os projetos renováveis e não renováveis, concentraram-se em estudos do carvão e gás natural, associados às fontes renováveis (CCS, biomassa, solar fotovoltaica, e solar térmica), apontando o contexto de transição energética para o uso dos combustíveis fósseis.

Sobre implantação foram contabilizados 15 trabalhos, 200 citações, sendo a maioria (10) para termoelétricas com uso de fontes não renováveis especialmente carvão, gás natural e óleo. Os projetos de implantação com fontes renováveis (3) avaliaram a viabilidade do uso da biomassa e a energia geotérmica. No tocante ao uso de ambas as fontes foram encontrados 2 trabalhos, o primeiro deles, dos autores Semin et al. (2019), avaliou um modelo de otimização de eficiência energética para obter uma estrutura ótima de geração na Rússia, e a pesquisa de

Zhou, Hanasaki e Fujimori (2018) destacou os impactos das mudanças climáticas na geração das usinas térmicas.

Tabela 2.4 Publicações relacionados por tipo de investimento.

Tipo	Fonte	Autores	Publicações	Citações
Desmobilização	Não Renovável	Bylkin et al. (2011), Jeong et al. (2014), Jeong et al. (2014), Jeong et al. (2016), Jeong et al. (2016), Jeong et al. (2019), Khattak et al. (2018), Li et al. (2018), Park et al. (2016)	9	31
Implantação	Renovável	Sagani et al. (2019), Mayer et al. (2015), Procesi (2014).	3	200
	Não Renovável	Almeida et al. (2018), Guttikunda e Jawahar (2018), Katsaprakakis et al. (2015), Li et al. (2018), Li e Zhao (2016), Miara et al. (2019), Sethi (2015), Wang et al. (2019), Zhang et al. (2012), Zhang, Xia e Li (2014).	10	
	Renovável e Não Renovável	Semin et al. (2019), Zhou et al. (2018).	2	
Modernização	Renovável	Cardoso et al. (2019), Franki et al. (2019).	2	822
	Não Renovável	Ahmadi et al. (2019), Aminov et al. (2016), Bhangu et al. (2015), Gingerich e Mauter (2015), Gupta e Tewari (2011), Khankari e Karmakar (2016), Kiliç et al. (2013), Lin et al. (2019), Liu et al. (2013), Liu et al. (2010), Ma et al. (2016), Mahmoudi et al. (2019), Meng et al. (2016), Reddy et al. (2014), Veselov et al. (2017), Wang et al. (2019), Xie et al. (2019), Ye et al. (2019).	18	
	Renovável e Não Renovável	Amirabedin e McIlveen-Wright (2013), Bricl e Avsec (2019), Cui et al. (2018), Fan et al. (2019), Heller e Gauché (2013), Liang et al. (2010), Suresh et al. (2010).	7	

Fonte: Autor (2022).

Em geral, os estudos abordaram temas que impactam a implantação de novos empreendimentos, como por exemplo: as novas usinas ecoindustriais na China que incluem a circularidade econômica nos processos internos; impactos na saúde; crises hídricas que afetam o funcionamento das usinas; custo de políticas governamentais; e modelos de avaliação para implantação de novas plantas (LI e ZHAO, 2016). Os projetos de descomissionamentos somaram 9 publicações, 31 citações e trouxeram casos de usinas nucleares. O artigo mais citado foi Jeong et al. (2014), em que se estimou aspectos técnicos para melhor planejamento da desmontagem dos equipamentos na planta de uma usina. Jeong et al. (2016) contribuíram com um olhar sob métodos de prevenção dos acidentes de trabalho. Sob a ótica dos custos, Park et al. (2016), ressaltaram a importância das etapas iniciais de planejar e obter dados para garantia da segurança e a viabilidade econômica. A preparação e execução a partir de um plano inicial contribui para melhor análise das termoelétricas ao término da vida útil, fortalecendo a necessidade de critérios técnicos e cronogramas para o sucesso dos projetos (BYLKIN et al., 2011).

O grupo 3, representado na Tabela 2.5, relaciona três trabalhos da amostra que abordam aspectos relevantes sobre a economia circular. Apesar da baixa quantidade de trabalhos nessa linha, as contribuições foram importantes para o avanço da pesquisa, e a relação com as termoelétricas. O trabalho de maior relevância no âmbito da economia circular foi dos autores Jesus et al. (2018), que trouxeram uma nova concepção para a economia circular ao incluir aecoinovação. Devido a poucas informações sobre o assunto, o trabalho contribui facilitando o processo de mudança para um ambiente de circularidade econômica, através da ecoinovação.

Tabela 2.5 Trabalhos pela ótica da economia circular e meio ambiente.

Tema	Autores	Citações
Economia Circular	Jesus et al., (2018)	108
	Park, Sarkis e Wu (2010)	199
	Li e Zhao (2016)	50

Fonte: Autor (2022).

Ainda sob a visão da economia circular, Park, Sarkis e Wu (2010), também contribuem com a visão de negócios no enfoque da economia circular e o valor ambiental pela modernização ecológica, a pesquisa investiga oportunidades e desafios que devem ser incluídos em todas as esferas de negócios, até mesmo para as usinas. Ponto crucial, para reformulação de processos e adequação aos princípios ecológicos. Li e Zhao (2016), mostram os avanços na China pelo estabelecimento de usinas com base nos conceitos da economia circular (reduzir,

reutilizar e reciclar) para promover um ambiente mais limpo e sustentável. O estudo avaliou o desempenho das usinas ecoindustriais instaladas para garantir níveis maiores de eficiência quanto às emissões produzidas na China.

Com a transição da matriz energética mundial para fontes de energias renováveis e abandono gradual dos combustíveis fósseis, as discussões sobre o futuro das usinas termoelétricas revelam o importante papel das termoelétricas em relação à segurança energética, ficando cada vez mais em evidência com as projeções de mudanças climáticas, que causariam impacto direto até mesmo nas fontes renováveis de energia.

A Tabela 2.6 apresenta a relação entre as perspectivas da economia circular associadas aos autores identificados na pesquisa. Para gestores, líderes de governo e agentes econômicos os estudos relacionados fomentam melhores práticas e técnicas a serem adotadas no processo produtivo promovendo cada vez mais o ambiente sustentável (SEHNEM e PEREIRA, 2019). O conceito de economia circular surge para reduzir impactos ambientais e sociais, além de minimizar o uso dos recursos não renováveis, materiais tóxicos ou semelhantes e potencializar a vida útil de produtos, reutilizando e recuperando de alguma forma (IAU, 2013). Na transição para um caminho mais sustentável sob uma perspectiva mais ampla de mudanças emerge uma nova abordagem, a ecoinovação (KEMP, 2010).

Dentro do setor energético toda mudança envolve os princípios da economia circular e ecoinovação, além disso, o caminho para sustentabilidade passa por diversas mudanças estruturais e institucionais. Jesus et al. (2018) enfatizam que com o passar do tempo o meio ambiente se tornou o principal motivo de discussões em relação ao projeto de transição para uma sociedade mais preocupada com fatores sustentáveis.

Auxiliando nesse processo de mudança, surge a ecoinovação, que em suma, promove a viabilidade econômica dos negócios sem impedir o desenvolvimento sustentável, seja ele, econômico, ecológico ou social. Sua contribuição ainda reduz externalidades ao meio ambiente, pelo uso responsável dos recursos naturais (EC, 2011). A concepção da ecoinovação abre novos caminhos para criação de alternativas inovadoras e projetos economicamente viáveis, ao mesmo tempo que garante a continuidade das usinas termoelétricas na matriz energética.

A preocupação com o meio ambiente coloca em ênfase a reutilização dos recursos, ou seja, que estes sejam convertidos de alguma forma criando uma nova concepção de recursos na cadeia produtiva, como é o caso do vapor em alguns trabalhos abordados. Cada vez mais é possível perceber o reaproveitamento de materiais, o uso da biomassa é outro exemplo dessa evolução de pensamento, a geração de energia contribui não apenas por ser uma fonte

renovável, mas também, por adotar conceitos da economia circular em seu processo de produção.

Tabela 2.6. Premissas da economia circular e suas bases teóricas.

Base teórica	Elementos	Perspectivas	Premissas	Autores
Design Regenerativo	Fornece uma estrutura conceitual de processos que restauram, revitalizam ou renovam seus materiais ou fontes de energia com base na sustentabilidade que avalia as necessidades humanas em conformidade com a preservação da natureza. Cria sistemas livre de resíduos.	Double loop	Voltado para o desenvolvimento educacional de líderes organizacionais que busca criar novas alternativas para os resíduos, reintroduzindo-os.	Almeida et al. (2018), Kiliç et al. (2013)
		Upcycle	Agrega maior valor, uso ou qualidade em produtos ou resíduos no final da vida útil.	Mayer et al. (2015), Khankari e Karmakar (2016)
		Economia espiral	Enfatiza o uso infinito dos produtos e subprodutos em diferentes escalas.	Bricl e Avsec (2019), Fan et al. (2019), Franki et al. (2019), Katsaprakakis et al. (2015), Li e Zhao (2016), Liang et al. (2010), Liu et al. (2013), Reddy et al. (2014), Suresh et al. (2010)
Economia de Performance	Persegue o objetivo de gerar o maior valor de uso possível durante o máximo de tempo, consumindo o mínimo de recursos e energia.	Closed loop	Critica o modelo de economia linear e preza pelo reprocessamento dos recursos em ciclos.	Sagani et al. (2019) e Cardoso et al. (2019)
		Cradle to cradle	Possibilita o uso infinito dos recursos de modo inovador, com qualidade e bom design. Após o uso os produtos permanecem em circulação.	Procesi (2014), Ahmadi et al. (2019), Aminov et al. (2016), Cui et al. (2018) e Heller e Gauché (2013)
Ecologia Industrial	Observa o fluxo de materiais e energia nos sistemas industriais, possibilitando que os resíduos se transformem em insumos.	Logística reversa	Atribui a recuperação de produtos, com menor impacto ambiental possível, desde o lugar de consumo até o ponto de origem.	Gingerich e Mauter (2015) e Ma et al. (2016)
		Simbiose industrial	Estimula o uso compartilhado de recursos e subprodutos com ganhos ambientais e econômicos	Amirabedin et al. (2013) e Lin et al. (2019)

Fonte: Autor (2022).

Jesus et al. (2018), ainda reúnem em sua pesquisa os principais conceitos da economia circular. Os princípios 3R de “redução, reutilização e reciclagem”, ainda incluem a “emissão zero” e o “desperdício zero”. No que diz respeito às suas contribuições, devem ser empregadas em vários contextos específicos e utilizados da forma mais abrangente possível para cada tipo de atividade. De um modo geral a economia circular visa integrar vários aspectos dentro dos empreendimentos. Visa a mudança institucional, de dentro para fora, passa a considerar questões econômicas, socioeconômicas, modelos de negócios mais sustentáveis e preocupados com o meio ambiente, além de fazer melhor uso dos recursos naturais e desenvolvimento de novos modelos de negócios.

Um ponto crucial, segundo Cheng (2007), para o fortalecimento e fomento de iniciativas com a abordagem da circularidade econômica, é o apoio dos governos. Este deve liderar o caminho na promoção de planos, metas e orientações institucionais, bem como estimular a criação de novos modelos de negócios que atuem nessa linha de pensamento mais eficiente e menos poluente.

Muitos países já implementaram a economia circular em seus planos de governo, por exemplo, a União Europeia (EC, 2015). Países asiáticos como China e Japão, também incluíram a economia circular em suas respectivas agendas. A China, apesar da grande dependência do carvão, desenvolveu uma política nacional de apoio a parques ecoindustriais com mecanismos de geração limpa (DONG et al., 2013).

Por último, impulsionada pela tecnologia aecoinovação contribui para criação de novas formas de reutilizar, reciclar e aproveitar os materiais de algum modo dentro do processo produtivo. Atua também, no avanço de uma visão mais integrada de sociedade, economia e meio ambiente (WEN et al., 2007).

2.4 CONCLUSÃO

Este trabalho sistematizou 53 trabalhos que associaram a perspectiva das termoelétricas no contexto de transição energética, sob a ótica da economia circular. Os resultados mostraram como os diversos autores estão concentrando estudos e análises nessa área, ao mesmo tempo que observam aspectos sobre viabilidade técnica e econômica, como também a preocupação com o meio ambiente e redução de externalidades.

As principais contribuições demonstraram a importância das usinas termoelétricas para garantia da segurança energética, diante da ampla capacidade de geração. Apesar da constante

migração para uso de fontes renováveis, a energia fornecida pelas usinas térmicas continuarão sendo utilizadas e devem permanecer operando por um longo período de tempo.

O trabalho identificou como vários países pretendem mitigar os impactos negativos do uso dos combustíveis fósseis. A tendência de aplicar novos conceitos e combinação entre fontes de energia, deve ser a nova inclinação dos projetos. Cada vez mais, pesquisas são desenvolvidas nesse escopo, abrangendo a eficiência técnica dos empreendimentos.

A economia circular tornou-se parte dos processos por meio dos princípios de sustentabilidade eecoinovação. Os novos pilares dessa nova concepção de mercado estão diretamente conectados com as novas pesquisas e ações das usinas. Esse tipo de olhar tem levado gestores a repensar os processos e tornar a geração elétrica mais sustentável.

Por fim, os trabalhos futuros podem restringir mais as palavras-chave da pesquisa para melhor análise individual de cada um dos temas que emergiram na pesquisa. Outros assuntos específicos que fazem parte do escopo e campo de atuação das termoelétricas não foram encontrados, a exemplo, dos mercados de serviços auxiliares e projetos de descomissionamentos em outras fontes energéticas, restritos apenas a fonte nuclear. Todavia, esse trabalho serve de base para futuras pesquisas e aprofundamentos sobre os demais assuntos que não foram alcançados.

REFERÊNCIAS

- AHMADI, H. H. et al. Thermodynamic and economic analysis of performance evaluation of all the thermal power plants: A review. **Energy science & engineering**, v. 7, n. 1, p. 30-65, 2019.
- ALMEIDA, J.; ALMEIDA, E.; TORRES, E.; FREIRES, F. Economic value of underground natural gas storage for the Brazilian power sector. **Energy Policy**, v. 121, p. 488-497, 2018.
- AMINOV, Z.; NAKAGOSHI, N.; DANG X. T.; HIGASHI, O.; ALIKULOV, K. Evaluation of the energy efficiency of combined cycle gas turbine. Case study of Tashkent thermal power plant, Uzbekistan. **Applied Thermal Engineering**, v. 103, p. 501-509, 2016.
- AMIRABEDIN, E.; MCILVEEN-WRIGHT, D. A Feasibility Study of Co-Firing Biomass in the Thermal Power Plant at Soma in order to Reduce Emissions: an Exergy Approach. **International Journal of Environmental Research**, v. 7, p. 139-154, 2013.
- BEZERRA, M. C.; GOHR, C.; MORIOKA, S. Organizational capabilities for sustainability towards corporate sustainability benefits: a systematic literature review and an integrative framework proposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, n. 119114, 2020.
- BHANGU, N. S.; PAHUJA, G. L.; SINGH, R. Application of fault tree analysis for evaluating reliability and risk assessment of a thermal power plant. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 37, n. 18, p. 2004-2012, 2015.
- BOYACK, K.; KLAVANS, R. Co-citation analysis, bibliographic coupling, and direct citation: Which citation approach represents the research front most accurately? **Journal of**

- the American Society for Information Science and Technology, v. 61, n. 12, p. 2389-2404, 2010.
- BRICL, M.; AVSEC, J. Evaluation of System for Economically Viable Thermal Power Plant Operation. **Tehnicki Vjesnik**, v. 28, p. 1038-1043, 2019
- BYLKIN, B. et al. Composition and structure of simulation models for evaluating decommissioning costs for nuclear power plant units. **Atomic Energy**, v. 110, n. 2, 2011.
- CALZOLARI, T.; GENOVESE, A.; BRINT, A. Circular Economy indicators for supply chains: A systematic literature review. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 13, p. 100160, 2021.
- CARDOSO, J.; SILVA, V.; EUSÉBIO, D. Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 10.1016, 2018.
- CHABOWSKI, B.; SAMIEE, S; HULT, G. A bibliometric analysis of the global branding literature and a research agenda. **J Int Bus Stud**, v. 44, p. 622–634, 2013.
- CHENG, C. Y. China's new development plan: strategy, Agenda, and prospects. **Asian Aff: Am. Rev**, v. 34, p. 47-59, 2007.
- CRAIG, M. T.; COHEN, S.; MACKNICK, J.; DRAXL, C.; GUERRA, O. J.; SENGUPTA, M.; HAUPT, S. E.; HODGE, B. M.; BRANCUCCI, C. A review of the potential impacts of climate change on bulk power system planning and operations in the United States. **Renewable Sustainable Energy Rev.**, v. 98, p. 255–267, 2018.
- CUI, H.; ZHAO, T.; WU, R. An Investment Feasibility Analysis of CCS Retrofit Based on a Two-Stage Compound Real Options Model. **Energies**, v. 11, n. 7, p. 1711, 2018.
- DOE - U.S DEPARTMENT OF ENERGY. **Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities**, 2015.
- DONG, L.; ZHANG, H.; FUJITA, T.; OHNISHI, S.; LI, H.; FUJII, M.; DONG, H. Environmental and economic gains of industrial symbiosis for Chinese iron/steel industry: Kawasaki's experience and practice in Liuzhou and Jinan. **J. Clean. Prod.**, v. 59, p. 226-238, 2013.
- EC - EUROPEAN COMMISSION. **Closing the Loop - an EU Action Plan for the Circular Economy (Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions**. No. COM(2015) 614 Final). European Commission, Directorate General for the Environment. 2015.
- EC - EUROPEAN COMMISSION. Innovation for a Sustainable Future - the Eco-innovation Action Plan (Eco-AP), COM(2011) 899 Final. **Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions**. European Commission. 2011.
- EC - EUROPEAN COMMISSION. **The use of woody biomass for energy production in the EU**. European Union, 2021.
- ELO, S; KYNGÄS; H. The qualitative content analysis process. **Journal of advanced nursing**, v. 62, n. 1, p. 107-115, 2008
- ESEN, M.; YUKSEL, T. Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. **Energy Build**, v. 65, p. 340, 2013.
- FAN, J. L. et al. Benefit evaluation of investment in CCS retrofitting of coal-fired power plants and PV power plants in China based on real options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109350, 2019.
- FAROUK, H.; ZAHRAEE, S. M.; ATABANI, A.; MOHD JAAFAR, M. N.; ALHASSAN, F. H. Optimization of the esterification process of crude jatropha oil (CJO) containing high levels of free fatty acids: a Malaysian case study. **Biofuels**, v. 11, n. 6, p. 655-662, 2017.

- FRANKI, V.; VIŠKOVIĆ, A.; ŠAPIĆ, A. Carbon capture and storage retrofit: Case study for Croatia. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**. 2019.
- GINGERICH, D.; MAUTER, M. Quantity, Quality, and Availability of Waste Heat from United States Thermal Power Generation. **Environmental science & technology**, v. 19, n. 14, p. 8297-8306, 2015.
- GUPTA, S.; TEWARI, P. C. Maintenance performance evaluation of power generation system of a thermal power plant. *Iranian Journal Of Science And Technology Transaction B-Engineering*, v. 35, p. 47-59, 2011.
- GUTTIKUNDA, S.; JAWAHAR, P. Evaluation of Particulate Pollution and Health Impacts from Planned Expansion of Coal-Fired Thermal Power Plants in India Using WRF-CAMx Modeling System. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 18, p. 10.4209, 2018.
- HELLER, L.; GAUCHÉ, P. Modeling of the Rock Bed Thermal Energy Storage System of a Combined Cycle Solar Thermal Power Plant in South Africa. **Solar Energy**, v. 93, p. 345-356, 2013.
- IAU - INSTITUT D'AMÉNAGEMENT ET D'URBANISME. **Économie circulaire, écologie industrielle Éléments de réflexion à l'échelle de l'Île-de-France**. IAU Ile-de-France, 2013. Disponível em: <https://www.iau-idf.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_1036/Economie_circulaire_Ecologie_industrielle_IdF.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2021.
- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2020**; International Energy Agency: Paris, France, 2020.
- JEONG, K. et al. An estimation to measure and to evaluate the work times following the trajectory of workers during decommissioning of nuclear facilities. **Annals of Nuclear Energy**, v. 94, p. 10-15, 2016.
- JEONG, K. et al. An evaluation of the dismantling technologies for decommissioning of nuclear power plants. **Annals of Nuclear Energy**, v. 69, p. 62-64, 2014.
- JEONG, K. et al. Approach to optimization of risk assessment based on an evaluation matrix for decommissioning processes of a nuclear facility. **Annals of Nuclear Energy**, v. 128, p. 53-62, 2019.
- JEONG, K. et al. The digital mock-up system to simulate and evaluate the dismantling scenarios for decommissioning of a NPP. **Annals of Nuclear Energy**, v. 69, p. 238-245, 2014.
- JEONG, K. et al. The safety assessment system based on virtual networked environment for evaluation on the hazards from human errors during decommissioning of nuclear facilities. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 156, p. 34-39, 2016.
- JEONG, K. S. et al. The safety assessment system based on virtual networked environment for evaluation on the hazards from human errors during decommissioning of nuclear facilities. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 156, p. 34-39, 2016.
- JESUS, A. D.; ANTUNES, P.; SANTOS, R.; MENDONÇA, S. Eco-Innovation in the transition to a circular economy: an analytical literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2999-3018, 2018.
- KATSAPRAKAKIS, D.; KALLIGEROS, S.; PASADAKIS, N.; MONIAKIS, M.; SKIAS, I. The feasibility of the introduction of natural gas into the electricity production system in the island of Crete (Greece). **Energy for Sustainable Development**, v. 27, p. 155-167, 2015.
- KEMP, R. Eco-innovation: definition, measurement and open research issues. **Econ. Polit.** v. 3, p. 397-420, 2010.
- KHANKARI, G.; KARMAKAR, S. Power generation from coal mill rejection using Kalina cycle. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 138, n. 5, 2016.

- KHATTAK, M. A.; BORHANA, A.; SALMAN, M.; ALI, H.; NAWAZ, S.; KHAN, Z. Cost evaluation of proposed decommissioning plan of CANDU reactor. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 13, p. 3173-3189, 2018.
- KILIÇ, O.; ACARKAN, B.; AY, S. FGD investments as part of energy policy: A case study for Turkey. **Energy policy**, v. 62, p. 1461-1469, 2013.
- KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews**. Keele, UK, Keele Univ. 33, 28. 2004. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/kitchenham.pdf>>. Acesso em 05 jan. 2021.
- LAUER, M.; DOTZAUER, M.; HENNIG, C.; LEHMANN, M.; NEBEL, E.; POSTEL, J. Flexible power generation scenarios for biogas plants operated in Germany: impacts on economic viability and GHG emissions. **Int. J. Energy Res**, v. 41, n. 1, p. 63–80, 2017.
- LI, M. et al. The digital simulation and fuzzy evaluation to reduce the likelihood of unsafe behavior in nuclear decommissioning. **Annals of Nuclear Energy**, v. 119, p. 331-341, 2018.
- LI, N.; ZHAO, H. Performance evaluation of eco-industrial thermal power plants by using fuzzy GRA-VIKOR and combination weighting techniques. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 169-183, 2016.
- LI, S.; MA, X.; YANG, C. A combined thermal power plant investment decision-making model based on intelligent fuzzy grey model and its stochastic process and its application. **Energy**, v. 159, p. 1102-1117, 2018.
- LIANG, X. et al. Getting ready for carbon capture and storage by issuing capture options. **Environment and Planning A**, v. 42, n. 6, p. 1286-1307, 2010.
- LIN, L.; XU, B.; XIA, S. Multi-Angle Economic Analysis of Coal-Fired Units with Plasma Ignition and Oil Injection during Deep Peak Shaving in China. **Applied Sciences**, v. 9, n. 24 p. 5399, 2019.
- LIU, C. H. et al. Evaluation of NO_x, Sox and CO₂ emissions of Taiwan's thermal power plants by data envelopment analysis. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 13, n. 6, p. 1815-1823, 2013.
- LIU, C. H.; LIN, S. J.; LEWIS, C. Evaluation of thermal power plant operational performance in Taiwan by data envelopment analysis. **Energy policy**, v. 38, n. 2, p. 1049-1058, 2010.
- LIU, C.; LIN, S.; LEWIS, C. Evaluation of thermal power plant operational in Taiwan by data envelopment analysis. **Energy Policy**, v. 38, p. 1049-1058, 2010.
- LUND, H.; MATHIESEN, B. V. The role of carbon capture and storage in a future sustainable energy system. **Energy**, v. 44, p. 469–76, 2012.
- MA, Y.; YANG, L.; LU, J.; PEI, Y. Techno-economic comparison of boiler cold-end exhaust gas heat recovery processes for efficient brown-coal-fired power generation. **Energy**, v. 116, p. 812-823, 2016.
- MAHMOUDI, R.; EMROUZNEJAD, A.; KHOSROSHAHI, H.; KHASHEI, M.; RAJABI, P. Performance evaluation of thermal power plants considering CO₂ emission: A multistage PCA, Clustering, Game theory and Data Envelopment Analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 10.1016, 2019.
- MAYER, F. D.; SALBEGO, P. R. S.; ALMEIDA, T. C. et al. Quantification and use of rice husk in decentralized electricity generation in Rio Grande do Sul State, Brazil. **Clean Techn Environ Policy**, v. 17, p. 993–1003, 2015.
- MELDRUM, J.; NETTLES-ANDERSON, S.; HEATH, G.; MACKNICK, J. Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates. **Environ. Res. Lett**, v. 8, n. 1, 2013.
- MENG, M.; MANDER, S.; ZHAO, X.; NIU, D. Have market-oriented reforms improved the electricity Generation efficiency of China's thermal power industry? An empirical analysis. **Energy**, v. 114, p. 734–741, 2016.

- MIARA, A. et al. Climate-water adaptation for future US electricity infrastructure. **Environmental science & technology**, v. 53, n. 23, p. 14029-14040, 2019.
- OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD Environmental Outlook to 2050**. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris. 2012.
- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, Brasília, 2022. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 10 jun. 2022.
- PARK, H. S. et al. A study of the decommissioning procedure of an activated structure through an evaluation of the decommissioning cost for a research reactor. **Progress in Nuclear Energy**, v. 91, p. 399-410, 2016.
- PARK, J.; SARKIS, J.; WU, Z. Creating integrated business and environmental value within the context of China's circular economy and ecological modernization. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 15, p. 1494-1501, 2010.
- PARK, J.; SARKIS, J.; WU, Z. Creating integrated business and environment value within the context of China's circular economy and ecological modernization. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1494-1501, 2010.
- PROCESI, M. Geothermal potential evaluation for Northern Chile and suggestions for new energy plans. **Energies**, v. 7, n. 8, p. 5444-5459, 2014.
- SAGANI, A.; HAGIDIMITRIOU, M.; DEDOSSIS, V. Perennial tree pruning biomass waste exploitation for electricity generation: The perspective of Greece. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 31, p. 77-85, 2018.
- SCHMIDT, F. Meta-analysis: A constantly evolving research integration tool. **Organizational Research Methods**, v. 11, n. 1, p. 96-113, 2008.
- SEHNEM, S.; PEREIRA, S. C. F. Rumo à Economia Circular: Sinergia Existente entre as Definições Conceituais Correlatas e Apropriação para a Literatura Brasileira. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, v.18, n.1, 35-62, 2019.
- SEMIN, A. N. et al. Optimization model for the Russian electric power generation structure to reduce energy intensity of the economy. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 9, p. 379-387, 2019.
- SETHI, M. Location of greenhouse gases (GHG) emissions from thermal power plants in India along the urban-rural continuum. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 586-600, 2015.
- SIVA R., V.; KAUSHIK, S. C.; TYAGI, S. K. Exergetic analysis and evaluation of coal-fired supercritical thermal power plant and natural gas-fired combined cycle power plant. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, n. 3, p. 489-499, 2014.
- SURESH, M.V. J. J.; REDDY, S.; KOLAR, A. 4-E (Energy, Exergy, Environment, and Economic) analysis of solar thermal aided coal-fired power plants. **Energy for Sustainable Development**, v. 14, p. 267-279, 2010.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence informed management knowledge by means of systematic review. **Br. J. Manag**, v. 14, p. 207-222, 2003.
- UNDERSCHULTZ, J.; DODDS, K.; MICHAEL, K.; SHARMA, S.; WALL, T.; WHITTAKER, S. **Carbon capture and storage**. Taylor&Francis Group, 2017.
- VAN, V. M. T. H.; WIBERG, D.; LEDUC, S.; RIAHI, K. Powergeneration system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. **Nat. Clim. Change**, v. 6, n. 4, p. 375-380, 2016.
- VESELOV, F. V. et al. Comprehensive assessment of the effective scope of modernization of thermal power plants to substantiate the rational structure of the generating capacities for the future until 2035. **Thermal engineering**, v. 64, n. 3, p. 161-169, 2017.

- WANG, L. et al. A review of evaluation, optimization and synthesis of energy systems: methodology and application to thermal power plants. **Energies**, v. 12, n. 1, p. 73, 2018.
- WANG, Y.; YAN, W.; KOMONPIPAT, S. How does the capacity utilization of thermal power generation affect pollutant emissions? Evidence from the panel data of China's provinces, **Energy Policy**, v. 132, p. 440-451, 2019.
- WASSERBAUR, R.; SAKAO, T.; MILIOS, L. Interactions of governmental policies and business models for a circular economy: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 337, p. 130329, 2022.
- WEN, C. F.; ZHAO, Y. L.; LIANG, R. Z. Recycle of low chemical potential substance. **Res. Conservat. Recycl**, v. 51, p. 475-486, 2007.
- WHITE, M.; MARSH, E. Content analysis: aflexible methodology. **Libr. Trends**, v. 55, n. 1, p. 22-45, 2006.
- XIE, J. et al. Efficiency evaluation of thermal power plants in China based on the weighted Russell directional distance method. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 573-583, 2019.
- YE, M.; SUN, J.; HUANG, S. Comprehensive evaluation of cleaner production in thermal power plants based on an improved least squares support vector machine model. **Environmental Engineering Research**, v. 24, n. 4, 2018.
- ZHANG, W.; XIA, X.; LI, J. Comparison of energy and environmental regulations for thermal power plants in China. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 13, p. 1221-1227, 2014.
- ZHANG, Y.; QIN, F.; SHAO, S.; LIU, S. L.; CHEN, Y.; ZHANG, S. S. An Evaluation of the Sustainability of Thermal Power Plants Based on Emergy and Exergy Theory. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 34, p. 1249-1258, 2012.
- ZHOU, K.; BONET FERNANDEZ, D.; WAN, C.; DENIS, A.; JUILLARD, G. M. A study on circular economy implementation in China. **Working Paper IPAG Business School**, n. 312, v. 3, p.2014-312, 2014.
- ZHOU, Q.; HANASAKI, N.; FUJIMORI, S. Economic Consequences of Cooling Water Insufficiency in the Thermal Power Sector under Climate Change Scenarios. **Energies**, v. 11, n. 10, p. 2686, 2018.
- ZUPIC, T. C. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015.

3. ARTIGO 2 - EVIDÊNCIA EMPÍRICA DO CUSTO DE CAPITAL PARA TERMOELÉTRICAS NO BRASIL SOB CONDIÇÕES DE RISCO

RESUMO

Este artigo analisou o custo de capital para termoelétricas no Brasil sob condições de risco, aplicando o *Capital Asset Pricing Model* - CAPM e o *Weighted Average Capital Cost* - WACC. Para estimativa do CAPM local utilizou informações do Índice de Energia Elétrica - IEE das firmas do setor elétrico com capital aberto no Brasil e para o CAPM global, observou as empresas associadas ao *Edison Electric Institute* - EEI, cotadas na *New York Stock Exchange* - NYSE e na *National Association of Securities Dealers Automated Quotations System* - NASDAQ - USA. As condições de risco para os custos de capital foram representadas por simulação de Monte Carlo usando-se, como base, o WACC de uma termoelétrica a óleo combustível e o CAPM local e global. Os principais resultados apontam que as empresas do IEE e EEI obtiveram retorno médio diário positivo. Devido ao risco Brasil, sob condições determinísticas, o WACC local (11,13% a.a.) foi mais atrativo para os investidores quando comparado com WACC global (10,32% a.a.) e com o WACC regulatório de 10,55% a.a., estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. As variáveis de entrada mais sensíveis a riscos foram: Beta não alavancado; Dívida Líquida e Patrimônio Líquido. Em condições de risco observando pelo mercado sob a ótica das empresas brasileiras, as chances de o WACC da termoelétrica a óleo combustível ser no máximo 11,13% a.a. foi de 68,30% e sob a ótica global a chance de o WACC ser no máximo 10,32% a.a. foi de 99,51%. Conclui-se que o custo de capital em condições de risco proporciona uma visão mais realista à tomada de decisão para empresas de capital fechado.

Palavras-chave: Economia da Energia, Investimento, Estrutura de capital.

ARTICLE 2 - EMPIRICAL EVIDENCE OF CAPITAL COSTS FOR THERMOELECTRIC PLANTS IN BRAZIL UNDER RISK CONDITIONS

ABSTRACT

This article analyzed the cost of capital for thermoelectric plants in Brazil under risky conditions, applying the Capital Asset Pricing Model - CAPM and the Weighted Average Capital Cost - WACC. To estimate the local CAPM, it used information from the Electric Energy Index - IEE of publicly traded companies in the electricity sector in Brazil and for the global CAPM, observed the companies associated with the Edison Electric Institute - EEI, listed on the New York Stock Exchange - NYSE and at the National Association of Securities Dealers Automated Quotations System - NASDAQ - USA. The risk conditions for capital costs were represented by Monte Carlo simulation using, as a basis, the WACC of a fuel oil thermoelectric plant and the local and global CAPM. The main results indicate that the IEE and EEI companies obtained a positive average daily return. Due to the Brazil risk, under deterministic conditions, the local WACC (11.13% p.a.) was more attractive to investors when compared to the global WACC (10.32% p.a.) and the regulatory WACC of 10.55% p.a., established by the National Electric Energy Agency - ANEEL. The most risk-sensitive input variables were: Unleveraged Beta; Net Debt and Equity. Under risk conditions observed by the market from the perspective of Brazilian companies, the chances of the WACC of the fuel oil thermoelectric plant being at most 11.13% p.a. was 68.30% and from a global perspective, the chance of the WACC being at most 10.32% p.a. was 99.51%. It is concluded that the cost of capital in risky conditions provides a more realistic view of decision making for privately held companies.

Keywords: Energy Economy, Investment, Capital Structure.

3.1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui condição privilegiada na matriz de geração de eletricidade quando comparada com outros países, com uma capacidade instalada 84% da oferta interna de eletricidade proveniente dos recursos renováveis, distribuída em hidroelétricas (65,8%), biomassa (9%), eólica (8%) e outras renováveis (1,2%) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2022). Historicamente, o sistema elétrico brasileiro caracteriza-se pela presença de hidroelétricas incorporadas no modelo regulatório e comercial com grandes reservatórios, o que garante segurança e baixo custo operacional. A redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios hídricos, aliado às mudanças climáticas, vem impactando a capacidade efetiva de geração e atendimento à ponta do Sistema Integrado Nacional - SIN. A segurança energética fica em risco, necessitando de planejamento do SIN para a promoção do desenvolvimento dos empreendimentos do setor envolvendo questões técnico-econômicas e socioambientais (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2017; 2022; EPE, 2020; 2022).

A crise energética e o racionamento de energia elétrica no Brasil nos anos 2000, trouxe a necessidade de contratação das usinas termoelétricas a óleo combustível, para acelerar a capacidade de geração, e inserir fontes renováveis. Para atendimento à carga elétrica, o Operador Nacional do Sistema (ONS) controla a quantidade expressiva e a capacidade de atender aos requisitos sistêmicos de confiabilidade e segurança para o atendimento à curva de carga, considerando a variabilidade da geração renovável, cada vez mais presente no sistema. As termelétricas a óleo combustível por sua vez, possuem ampla capacidade de flexibilidade e confiabilidade na geração de energia. Atualmente, essas usinas térmicas a óleo combustível estão próximas ao final do contrato de suprimento de energia (ONS, 2020; ANEEL, 2020; EPE, 2020; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - DOE, 2015).

Todo o empreendimento tende a maximizar o valor de mercado, comparando retorno do investimento e o custo de capital. Além disso, outros critérios sustentáveis que estão associados às boas práticas ESG (*Environmental, Social and Governance*) ganharam força dentro das grandes empresas que atuam no mercado financeiro, impulsionando investimentos em novas tecnologias, para fornecimento de energia mais limpa e mitigação de alterações climáticas, pauta de alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (B3, 2022; EDISON ELECTRIC INSTITUTE – EEI, 2022; UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME – UNDP, 2022). Logo, o custo de capital é a taxa média no tempo requerida por *stakeholders*, acionistas (capital próprio) e credores (capital de terceiros). Para a tomada de

decisão, a estrutura de capital de uma empresa possui complexidade devido sua relação com outras variáveis, que são originadas de financiamentos, empréstimos, debêntures, sócios, acionistas, entre outros que recebem um retorno igual ou superior ao custo de oportunidade (Brealey et al., 2020; Marcus et al., 2020).

Na teoria de finanças corporativa, desde as contribuições de Modigliani e Miller (1958) o *Weighted Average Capital Cost* - WACC se tornou um dos pilares. O WACC determina uma taxa mínima requerida para atender as necessidades dos *stakeholders*, para aceitar ou não o risco do investimento. Marcus et al. (2020) recomendaram o *Capital Asset Pricing Model* (CAPM) que auxilia na tomada de decisão envolvendo o orçamento de capital. O CAPM assume dois tipos de riscos (diversificável e não diversificável) e para torná-lo atrativo, o prêmio de risco deve compensar sua exposição ao risco, ao abrir mão de investir em um ativo livre de risco (BREALEY et al., 2020; HAWAWINI e VIALLET, 2009). O único risco que envolve a maioria ou totalidade das empresas, e não pode ser eliminado pela diversificação, é o risco macroeconômico, denominado como risco não diversificável. Markowitz (1952) afirmou que o risco de mercado, diversificável, seria o único a ser considerado pelos investidores, pois de alguma forma poderia ser estimado. Rocha et al. (2018); Rotella Junior et al. (2021); Saluga et al. (2020) e Steffen (2020) aplicaram o WACC nas análises econômicas dos empreendimentos em energia.

Em modelos determinísticos de avaliação econômica, geralmente, os dados de entrada são conhecidos ou assumidos como conhecidos. Para o investidor a incerteza de um cenário futuro no que tange a tomada de decisão não pode ser ignorada (DROZDOWSKI, 2021). Eid e Eldin (1977) consideram o risco como um fator inerente à maioria das decisões para um negócio, definindo como ponto central da análise de risco. Em uma análise sob condições de risco deseja-se conhecer a distribuição de probabilidades dos resultados possíveis. Quando se conhece pouco sobre os dados de entrada, adotam-se métodos para análise de risco. Um dos métodos para avaliar possíveis desvios e riscos envolvidos é a simulação de Monte Carlo conforme aplicados por Aquila et al. (2017), Lacerda et al. (2020) e Silva et al. (2012).

No setor elétrico brasileiro, a ANEEL calcula o custo de capital para efeito de revisão de tarifa ou receita dos segmentos de distribuição, transmissão e geração de energia elétrica. O cálculo da taxa regulatória de remuneração do capital é estimado a partir de empresas americanas do EEI, segue premissas da entidade e passa por revisões periódicas por meio de consultas públicas (ANEEL, 2020, 2021). As termoeletricas são de capital intensivo e é necessário conhecer os fatores determinantes para avaliação do plano de negócio. Apesar da

complexidade, entender sobre o custo de capital torna-se fundamental para análise dos resultados da empresa e a relação entre risco e retorno do negócio.

Sobre termoeletricas de capital fechado, no contexto de mercado emergente, há pouco entendimento e publicidade da estrutura de capital, devido à confidencialidade das informações empresariais. Em busca de garantir competitividade, sobrevivência no mercado e contribuir no tocante ao custo de capital proposto pela Aneel no processo de tomada de decisão no setor energético. Este artigo analisou o custo de capital empiricamente sob condições de risco para uma termoeletrica no Brasil, sob a ótica de empresas local e internacional, com base no CAPM e WACC.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Objeto de Estudo

O estudo de caso apresentado no trabalho refere-se à aplicação da metodologia proposta ao caso real de uma termoeletrica a óleo combustível localizada no município de João Pessoa, Paraíba, com potência instalada de 342 MW em área de 800 mil m².

3.2.2 Desenvolvimento do modelo

A análise do custo de capital de uma termoeletrica seguiu as seguintes etapas: identificar o setor de atividades; levantar informações sobre o beta médio não alavancado do segmento, verificar o endividamento médio das empresas do setor e inferir o beta alavancado (HAWAWINI e VIALLET, 2009). A Tabela 3.1 mostra as empresas selecionadas do setor elétrico, localizadas no mercado brasileiro (local) e norte americano (internacional), utilizando a cotação diária dos ativos, no período de 2011 a 2019. As firmas locais são do Índice de Energia Elétrica (IEE), da B3 S.A. Brasil, Bolsa, Balcão (B3) e as internacionais estão associadas ao *Edison Electric Institute* (EEI), cotadas nas bolsas *New York Stock Exchange* (NYSE) e *National Association of Securities Dealers Automated Quotations System* (NASDAQ).

3.2.3 Identificação de risco (input)

Para elaboração da análise do custo de capital em situação de risco evidenciaram-se as oportunidades e as ameaças que influenciam nas variáveis envolvidas na geração termoeletrica. Como ameaças foram identificadas o término da autorização para funcionamento do

empreendimento de geração e pressões ambientais impostas às termelétricas a óleo combustível. As oportunidades levantadas foram Leilões para retrofit de usinas a óleo combustível, mercado de serviços ancilares e incentivo fiscal. As variáveis de entrada consideradas mais significativas para analisar o custo de capital, local e internacional, foram: Beta não alavancado, Dívida Líquida e Patrimônio Líquido. Para a simulação de Monte Carlo das variáveis utilizou-se a distribuição triangular, pela simplicidade matemática e por gerar amostras aleatórias capazes de identificar os parâmetros sensíveis (LAMERS et al., 2015, ROTELLA JUNIOR et al., 2021).

Tabela 3.1 Empresas do mercado local e internacional, que compõem o Índice de Energia Elétrica (IEE) e *Edison Electric Institute* (EEI), respectivamente.

Local		Internacional	
Código	Empresa	Código	Empresa
ALUP11	Alupar Investimento S.A.	FE	Firstenergy Corp.
CESP6	Cesp - Cia Energética de São Paulo	EIX	Edison International
CMIG4	Cemig - Cia Energética de Minas Gerais	ES	Eversource Energy
COCE5	Coelce - Cia Energética do Ceará	PPL	Ppl Corporation
CPFE3	CPFL energia	ED	Consolidated Edison, Inc.
CPLE6	Copel - Cia Paranaense de Energia	AEP	American Electric Power Company, Inc.
EGIE3	Engie Brasil Energia S.A.	PCG	Pg&e Corporation
ELET3	Eletrobrás - Centrais Elétricas Bras. S.A.	OGE	Oge Energy Corp.
ENBR3	EDP Energias do Brasil	EXC	Exelon Corporation
ENEV3	Eneva S.A.	NWE	Northwestern Corporation
ENGI11	Energisa S.A.	NEE	Nextera Energy, Inc.
EQTL3	Equatorial Energia S.A.	AEE	Ameren Corporation
LIGT3	Light Serviços de Eletricidade S.A.	IDA	Idacorp, Inc.
NEOE3	Neoenergia S.A.	ETR	Entergy Corporation
OMGE3	Ômega Geração S.A.	PEG	Public Serv. Enterprise Group Incorporated
TAEE11	Taesá – Transm. Aliança de Energia Elét. S.A.		
TIET11	AES Tiete Energia S.A.		
TRPL4	Isa Cteep - Cia Trans. Energia Elétrica Paulista		

Fonte: B3 (2021); NYSE (2021); NASDAQ (2021).

Reuniram-se as informações da inflação brasileira pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), da Inflação nos EUA, medida pelo *Consumer Prices Index* (CPI) do *U.S. Bureau of Labor Statistics*, extraída das projeções do Fundo Monetário Internacional (FMI), em abril de 2021. Para as estimativas do CAPM, utilizou a rentabilidade da carteira do Índice Standard & Poor's 500 (S&P500) no período de 2011 a 2020 (ANEEL, 2021). A taxa livre de risco compreendeu

as Notas do Tesouro Nacional indexadas à inflação (NTN-B), medida pelo IPCA, utilizando uma janela de 10 anos (ANEEL, 2021). Somente os títulos do governo podem ser considerados como livres de risco, dado o poder de emitir moeda e pagar os valores nominais (DAMODARAN, 2008).

3.2.4 Identificação das variáveis de análise ou variáveis de saída (output)

A variável de saída utilizada foi o WACC (Equação 1).

$$WACC = \left(\frac{E}{E + D} \right) Ke + \left(\frac{D}{E + D} \right) Kd(1 - T) \quad (1)$$

em que, E é o valor do Patrimônio Líquido, D é o valor da Dívida Líquida, Ke é o Custo do Capital Próprio, Kd é o Custo do Capital de Terceiros e T é a Taxa Marginal do Imposto, 34% no Brasil (ANEEL, 2020). O custo de capital dos sócios (Ke) na análise representou o retorno mínimo aceitável pelos investidores de capital próprio em relação ao risco da termoeletrica, calculado pela abordagem CAPM (MARCUS et al., 2020, LACERDA et al. 2020). A Figura 3.1 mostra a formação do custo de capital da termoeletrica para se estimar o WACC.

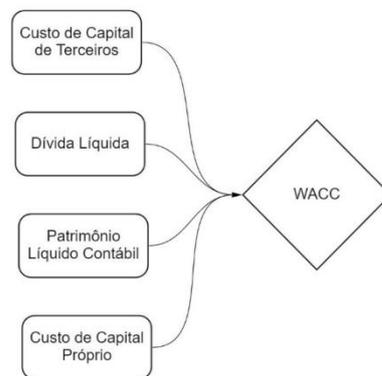


Figura 3.1. Estrutura da formação do WACC.

Fonte: Autor (2022).

Com base na estrutura da formação do WACC, estimou-se o beta para inclusão do risco de mercado. Assim, quanto maior o risco, maior o beta do ativo e calculou-se o CAPM (equação 2), em que, Ke é o retorno esperado em dólares, rf é o retorno do ativo livre de risco, dado pelo retorno médio das Notas do Tesouro Nacional indexadas à inflação (NTN-B); β é o beta do ativo; $(rm - rf)$ é o prêmio de risco, que é a diferença entre o retorno do mercado (Índice S&P500) e retorno do ativo livre de risco; e, também, ajustou os valores para obter o Ke em reais (AQUILA et al., 2017; BREALEY et al., 2020).

$$Ke = rf + \beta(rm - rf) \quad (2)$$

Para analisar o risco das empresas calculou-se a correlação dos índices com base mercado local (IBOV) e o internacional (S&P500). A correlação entre os ativos o risco da carteira mostrou as condições de mercado, afetando positivamente ou negativamente as empresas. À medida que os índices de mercado são afetados, as empresas também podem ser afetadas, sendo calculado covariância entre os índices. O beta (β) indica a sensibilidade do ativo em relação a volatilidade do mercado, ou seja, entre o retorno dos ativos da carteira e o retorno dos índices de mercado, o IBOV e S&P500. O cálculo do beta (Equação 3) é realizado por meio do desvio padrão em relação aos retornos diários (BODIE; KANE; MARCUS, 2015).

$$\beta_i = \frac{Cov(R_i, R_m)}{S^2(R_m)} \quad (3)$$

Em que, $Cov(R_i, R_m)$ é a covariância entre o retorno dos ativos e o retorno dos índices de mercado. $S^2(R_m)$ é a variância dos retornos da carteira de mercado. O risco e retorno do beta pode apresentar três cenários: Ativo tem risco superior ($\beta > 1$), inferior ($\beta < 1$) e semelhante ($\beta = 1$) ao risco de mercado. Ross et al. (1995) apontam a determinação do beta de uma empresa sob três aspectos: natureza cíclica das receitas, alavancagem operacional e alavancagem financeira. Após encontrar o valor do beta das empresas selecionadas, inferiu-se o endividamento das empresas. O beta do patrimônio líquido é o beta não alavancado, e o beta do ativo corresponde ao beta alavancado. Para retirar o risco financeiro e determinar apenas o risco do negócio deve-se “desalavancar” os betas e, fazendo isso, todas as empresas estarão em um mesmo nível para continuidade da análise. Logo após, foi calculada a média dos betas sem alavancagem das empresas. Na última etapa, o beta da termoelétrica é novamente alavancado usando a estrutura de capital da mesma. O custo de capital de terceiros (Kd) representa o percentual de juros exigido pelos credores e inclui ainda outras despesas financeiras da empresa. Em resumo, leva-se em consideração todos os custos de empréstimos de curto e longo prazo da empresa e as respectivas taxas de juros ponderadas (STEFFEN, 2020).

3.2.5 Simulação e Análises dos Modelos

Depois de mensurado o WACC (variável de saída), foram realizadas 10.000 simulações para variável de saída, utilizando números pseudo-aleatórios, isto é, gerando uma série de valores para a variável de análise para a obtenção de sua distribuição de frequência simples e acumulada, estatísticas descritivas e sensibilidade das variáveis de entrada. Obtida a distribuição de probabilidades das variáveis de saída, toma-se a decisão com base nas informações encontradas e levando-se em consideração outros aspectos relevantes do projeto.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3.2 apresenta resultados financeiros médios das empresas local e internacional, de janeiro de 2011 a dezembro de 2019. Para as empresas brasileiras obteve-se correlação positiva de 39,7% com o IBOV e a análise estatística de correlação das empresas americanas foi de 39,5%, também caracterizando associação com índice desta análise, o S&P500, mostrando correlação positiva.

A análise de correlação oferece uma excelente percepção da relação entre o retorno das variáveis, que foi percebido no retorno esperado dos ativos envolvidos. Todas as empresas brasileiras obtiveram retorno médio diário positivo, exceto a ENEV3, com uma volatilidade dos ativos fluando entre 1,36% e 3,74%. Para as empresas americanas os retornos médios foram entre 0,95% e 3,55%, com exceção da empresa PCG. Para que o investimento na ENEV3 seja viável, o investidor deverá exigir um retorno maior para compensar sua exposição ao risco. Para um determinado grau de risco, o investidor escolherá a alternativa que oferecer o maior retorno possível, considerando o menor desvio padrão.

A NEOE3 tem a melhor alternativa com o menor desvio padrão (1,36%) da série e o retorno diário mais favorável (0,32%). Para as empresas americanas, NEE foi a mais recomendada com desvio padrão de 1% e maior retorno diário (0,08%) entre os demais ativos. O beta alavancado das empresas, representa um importante indicador que estima o risco relativo das empresas. Essa medida de risco tem como referencial o risco de mercado, representado pelo IBOV (empresas locais) e S&P500 (empresas internacionais). Os valores podem ser maiores, iguais ou inferiores a zero. Os betas locais variaram de 0,25 a 1,17 e ELET3 evidenciou o maior beta (1,17) da carteira, possuindo risco superior ao risco de mercado ($\beta > 1$). De acordo com o método CAPM ao escolher esse ativo ou empresa, o investidor espera um prêmio maior para seu investimento, todavia incorre em maiores riscos. Essa hipótese é confirmada na Tabela 3,

com a contabilização do maior retorno esperado em 21,9% para esse ativo, resultado do Ke em reais.

Tabela 3.2 Resultados financeiros médios das empresas local e internacional, no período de jan/2011 a dez/2019.

	Código	Retorno médio	Desvio padrão	Beta alavancado	D/E	Beta não alavancado	Ke (USD \$)	Ke (BRL \$)
Local	ALUP11	0,06%	1,70%	0,42	46,8%	0,28	8,4%	11,8%
	CESP6	0,03%	2,24%	0,63	33,0%	0,57	11,1%	14,6%
	CMIG4	0,03%	2,62%	0,99	63,6%	0,70	15,8%	19,5%
	COCE5	0,06%	1,67%	0,32	15,4%	0,21	7,0%	10,4%
	CPFE3	0,04%	1,66%	0,56	105,4%	0,37	10,3%	13,7%
	CPLE6	0,04%	2,23%	0,89	54,6%	0,73	14,6%	18,2%
	EGIE3	0,06%	1,49%	0,50	14,5%	0,24	9,4%	12,8%
	ELET3	0,04%	3,24%	1,17	81,5%	0,89	18,2%	21,9%
	ENBR3	0,05%	1,89%	0,58	64,7%	0,43	10,5%	13,9%
	ENEV3	-0,10%	3,74%	0,43	76,2%	0,30	8,5%	11,9%
	ENGI11	0,10%	1,95%	0,27	88,1%	0,12	6,4%	9,7%
	EQTL3	0,11%	1,57%	0,44	158,0%	0,28	8,7%	12,0%
	LIGT3	0,01%	2,53%	0,80	83,9%	0,47	13,3%	16,9%
	NEOE3	0,32%	1,36%	0,26	71,8%	0,15	6,2%	9,5%
	OMGE3	0,13%	1,54%	0,25	202,9%	0,17	6,2%	9,5%
	TAEE11	0,06%	1,59%	0,38	75,9%	0,24	7,8%	11,2%
	TIET11	0,06%	1,54%	0,43	99,0%	0,18	8,5%	11,9%
TRPL4	0,04%	1,75%	0,41	184,4%	0,37	8,2%	11,6%	
Internacional	AEE	0,06%	1,09%	0,52	128,0%	0,28	7,7%	10,1%
	AEP	0,06%	1,01%	0,44	160,4%	0,21	6,9%	9,3%
	ED	0,04%	0,95%	0,33	121,8%	0,18	6,0%	8,4%
	EIX	0,04%	1,35%	0,50	163,5%	0,24	7,5%	9,9%
	ES	0,06%	1,04%	0,49	127,0%	0,26	7,3%	9,8%
	ETR	0,04%	1,08%	0,46	202,9%	0,20	7,1%	9,5%
	EXC	0,02%	1,20%	0,50	118,7%	0,28	7,4%	9,8%
	FE	0,03%	1,27%	0,51	314,1%	0,17	7,6%	10,0%
	IDA	0,06%	1,09%	0,61	66,4%	0,42	8,4%	10,8%
	NEE	0,08%	1,00%	0,47	128,7%	0,26	7,2%	9,6%
	NWE	0,05%	1,08%	0,58	115,9%	0,33	8,1%	10,5%
	OGE	0,04%	1,16%	0,68	98,8%	0,41	9,0%	11,4%
	PCG	-0,05%	3,55%	0,53	192,3%	0,24	7,7%	10,2%
	PEG	0,04%	1,12%	0,53	104,5%	0,31	7,7%	10,1%
	PPL	0,04%	1,07%	0,46	180,1%	0,21	7,1%	9,5%

Fonte: Autor (2022).

A OMGE3 apresentou o menor beta (0,25) e inferindo menor risco em relação ao mercado ($\beta < 1$), e também o menor retorno esperado (9,5%) do Ke em reais. O intervalo dos

betas serve de *benchmark*, compondo um importante parâmetro para avaliação do nível de risco apresentado pelo beta da termoelétrica na avaliação final. O beta alavancado das empresas internacionais variou de 0,33 a 0,68 e média de 0,51. A empresa OGE evidenciou o maior beta da carteira (0,68), possuindo risco inferior ao risco de mercado ($\beta < 1$), contabilizando o maior retorno esperado do Ke (BRL \$) de 11,4% entre as demais empresas americanas. A empresa ED destacou-se na análise apresentando o menor beta (0,33), conferindo o menor risco em relação ao mercado ($\beta < 1$) e menor retorno esperado (8,4%) do Ke (BRL \$). Para os betas não alavancados (Tabela 3), as empresas brasileiras tiveram uma média de 0,37, variando de 0,12 a 0,89; e as empresas internacionais com média de 0,27, oscilando entre 0,17 e 0,42, o que equivale ao nível de risco setor elétrico que compõem o IBOV e o S&P500. Segundo Damodaran (2008), quanto maior o nível de alavancagem financeira pelo uso de capital de terceiros, menor é o beta não alavancado.

Para o caso local, a ENGI11 apresentou menor beta não alavancado (0,12) com forte sujeição à capital de terceiros de 184%, com base na proporção capital de terceiros e capital dos sócios, sendo a segunda empresa mais endividada. Notou-se que a ELET3 com maior beta não alavancado (0,89), não apresentou a maior relação dívida líquida e capital dos sócios, computando 46,8%. Brealey et al. (2020) apontaram que outros aspectos podem determinar o beta de uma empresa, que vão além do financeiro, como alavancagem operacional e a natureza cíclica das receitas. Portanto, evidenciando a teoria o beta alavancado da ELET3 foi o maior das empresas brasileiras de 1,17.

A empresa americana com maior nível de alavancagem foi a FE, com beta não alavancado em 0,17, mostrou forte dependência de capital de terceiros. A Relação dívida líquida e capital dos sócios, calculada em 314,1% comprova o resultado da análise. Sob outra perspectiva a empresa IDA, com maior beta não alavancado (0,42) assumiu posição de destaque, pela baixa dependência de capital de terceiros e, conseqüentemente, menor relação dívida líquida e capital (66,4%).

Para o investidor local percebeu-se que o risco é mais elevado devido a maior volatilidade dos ativos, do desvio padrão e pelos betas alavancados. Os retornos sobre o capital investido superaram o rendimento das empresas internacionais. Na composição do risco assume-se que se a empresa tem mais proporção de capital de terceiros e o beta não alavancado tende a ser maior, mas a maior parte do risco vem da alavancagem financeira e não do mercado. Apesar das firmas internacionais possuírem maior proporção de capital de terceiros que as

locais, o risco estimado a partir dos betas alavancados vinculadas EEI foram inferiores das IEE, mostrando que o risco internacional é inferior ao mercado brasileiro.

A Tabela 3.3 apresenta as estimativas do WACC para a termoelétrica de capital fechado, sob ponto de vista local e internacional. Com base no quociente de endividamento das empresas locais (0,36), o beta alavancado da termoelétrica foi estimado em 0,38. Analisando as empresas internacionais, o quociente de endividamento das empresas estimadas em 0,26, resultou em menor beta alavancado para a termoelétrica em 0,28.

Tabela 3.3 Custo de capital da termoelétrica de empresas local e internacional.

Parâmetros	Local	Internacional
Beta alavancado	0,38	0,28
Beta não alavancado	0,36	0,26
Custo do capital próprio (<i>Ke</i>) em Reais	11,32%	10,48%
Custo do capital de terceiros (<i>Kd</i>) em Reais	8,19%	8,19%
WACC	11,13%	10,32%
WACC Aneel (Nota Técnica N° 45/2020)	10,55%	10,55%

Fonte: Autor (2022).

O *spread* entre o beta alavancado e beta não alavancado deixa em evidência que a termoelétrica não depende do capital de terceiros para financiar sua atividade operacional. Esse evento reflete o sucesso da boa gestão e performance operacional do empreendimento. A relação entre dívida líquida e capital dos sócios da termoelétrica foi contabilizada em apenas 3%. Quando a empresa não possui nenhuma dívida líquida, trata-se de uma empresa exclusivamente de patrimônio. Contudo, apesar do baixo custo de capital de terceiros, a usina ainda dispõe de financiamentos a pagar.

O percentual da relação entre dívida líquida e patrimônio líquido das empresas nacionais variou de 14,5% a 202,9% e das internacionais 66,4% a 314,1%. Apesar de maior endividamento as empresas americanas possuem menor beta, apontando maior risco para o cenário brasileiro. O beta médio alavancado de mercado no mercado local foi de 0,54 e das empresas no mercado internacional foi de 0,51. O resultado do beta alavancado estimado para a termoelétrica ficou abaixo das médias apresentadas, 0,36 (nacional) e 0,26 (internacional). A baixa exposição à capital de terceiros é o principal fato para diluição do risco da empresa.

Apurando o montante e a taxa dos financiamentos tomados pela termoelétrica no período analisado, o custo do capital de terceiros (*Kd*) foi 8,19%. Aplicando o CAPM, o retorno requerido pelos acionistas (*Ke*) em dólares americanos (\$ USD) foi de 11,32% em reais (R\$)

para o caso brasileiro e 10,48% em reais (\$ BRL) para o caso internacional das empresas americanas. O WACC calculado para o período de 2020 pela Aneel, foi estimado em 10,55%, com base em empresas americanas. Comparando com o resultado das empresas brasileiras (11,13%) e empresas americanas (10,32%), no período da análise variou 0,58% (empresas brasileiras) e 0,23% (empresas americanas). Steffen (2020), Anton e Nucu (2020) apontam em suas análises que, em geral, o custo de capital nos países emergentes é maior contraposto à países estáveis. A fim de estabelecer estratégias para minimizar riscos e, ou, maximizar ganhos para o tomador de decisões, levou-se em consideração as atitudes, ações e reações dos atores a fim de formalizar a maximização do *payoff* esperado. A Tabela 3.4 apresenta as variáveis do modelo estocástico, atribuindo valores mínimos, máximos e mais prováveis, optando pela distribuição triangular para mensurar as incertezas sobre o custo de capital.

Tabela 3.4. Valores máximo, mínimo e mais provável das variáveis de custo de capital da termoeletrica para estimativa do WACC.

	Brasil			EUA		
	Mínimo	Mais provável	Máximo	Mínimo	Mais provável	Máximo
Beta Não Alavancado	0,12	0,37	0,89	0,17	0,27	0,42
Dívida Líquida (x 10⁶)	R\$ 1,11	R\$ 9,10	R\$ 35,75	R\$ 1,70	R\$ 21,84	R\$ 46,98
Patrimônio Líquido (x 10⁶)	R\$ 1,38	R\$ 76,37	R\$ 13,67	R\$ 2,07	R\$ 14,82	R\$ 36,51

Fonte: Autor (2022).

A Figura 3.2 apresenta a participação das variáveis na composição das probabilidades do WACC. Para as empresas brasileiras a variável de entrada que apresentou maior impacto foi o beta não alavancado (84%), portanto mais sensível e de maior importância em relação ao custo de capital da termoeletrica. O patrimônio líquido dos empreendimentos colaborou para a estimativa (39%), apesar da menor proporção. Somente a dívida líquida (-31%) obteve participação negativa quanto ao resultado do custo de capital. A análise de sensibilidade das empresas americanas mostra que o Patrimônio Líquido e o Beta Não Alavancado dos empreendimentos contribuíram com 55% na composição da estimativa do WACC, enquanto que a Dívida Líquida contribuiu negativamente em 56%.

A simulação de Monte Carlo é uma técnica aplicada com objetivo de emular a incerteza de determinadas variáveis (ditas variáveis de entrada) a fim de encontrar resultados concernentes a outras variáveis dependentes das primeiras (ditas variáveis de saída). Simulação vem do latim *similis*, que significa similar. É uma técnica que visa a reproduzir situações

supostamente semelhantes às reais. Na realidade, os fluxos de caixa e taxas de desconto são desconhecidos, caracterizando uma situação de incerteza, por isso, nesse método, são realizadas simulações por meio de dados hipotéticos (através de números pseudo-aleatórios). A Figura 3.3 mostra a distribuição do WACC, sob a perspectiva de empresas brasileiras e americanas, em termos de simulação de Monte Carlo, considerando 10.000 iterações.

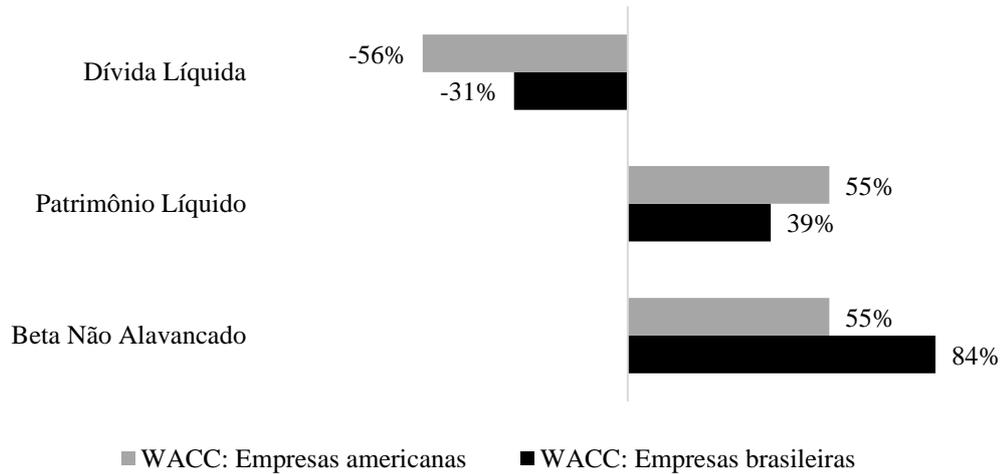


Figura 3.2 Análise de sensibilidade das variáveis de incerteza das empresas brasileiras e americanas em relação ao custo de capital (WACC) da termoeletrica a óleo combustível.
 Fonte: Autor (2022).

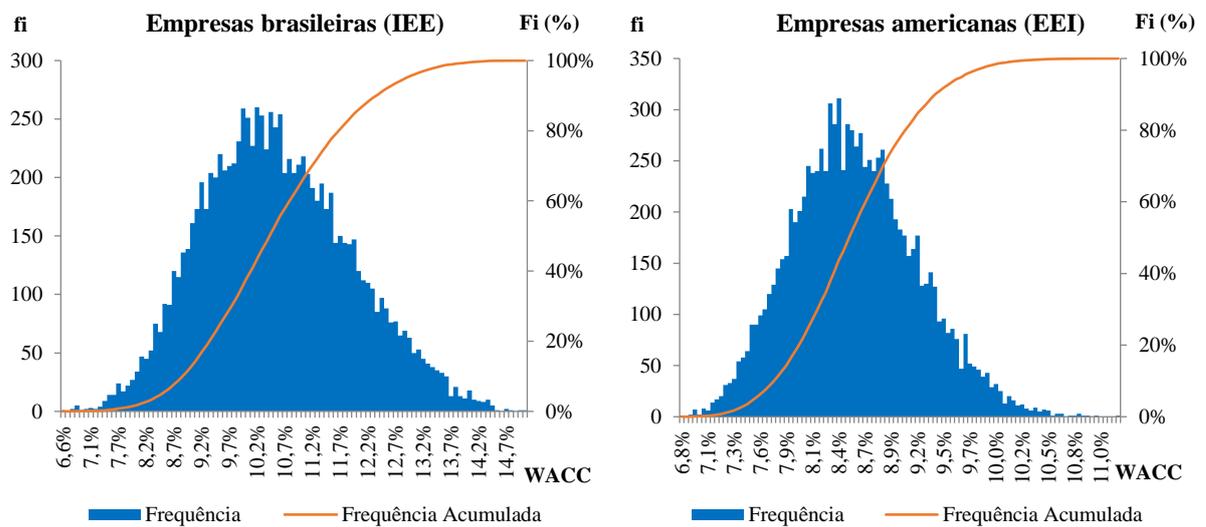


Figura 3.3 Histograma da frequência e frequência acumulada (%) da simulação de Monte Carlo pela ótica das empresas brasileiras (IEE) e americanas (EEI).
 Fonte: Autor (2022).

Observando a distribuição de probabilidades das empresas brasileiras o WACC variou entre 6,64% e 15,06%, com uma média de 10,50% e desvio padrão de 1,35% (Tabela 3.5). A probabilidade do WACC ser igual ou inferior a 11,13% para a termoelétrica a óleo combustível foi de 68,30%, enquanto a probabilidade de valores inferiores à média, que foi próxima ao WACC da Aneel, no patamar de 10,55%, foi de 53,20%. Já para o WACC americano de 10,32% a.a., a probabilidade de valores inferiores foi de 48,21%.

Sob a ótica das empresas americanas, o WACC variou de 6,79% a 11,22%, com uma média de 8,53% e desvio padrão de 0,63%. As chances do WACC ser no máximo 11,13% a.a. da termoelétrica a óleo combustível foi de 100,00%, para o WACC Aneel ser 10,55% foi de 99,57% e para o WACC americano 10,32% foi de 99,55%. A proporção média de capital de terceiros das empresas americanas foi de 42%, refletido pelo beta alavancado da usina ficando fora do intervalo das empresas americanas (Tabela 3.2).

A Tabela 3.5 apresenta as estatísticas descritivas da projeção do WACC. As empresas brasileiras contabilizaram, média de 10,50% e mediana de 10,40%.

Tabela 3.5. Estatística Descritiva das variáveis de saída da projeção do WACC sob a ótica das empresas IEE e EEI.

Estatística	Empresas brasileira (IEE)	Empresas americanas (EEI)
Média	10,50%	8,53%
Mediana	10,40%	8,49%
Desvio Padrão	1,35%	0,63%
Variância	0,02%	0,00%
Curtose	2,71	2,94
Coefficiente de Variação	0,1286	0,0745
Mínimo	6,64%	6,79%
Máximo	15,06%	11,22%
Percentis		
0%	6,64%	6,79%
10%	8,82%	7,73%
20%	9,30%	7,98%
30%	9,70%	8,17%
40%	10,06%	8,33%
50%	10,40%	8,49%
60%	10,77%	8,66%
70%	11,18%	8,83%
80%	11,66%	9,06%
90%	12,35%	9,37%
100%	15,06%	11,22%

Fonte: Autor (2022).

Analisando os percentis existe uma possibilidade de 50% do WACC ser igual ou superior aos valores da média e mediana, e 90% de chance de ser igual ou inferior a 12,3%. As empresas americanas retornaram média de 8,53% e mediana de 8,49%. Examinando os percentis também existe uma chance de 50% do WACC ser igual ou superior à média e mediana, e 90% de chance de ser igual ou inferior a 9,3% ao ano.

3.4 CONCLUSÃO

O custo de capital fornece um parâmetro crítico para alocação de capital dos investidores, influenciando preços e escolhas no setor energético. A partir das análises realizadas, conclui-se que sob a perspectiva das empresas nacionais e internacionais, o WACC da termoelétrica local estimado foi de 11,13% e 10,32%, respectivamente. Isso significa que o custo de capital para uma economia emergente é maior, quando comparado à uma economia estável. Nesse sentido pode-se dizer que políticas econômicas, quando bem implementadas, podem assegurar a estabilidade econômica, reduzindo o risco e a incerteza dos negócios.

A melhoria do ambiente de negócios, também depende da carga tributária, da previsibilidade econômica, entre outros aspectos que influenciam os investimentos privados, impactando as expectativas dos agentes com relação ao futuro da economia e alocação de capital. Apesar da baixa presença de capital de terceiros na estrutura de capital das empresas locais, o risco calculado dos negócios tornou o custo de capital maior. A termoelétrica ostentou baixíssimo nível de alavancagem financeira, 3% em capital de terceiros. Expôs que 97% do beta estimado para o empreendimento foi associado unicamente ao risco do negócio. Sob condições de risco local e internacional, o WACC do estudo de caso ficou próximo da média sob a ótica das empresas locais e igual ou inferior a 100% das firmas internacionais.

Este estudo contribui à tomada de decisão mais realista, trazendo implicações relevantes para o contexto de uma economia emergente, em que as empresas estão expostas a maiores riscos e incertezas, e mensurando o risco econômico das termoelétricas de capital fechado. A partir do estudo, o WACC calculado pode ser usado em análises de Fluxo de Caixa Descontado (FCD), método essencial para avaliação econômica, permitindo outras análises. O resultado empírico limita-se às empresas cotadas em apenas dois países de economia estável e emergente.

Novas pesquisas podem incluir outras empresas do segmento, em cenário ocidental, confrontando os resultados.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. (2017). Serviços/Biblioteca/Pesquisa On-line/Legislação/Resolução Normativa no. 792, de 28 de novembro de 2017., disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017792.pdf>>. Acesso em: 20 de dez. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 05 mai. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Nota Técnica 45/2020 - SRM/ANEEL**, de 14/04/2020, conforme detalhado no item “III.4.1- Taxa Regulatória de Remuneração de Capital real e antes de impostos – Segmento de Distribuição – por alíquotas de IRPJ e CSLL”. Brasília: ANEEL, 2020.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica 34/2021 – SGT-SRM/ANEEL**, de 10/03/2021, Atualização da Taxa Regulatória de Remuneração do Capital. Brasília: ANEEL, 2021.
- AQUILA, G.; ROTELLA JUNIOR, P.; PAMPLONA, E.; DE QUEIROZ, A. (2017). Wind Power Feasibility Analysis under Uncertainty in the Brazilian Electricity Market. **Energy Economics**, v. 65, p. 127-136, 2017.
- B3 S.A. - BRASIL, BOLSA, BALCÃO (B3). **Índice de Energia Elétrica (IEE B3)**. Disponível em: <<https://www.b3.com.br/>>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- B3 S.A. - BRASIL, BOLSA, BALCÃO (B3). **Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE B3)**. Disponível em: <<https://www.b3.com.br/>>. Acesso em: 24 mai. 2022.
- BREALEY, R., Allen, F., STEWART, M. **Principles of Corporate Finance**. 13ª Ed: Mc Graw Hill, 2020.
- CARDOSO, J. S.; VALTER, E. D. Techno-economic analysis of a biomass gasification Power plant dealing with forestry residues blends for electricity production In Portugal. **Journal Of Cleaner Production**, v. 212, p. 741-753, 2018.
- DAMODARAN, A. What is the Riskfree Rate? A Search for the Basic Building Block. **SSRN Electronic Journal**. 2008.
- EID, M. S.; ELDIN, H. K. Evaluation of risk in investment alternatives. **Computers & Industrial Engineering**, v. 1, p. 185-197, 1977.
- EDISON ELECTRIC INSTITUTE – EEI. **Delivering The Future**. Disponível em: <<https://www.eei.org/>>. Acesso em: 24 mai. 2022.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2020**: Ano base 2019. Rio de Janeiro, 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Expansão da Geração 2022**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes>>. Acesso em: 16 de jan. de 2022.
- HAWAWINI, G.; VIALLET, C. **Finance for Executives: Managing for Value Creation**. 4. ed. South-western Cengage Learning, 2009.
- LACERDA, L. S.; ROTELA JUNIOR, P.; PERUCHI, R. S.; CHICCO, G.; ROCHA, L. C. S.; AQUILA, G.; COELHO JUNIOR, L. M. Microgeneration of Wind Energy for Micro and Small

- Businesses: Application of ANN in Sensitivity Analysis for Stochastic Economic Feasibility. **IEEE Access**, v. 8, p. 73931-73946, 2020.
- LAMERS, P.; RONI, M. S.; TUMULURU, J. S.; JACOBSON, J. J.; CAFFERTY, K. G.; HANSEN, J. K.; KENNEY, K.; TEYMOURI, F.; BALS, B. Techno-economic analysis of decentralized biomass processing depots. **Bioresour. Technol**, v. 194, p. 205-213, 2015.
- LIANG, X.; REINER, D.; GIBBINS, J.; LI, J. Getting Ready for Carbon Capture and Storage by Issuing Capture Options. **Environment and Planning A**, v. 42, p. 1286-1307, 2010.
- MARCUS, A.; KANE, A.; BODIE, Z. **ISE Investments**. 12^a ed. Mc Graw Hill, 2020.
- MARKOWITZ, H. Portfolio Selection. **The Journal of Finance**, v.7, n. 1, p.77-91, 1952.
- MODIGLIANI, F.; MILLER, M. H. The Cost of Capital, Corporation Finance and the Theory of Investment. **American Economic Review**, v. 48, p. 261-297, 1958.
- NASDAQ - NATIONAL ASSOCIATION OF SECURITIES DEALERS AUTOMATIC QUOTATION SYSTEM. **Market activity**. Disponível em: < <https://www.nasdaq.com/>>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- NYSE - NEW YORK STOCK EXCHANGE. **Listings**. Disponível em: <<https://www.nyse.com/index>>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Módulo 7 - Planejamento da Operação Energética > Submódulo 7.2 Planejamento anual da operação energética**. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, 2020. disponível em:<<http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%207%2FSubm%C3%B3dulo%207.2%2FSubm%C3%B3dulo%207.2%202017.12.pdf>>. Acesso em 10 dez. de 2021.
- ROCHA, L. C. S.; AQUILA, G.; ROTELA JUNIOR, P.; PAIVA, A. P.; PAMPLONA, E. O.; BALESTRASSI, P. P. A stochastic economic viability analysis of residential wind power generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 412-419, 2018.
- ROTELLA JUNIOR, P.; ROCHA, L. C. S.; MORIOKA, S. N.; BOLIS, I.; CHICCO, G.; MAZZA, A.; JANDA, K. Economic Analysis of the Investments in Battery Energy Storage Systems: Review and Current Perspectives. **Energies**, v. 14, p. 2503, 2021.
- SILVA, C. P. C.; COELHO JUNIOR, L. M.; OLIVEIRA, A. D.; SCOLFORO, J. R. S.; REZENDE, J. L. P.; LIMA, I. C. G. Economic analysis of agroforestry systems with candeia. **CERNE**, v. 18, p. 585-594, 2012.
- STEFFEN, B.. Estimating the cost of capital for renewable energy projects. **Energy Economics**, v. 88, p. 104783, 2020.
- UNDP - UNITED NATIONS LEAD AGENCY ON INTERNATIONAL DEVELOPMENT. **Sustainable Development Goals (SDGs)**. Disponível em: <<https://www.undp.org/sustainable-development-goals>>. Acesso em: 24 mai. 2022.
- U.S DEPARTMENT OF ENERGY - DOE. **Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities**, 2015.

4. ARTIGO 3 - ANÁLISE ECONÔMICA SOB CONDIÇÕES DE RISCO DO DESCOMISSIONAMENTO EM TERMOELÉTRICAS A ÓLEO COMBUSTÍVEL NO BRASIL

RESUMO

A análise de estratégia para o descomissionamento ou desmobilização de usinas termoeletricas é vista como tendência para os próximos anos. A busca por alternativas renováveis, deve promover investimentos em outras fontes de energia, reduzindo o número de termoeletricas no sistema de geração. Contudo, poucos trabalhos tratam sobre o descomissionamento de usinas termoeletricas a óleo combustível. Este trabalho utilizou métodos sob condições determinística e estocástica: Valor Presente Líquido (VPL); Taxa Interna de Retorno (TIR); *Weighted Average Cost of Capital* (WACC), e; Simulação de Monte Carlo (SMC). Os resultados projetaram três cenários para o descomissionamento. O “Cenário A”, contabilizou R\$56,95 milhões sendo o mais pessimista, o “Cenário B”, computou R\$83,74 milhões, correspondendo ao mais provável e o “Cenário C”, estimou R\$125,98 milhões representando o mais otimista. Os indicadores econômicos computaram para o cenário A um VPL de R\$222,86 milhões e TIR 15,22% a.a.; para o cenário B, VPL de R\$229,23 milhões e TIR 15,31% a.a.; para o cenário C, mais otimista, VPL de R\$236,97 milhões e TIR 15,41% a.a. Na SMC, o VPL variou entre R\$143,89 e R\$463,76 milhões, com média de R\$297,29 milhões. A TIR variou entre 14,39% e 17,87%, com média de 16,23%. Conclui-se que o descomissionamento apresentou VPL positivo, admitindo a viabilidade nos três horizontes projetados, mas o cenário B foi o mais aceitável às condições de mercado. O trabalho contribui para futuros projetos de descomissionamento no Brasil, considerando o cenário de estímulo às fontes renováveis, além de outros aspectos envolvidos de caráter ambiental e socioeconômico. Auxilia gestores e investidores para tomada de decisão, bem como formulação de políticas em relação ao tema abordado.

Palavras-Chave: Desmobilização. Termoeletrica. VPL. TIR. WACC.

ARTICLE 3 - ECONOMIC ANALYSIS UNDER RISK CONDITIONS OF DECOMMISSIONING IN FUEL OIL THERMOELECTRIC POWER PLANTS IN BRAZIL

ABSTRACT

The analysis of the strategy for the decommissioning or demobilization of thermoelectric plants is seen as a trend for the coming years. The search for renewable alternatives should promote investments in other energy sources, reducing the number of thermoelectric plants in the generation system. However, few works deal with the decommissioning of fuel oil thermoelectric plants. This work used methods under deterministic and stochastic conditions: Net Present Value (NPV); Internal Rate of Return (IRR); Weighted Average Cost of Capital (WACC), and; Monte Carlo Simulation (SMC). The results projected three scenarios for decommissioning. "Scenario A", accounted for R\$56.95 million, being the most pessimistic, "Scenario B", computed R\$83.74 million, corresponding to the most probable and "Scenario C", estimated R\$125.98 million representing the most optimistic. The economic indicators computed for the A scenario an NPV of R\$222.86 million and an IRR of 15.22% p.a.; for scenario B, NPV of R\$229.23 million and IRR 15.31% p.a.; for the more optimistic scenario C, NPV of R\$236.97 million and IRR 15.41% p.a. At SMC, NPV ranged between R\$143.89 and R\$463.76 million, with an average of R\$297.29 million. The IRR varied between 14.39% and 17.87%, with an average of 16.23%. It is concluded that the decommissioning presented a positive NPV, admitting the feasibility in the three projected horizons, but the scenario B was the most acceptable to the market conditions. The work contributes to future decommissioning projects in Brazil, considering the scenario of stimulus to renewable sources, in addition to other environmental and socioeconomic aspects involved. It helps managers and investors to make decisions, as well as formulate policies in relation to the topic addressed.

Keywords: Demobilization. thermoelectric. NPV. IRR. WACC.

4.1 INTRODUÇÃO

Ao se observar o histórico do Setor Elétrico Brasileiro (SEB), é possível identificar ocasiões marcantes para inclusão das usinas termelétricas com vistas ao atendimento das necessidades de expansão da oferta de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN). Até os anos 2000 o sistema era eminentemente hidrelétrico com um apoio marginal das termelétricas nas situações de baixas afluências. Por efeito da escassez hídrica, surgiu a necessidade de diversificar a matriz energética através de outras fontes de energia, optando-se pela contratação regulada de usinas termoelétricas movidas à óleo combustível, acelerando a capacidade de geração e equilibrando a oferta e a demanda por eletricidade, e incentivando a inserção de fontes renováveis (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2017; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2018).

Com a crescente preocupação sobre a dependência e problemas causados pelo uso dos combustíveis fósseis ao meio ambiente, observa-se novas formas de produzir e consumir energia. Portanto, há um grande esforço para desenvolver cada vez mais alternativas para suprimento da demanda energética com o mínimo de externalidades. Essa visão afeta diretamente os agentes que operam fazendo uso de fontes poluentes, as usinas termoelétricas. Para *International Atomic Energy Agency* (IAEA), usinas movidas a combustíveis fósseis estão no final de seus ciclos operacionais e em breve, enfrentarão a paralização permanente (INVERNIZZI et al., 2019; MALEK et al., 2017).

No Brasil, a participação das termoelétricas no total de geração vem caindo nos últimos anos, principalmente, as fontes derivadas de petróleo. Entre as fontes de geração termoelétrica (gás natural, biomassa, nuclear e carvão) que apresentaram crescimento, a participação dos derivados do petróleo caíram de 14,6% em 2010, para 7,8% em 2020. Somente no período de 2018 a 2019, a geração elétrica em GWh dos derivados de petróleo reduziu de 9.293 para 6.926, representando queda de 25,5% (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICA - EPE, 2020).

O cenário nacional, pressupõe uma tendência e visão estratégica voltada para redução das usinas termoelétricas com uso de fontes derivadas do petróleo, encerrando os contratos de suprimento de energia, restando, para os empreendimentos planejar o descomissionamento, ou seja, a fase final do seu ciclo de vida. Para a viabilidade econômica do negócio, sabe-se que os ativos devem superar os custos de todo processo de fechamento. Este, leva em consideração as instalações, a localização, o investimento inicial, a construção e toda operação que envolve o empreendimento (NUCLEAR ENERGY AGENCY - NEA, 2003).

Na tomada de decisão para desmobilizar, é inevitável ter um período com fluxo de caixa negativo, ou seja, projetos de descomissionamento impedem que se tenha qualquer geração de receita. No futuro tais projetos poderão acarretar problemas do ponto de vista financeiro, que por sua vez, impactam diretamente o meio ambiente, entre outros aspectos socioeconômicos, afetando até mesmo os trabalhadores que fazem parte dos empreendimentos (INVERNIZZI et al. 2019; PARENTE et. al., 2006; NATIONAL AUDIT OFFICE - NAO, 2019).

Atualmente, existem diversos relatórios e experiências sobre desmobilização em setores, como o petróleo, gás, energia eólica, solar, mineração, e principalmente usinas nucleares (MARTINS et al., 2020). As características em comum dos projetos de descomissionamento geralmente envolvem, grandes volumes de investimentos, impactos ambientais, econômicos, sociais e de infraestrutura. Estes projetos relatados, oferecem uma visão estratégica para o descomissionamento de usinas termoeletricas movidas à óleo combustível, tema escasso dentro da literatura nacional e internacional. Nas próximas décadas, outros empreendimentos enfrentarão fechamentos devido aos ciclos de vida útil. Suas estruturas feitas sob medidas tornam o descomissionamento extremamente complexo e difícil de monitorar (MIGNACCA; LOCATELLI e VELENTURF, 2020; RAIMI, 2017).

Ao redor do mundo, vários países têm buscado reforçar leis e boas práticas dos projetos de descomissionamento. A Holanda incluiu um plano mestre com princípios da economia circular (ENERGIE BEHEER NEDERLAND - EBN, 2016). No Reino Unido os planos de descomissionamento integram novas infraestruturas de energias renováveis (DEPARTMENT FOR BUSINESS, ENERGY & INDUSTRIAL STRATEGY - BEIS, 2019).

No Brasil, a falta de políticas específicas sobre o descomissionamento de termoeletricas deixa o ambiente com muitas incertezas para um futuro próximo, onde o fechamento será inevitável. A compreensão dos desafios visa a mitigação de problemas econômicos, sociais e ambientais. As políticas deverão considerar questões técnicas, jurídicas, econômicas, sociais e ambientais (INVERNIZZI et al., 2017). Para Gitman (2010), projetos de investimento assumem a existência de riscos. Logo, é necessário planejar ações e fazer uso dos melhores métodos para análise de viabilidade econômica.

Este artigo analisou a viabilidade econômica do descomissionamento de uma termoeletrica a óleo combustível no Brasil em término de contrato para suprimento de energia. O método do Fluxo de Caixa Livre da Firma (FCLF) ou *Free Cash Flow for the Firm* (FCFF), foi empregado com objetivo de estimar o valor da usina. Para tomada de decisão, sob critérios determinísticos foram utilizados o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno

(TIR) e Custo Médio Ponderado de Capital (WACC), indicados por Gitman (2010), Lapponi (2007) e Assaf Neto (2014). Os riscos compreendidos no projeto, foram mensurados por meio da simulação de Monte Carlo pela avaliação das variáveis consideradas mais críticas dentro do modelo (LAMERS et al., 2015).

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Objeto de Estudo

O estudo de caso apresentado no trabalho refere-se à aplicação da metodologia proposta ao caso real de uma termoeletrica a óleo combustível localizada no município de João Pessoa, Paraíba, com potência instalada de 342 MW em área de 800 mil m².

4.2.2 Desenvolvimento do modelo

Para analisar a desmobilização, considerando os riscos, partiu-se do Balanço Patrimonial (BP), Demonstração de Resultado do Exercício (DRE), e informações gerenciais da termoeletrica, no período de 2010 a 2020.

Um plano de descomissionamento foi elaborado para análise do empreendimento e construção de possíveis cenários a fim de obter o valor residual ao término de contrato. As projeções do fluxo de caixa (2021 a 2024) consideraram as estimativas de receita da administração da empresa. Para determinar o valor econômico foi aplicado o Fluxo de Caixa Livre da Firma (FCLF) ou *Free Cash Flow for the Firm* (FCFF), descontado pelo Custo Médio Ponderado de Capital ou *Weighted Average Cost Of Capital* (WACC) de 10,55% calculado pela Aneel, através da nota técnica 45/2020 (ANEEL, 2020).

4.2.2.1 Demonstrações financeiras

Os dados brutos do BP e DRE foram tratados, classificados e agrupados em despesas e receitas, a fim de se extrair informações detalhadas para cada tipo de lançamento existente. Os dados foram tabulados ano a ano, criando a série histórica do fluxo de caixa. Seguiram-se as recomendações de Matarazzo (2010), Penman (2003) e Salotti et al., (2019).

Após investigação preliminar da usina, utilizou-se a técnica de Análise Vertical e Horizontal, pela capacidade de relacionar as contas e projetar cenários (MATARAZZO, 2010;

PENMAN, 2013). Todas as contas do BP e DRE, no período de 2021 a 2024, foram projetadas com a média dos últimos 5 anos de operação, com exceção da conta “outras receitas/despesas” e “receita operacional bruta”, nas quais foram levadas em consideração as projeções futuras da administração.

Os ativos contabilizados no período de 2010 a 2020, foram classificados e separados em classes. Para estimar a vida útil e taxa de depreciação dos ativos utilizou-se a tabela da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através do método linear (Equação 1), em que a depreciação ocorre de modo constante no tempo (CASAROTTO, 2000).

$$D = \frac{1}{N}(P - S) \quad (1)$$

Onde, P representa o valor inicial do ativo, S é dado pelo valor residual e N é a vida útil do ativo. No cálculo da depreciação é necessário incluir o valor residual do ativo, ou seja, o valor que o ativo representa para a empresa mesmo depois de totalmente depreciado, representa a estimativa que a empresa tem em receber pela venda futura após o fim da vida útil (CASAROTTO, 2000).

Pela dificuldade de estimar o valor residual dos bens, considerou-se que terão valor igual a zero. Contudo, a estimativa dos valores residuais foi incluída no plano de desmobilização em 2024, ao término do contrato. Durante a análise, por decisão estratégica da usina a partir de 2020 todos os valores a depreciar foram ajustados ao término de contrato, ficando o saldo zerado no ano de 2025.

Na DRE observou-se as despesas operacionais da usina, identificando quanto a empresa gasta para gerar energia em cada conta: Energia comprada para revenda; Encargos de transmissão; Matéria-prima/insumos para produção; Pessoal (encargos sociais, férias, rescisões, participação em lucros, e outras despesas); Administradores; Materiais; Serviços de terceiros; Arrendamentos e aluguéis; Seguros; Doações e contribuições; Provisão; Perdas alienação e desativação de bens; Recuperação de despesas; Tributos; Amortização; e Gastos diversos.

4.2.2.2 Fluxo de Caixa Livre da Firma (FCLF)

O FCLF é amplamente usado em casos de abertura e fechamento de capital, análise de novos investimentos, consultorias, fusões, cisões, compra e venda de participações e

determinação do “preço justo” de uma ação. Sucede do registro de entradas e saídas de um determinado investimento, mostrando o lucro operacional da empresa após os impostos, redução de investimentos em capital de giro, equipamentos, instalações e outros ativos da operação da empresa. O método garante sofisticação e confiabilidade para estimar o valor da empresa, visto que é baseada em uma taxa, refletindo o nível de risco do fluxo de caixa, além de incluir parâmetros importantes, como o risco do investimento. A estrutura do FCLF é demonstrada na Tabela 4.1 (COPELAND; KOLLER; MURRIM, 2002; MARTELANC; PASIN; CAVALCANTE, 2005).

Tabela 4.1 Estrutura do Fluxo de Caixa Livre da Firma (FCLF).

(+) EBIT (resultado operacional)
(-) Impostos sobre EBIT (IR e CSLL)
(+) Depreciação
(-) Variação de investimentos em ativos fixos (imobilizado e intangível)
(-) Variação da necessidade de capital de giro
(=) Fluxo de Caixa Livre da Firma

Fonte: Assaf Neto (2014).

Para estimar e avaliar o FCLF contabilizou-se a receita, os investimentos realizados em imobilizados e intangíveis, a Necessidade do Capital de Giro (NCG), com base em Matarazzo (2010) e Penman (2013). A depreciação não gera saída de caixa sendo retirada do resultado para reduzir impostos e, posteriormente, retornou ao fluxo de caixa (ASSAF NETO, 2014).

4.2.2.3 Plano de descomissionamento

O plano de desmobilização foi dividido em quatro grupos: ativos (imóveis, estoques e imobilizados); custos ambientais (estimativas para desativação); custos financeiros e tributários; e demandas jurídicas (trabalhistas, tributárias, rescisões contratuais e encerramento do Cadastro Nacional de Pessoas Jurídicas - CNPJ). A Figura 4.1 apresenta o plano de desmobilização, para planejamento e simulação de três cenários (pessimista, mais provável, otimista) após o término de contrato de suprimento de energia.

Entre os ativos da usina, o imobilizado foi levantado de acordo com as demonstrações financeiras. O imóvel foi retirado da análise por envolver assuntos estratégicos da usina e discussões jurídicas específicas, dificultando a análise no período. Os estoques (combustíveis e lubrificantes) serão analisados pelo valor representado no ativo da usina. A importância do

estoque é mensurada em relação ao volume físico e a sua participação no total dos investimentos realizados. Com base na análise dos dados, foi possível selecionar os ativos mais representativos pela aplicação do método da curva ABC (ASSAF NETO, 2014).

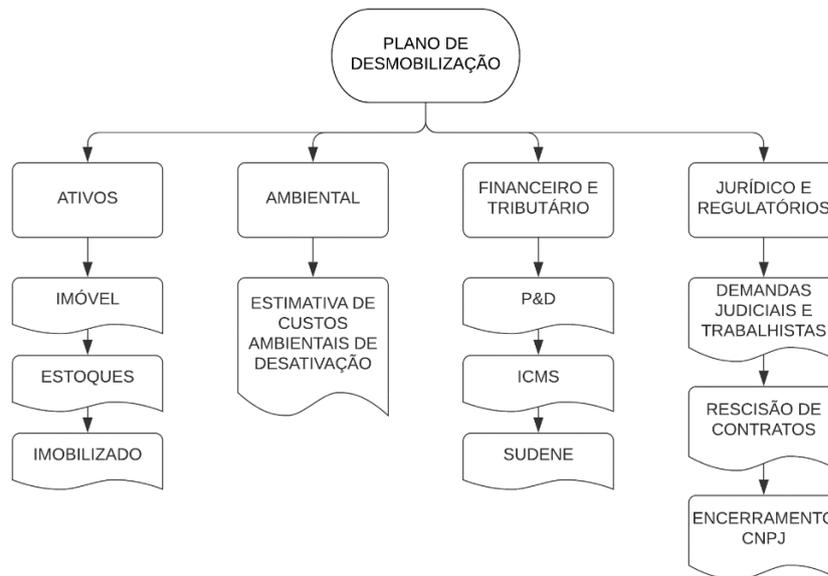


Figura 4.1 Plano de desmobilização para término de contrato de concessão em 2024.

Fonte: Autor (2022).

Carvalho (2002) classifica o estoque em três categorias: A, B e C. Onde na categoria A são apresentados todos os ativos que demanda maior investimento, e conseqüentemente, maior gestão. Geralmente, apresentam baixa giro e o volume estocado é altamente significativo. Na categoria B são apresentados os ativos que necessitam de menor controle. Por fim, os itens elencados na categoria C são de baixa representatividade, dispensando maiores cuidados. A Figura 4.2 mostra a classificação gráfica da curva ABC.

Os custos ambientais foram levantados via consultoria especializada e orçamentos técnicos fornecidos pela própria empresa. Entre eles, foram observadas algumas etapas na análise para custo efetivo: plano de desativação para apresentação ao órgão ambiental; investigação ambiental do solo e da água subterrânea, monitoramento da água subterrânea, relatório de desativação, e destinação de resíduos perigosos. As estimativas foram incluídas no cálculo da desmobilização.

Nos aspectos tributários existem particularidades que envolvem o terreno e entraves judiciais com o Estado da região. Contudo, levantou-se os créditos e débitos dentro dos dados contábeis disponíveis para estimativa do impacto na desmobilização. A usina possui o benefício

da Sudene concedido pelo Governo Federal que reduz o imposto de renda a pagar em 75%. Porém, existe muita incerteza sobre a lei que rege o benefício deixando em aberto o tratamento a ser dado sobre os casos de desmobilização do empreendimento. Em cenário conservador, deve-se colocar em contas a devolver para Sudene. Portanto, o benefício não foi incluído nos resultados da desmobilização.

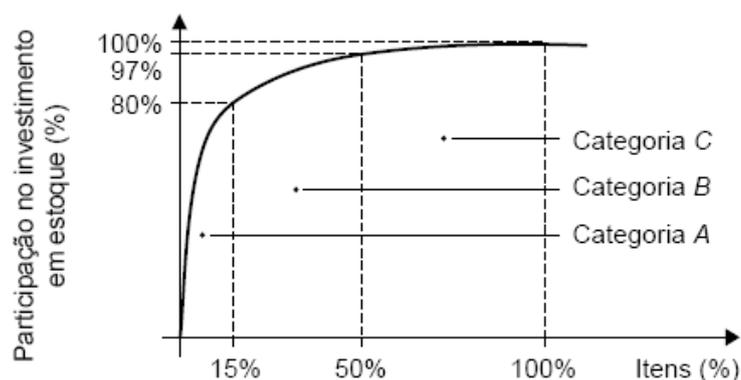


Figura 4.2. Curva ABC

Fonte: Assaf Neto (2014).

Os custos com demandas judiciais da usina foram identificados com base em relatórios do departamento jurídico da usina onde foi possível traçar três cenários (provável, possível e remoto) para todas as esferas judiciais. Ainda nesse escopo jurídico identificou-se que não haverá multas e/ou custos contratuais pelo término das operações. Na etapa que compreende o investimento inicial (2010), não foi apresentada a DRE, desse modo, tais informações foram coletadas com base no balanço do período analisado.

Durante o estudo foram incluídos valores percentuais de contingência para custos diretos e indiretos, utilizados mediante pesquisa em relatório desenvolvido pela *Duke Energy*, após execução de inúmeros planos de desmobilização (BURNS & MCDONNELL, 2017).

4.2.3 Identificação de risco ou variáveis de entrada

Para elaboração da análise do descomissionamento em situação de risco evidenciaram-se as oportunidades e as ameaças que influenciam nas variáveis envolvidas na geração da termoelétrica. Para avaliar possíveis desvios nos resultados na avaliação do modelo, aplicou-se a simulação de Monte Carlo (CORREIA NETO, 2009).

Freitas (2009) recomenda que as variáveis de entrada correspondam aos pontos mais críticos em relação à análise de sensibilidade. As variáveis mais significativas que afetam a viabilidade do projeto de acordo com o levantamento de dados foram: receita, uma vez que a geração depende dessa variável; possíveis cenários da desmobilização; taxa de desconto (WACC), uma vez que afeta diretamente o VPL; e o custo com matéria prima, por ser a principal despesa da usina. Utilizou-se a distribuição triangular para cada variável analisada, exigindo a entrada de valor mínimo, um valor mais provável e um valor máximo (LAMERS et al., 2015; ROTELLA JUNIOR et al., 2021).

4.2.4 Identificação das variáveis de análise ou variáveis de saída

O Valor Presente Líquido (VPL) representa a aceitação ou negação de um projeto de investimento (GITMAN, 2010). O VPL (Equação 2) foi usado para avaliar a lucratividade do projeto, onde na Equação 1, FC_t é o fluxo de caixa líquido de cada período, K é a taxa de desconto (WACC), I_0 é o investimento processado no momento zero e I_t valor do investimento previsto em cada período subsequente (ASSAF NETO, 2014).

$$VPL = \left[\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t} \right] - \left[I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+K)^t} \right] \quad (2)$$

Como taxa mínima exigida o estudo utilizou o Custo Médio Ponderado de Capital (WACC), que é a taxa de retorno mínima exigida por credores e acionistas. O cálculo é feito de acordo com a Equação 3 (ASSAF NETO, 2014):

$$WACC = \left(\frac{E}{E+D} \right) Ke + \left(\frac{D}{E+D} \right) Kd(1-T) \quad (3)$$

Onde, E é o valor do Patrimônio Líquido, D é o valor da Dívida Líquida, Ke é o Custo do Capital Próprio, Kd é o Custo do Capital de Terceiros e T é a Taxa Marginal do Imposto, 34% no Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2021).

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é, possivelmente, a técnica mais usada para detectar a criação de valor de um projeto. A TIR é a taxa de desconto que iguala, em determinado período, as entradas com as saídas. No processo de decisão do VPL, caso a taxa requerida seja menor que a TIR, o projeto será aceito (Equação 4) (LAPPONI, 2007; GITMAN, 2010; ASSAF NETO, 2014).

$$I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+K)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t} \quad (4)$$

Onde I_0 é o montante do investimento no período zero, I_t são os montantes previstos de investimento em cada período subsequente, K é a taxa equivalente periódica (TIR), e FC são os fluxos de entradas de caixa em cada período de vida do projeto.

4.2.5 Simulação e análise dos modelos

A análise de risco foi realizada pela aplicação da simulação de Monte Carlo para simular cenários futuros, baseados em variáveis estocásticas cujos valores são gerados aleatoriamente dentro de uma distribuição de probabilidade que as representa (CORREIA NETO, 2009).

Os riscos do modelo, variáveis de entrada, retornam sobre os indicadores, VPL, WACC e TIR, selecionados como parâmetros de saída. Depois de mensurados, foram realizadas 10.000 simulações, gerando uma série de valores para cada variável de análise para a obtenção de sua distribuição de frequência simples e acumulada, estatísticas descritivas e sensibilidade das variáveis de entrada. Obtida a distribuição de probabilidades das variáveis de saída, toma-se a decisão com base nas informações encontradas e levando-se em consideração outros aspectos relevantes do projeto (LAMERS et al., 2015).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4.3 mostra a proporção dos ativos existentes na usina e há grande destinação aos imobilizados (48,46%), devido às máquinas e equipamentos, edificações e outros ativos. Possui um nível elevado de contas a receber (15,62%), disponibilidades em caixa e equivalentes (14,30%) que dão liquidez para as operações, o estoque (7,04%) e outros ativos. No processo de exploração dos custos da desmobilização foi dada maior atenção aos grandes ativos (imobilizados e estoques) da usina, tendo em vista, a capacidade de geração de caixa para usina revertendo possíveis prejuízos no término do contrato.

No passivo destacam-se as obrigações com os acionistas no patrimônio líquido (55,8%), em segundo lugar os tributos (federais, estaduais, municipais, INSS, FGTS, taxas, imposto de renda e contribuição social) que representam 23,3% e em terceiro lugar empréstimos e financiamentos (18%). Percebeu-se que o empreendimento possui baixo nível endividamento

com fornecedores (1,1%) e obrigações sociais e trabalhistas (0,6%) e outros passivos (0,2%).

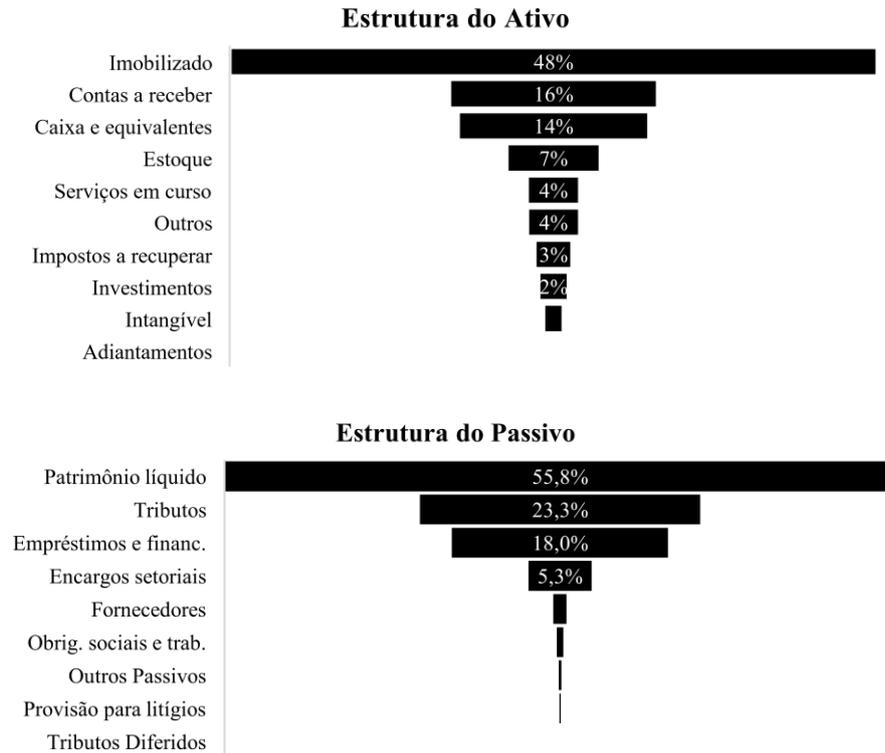


Figura 4.3. Estrutura dos ativos e passivos da usina em 2020.

Fonte: Autor (2022).

A Figura 4.4 mostra os grupos de receitas da usina. No primeiro grupo, por “disponibilidade” onde a usina recebe uma receita fixa para cobrir custos fixos e outra receita variável sempre que é solicitada para gerar energia. Esta última receita é destinada para remuneração de custos variáveis (O&M) e compra de combustíveis. Considerando o período de 2010 a 2020, esse tipo de receita representou aproximadamente 24% da receita total. Por “despacho”, na operação o gerador é obrigado a entregar a quantidade de energia contratada. O valor pago deve cobrir custos operacionais da usina (61% da receita total); e na “revenda”, a usina compra energia no mercado de curto prazo e revende, rendendo 15% da receita total.

A Figura 4.5 apresenta a evolução da depreciação anual de 2010 a 2019, considerando todos os ativos de acordo com a tabela de depreciação (ANEEL, 2015). No período de 2020 a 2024, por decisão estratégica da empresa todos ativos foram amortizados. A medida visou melhorar o resultado final da DRE pela grande quantidade de ativos a depreciar em 2025.

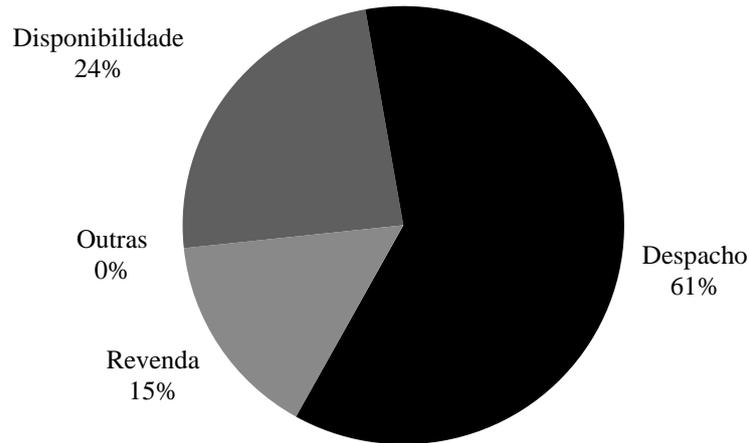


Figura 4.4. Percentual de distribuição das fontes de receita no período de 2011 a 2020.

Fonte: Elaboração própria (2022).

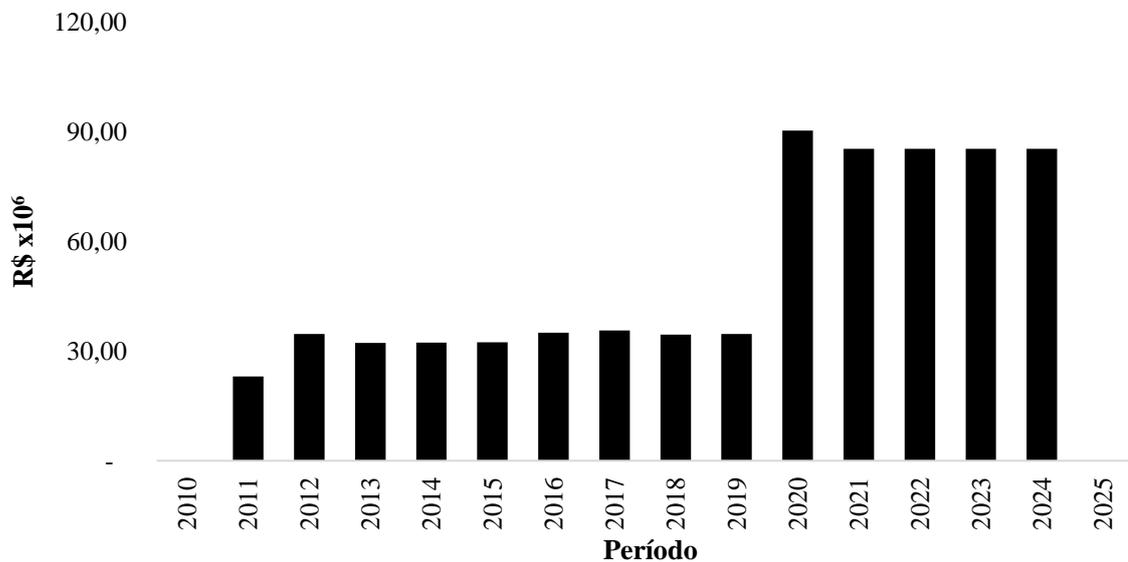


Figura 4.5. Evolução Depreciação anual, no período de 2011 a 2024.

Fonte: Autor (2022).

Em 2020, o Capital de Giro Líquido (CGL) foi de R\$ 439,86 milhões e o Índice de Liquidez Corrente (ILC) mostrou que a usina tinha R\$ 3,86 (três reais e oitenta e seis centavos) de bens e direitos a receber para cada R\$ 1,00 (um real) de obrigação, consolidando a saúde financeira do empreendimento. A Tabela 4.2 mostra a composição do ativo imobilizado (Edificações; Máquinas; Veículos; Móveis e utensílios; e Softwares) da usina, de 2011 até 2024.

A Tabela 4.3 apresenta a classificação dos ativos em estoque, por quantidade, custo total, percentual individual para cada classe de ativos, percentual acumulado e a classificação da curva ABC. O método ABC foi implementado por uma política de venda dos ativos, a fim de estabelecer prioridades, administração e controle de estoques.

Tabela 4.2. Total de ativos agrupados na data base em 31 de dezembro de 2020.

Ativos	Valor (R\$)
Edificações	36.167.068,26
Máquinas	658.003.273,10
Veículos	270.333,32
Móveis e Utensílios	587.800,73
Software	31.832.243,04
Total de ativos imobilizados	726.860.718,45

Fonte: Autor (2022).

Tabela 4.3. Classificação e agrupamento de ativos imobilizados pela Curva ABC.

Ativos	Quantidade de Ativos	Custo Total (R\$)	Custo Total (%)	Acumulado (%)	Categoria
Máquinas	1.683	575.291.163,96	79,15	79,15	A
Edificações	343	58.838.871,59	8,09	87,24	B
Material elétrico	165	37.576.187,46	5,17	92,41	B
Software	9	31.862.966,18	4,38	96,80	B
Estruturas	2	11.317.971,01	1,56	98,35	C
Equipamentos	187	8.078.165,17	1,11	99,46	C
Informática	55	2.196.423,50	0,30	99,77	C
Ferramentas	38	802.740,85	0,11	99,88	C
Móveis	36	280.583,57	0,04	99,92	C
Veículos	3	270.333,32	0,04	99,95	C
Utensílios	7	173.329,11	0,02	99,98	C
Material ar condicionados	7	79.780,66	0,01	99,99	C
Material primeiros socorros	4	56.236,15	0,01	100,00	C
Material incêndio	4	21.665,24	0,00	100,00	C
Diversos	6	14.300,68	0,00	100,00	C
		726.860.718			

Fonte: Autor (2022).

Dentre os ativos contabilizados, as máquinas representam 79,15% de todo o investimento realizado pela empresa. Classificado como categoria A da curva ABC, exerce o maior impacto em termo de orçamento para a empresa. Na categoria B estão edificações (estrutura física), materiais elétricos (barramentos, chaves, disjuntores, iluminações, TC, TP e transformadores) e software (licenças de aquisição). Dessa categoria estima-se que serão negociados apenas os materiais elétricos, tendo em vista que, edificações e software não poderão ser negociados ou vendidos. A categoria C retornou com diversos ativos, destacando as estruturas (torres), equipamentos, materiais de informática, ferramentas, móveis, veículos, materiais e utensílios e outros. Apesar do baixo valor agregado, estes também devem ser negociados e incluídos no planejamento.

A Tabela 4.4 apresenta os três cenários projetados do plano de descomissionamento da usina em término de contrato (2024) e desmobilização prevista para 2025.

Tabela 4.4. Cenários do plano de descomissionamento em término de contrato (2024), em milhões de Reais (R\$ x10⁶).

DESCRIÇÃO	Cenário A	Cenário B	Cenário C
Custo total	-43,13	-19,88	-43,88
Meio ambiente	-1,20	-0,60	-0,60
Demandas Jurídicas	-2,00	-2,00	-2,00
Pessoal	-3,60	-3,60	-4,80
PDI	-6,70	-6,70	-6,70
Seguros	-2,00	-2,00	-2,00
Desmontagem do Imobilizado	-18,00	-	-18,00
Despesas Operacionais	-1,00	-1,00	-1,00
Contingência Custos indiretos (5%)	-1,73	-0,80	-1,76
Contingência Custos Diretos (20%)	-6,90	-3,18	-7,02
Receita total	106,60	126,80	203,60
Caixa Orçado	97,00	97,00	97,00
Venda de Imobilizados	-	25,00	97,00
Venda de Estoque	9,60	4,80	9,60
Tributos a pagar	-6,52	-23,19	-33,75
Valor líquido	56,95	83,73	125,97

Fonte: Autor (2022).

No “**Cenário A**”, considerado o mais pessimista, contabilizou R\$56,95 milhões, computou a venda dos ativos como sucata e alto custo de desmontagem; custos ambientais para desativação e venda de estoques por 20% do disponibilizado pela empresa (base = 30/06/2019). O “**Cenário B**”, mais provável, computou R\$83,73 milhões, composto na venda dos ativos por 10% do valor residual (base em 31/12/2024); venda de estoques por 10% (base = 30/06/2019); melhor cenário para custos ambientais de desativação. Já o “**Cenário C**”, considerou a venda dos ativos no melhor cenário, acumulando R\$125,97 milhões, com base em estudo realizado por consultoria especializada; venda de estoques por 20% (base = 30/06/2019); considera aumento dos custos com folha de pagamento pela maior demanda de serviços internamente.

A Figura 4.6 apresenta o FCLF, incluindo depreciação pela Aneel (2010 a 2019) e pelo tempo do contrato (2020 a 2024), em milhões de reais (R\$ x10⁶). Os valores contabilizados no período de 2021 a 2024 resultaram das projeções para os fluxos de caixas considerados. Os valores médios anuais dos fluxos de caixa entre 2021 e 2024 resultaram em cerca de R\$ 123,9 milhões.

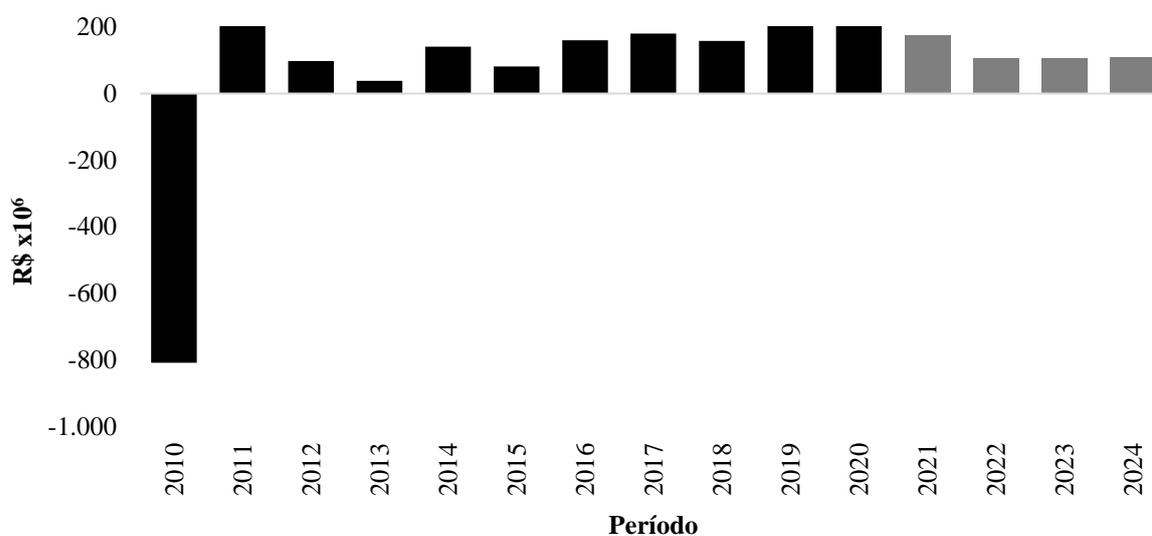


Figura 4.6. Fluxo de Caixa Livre da Firma, com depreciação pela Aneel (2010 a 2019) e pelo tempo do contrato (2020 a 2024), em milhões de reais (R\$ x 10⁶), de 2010 a 2024.

Fonte: Autor (2022).

O FCLF representa o resultado da usina após desconto de todas as obrigações operacionais sobre a receita líquida, ou seja, apresenta o montante disponível em relação às dívidas contraídas de terceiros e capital próprio. Observam-se bons níveis de estabilidade neste critério de avaliação dos resultados, visto que a empresa obteve resultado operacional satisfatório, mesmo com redução de investimentos em CAPEX, e pouca variação na necessidade de capital de giro, historicamente.

A Tabela 4.5 mostra o resultado da avaliação econômica através dos indicadores de viabilidade frente à análise dos três cenários do descomissionamento, contemplando todo o período (2010 a 2025). O VPL variou entre R\$222,86 milhões (cenário pessimista) e R\$236,97 milhões (cenário otimista). A TIR variou entre 15,22% a.a. a 15,41% a.a. para os cenários estudados, inferindo ganhos superiores a taxa requerida pelos acionistas e credores, calculada pela Aneel (10,55% a.a.), mostrando êxito do empreendimento em qualquer cenário.

Sabendo do alto grau de riscos, foram realizadas 10.000 simulações com diferentes probabilidades de ocorrência para cada uma das variáveis analisadas, suficientes para identificar os parâmetros sensíveis. A Tabela 4.6 apresenta as variáveis do modelo estocástico, atribuindo valores mínimos, mais prováveis e máximos, optando pela distribuição triangular e a escolha dos parâmetros da análise.

Tabela 4.5. Indicadores de avaliação econômica considerando o FCLF com depreciação pela ANEEL (2010 a 2020) e depreciação total dos ativos o término do contrato (2021 a 2025), em milhões de reais (R\$ x10⁶).

Indicadores	Cenário Pessimista (A)	Cenário Mais Provável (B)	Cenário Otimista (C)
VPL	222,86	229,23	236,97
TIR	15,22%	15,31%	15,41%

Fonte: Autor (2022).

Tabela 4.6. Valores máximo, mínimo, mais provável e parâmetros das variáveis de viabilidade econômica para estimativa do VPL e TIR, em milhões de reais (R\$ x10⁶).

Variáveis Analisadas	Mínimo	Mais provável	Máximo	Parâmetro
Receita	452,66	700,68	935,53	5 anos
Custo da matéria-prima	138,28	273,94	411,90	5 anos
Taxa de desconto (WACC)	9,50%	10,55%	11,61%	-10% a 10%
Cenários do descomissionamento (FCLF)	63,48	106,93	159,73	A, B e C

Fonte: Autor (2022).

A Figura 4.7 apresenta a participação das variáveis analisadas na composição das probabilidades do VPL e TIR. Analisando o VPL, o valor de entrada de maior impacto foi evidenciado pela taxa de desconto (WACC), uma vez que incorpora os custos de capital do empreendimento, impactou negativamente o resultado estimado em 41%. A matéria-prima, também se mostrou relevante para o resultado da usina, contribuindo negativamente em 22% para o resultado do VPL. Positivamente, a variável de maior grau de sensibilidade, destacou a relevância da receita (37%) para a melhoria dos resultados financeiros. Quanto aos cenários do descomissionamento (A, B e C), estimados no FCLF para 2025, o impacto sobre o VPL não foi significativo (0,00%).

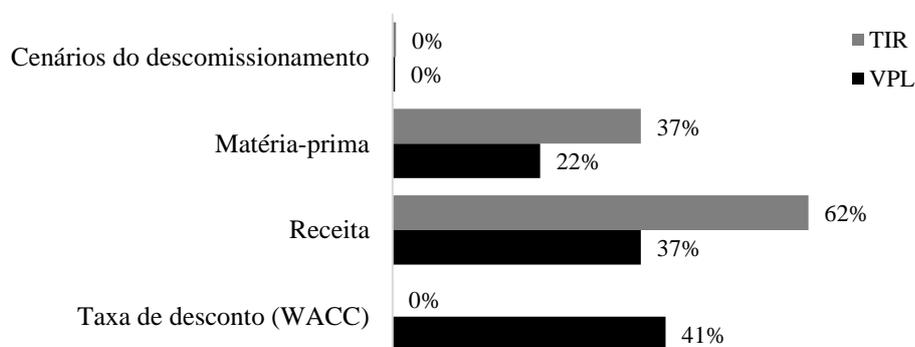


Figura 4.7. Análise de sensibilidade das variáveis de incerteza sobre o VPL e a TIR.

Fonte: Autor (2022).

Para a TIR, houve expressiva participação da receita (62%) quanto ao valor computado. Por outro lado, a matéria-prima afetou o resultado negativamente em 37%. A taxa de desconto (WACC) e os cenários do descomissionamento no FCLF não computaram nenhuma contribuição (0,00%), isso significa dizer que não houve qualquer influência sobre a viabilidade final do empreendimento. Ao identificar quais variáveis tiveram maior influência sobre o resultado do VPL e TIR, a simulação Monte Carlo permitiu realizar várias alternativas de ocorrências para prover uma distribuição de probabilidades que serviu para a análise de decisão dos gestores. Destaca-se que com base nos parâmetros (Tabela 4.6) escolhidos os resultados estiveram mais adequados à realidade do empreendimento.

Na Figura 4.8, observa-se a distribuição das variáveis de saída, onde as barras de frequência representam o eixo esquerdo e a curva de frequência acumulada caracterizam o eixo direito. Gitman (2010) destaca que o resultado do VPL depende do custo inicial, dos retornos, suas datas de ocorrência e taxa requerida pelo risco do projeto. O VPL variou entre R\$143,89 e R\$463,76 milhões, com média de R\$297,29 milhões e desvio padrão de R\$45,29 milhões. As chances do VPL ser maior que zero foi de 100%, afastando a inviabilidade do empreendimento.

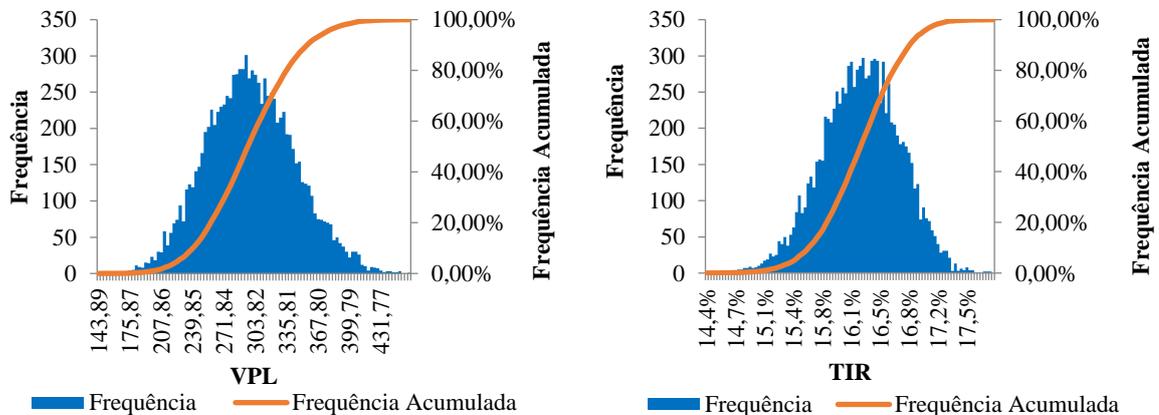


Figura 4.8. Histograma da frequência e frequência acumulada (%) da simulação de Monte Carlo, em milhões de reais (R\$ x10⁶).

Fonte: Autor (2022).

A frequência acumulada fornece o nível de risco para cada uma de suas estimativas, mostrou com 29% de certeza que o VPL será igual ou maior a R\$323,02 milhões sobre o histograma projetado. Para o VPL entre R\$270,00 e R\$320,00 milhões, valores próximos à média do histograma, existe uma probabilidade de 41%. Considerando o pior cenário (A), estimado em R\$222,86 a probabilidade de ocorrência foi de 95%, indicando que há grandes

chances do resultado ser maior que o computado, não apenas para o cenário mais pessimista (A), mas também para os demais, visto que ficaram abaixo da média e mediana.

A TIR variou entre 14,39% a.a. e 17,87% a.a. com média de 16,23% e desvio padrão de 0,47% a.a., indicando superioridade à taxa de desconto (WACC) de 10,55% a.a. calculada pela Aneel. Isso significa que a taxa de retorno do empreendimento foi maior que o custo de capital, detectando a geração de valor do projeto no período de análise. Assaf Neto (2014) aponta que no processo de decisão do VPL, caso a taxa requerida seja menor que a TIR, o projeto será aceito. As projeções mostram que ao término de contrato a TIR será maior que a taxa requerida, o WACC. A TIR calculada para os três cenários (pessimista, mais provável e otimista) ficou próximo da média e mediana, indicando forte correlação e chance de 99% para estar acima de 15%. As maiores frequências registradas apontam que para a TIR situar-se entre 15,90% e 16,60% a chance é de 53%.

Na Tabela 4.7, as medidas estatísticas de média, mediana, curtose e desvio padrão indicam que a distribuição dos valores de saída VPL e TIR seguem a distribuição normal, já que os valores da média e mediana são próximos entre si.

Tabela 4.7. Estatística descritiva das variáveis de saída, VPL e TIR.

Estatística	VPL	TIR
Média	R\$297,29	16,23%
Mediana	R\$295,91	16,24%
Desvio Padrão	R\$45,29	0,47%
Curtose	2,97	2,89
Coefficiente de Variação	0,0291	0,1523
Mínimo	R\$143,89	14,39%
Máximo	R\$463,76	17,87%
Percentis	VPL	TIR
0%	143,89	14,39%
10%	239,94	15,61%
20%	257,89	15,83%
30%	272,23	15,99%
40%	284,63	16,11%
50%	295,90	16,24%
60%	307,73	16,36%
70%	320,45	16,49%
80%	335,33	16,64%
90%	356,48	16,83%
100%	463,76	17,87%

Fonte: Autor (2022).

O desvio padrão, que reflete a variação das estimativas, constituindo um importante indicador de risco para tomada de decisão, indicou a TIR como melhor parâmetro para avaliar o grau de dispersão dos resultados. A análise dos percentis indica que existe alta probabilidade de viabilidade econômica do empreendimento, com 100% de chance de a TIR estar acima de 10,55% a.a. e o VPL ser superior aos valores determinísticos.

4.4 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a viabilidade econômica do descomissionamento de uma usina termoelétrica movida a óleo combustível, com auxílio dos métodos determinístico e estocástico. O fluxo de caixa descontado mostrou êxito do empreendimento, retratando lucro operacional, após impostos, investimentos em capital de giro, máquinas, equipamentos, instalações e outros ativos contabilizados no período. O VPL apresentou resultado positivo, variando entre R\$ 222,86 milhões (cenário pessimista) e R\$ 236,97 milhões (cenário otimista). A TIR estimada foi superior à taxa de desconto de 10,55% a.a., no intervalo de 15,22% a.a. e 15,41% a.a.

A simulação de Monte Carlo indicou com aproximadamente 100% de certeza que o resultado das variáveis de saída, apresentam viabilidade econômica. A análise de sensibilidade mostrou que das variáveis críticas testadas, a variável de maior impacto sobre o VPL foi a taxa de desconto, afetando negativamente. No tocante a TIR, mostrou-se mais sensível a receita, contribuindo positivamente para o aumento da taxa de retorno, afirmando que o desempenho econômico do projeto é altamente dependente da receita de venda de energia. O estudo ainda indicou a TIR como melhor parâmetro do projeto, visto que refletiu menor variação em relação às estimativas.

Conclui-se que apesar do risco, e uma possível descontinuidade da usina ao término do contrato de suprimento de energia, do ponto de vista dos acionistas, existe uma alta capacidade de ganhos financeiros e geração de riqueza para este modelo de negócio. Por fim, o estudo contribui para futuros projetos de descomissionamento no Brasil, considerando o cenário de estímulo às fontes renováveis, além de outros aspectos de caráter ambiental e socioeconômico. Auxilia gestores para tomada de decisão e formulação de políticas em relação ao tema abordado.

REFERÊNCIAS

- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Estabelece os critérios e as condições do programa da Resposta da Demanda**, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017792.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica 34/2021** – SGT-SRM/ANEEL, de 10/03/2021, Atualização da Taxa Regulatória de Remuneração do Capital. Brasília: ANEEL, 2021.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa ASSAF NETO, A. **Finanças Corporativas e Valor**. São Paulo: Atlas, 2014.
- BEIS - BUSINESS, ENERGY & INDUSTRIAL STRATEGY. **Decommissioning of offshore renewable energy installations under the energy Act 2004**. 2019.
- BURNS & MCDONNELL ENGINEERING COMPANY. **Decommissioning Cost Estimate Study**. Kansas. 2017.
- CARVALHO, J. M. C. **Logística**. 3ª ed. Lisboa: Edições Silabo, 2002.
- CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. H. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 9ª ed. São Paulo: Atlas, 2000.
- COPELAND, T; KOLLER, T; MURRIN, J. **Avaliação de Empresas –Valuation: Calculando e gerenciando o valor das empresas**. 3ª ed. São Paulo: Makron Books Ltda., 2002.
- CORREIA NETO, J. F. **Elaboração e avaliação de projetos de investimento considerando o risco**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- de Geração Nucleoelétrica. Brasília, DF. Disponível em: www.aneel.gov.br/biblioteca/. 2015.
- EBN - ENERGIE BEHEER NEDERLAND. **Netherlands masterplan for decommissioning and re-use**. 2016.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro, 2020.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Flexibilidade e Capacidade: Conceitos para a incorporação de atributos ao planejamento**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-316/NT_EPE_DEE-NT-067_2018-r0.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- FREITAS, C. P. **Relatório de Avaliação de Projecto de Investimento Central Termoelectrica a Biomassa Florestal (CTBF)**. Polytechnic of Porto - School of Engineering. 2009.
- GITMAN, L. J. **Princípios da Administração Financeira**. 12ª ed. Porto Alegre: Pearson, 2010.
- INVERNIZZI, D. L. An exploration of the relationship between nuclear decommissioning projects characteristics and cost performance. **Prog. Nucl. Energy**, p. 129–141. 2019.
- INVERNIZZI, D. L. Managing social challenges in the nuclear decommissioning industry: a responsible approach towards better performance. **Int. J. Proj. Manag.**, p. 1350–1364. 2017.
- LAMERS, P.; RONI, M. S.; TUMULURU, J. S.; JACOBSON, J. J.; CAFFERTY, K. G.; HANSEN, J. K.; KENNEY, K.; TEYMOURI, F.; BALS, B. Techno-economic analysis of decentralized biomass processing depots. **Bioresour. Technol.**, v. 194, p. 205-213, 2015.
- LAPPONI, J.C. **Projetos de investimento na empresa**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2007.
- MALEK, A. B. M. A.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. A.; TURKI, Y. A. A. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of a 10 MW biomassbased power plant in Malaysia. **J. Clean. Prod.**, v. 141, p. 502-513, 2017.

- MARTELANC, R; PASIN, R; CAVALCANTE, F. **Avaliação de empresas**: um guia para fusões e aquisições e gestão de valor. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- MARTINS, I. D.; MORAES, F.F.; TÁVORA G.; SOARES H.L.F.; INFANTE C.E.; ARRUDA E.F.; BAHIENSE, L.; CAPRACE, J.; LOURENÇO M.I. A review of the multicriteria decision analysis applied to oil and gas decommissioning problems. **Ocean & Coastal Management**, v. 184, 2020.
- MATARAZZO, D. C. **Análise financeira de balanços**: abordagem gerencial. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- MIGNACCA, B.; LOCATELLI, G.; VELENTURF, A. Modularisation as enabler of circular economy in energy infrastructure. **Energy Pol**, v. 139, p. 111371, 2020.
- NAO - NATIONAL AUDIT OFFICE. **Oil and gas in the UK**: offshore decommissioning. 2019.
- NEA - NUCLEAR ENERGY AGENCY. **Decommissioning of Nuclear Power Plants- Policies, Strategies and Costs**. Nuclear Energy Agency, OECD. 2003.
- nº 674, de 11 de Agosto de 2015. Taxas de depreciação aplicáveis aos ativos de Centrais
- PARENTE, V., FERREIRA, D., SANTOS, E. M., & LUCZYNSKI, E. Offshore decommissioning issues: deductibility and transferability. **Energy Policy**, p. 1992-2001. 2006.
- PENMAN, S. H. **Análise de Demonstrações Financeiras e Security Valuation**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- RAIMI, D. Decommissioning US power plants. Decisions, costs, and key issues. **Resources for the Future (RFF)**. Report, October. 2017.
- ROTELLA JUNIOR, P.; ROCHA, L. C. S.; MORIOKA, S. N.; BOLIS, I.; CHICCO, G.; MAZZA, A.; JANDA, K. Economic Analysis of the Investments in Battery Energy Storage Systems: Review and Current Perspectives. **Energies**, v. 14, p. 2503, 2021.
- SALOTTI, B. M.; LIMA, G. A. S. F.; MURCIA; F. D.; MALACRIDA, M. J. C.; PIMENTEL; R. C. **Contabilidade financeira**. São Paulo: Atlas, 2019.

5. ARTIGO 4 - ANÁLISE ECONÔMICA DE UMA TERMOELÉTRICA A ÓLEO COMBUSTÍVEL COM AUXÍLIO DE UM SISTEMA SOLAR TÉRMICO SOB CONDIÇÕES DE RISCO

RESUMO

A atuação das usinas termoeletricas dentro da matriz energética brasileira visa atender e garantir a segurança da demanda energética de acordo com as necessidades do Sistema Interligado Nacional (SIN). Para gerar energia, tais usinas operam com caldeiras, que são destinadas a produzir e acumular vapor, ou através da queima de combustível diretamente em motores, utilizando-se de diversas fontes primárias de energia. Observando os impactos do aquecimento global, a conjuntura climática e energética, é cada vez mais notório que as usinas termoeletricas convencionais modernizem suas estruturas para conseguir uma operação economicamente viável, diante das exigências e mudanças no mercado de energia. A energia solar térmica é uma das alternativas para absorção da energia solar. Contudo, faltam estudos sobre a viabilidade econômica e ambiental com inclusão de alternativas para substituir sistemas de geração a combustíveis fósseis. Este trabalho analisou a viabilidade técnica e econômica para substituir um sistema de caldeira a gás natural, por um sistema solar térmico. Realizou-se uma revisão da literatura, e analisou-se a viabilidade econômica através dos indicadores: Valor Presente Líquido (VPL); Custo Médio Ponderado de Capital (WACC); Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE); e Custo Nivelado da Eletricidade (LCOE). Com o objetivo de mensurar os riscos envolvidos no projeto, uma Simulação de Monte Carlo (SMC) foi realizada para avaliação das variáveis consideradas mais significativas dentro da execução do modelo. A revisão de literatura do sistema solar térmico apontou vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Os resultados econômicos mostraram os benefícios para substituição do sistema de caldeira, sendo mais lucrativo implantar o sistema solar térmico. Observando os horizontes de planejamento, o custo total com a tecnologia Fresnel alcançou a quantia máxima de R\$15,86 milhões, enquanto para o sistema de caldeira contabilizou R\$73,56 milhões. A receita de equilíbrio foi menor para o sistema solar térmico, com diferença de R\$4,79 milhões. O VPL mostrou a aceitação de ambos os sistemas. Sob a perspectiva do CAUE, o valor estimado para o sistema Fresnel variou de R\$1,94 a R\$2,82 milhões, inferior ao intervalo computado no uso do sistema de caldeira, que ficou entre R\$2,95 e R\$4,28 milhões. Quanto ao LCOE, o custo de energia produzida pela tecnologia Fresnel foi substancialmente inferior. Por fim, a pesquisa contribui para execução de projetos híbridos, estimula mais estudos sobre uso e o potencial da energia solar térmica, além de contribuir com alternativas energéticas, somando medidas mitigadoras de combate aos efeitos das mudanças climáticas.

Palavras-Chave: Termoeletrica, Refletor linear Fresnel, Solar térmica, Análise econômica.

ARTICLE 4 - ECONOMIC ANALYSIS OF A FUEL OIL THERMO ELECTRICITY WITH THE AID OF A SOLAR THERMAL SYSTEM UNDER RISK AND UNCERTAINTY CONDITIONS

ABSTRACT

The performance of thermoelectric plants within the Brazilian energy matrix aims to meet and ensure the security of energy demand according to the needs of the National Interconnected System (SIN). To generate energy, such plants operate with boilers, which are intended to produce and accumulate steam, or by burning fuel directly in engines, using various primary sources of energy. Observing the impacts of global warming, the climate and energy conjuncture, it is increasingly evident that conventional thermoelectric plants modernize their structures to achieve an economically viable operation, given the demands and changes in the energy market. Thermal solar energy is one of the alternatives for absorbing solar energy. However, there is a lack of studies on the economic and environmental feasibility with the inclusion of alternatives to replace fossil fuel generation systems. This work analyzed the technical and economic feasibility to replace a natural gas boiler system with a solar thermal system. A literature review was carried out, and the economic viability was analyzed through the indicators: Net Present Value (NPV); Weighted Average Cost of Capital (WACC); Equivalent Uniform Annual Cost (CAUE); and Levelized Cost of Electricity (LCOE). In order to measure the risks involved in the project, a Monte Carlo Simulation (SMC) was performed to evaluate the variables considered most significant within the execution of the model. The literature review of the solar thermal system pointed out technical, economic and environmental advantages. The economic results showed the benefits for replacing the boiler system, being more profitable to implement the solar thermal system. Looking at the planning horizons, the total cost with Fresnel technology reached the maximum amount of R\$15.86 million, while for the boiler system it amounted to R\$73.56 million. Break-even revenue was lower for the solar thermal system, with a difference of R\$4.79 million. The NPV showed the acceptance of both systems. From the CAUE perspective, the estimated value for the Fresnel system ranged from R\$1.94 to R\$2.82 million, lower than the calculated range for the use of the boiler system, which was between R\$2.95 and R\$4.28 million. As for LCOE, the cost of energy produced by Fresnel technology was substantially lower. Finally, the research contributes to the execution of hybrid projects, encourages further studies on the use and potential of solar thermal energy, in addition to contributing to energy alternatives, adding mitigating measures to combat the effects of climate change.

Keywords: Thermoelectric, Fresnel linear reflector, Solar thermal, Economic analysis.

5.1 INTRODUÇÃO

Historicamente, as termoeletricas brasileiras assumem posição estratégica no abastecimento e segurança energética no Sistema Interligado Nacional (SIN). Pela forte presença de hidrelétricas, as usinas térmicas são acionadas geralmente em períodos de escassez hídrica. Além disso, atuam também no suprimento de variações causadas pela intermitência das fontes renováveis, eólica e solar. Tais fatores destacam a importância e relevância das termoeletricas dentro da matriz energética (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2020; LIMA e SOUZA, 2015).

A geração de energia elétrica das usinas térmicas, geralmente, ocorre a partir da queima de carvão, óleo combustível ou gás natural em uma caldeira projetada para esta finalidade, ou diretamente na combustão da fonte primária nos motores. Essa caldeira é aquecida e a água em seu interior transforma-se em vapor, que impulsiona as turbinas e por sua vez movem os geradores de energia (ALVES FILHO, 2003; EPE, 2016).

Com o crescimento da demanda mundial por energia elétrica, associada ao crescimento da população e a evolução industrial, o mercado energético vem passando por um forte processo de transformação à medida que as usinas termoeletricas convencionais são substituídas por usinas a fontes renováveis. Até 2030, as térmicas à óleo combustível, continuarão perdendo espaço, podendo deixar de existir, em função das desvantagens ambientais e da redução das quantidades disponíveis de óleo combustível em todo o mundo (EPE, 2007; EPE, 2021; FAN et. al. 2019).

Na busca por alternativas energéticas de menor impacto ambiental e perpetuidade das usinas térmicas muitos estudos concentram-se em projetos híbridos, combinando fontes renováveis e não renováveis, ou processos de modernização (EPE, 2021; FAN et. al. 2019; LAUER et al, 2017; LIN et al., 2019; PAPAVASILIOU, 2020). Entre as fontes renováveis, a energia solar térmica tem se mostrado uma alternativa viável. Consiste na absorção da energia do sol e transferência, sob forma de calor, contribuindo com a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). O sistema solar térmico utiliza a tecnologia de Concentração Solar Térmica (CST), que faz a conversão da energia solar direta, usando espelhos refletivos por meio dos feixes solares para produzir energia, calor, eletricidade ou combustíveis. Na literatura outros estudos deram ênfase ao uso da energia solar térmica mostrando resultados favoráveis em vários tipos de usinas (FAN et al., 2019; HELLER E GAUCHÉ, 2013; KALOGIROU, 2014; SURESH, REDDY e KOLAR, 2010; SUN et al., 2020).

O futuro de um empreendimento depende das decisões de investimento tomadas para sua materialização. Observar as oportunidades de acordo com os objetivos do modelo de negócio maximiza o retorno para os investidores. Portanto, as empresas devem estudar e analisar os possíveis cenários para traçar planos e objetivos de curto, médio ou longo prazo (GITMAN, 2010; HAWAWINI e VIALLET, 2010; LAPPONI, 2007).

O panorama abordado permite realizar um estudo da aplicação industrial de energia solar térmica para substituição das caldeiras. Os concentradores solares de média temperatura conseguem atingir a mesma temperatura utilizada nas caldeiras para aquecer o óleo combustível, substituindo o uso de combustíveis fósseis por fontes renováveis (EPE, 2021; KALOGIROU, 2004; SHARMA et al., 2017).

Este trabalho analisou a viabilidade técnica e econômica de uma termoelétrica a óleo combustível, em um horizonte de dez anos, com a possibilidade de a usina continuar em operação efetuando a mudança energética entre os sistemas, de caldeira a gás natural para os refletores linear Fresnel. Com o objetivo de fornecer uma visão recente sobre o atual estado dos estudos da tecnologia Fresnel, foi realizada uma revisão da literatura para contribuir com o desenvolvimento do trabalho (WEBSTER e WATSON, 2002). Para analisar a viabilidade econômica, efetuou-se os cálculos relacionados ao Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), Valor Presente Líquido (VPL), e Custo Nivelado de Energia (*Levelized Cost Of Electricity* – LCOE). Para mensurar o risco do projeto, uma Simulação de Monte Carlo foi empregada para simular cenários futuros, baseados em variáveis estocásticas cujos valores são gerados aleatoriamente dentro de uma distribuição de probabilidade que as representa (CORREIA NETO, 2009; BRANKER; PATHAK; PEARCE, 2011; GUASTARROBA et al., 2009).

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Objeto de Estudo

O estudo de caso apresentado no trabalho refere-se à aplicação da metodologia proposta ao caso real de uma termoelétrica a óleo combustível localizada no município de João Pessoa, Paraíba, com potência instalada de 342 MW em área de 800 mil m².

5.2.2 Desenvolvimento da revisão da literatura: Refletor linear Fresnel (RLF)

Kitchenham (2004) afirma que uma revisão de literatura deve identificar a pesquisa, selecionar estudos e avaliar sua qualidade. A Tabela 5.1 mostra uma síntese de cada estágio utilizado para o desenvolvimento da revisão.

Tabela 5.1. Estágios da revisão da literatura.

Estágio da revisão sistemática	Detalhamento do processo
Identificação da pesquisa	Encontrar o maior número de estudos potencialmente relevantes.
Seleção de estudos	Identificar estudos que forneçam evidências diretas sobre o tema da pesquisa.
Avaliação da qualidade do estudo	Analisar a metodologia de pesquisa do estudo e avaliar os resultados.

Fonte: Kitchenham (2004)

O escopo da revisão da literatura consistiu na busca por artigos de pesquisa e artigos de revisão com ênfase em estudos recentes de 2010 a 2021. A pesquisa foi iniciada em maio de 2021, aceitando estudos publicados até essa data. A pesquisa ocorreu nas seguintes bases de dados: *ScienceDirect*, *Scopus* e *Web Of Science*.

O método de busca utilizou palavras-chave relacionadas ao tema do estudo: (“*linear concentrating Fresnel*” or “*linear Fresnel reflector*” and “*thermoelectric power plant*” or “*flamotubular boiler*” and “*viability*”). E por fim, os critérios de seleção foram realizados através da leitura de títulos e resumos, buscando encontrar os trabalhos em linha com o tema da pesquisa, com enfoque ambiental e econômico, avaliando o resultado das publicações em conformidade com os temas.

5.2.3 Desenvolvimento do modelo: Viabilidade econômica e técnica

Os investimentos foram analisados considerando três horizontes de tempo, taxa de desconto, capital despendido e risco do investimento. A projeção do fluxo de caixa foi construída com base na análise histórica (2010-2020) do Balanço Patrimonial (BP) e Demonstração de Resultado do Exercício (DRE) da usina, de acordo com Casarotto e Kopittke (2000), Matarazzo (2010) e Assaf Neto (2014).

Mediante estudo anterior do plano de descomissionamento, utilizou-se o valor residual do cenário “B”, mais provável como investimento inicial. Os horizontes consistiram em 10, 15 e 25 anos. Buscou-se analisar a continuidade das operações do empreendimento substituindo o sistema de caldeira a gás natural para o sistema de refletores linear Fresnel. Foram incorporados os valores de um possível descomissionamento ao encerramento das atividades, conforme recomenda Correia Neto (2009).

Para construção da projeção do fluxo de caixa, estimou-se a receita do empreendimento através do método de regressão linear (Equação 1), segundo Sartoris (2003), buscando encontrar relação entre as variáveis receita da usina e a geração de eletricidade das termoeletricas a óleo combustível no Brasil. Observou-se nessa etapa as informações contidas no Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, onde há uma previsão sobre a geração das termoeletricas a óleo combustível.

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon \quad (1)$$

onde, $\alpha + \beta X$ é a equação da reta e ε é o erro. O levantamento dos dados históricos de geração (Figura 5.1), partiu da base técnica do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em que se considerou o ano em que a usina começou a auferir receita até o último levantamento de dados (2011-2020). Os números da Figura 1 são apresentados em GWh (Gigawatt-hora), filtrados por tipo de usina térmica, óleo combustível e escala de tempo anual, de 2011 a 2021.

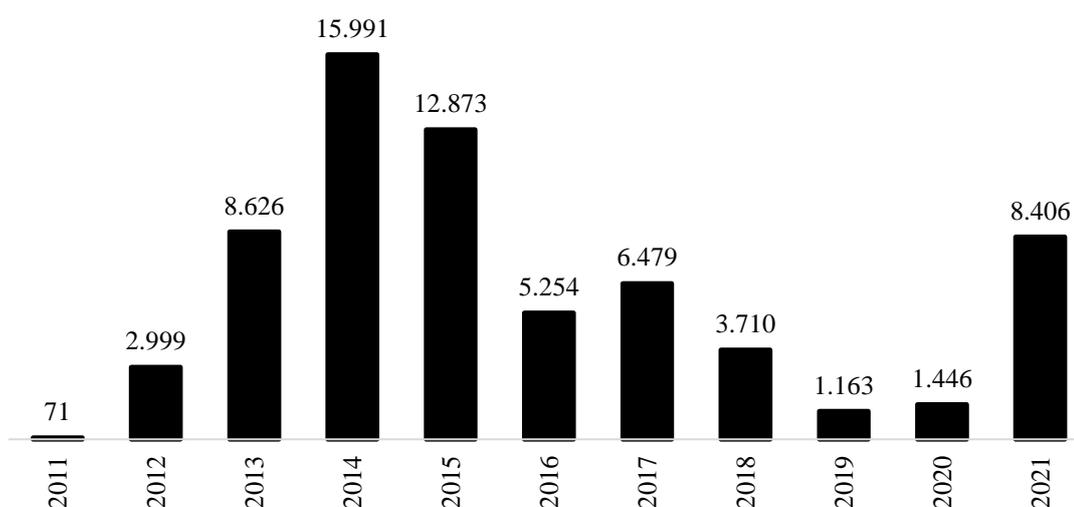


Figura 5.1. Geração anual de energia (GWh) das termoeletricas a óleo.

Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (2022).

A Tabela 5.2 apresenta o Fluxo de Caixa Livre da Firma (FCLF). A partir da receita projetada, contabilizaram-se o resultado operacional, impostos, investimentos e a Necessidade do Capital de Giro (NCG) da usina. A depreciação, apesar de ser um custo ou despesa, foi adicionada ao FCLF, após o imposto renda, pois não representa uma saída de caixa (ASSAF NETO, 2014; MATARAZZO, 2010; PENMAN, 2013).

Tabela 5.2. Estrutura do Fluxo de Caixa Livre da Firma (FCLF).

(+) EBIT (resultado operacional)
(-) Impostos sobre EBIT (IR e CSLL)
(+) Depreciação
(-) Variação de investimentos em ativos fixos (imobilizado e intangível)
(-) Variação da necessidade de capital de giro
(=) Fluxo de Caixa Livre da Firma (FCLF)

Fonte: Assaf Neto (2014).

A análise de viabilidade para inserção da tecnologia Fresnel em substituição ao sistema de caldeira a gás natural partiu do estudo técnico dos respectivos sistemas. A Figura 5.2.A. apresenta a caldeira usada no processo de geração de energia elétrica da usina, fabricante Aalborg, modelo 5, do tipo flamotubular (AALBORG INDUSTRIES, 2021). A Figura 5.2.B. mostra a estrutura do refletor linear Fresnel, modelo F-11 (INDUSTRIAL SOLAR, 2021). Ambos os sistemas têm vida útil de 25 anos, de acordo com a Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 674 (ANEEL, 2015).

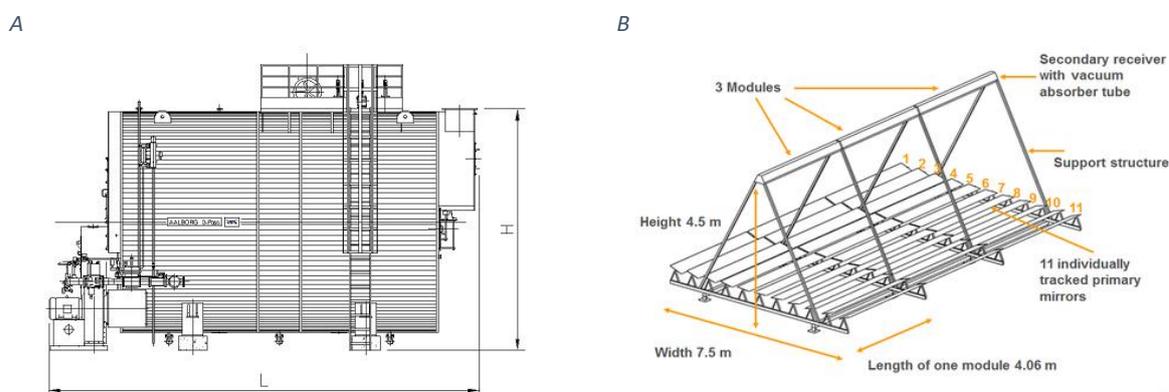


Figura 5.2. A. Caldeira flamotubular Aalborg 3-PASS a gás natural; B. Estrutura do refletor linear Fresnel LF-11.

Fonte: Aalborg Industries (2021); Industrial Solar (2021).

A Tabela 5.2 mostra as especificações técnicas da caldeira, que opera sob temperaturas de até 200°C. Sobre os aspectos econômicos levantou-se os valores: custo total médio anual da usina com gás natural (2019-2021), projetando a partir dos indicadores contidos no Plano Decenal de Expansão 2030; custo de aquisição e instalação, em reais; frete (FOB); custo total anual de manutenção (O&M), acrescido da inflação, representada pelo Índice Nacional de Inflação ao Consumidor Amplo (IPCA), média dos últimos dez anos (2011-2020); adicionou-se um percentual de 5% para custos diretos e indiretos. A depreciação e o valor residual da caldeira não foram incluídos na análise, visto que ocorreram no estudo anterior do descomissionamento. O fluxo de caixa contemplou o período de 10, 15 e 25 anos.

Tabela 5.2. Especificações técnicas e financeiras da caldeira a gás natural.

Parâmetro	Unidade	Parâmetro
Pressão de operação	kgf/cm ²	8,5
Superfície de aquecimento	m ²	91,7
Capacidade de produção de vapor	kg/h	4.000
Consumo máximo de gás natural	m ³ /h	314
Potência	MW	3,30
Eficiência	%	± 85
Vida útil	Anos	25

Fonte: Aalborg (2021).

A Tabela 5.3 mostra as características técnicas gerais do refletor linear Fresnel, modelo LF-11. A eficiência referente a situação do sol no zênite é $\eta_0 = 0,686$ e o rendimento para o sol em ângulo zenital transversal de 5° é $\eta_{máx} = 0,709$. A geração de energia térmica do refletor pode produzir calor entre 500kW a 30MW, e as pressões podem ir até 120 bar e fornecer calor de até 400°C. A capacidade de produção anual de energia é de 5.246MWh. O desempenho térmico do equipamento é relacionado com o tubo à vácuo de absorção e independente da velocidade do vento. Deste modo, considerando a temperatura ambiente de 30°C, a temperatura de entrada de 160°C, a temperatura de saída de 180°C, a radiação direta normal de 900 W/m², o ângulo azimutal de 90° e o ângulo zenital de 30° (INDUSTRIAL SOLAR, 2021).

No aspecto econômico, levantou-se os valores: custo de aquisição e instalação, em euro (€), convertido para reais, na cotação de R\$5,97 em março de 2021; custo anual de manutenção (O&M) incluindo a inflação nacional, representada pelo IPCA, média dos dez anos; valor residual, considerando 50% do investimento inicial. O fluxo de caixa projetado abrangeu 10, 15 e 25 anos, depreciando o sistema Fresnel de acordo com os respectivos horizontes de planejamento.

Tabela 5.3. Especificações técnicas de um módulo de refletor linear Fresnel.

Parâmetro	Unidade	Valor
Largura do módulo	m	7,5
Comprimento do módulo	m	4,06
Superfície de abertura dos refletores primários	m ²	23
Superfície do solo de um único módulo	m ²	30,45
Altura do receptor acima do refletor primário	m	4,0
Altura do refletor primário acima do nível do solo	m	0,5
Espaço mínimo entre filas paralelas	m	0,2
Peso específico	kg/m ²	26,2
Velocidade máxima do vento operacional	km/h	100
Velocidade máxima do vento na posição retraída	km/h	180
Vida útil	anos	25

Fonte: Industrial Solar (2021).

5.2.4 Identificação das variáveis de risco (input)

As variáveis de entrada correspondem aos pontos mais críticos em relação à análise de sensibilidade (FREITAS, 2009). Para realizar o estudo de viabilidade econômica foram observados os dados financeiros, custos iniciais, Custo Médio Ponderado de Capital ou *Weighted Average Cost of Capital* (WACC), custos relacionados a operação e manutenção (O&M) da caldeira e dos refletores lineares Fresnel. Sobre as despesas, assumiu-se a premissa que ocorreram ao final do exercício, a valores correntes. Para avaliar um possível impacto negativo na receita futura, foi calculado o *break even point* (ponto de equilíbrio) necessário para manter TIR alcançada até 2020, mais precisamente à realidade operacional da usina. Objetivou-se identificar a necessidade de receita do projeto nos anos subsequentes, após o final dos atuais contratos, que preservem o valor ao acionista observado o histórico da operação, medido pela TIR do projeto. Assaf Neto (2014) classifica o ponto de equilíbrio como o cruzamento entre as receitas totais e os custos totais de um empreendimento, em que, acima desse ponto existe lucro e abaixo há prejuízo.

As variáveis mais significativas que afetam a viabilidade do projeto de acordo com o levantamento de dados foram: Investimento inicial, considerando os três cenários projetados do descomissionamento, uma vez que grandes quantias precisam ser recuperadas; Cotação do euro (€), pela influência no custo de aquisição do sistema Fresnel, considerou os valores mínimo, mais provável e máximo dos últimos três anos (2019-2021); Taxa de desconto (WACC), visto que influencia diretamente, VPL e CAUE; receita estimada, pois afeta o resultado financeiro;

custo de O&M e consumo do gás natural em m³, observando as faixas de consumo com os dados levantados na Companhia Paraibana de Gás (PBGÁS) (2022), uma vez que influencia o resultado operacional; tarifa do gás em R\$/m³ com impostos, pois afeta o custo total da matéria-prima; e o valor residual ao término das atividades. A partir dos parâmetros de incerteza estimou-se o VPL, CAUE e LCOE para comparação entre os projetos em análise.

5.2.5 Identificação das variáveis de saída (output)

O VPL foi usado para avaliar a lucratividade do projeto e foi calculado de acordo com a Equação 2, onde na equação, FC_t é o fluxo de caixa líquido de cada período, K é a taxa de desconto (WACC), I_0 é o investimento processado no momento zero e I_t valor do investimento previsto em cada período subsequente (ASSAF NETO, 2014).

$$VPL = \left[\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t} \right] - \left[I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+K)^t} \right] \quad (2)$$

O WACC foi estimado com base no custo de capital próprio e no custo de capital de terceiros, que permitem determinar o desconto para aplicar aos fluxos de caixas e calcular o VPL, Equação 3. Onde, E é o valor do Patrimônio Líquido, D é o valor da Dívida Líquida, Ke é o Custo de Capital Próprio, Kd é o Custo de Capital de Terceiros e T é a Taxa Marginal do Imposto, que foi considerada como 34%, que é a aplicada no Brasil (FREITAS, 2009; ANEEL, 2020).

$$WACC = \left(\frac{E}{E+D} \right) Ke + \left(\frac{D}{E+D} \right) Kd(1-T) \quad (3)$$

Para a análise de substituição dos sistemas empregou o método de Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE). A metodologia implica em estimar uma parcela do Custo Operacional (CO) e a outra parcela do Custo de Recuperação do Capital (CRC). O desconto do FCLF foi realizado por meio do WACC. O cálculo simplificado do CAUE é dado pela Equação 4, e detalhado nas equações 5 e 6. Sendo, CO o custo operacional equivalente por período, CRC o custo de recuperação do capital por período, $(CO)_j$ custo operacional do período j e n o número de períodos. I é o valor do investimento, Vr é o valor residual ou valor de revenda e i é o WACC (CASAROTTO e KOPITTKKE, 2000; GOMES, 2013).

$$CAUE = CO + CRC \quad (4)$$

Onde,

$$CO = \left[\sum_{j=0}^n (CO)_j (1+i)^{-j} \right] * \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad (5)$$

$$CRC = \left[I - \frac{Vr}{(1+i)^n} \right] * \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad (6)$$

O Custo Nivelado de Energia ou *Levelized Cost Of Electricity* (LCOE) verifica o custo de geração de energia na unidade de R\$/kWh. Na Equação 7, as variáveis I , M e F , representam o CAPEX, manutenção, e os gastos com combustível, respectivamente. r é a taxa de desconto (WACC), t se refere ao tempo, n é a vida útil e o E significa produzida pelo sistema durante o período analisado em kWh (BRANKER; PATHAK; PEARCE, 2011).

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I + M + F}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E}{(1+r)^t}} \quad (7)$$

5.2.6 Simulação e análise dos modelos

Depois de mensuradas as variáveis de saída, foram realizadas 10.000 simulações para analisar os impactos sobre o VPL, utilizou-se números pseudo-aleatórios, isto é, gerando uma série de valores para a variável de análise para a obtenção de sua distribuição de frequência simples e acumulada, estatísticas descritivas e sensibilidade das variáveis de entrada. Obtida a distribuição de probabilidades das variáveis de saída, toma-se a decisão com base nas informações encontradas, levando-se em consideração outros aspectos relevantes do projeto. Uma distribuição triangular foi considerada para cada variável analisada, exigindo a entrada de valor desfavorável, um valor mais provável e um valor favorável. Esse tipo de análise de distribuição é muito utilizado em projetos com alto grau de riscos por gerar amostras aleatórias suficientes para identificar a maioria dos parâmetros sensíveis (LAMERS et al., 2015).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Revisão da Literatura: Refletor Linear Fresnel (RLF)

Pela vasta quantidade de regiões no mundo com abundância solar, muitas pesquisas têm buscado alternativas para captar a energia produzida pelo sol. Problemas futuros como a escassez de água doce e pressões sobre o meio ambiente também são motivos para o avanço de tais estudos (THAKUR, 2021). Atualmente, as principais fontes para geração de energia em uso ainda vêm dos combustíveis fósseis, onde o petróleo, o carvão e o gás natural são predominantes nos países em desenvolvimento e industrializados (SONG et al., 2017).

Allouhia et al. (2017) destacam a energia solar como principal alternativa para produção de água quente. Contudo, os autores destacam que o uso do calor em processos industriais ainda está em desenvolvimento no mercado. Apesar disso, através de estudos realizados pelos autores foi possível mensurar a quantidade de energia solar térmica para um determinado processo industrial. A energia solar térmica é usada para operar um motor térmico, alguns desses sistemas podem incorporar o armazenamento de calor, o que permite seu uso em tempos nublados ou à noite (KALOGIROU, 2014).

Os Refletores Lineares Fresnel (RLF) geralmente são usados ou desenvolvidos para geração de calor em baixa ou média temperatura. Por meio de um processo indireto, chamado Concentração de Energia Solar (CSP), a energia solar é convertida em eletricidade. Esse tipo de tecnologia utiliza espelhos para concentrar os raios solares, onde o fluido passa por um tubo receptor sendo aquecido em alta temperatura, ao final do processo esse fluido pode ser utilizado para geração de energia (ZHU et al., 2014). A tecnologia apresenta baixa necessidade de estruturas, devido a sua montagem próxima ao solo, tornando o projeto fácil quanto à instalação. Além disso, as lentes Fresnel oferecem alta eficiência, baixo peso, além de servir como substituto de equipamentos convencionais (XIE et al., 2011).

O primeiro refletor linear Fresnel foi instalado na Itália em 1964 por Francia (1968), onde se tornou o grande pioneiro a desenvolver o sistema Fresnel de rastreamento linear por dois eixos de refletores. De acordo com Mills (2001) somente em 1979 a tecnologia tornou-se atrativa no mundo todo por sua viabilidade comercial, resultado de uma profunda e extensa pesquisa. Os refletores Fresnel consistem em vários coletores primários, discretos, planos ou parabólicos e um conjunto de receptor fixo que inclui um ou vários tubos, podendo usar um segundo coletor secundário para aumentar a concentração (SUN et al., 2020).

Existem dois subgrupos de refletores Fresnel, o Coletor de Lente Fresnel (FLC) e o Refletor linear Fresnel (RLF). O FLC é um sistema de plástico que concentra os raios solares em um ponto específico do receptor. O RLF atua com base em um refletor em calha parabólica cilíndrica e se configura como um sistema de tiras lineares espelhadas que concentram a luz em um receptor. As vantagens para o uso do RLF fundamentam-se no fato do refletor utilizado, plano ou elasticamente curvado, promover um melhor custo benefício associado ao baixo custo em relação aos refletores parabólicos de vidro (KALOGIROU, 2014).

Allouhia et al. (2017) indicam que o sistema de aquecimento solar pode ser aplicado nos mais diversos processos, incluindo pré-aquecimento de caldeiras. Contudo, a temperatura pode variar de acordo com a necessidade do processo em questão. Atualmente os painéis Fresnel têm sido desenvolvidos para fornecer até 400° de calor (INDUSTRIAL SOLAR, 2021). Montes et al. (2014), destacam vantagens para uso do sistema CSP principalmente em regiões ricas em energia solar. Acentuam a simplicidade, baixo custo de capital e robustez do sistema.

Zhu et al. (2014) apontam os coletores Fresnel como alternativa econômica competitiva pelo baixo custo de O&M, sendo capaz de contribuir para redução dos combustíveis fósseis no processo de geração de energia, além de estar inserido no contexto de transição para fontes de energia renováveis. De acordo com Kalogirou (2014), o custo da energia térmica é muito inferior ao da energia fotovoltaica, contudo, seu uso é viável apenas para sistemas de grande escala. O uso da tecnologia RLF no processo industrial consiste na energia solar que é concentrada por meio dos espelhos para criar calor, então o calor é usado para criar vapor, por fim, é usado para acionar turbinas e geradores movidos a combustível fóssil.

5.3.2 Análise de viabilidade técnica e econômica

A geração de energia térmica no modelo de coletor solar Fresnel LF-11 linear pode produzir calor entre a faixa de 500 kW a 30 MW, a pressões de até 120 bar e atinge até 400 °C. Apresentam capacidade de substituir as caldeiras auxiliares por atuarem a temperaturas requeridas no processo de até 200°C. A análise forneceu informações acerca do funcionamento dos 240 módulos para suprir 3,30MW, em termos geração de vapor (ton/h) e potência (kW_{th}) durante um dia, utilizando o parâmetro de melhor dia, um dia de primavera e outro de inverno.

No critério econômico, a Tabela 4 apresenta o resultado do levantamento financeiro acumulado ao final de cada horizonte de planejamento dos sistemas a gás natural e da tecnologia Fresnel. O investimento na tecnologia RLF foi de R\$14,72 milhões, esse valor engloba os

módulos coletores, serviço, componentes hidráulicos, sensores, armazenamento, estação de pressurização, estação de transferência de calor e fatores de mão de obra local. Contudo, os dados expostos evidenciam que esses refletores possuem um alto custo em decorrência de ser uma tecnologia pouco explorada no Brasil, implicando em importações de materiais e serviços. O custo para investimento no sistema de gás natural foi consideravelmente menor, R\$1,25 milhões. É possível que através dessa análise parcial muitos gestores acabem abrindo mão da alternativa energética, devido ao custo inicial de aquisição e instalação ser mais elevado.

Tabela 5.4. Custos e despesas totais, acumulados, em reais, ao final dos horizontes de planejamento, com o sistema de caldeira a gás natural e o sistema de refletores linear Fresnel, em milhões de reais (R\$ x10⁶), moeda corrente.

Sistema	Descrição	10 anos	15 anos	25 anos
Fresnel	Valor de aquisição e instalação	14,72	14,72	14,72
	Custos diretos e indiretos (aquisição)	0,74	0,74	0,74
	Combustível (gás natural)	-	-	-
	Operação e manutenção (O&M)	1,91	3,35	7,76
	Depreciação	5,89	8,83	14,72
	Residual	7,36	7,36	7,36
	Custo Total	15,90	20,28	30,58
Caldeira	Valor de aquisição e instalação	1,25	1,25	1,25
	Custos diretos e indiretos (aquisição)	0,06	0,06	0,06
	Combustível (gás natural)	26,81	40,74	69,61
	Operação e manutenção (O&M)	0,65	1,14	2,64
	Depreciação	-	-	-
	Valor Residual	-	-	-
	Custo Total	28,77	43,19	73,56

Fonte: Autor (2022).

As despesas com operação e manutenção (O&M) foram menores em relação ao uso da caldeira, podendo chegar a R\$2,64 milhões em 25 anos. Com a tecnologia RLF, considerando o mesmo período, os custos O&M foram de até R\$7,76 milhões, aproximadamente 1% do CAPEX ao ano. Nesse aspecto, o sistema Fresnel também poderia ser inviável. No tocante ao valor residual, foi estimado a quantia da tecnologia Fresnel em 50% do custo de aquisição e instalação ao final de cada horizonte. Como a caldeira já existia na usina, considerou como depreciada e sem valor residual.

Percebe-se que ao longo dos anos, os custos e as despesas com o sistema Fresnel cresceram em menor proporção, enquanto ao utilizar o sistema de caldeira aumentou em maior proporção, na medida em que o principal componente da matéria prima, o gás natural, contabilizou o montante de R\$69,61 milhões ao final de 25 anos, com impacto direto no custo operacional do empreendimento, além da imprevisibilidade de novos aumentos de preços no mercado.

A Tabela 5.5 mostra o estudo a partir das faixas de consumo do gás natural e suas respectivas tarifas com adição de impostos da PBGÁS. Essa observação deu-se para investigar os períodos de maior e menor consumo do gás natural, sabendo-se que quando não há geração de energia, o uso da matéria-prima é maior. A análise indicou maior recorrência, em 53% de consumo no intervalo, acima de 21.000 até 70.000 m³/mês, correspondendo a faixa 5, com a tarifa de R\$3,9254 R\$/m³. Sob outro ponto de vista, 92% do período analisado o consumo foi de 21.000 até 105.000. Nessa faixa, pela média dos preços (R\$3,4581), o custo com gás natural aumentaria para R\$3,03 milhões. A média ponderada de geração considerando o histórico anual foi calculada em 875.896 m³/ano, revelando um custo médio anual de R\$2,62 milhões com o gás natural.

Tabela 5.5. Consumo da termoeletrica por faixas, limites de consumo (m³/mês) e tarifas vigentes a partir de maio de 2022.

Faixas de Consumo	Limites de Consumo (m³/mês)	Tarifa Vigente com Impostos (R\$/m³)	Participação Histórica (%)
Faixa 5	> 21.000 ≤ 70.000	3,9254	53%
Faixa 6	> 70.000 ≤ 105.000	2,9907	39%
Faixa 7	> 105.000 ≤ 210.000	2,9311	8%

Fonte: Autor (2022).

O custo final de ambos os projetos (Tabela 4), nos horizontes de tempo, mostram que apesar do baixo investimento inicial o sistema a gás natural deverá incorrer em R\$73,56 milhões em 25 anos, enquanto o sistema Fresnel necessitará de R\$30,58 milhões. Essa análise é importante, pois a soma dos custos operacionais deve ser levada em consideração para tomada de decisão, nesse caso, observando um horizonte de operação mais longo seria mais vantajoso escolher o sistema Fresnel.

Os resultados da regressão linear (Tabela 5.6) contribuíram para elaboração e projeção das receitas durante os horizontes de planejamento. Apesar das poucas observações da série, o R múltiplo (0,86), demonstrou relação linear entre a receita da usina e a geração de energia das

termoelétricas, ou seja, mediu o quanto estão correlacionadas, comprovando o que seria óbvio de se esperar. O “R-quadrado” (0,74) mostrou o quão próximos estão os dados de geração das termoelétrica e a receita da usina na linha de regressão ajustada, a relação é demonstrada na Figura 5.2 (SARTORIS, 2003).

Tabela 5.6. Resumo dos resultados da regressão linear entre a receita e geração de termoelétricas a óleo combustível no período de 2011 a 2020.

Estatística da regressão	
R múltiplo	0,85819744
R-Quadrado	0,736502846
R-quadrado ajustado	0,703565702
Erro padrão	183354558,6
valor-P	0,001485361
Observações	10

Fonte: Autor (2022).

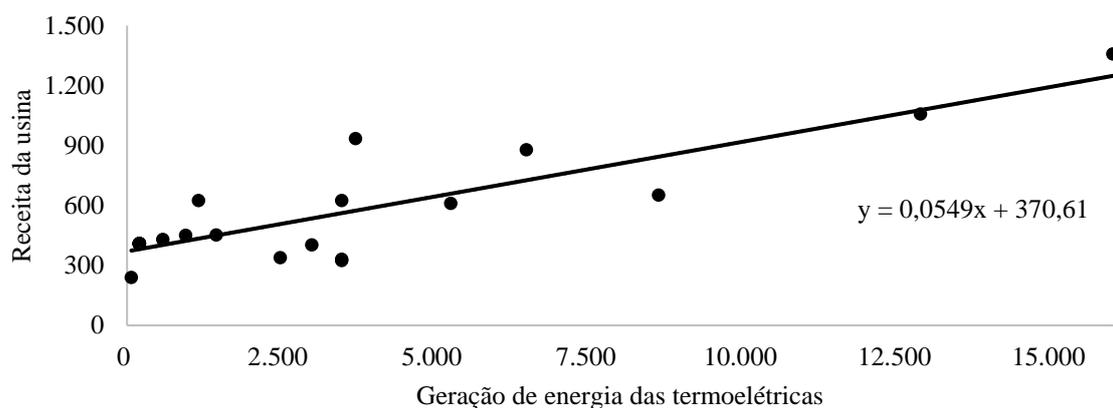


Figura 5.2. Reta da equação linear positiva das variáveis X e Y, considerando o histórico de operação (2011-2020) da usina e os horizontes de planejamento.

Fonte: Autor (2022).

Cabe destacar que para este setor existiu uma alta variação de geração e receita conforme observado na série histórica. Esse fato ocorre, tendo em vista fatores climáticos que interferem diretamente na operação ou decisão do ONS. O PDE 2030 divulgado pelo Governo Federal mostrou a intenção do país em expandir outras fontes de geração, renováveis e não renováveis, sobretudo, consolidando uma matriz energética mais limpa. Nota-se relevante redução da geração dos empreendimentos que fazem uso do óleo combustível, que por sua vez afeta esse tipo de negócio, além entre outros fatores imprevisíveis como o caso de uma pandemia e

conflitos entre nações. Ao projetar a receita com base na série histórica e não levando em consideração tais indicadores, podem enviesar a análise superestimando os valores de receita.

A Tabela 5.7 mostra os resultados da análise de viabilidade econômica para os três horizontes de planejamento. Utilizou-se a taxa de desconto, WACC de 10,55% a.a., que compreende o custo de capital do empreendimento calculado pela Aneel. O investimento inicial foi concebido em R\$83,74 milhões, cenário (B) mais provável no projeto de descomissionamento. Cada horizonte propõe uma respectiva receita mínima para manter, em qualquer cenário, o mesmo padrão de lucratividade da TIR=11,61% a.a., calculada no período de 2010 a 2020. Valores menores que o estimado auxilia os gestores na decisão quanto a continuidade do empreendimento para o horizonte de planejamento do projeto. Nesse ponto, as alterações de conjunturas macroeconômicas, ou mesmo a ocorrência de crises hídricas, alteram consideravelmente as projeções.

Tabela 5.7. Resumo dos resultados para análise de viabilidade econômica e substituição, considerando os horizontes de planejamento, em milhões de reais (R\$ x10⁶) de moeda corrente.

Sistema	Descrição	10 anos	15 anos	25 anos	Média
Fresnel	Receita de equilíbrio	69,20	60,40	55,00	61,53
	VPL	505,04	634,43	759,98	633,15
	CAUE	2,82	2,29	1,94	2,35
Caldeira	Receita de equilíbrio	70,60	61,10	55,10	62,27
	VPL	502,28	632,08	758,59	630,98
	CAUE	4,28	3,48	2,95	3,57

Fonte: Autor (2022).

A receita de equilíbrio calculada variou entre R\$55,00 e R\$69,20 milhões para o uso da tecnologia RLF, média de R\$61,53 com base nos três horizontes. Quanto ao uso da caldeira, a o ponto de equilíbrio ficou no intervalo de R\$70,60 e R\$55,10, média de R\$62,27 abrangendo os horizontes. Considerando a receita média projetada (R\$412,36) nos fluxos de caixa, o ponto de equilíbrio para o sistema Fresnel foi de 14,9% do total, inferior ao sistema de caldeira (15,1%). Essa análise indicou que no decorrer dos anos, a receita mínima reduz, sendo mais viável o investimento na tecnologia Fresnel.

O VPL aplicado ao WACC de 10,55% a.a., após impostos, mostrou a aceitação de ambos os sistemas, variando de R\$505,04 a R\$759,98 milhões, com média de R\$633,15 milhões para o sistema Fresnel. No sistema de caldeira o VPL ficou no intervalo de R\$502,28 a R\$758,59, com valor médio de R\$630,98 milhões. Mesmo com valores próximos, a diferença

média foi de R\$2,17 milhões, indicando o sistema RLF como um investimento economicamente viável nos três horizontes de planejamento. Apesar do maior desembolso inicial, a recuperação ocorreu a partir do 2º ano de uso da energia solar térmica, reduzindo o risco para o investidor.

Sob a perspectiva do CAUE, analisando os sistemas individualmente, o valor estimado para o sistema Fresnel variou de R\$1,94 a R\$2,82 milhões, custo inferior ao intervalo computado no uso do sistema de caldeira, que ficou entre R\$2,95 e R\$4,28 milhões. Na média, o sistema Fresnel contabilizou CAUE de R\$2,35 milhões, ao passo que o sistema de caldeira registrou R\$3,57 milhões, representando uma economia de R\$1,22 milhões aos cofres da usina. A partir da análise dos custos, a melhor alternativa é favorável ao sistema Fresnel. A diferença monetária calculada entre os projetos mostra a viabilidade para substituição, apesar da quantia inicial necessária para adquirir e instalar os refletores.

Quanto ao parâmetro do LCOE, que investiga o custo por energia produzida, mostrou que durante os três horizontes de planejamento a produção anual de energia (MWh) foi de 5.246. Durante os 25 anos de operação o LCOE do sistema Fresnel variou de R\$120,89 a R\$302,23 em R\$/kWh, enquanto, no mesmo período o LCOE para o sistema de caldeira ficou no intervalo de R\$560,85 e R\$1.402,13. Pode-se afirmar que o cenário mais viável economicamente é com o uso sistema linear Fresnel. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que a caldeira, incorre em mais custos (O&M, matéria prima, entre outros). Essa observação mostra que o sistema de caldeira opera com um nível maior de sensibilidade quanto às variações de preços dos insumos e mercado no tocante ao estudo de viabilidade para substituição dos sistemas.

Pela evidência de risco dos negócios e as várias possibilidades de resultados diferentes das estimativas, realizou-se 10.000 simulações com diferentes probabilidades de ocorrência para cada uma das variáveis críticas, suficientes para identificar os parâmetros sensíveis. A Tabela 5.7 apresenta as variáveis do modelo estocástico, atribuindo valores mínimos, mais prováveis e máximos, optando pela distribuição triangular.

A Figura 5.3 apresenta a contribuição das variáveis analisadas na composição das probabilidades do VPL, para os sistemas, considerando os horizontes de 10, 15 e 25 anos. O valor de entrada de maior impacto foi evidenciado pela receita projetada, visto que afeta o resultado financeiro da usina. O maior impacto foi contabilizado no horizonte de 10 anos, e reduzindo nos anos subsequentes.

Tabela 5.7. Valores máximo, mínimo e mais provável das variáveis de viabilidade econômica para estimativa do VPL, em milhões de reais (R\$ x10⁶).

Sistema	Variáveis Críticas	Mínimo	Mais provável	Máximo	Parâmetro
Fresnel	Investimento inicial (R\$)	56,95	83,74	125,97	Cenários A, B e C
	Receita projetada (R\$)	288,65	412,36	536,06	-30% a 30%
	Taxa de desconto (WACC) em percentual (%)	10,05%	10,55%	11,05%	-0,5 a 0,5 p.p.
	Cotação do Euro (€) em Reais (R\$)	4,16	5,60	7,00	3 anos
	Custos direto e indireto (R\$)	0,59	0,74	0,81	-10% a 10%
	Custos O&M (R\$)	0,15	0,31	0,56	25 anos
Caldeira	Investimento inicial (R\$)	56,95	83,74	125,98	Cenários A, B e C
	Receita projetada (R\$)	288,65	412,36	536,06	-30% a 30%
	Taxa de desconto (WACC) em percentual (%)	10,05%	10,55%	11,05%	-0,5 a 0,5 p.p
	Custos O&M (R\$)	0,05	0,11	0,19	25 anos
	Consumo do gás natural (m ³ /ano)	0,70	0,88	1,05	-20% a 20%
	Tarifa do gás natural em Reais (R\$)	1,94	3,87	5,81	-50% a 50%

Fonte: Autor (2022).

A Taxa de Desconto (WACC), foi a segunda variável de maior influência, uma vez que incorpora os custos de capital do empreendimento, impactou negativamente o resultado. É através do custo de capital, que o investidor aceita ou não o risco de investir em um determinado projeto. A variação de -0,5 a 0,5 ponto percentual impactou consideravelmente os VPLs, para cada um dos horizontes, refletindo maior variação percentual sobre o período de 25 anos, justificado pela sensibilidade da variável em relação as outras.

O Investimento inicial, também se mostrou relevante para o resultado quanto ao uso da caldeira e do sistema Fresnel, contribuindo para o resultado financeiro da usina. As outras

variáveis não apresentaram contribuições relevante. Essa situação, pode indicar que de acordo com os valores de entrada, apesar dos investimentos, valor residual, custos operacionais, custos O&M, variação de cotações e tarifas, não ofereceu grandes impactos na estimativa do VPL. Por outro lado, é irrefutável o impacto da receita, ainda que imprevisível, torna-se essencial para o sucesso do negócio, demandando aos investidores conhecer a receita de equilíbrio para evitar resultados negativos.

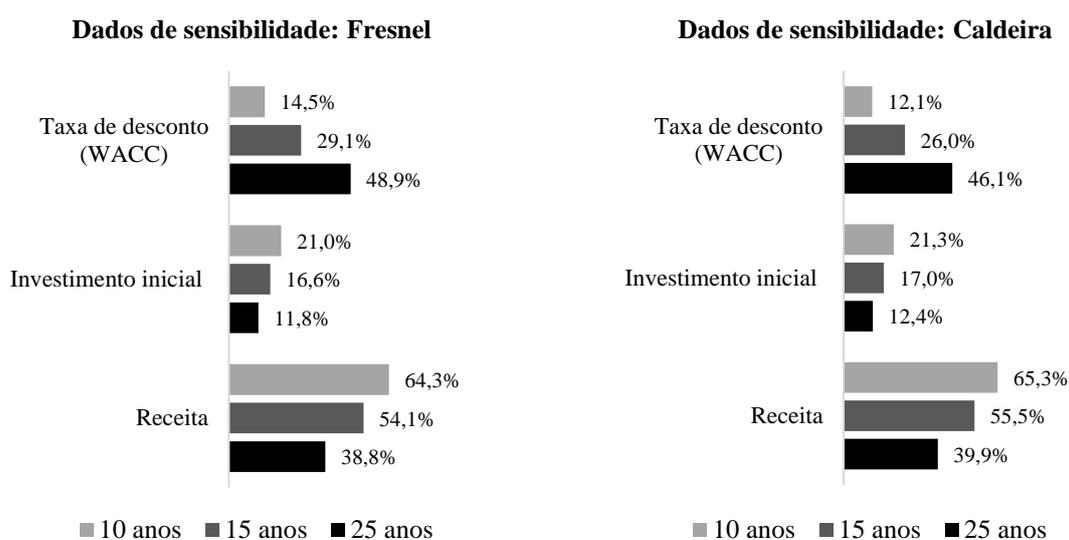


Figura 5.3. Influência das variáveis de incerteza em relação as variáveis de saída VPL, considerando os horizontes de planejamento.

Fonte: Autor (2022).

A Figura 5.4 apresenta o histograma projetado da distribuição dos VPLs, para os horizontes de planejamento, e os sistemas. As barras de frequência representadas pelo eixo esquerdo, mostram a contagem dos valores, e a curva de frequência acumulada caracterizada pelo eixo direito, fornece o nível de risco para cada uma de suas estimativas. Gitman (2010) destaca que o resultado do VPL depende dos custos iniciais, dos retornos, suas datas de ocorrência, e a taxa requerida pelo risco do projeto, o WACC. Para ambos os sistemas, a chance de o VPL ser maior que zero foi de 100% em todos os cenários, afastando o insucesso do projeto. Todos os VPLs ficaram acima da média do histograma projetado em seus respectivos cenários.

Observando o sistema Fresnel, nos três horizontes de planejamento, os VPLs variaram entre R\$383,65 e R\$882,97 milhões, com média de R\$621,74 milhões, mediana R\$621,43 e desvio padrão médio de 5,6%. A chance para os VPLs serem iguais ou superiores aos valores

determinísticos, considerando cada horizonte foi de: 30,85% para o VPL de R\$505,04 milhões, com intervalo de R\$383,65 a R\$597,73 milhões, no horizonte de 10 anos; 33,59% para o VPL de R\$634,43 milhões, entre R\$495,86 e R\$744,67 milhões, no cenário de 15 anos; e 36,80% para o VPL de R\$759,98 milhões, variando de R\$602,51 a R\$882,97 milhões, no período de 25 anos. A análise indica que existe alta probabilidade de viabilidade econômica do empreendimento, com aproximadamente 33,75% para os VPLs serem iguais ou superiores aos valores determinísticos.

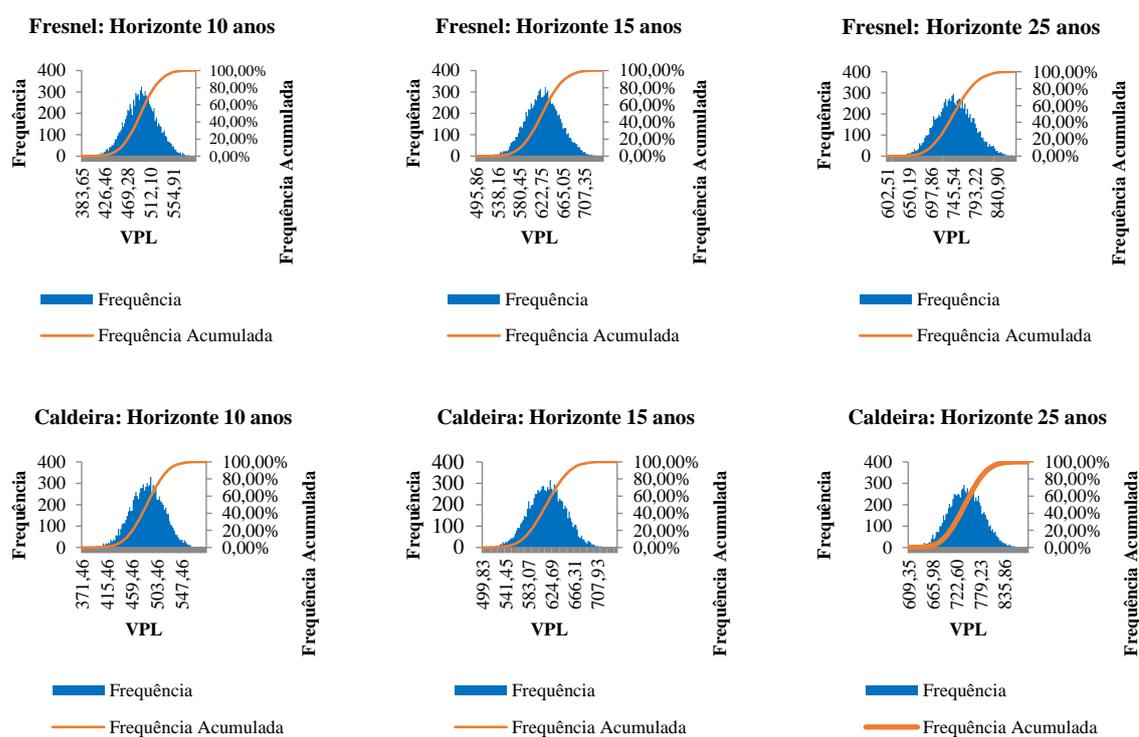


Figura 5.4. Histograma da frequência e frequência acumulada (%) da simulação de Monte Carlo quanto a viabilidade econômica do sistema Fresnel, em milhões de reais (R\$ x 10⁶).
Fonte: Autor (2022).

Analisando o sistema de caldeira e os horizontes de planejamento, a distribuição dos VPLs ficaram no intervalo de R\$371,46 e R\$892,48 milhões, com média de R\$613,97 milhões, mediana de R\$614,03 milhões, e desvio padrão médio de 5,6%. A probabilidade para os VPLs serem iguais ou superiores aos valores determinísticos, considerando cada cenário foi de: 28,67% de certeza para o caso base de R\$502,28 milhões, com intervalo de R\$377,97 a R\$593,72 milhões para dez anos; 30,92% de chance de ocorrência para o VPL de R\$632,08 milhões, variando de R\$492,59 a R\$731,21 no horizonte de 15 anos; e 34,25% de chance para

o VPL de R\$758,59 milhões, entre R\$599,24 e R\$874,34, para o cenário de 25 anos. Comparando os três horizontes, é possível afirmar, com 31,28% de certeza, que na média os VPLs podem ser iguais ou superiores aos valores determinísticos.

Tabela 5.8. Estatística descritiva da variável de saída VPL, nos horizontes de planejamento.

Estatística	Fresnel			Caldeira		
	10 anos	15 anos	25 anos	10 anos	15 anos	25 anos
Caso base	508,58	638,77	759,98	502,28	632,08	758,59
Média	493,62	624,65	746,97	484,93	614,99	741,99
Mediana	493,64	624,58	746,05	485,18	615,24	741,65
Desvio Padrão	29,60	33,76	40,47	29,60	33,76	40,47
Erro Padrão Média	0,30	0,34	0,40	0,30	0,33	0,40
Mínimo	597,73	744,67	882,97	371,46	499,83	609,35
Máximo	214,08	248,81	280,46	591,46	744,66	892,48
Percentis	10 anos	15 anos	25 anos	10 anos	15 anos	25 anos
0%	383,65	495,86	602,51	371,46	499,83	609,35
10%	455,69	581,22	695,12	446,93	572,18	690,60
20%	468,56	596,10	712,04	460,12	586,41	707,44
30%	478,33	606,86	725,10	469,28	597,22	719,95
40%	486,26	616,04	736,03	477,55	606,38	731,51
50%	493,63	624,58	746,04	485,18	615,24	741,65
60%	500,86	632,94	756,91	492,51	623,65	752,53
70%	508,87	642,13	768,25	500,61	632,92	763,43
80%	518,26	652,97	781,40	510,30	643,51	776,02
90%	532,39	668,60	799,88	522,39	657,69	793,62
100%	597,73	744,67	882,97	591,46	744,66	892,48

Fonte: Autor (2022).

Com base nos valores determinísticos, os valores calculados para os horizontes ficaram próximos da média e mediana, em ambos os sistemas (Tabela 8). O perfil das distribuições de probabilidade obtidas indica uma grande similaridade com a distribuição normal. A análise dos percentis indica que existe alta probabilidade de viabilidade econômica do empreendimento, com aproximadamente 30% de chance para os VPLs serem iguais ou superiores aos valores estimados. Comparando os sistemas, verificou que os resultados dos VPLs foram mais satisfatórios para o uso do sistema Fresnel, uma vez que gerou maior impacto financeiro em relação ao investimento inicial, ou seja, o lucro gerado depois de recuperar e remunerar o custo do capital inicial à uma taxa de desconto (WACC), garantiu a geração de valor para os investidores (LAPPONI, 2007; ASSAF NETO, 2014).

5.4 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a viabilidade econômica para substituição de um sistema de caldeira a gás natural, por um sistema solar térmico com uso de refletores linear Fresnel, em uma termoelétrica a óleo combustível, considerando um horizonte de planejamento de 10, 15 e 25 anos. O uso da tecnologia faz parte da busca por alternativas renováveis, que sejam viáveis economicamente, considerando os altos custos de capital, contabilizados durante o histórico de operação, além de trazer soluções para tornar as usinas térmicas menos agressivas ao meio ambiente.

A revisão de literatura mostrou aspectos gerais sobre a vasta incidência solar no mundo, o potencial e a viabilidade do uso da tecnologia em sistemas industriais convencionais, além de sua contribuição para redução dos níveis de Gases do Efeito Estufa (GEE). Contudo, percebe-se que o tema ainda necessita de mais estudos, diante do potencial técnico, econômico e ambiental, pouco explorado no contexto nacional.

Em relação à análise econômica, a tecnologia solar térmica necessita de um grande montante de investimento inicial e, por conseguinte, este ponto pode ser crucial para tomada de decisão dos gestores, fato que poderá dificultar a implantação do sistema no primeiro momento do estudo de substituição entre os sistemas. Entretanto, observando os horizontes de planejamento, e a estimativa dos indicadores VPL, CAUE e LCOE, o projeto de investimento para a tecnologia Fresnel se tornou mais atrativo em todos os aspectos, quando comparados ao custo anual, custo nivelado de eletricidade e geração de valor para investidores. É importante que os tomadores de decisão levem em consideração o impacto dos custos de O&M e da matéria-prima (gás natural) no decorrer da vida útil econômica dos projetos para certificar a melhor tomada de decisão. Fatores exógenos e endógenos, podem interferir significativamente na viabilidade econômica dos projetos.

O estudo contribui para inserção do sistema Fresnel no contexto de transição energética para fontes renováveis e geração de energia mais limpa, atribuída à modernização da termoelétrica. O cenário de expansão das energias renováveis, ainda pouco explorado no país, deve ser observado, para ampliação dos estudos. O trabalho também estimula a formulação de políticas públicas de incentivo e reflexões para concepção de projetos de investimentos que visam introduzir o sistema na matriz energética, além de substituir sistemas movidos a combustíveis fósseis.

Trabalhos posteriores podem evidenciar mais detalhes técnicos e ambientais sobre o uso tecnologia Fresnel, a respeito de estimativas sobre impactos e benefícios ao meio ambiente, ampliando a discussão sobre a necessidade do mercado, o que tornaria o assunto mais atrativo para potenciais investidores.

REFERÊNCIAS

- AALBORG INDUSTRIES. **Catálogo de caldeira Aalborg 3-PASS**. Disponível em: <http://aalborgindustries.com.br/downloads/catalogo-caldeiras-aalborg.pdf>. Acesso em 02 abr. 2021.
- ALLOUHIA, A.; AGROUZA, Y.; AMINEC, M. B.; REHMAND, S., BUKERE, M. S.; KOUSKSOU, T.; JAMILA, A.; BENBASSOU, A. Design optimization of a multitemperature solar thermal heating system for an industrial process, **Applied Energy**, v. 206, p. 382-392, 2017.
- ALVES F. J. **Matriz energética brasileira: da crise à grande esperança**. Rio de Janeiro: Mauad, 2003.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Nota Técnica 45/2020 - SRM/ANEEL, de 14/04/2020, conforme detalhado no item “III.4.1- Taxa Regulatória de Remuneração de Capital real e antes de impostos – Segmento de Distribuição – por alíquotas de IRPJ e CSLL”. Brasília: ANEEL, 2020.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 674, de 11 de Agosto de 2015. Taxas de depreciação aplicáveis aos ativos de Centrais de Geração Nucleoelétrica. Brasília, DF. Disponível em: www.aneel.gov.br/biblioteca/. 2015.
- ASSAF NETO, A. **Finanças Corporativas e Valor**. São Paulo: Atlas, 2014.
- BRANKER, K.; PATHAK, M. J. M.; PEARCE, J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 9, p. 4470-4482, 2011.
- CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. H. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 9ª ed. São Paulo: Atlas, 2000.
- CORREIA NETO, J. F. **Elaboração e avaliação de projetos de investimento considerando o risco**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2020**: Ano base 2019. Rio de Janeiro, 2020.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Energia Termoelétrica**: Gás natural, biomassa, carvão, nuclear. EPE: Rio de Janeiro. 2016
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília, 2021.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília. 2007.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, 2007. Disponível em: < [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termel%C3%A9trica%20\(G%C3%A1s%20Natural\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termel%C3%A9trica%20(G%C3%A1s%20Natural).pdf)> . Acesso em: 25 jun. 2021.

- FAN, J.; XU, M.; YANG, L.; ZHANG, X. Benefit evaluation of investment in CCS retrofitting of coal-fired power plants and PV power plants in China based on real options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, 2019.
- FRANCIA, G. Pilot plants of solar steam generation systems. **Solar Energy**, v. 12, p. 51–64, 1968.
- FREITAS, C. P. **Relatório de Avaliação de Projecto de Investimento Central Termoelectrica a Biomassa Florestal (CTBF)**. Polytechnic of Porto - School of Engineering. 2009.
- GITMAN, L. J. **Princípios da Administração Financeira**. 12ª ed. Porto Alegre: Pearson, 2010.
- GOMES, J. M. **Elaboração e análise de viabilidade econômica de projetos: Tópicos práticos de finanças para gestores não financeiros**. São Paulo: Atlas, 2013.
- GUASTAROBA, G.; MANSINI, R.; SPERANZA, M. G. On the effectiveness of scenario generation techniques in single-period portfolio optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 192, n. 2, p. 500-511, 2009.
- HAWAWINI, G.; VIALLET, C. **Finanças para executivos: gestão para a criação de valor**. São Paulo: South-Western Cengage Learning, 2010.
- HELLER, L.; GAUCHÉ, P. Modeling of the Rock Bed Thermal Energy Storage System of a Combined Cycle Solar Thermal Power Plant in South Africa. **Solar Energy**, v. 93, p. 345-356, 2013.
- INDUSTRIAL SOLAR. **Fresnel Collector LF-11 Datasheet**. Disponível em: <<https://www.industrial-solar.de/>>. Acesso em 20 mai. 2021.2021.
- KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. Elsevier: USA, 2014.
- KALOGIROU, S. Environmental benefits of domestic solar energy systems. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 3075–3092, 2004.
- KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews**. Keele, UK, Keele Univ. 33, 28. 2004. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/kitchenham.pdf>>. Acesso em 05 mai. 2021.
- LAPPONI, J.C. **Projetos de investimento na empresa**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2007.
- LAUER, M.; DOTZAUER, M.; HENNIG, C.; LEHMANN, M.; NEBEL, E.; POSTEL, J., et al. Flexible power generation scenarios for biogas plants operated in Germany: impacts on economic viability and GHG emissions. **Int. J. Energy Res**, v. 41, n. 1, p. 63–80, 2017.
- LIMA, M. T. S. L.; SOUZA, M. C. Discorrendo Sobre o Uso das Termelétricas no Brasil. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 2, p. 17-23, 2015.
- LIN, L.; XU, B.; XIA, S. Multi-Angle Economic Analysis of Coal-Fired Units with Plasma Ignition and Oil Injection during Deep Peak Shaving in China. **Applied Sciences**, v. 9, n. 24 p. 5399, 2019.
- MATARAZZO, D. C. **Análise financeira de balanços: abordagem gerencial**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- MILLS, D. R.; MORRISON, G. L. Compact linear Fresnel reflector solar thermal powerplants. **Solar Energy**, v. 68, p. 263–83, 2000.
- MONTES, M. J.; RUBBIA, C. A.; RUBÉN A.; MARTÍNEZ-VAL, J. M. [A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power](#). **Energy**, v. 73, p. 192-203, 2014.
- PAPAVASILIOU, A. Scarcity pricing and the missing European market for real-time reserve capacity, **The Electricity Journal**, v. 33, p. 106863, 2020.
- PENMAN, S. H. **Análise de Demonstrações Financeiras e Security Valuation**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

- SARTORIS, A. **Estatística e introdução à econometria**. São Paulo: Saraiva, 2003.
- SHARMA, A. K., SHARMA, C., MULLICK, S. C. E KANDPAL, T. C. Solar industrial process heating: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 78, p. 124–137, 2017.
- SONG, C.; LIU, Q.; JI, N.; DENG, S.; ZHAO, J.; KITAMURA, Y. Natural gas purification by heat pump assisted MEA absorption process. **Appl Energy**, v. 204, p. 353–61, 2017.
- SUN, J.; ZHANG, Z.; WANG, L.; ZHANG, Z.; WEI, JINJIA. Comprehensive Review of Line-Focus Concentrating Solar Thermal Technologies: Parabolic Trough Collector (PTC) vs Linear Fresnel Reflector (LFR). **J. Therm. Sci**, v. 29, p. 1097–1124, 2020.
- SURESH, M.V. J. J.; REDDY, S.; KOLAR, A. 4-E (Energy, Exergy, Environment, and Economic) analysis of solar thermal aided coal-fired power plants. **Energy for Sustainable Development**, v. 14, p. 267-279, 2010.
- THAKUR, A. Development and usability of solar thermal collectors in different fields: An overview, **Materials Today**, p. 2214-7853, 2021.
- WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. **MIS Q**, v. 26, p. 13-23, 2002.
- WORLD BANK. International Finance Corporation. World Bank Group. Converting Biomass to Energy. **A Guide for Developers and Investors**. 2017.
- Xie, W.T.; DAI, Y.; WANG, R. Z.; SUMATHY, K. Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2588-2606, 2011.
- ZHU, G.; WENDELIN, T.; WAGNER, M. J.; Kutscher, C. History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors, **Solar Energy**, v. 103, p. 639-652, 2014.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo analisou a viabilidade econômica sob condições de risco de uma termoelétrica a óleo combustível no Brasil, no contexto de transição energética. Após as análises chegou-se às seguintes considerações finais:

O primeiro artigo mostrou como diversos autores estão concentrando estudos e análises no campo das termoelétricas que utilizam combustíveis fósseis, principalmente o carvão. À medida que cresce o número de pesquisas sobre aspectos ligados à viabilidade técnica e econômica, aumenta a percepção sobre o cuidado com o meio ambiente, e os indivíduos. As principais contribuições demonstraram a importância das usinas térmicas para garantia da segurança energética, diante da ampla capacidade de geração e da flexibilidade operativa. Apesar da constante migração para uso de fontes renováveis, a energia fornecida pelas usinas termoelétricas continuará desempenhando papel relevante na matriz energética mundial. Os princípios da economia circular associados àecoinovação tornaram-se parte dos processos, constituindo-se em novos pilares no ambiente de negócios. Sua aplicação no ambiente empresarial potencializa a vida útil dos produtos. A concepção da ecoinovação abre novos rumos para criação de alternativas inovadoras e projetos economicamente viáveis, ao mesmo tempo que garante a continuidade das usinas termoelétricas na matriz energética.

O segundo estudo calculou o custo de capital fornecendo um parâmetro crítico para alocação de capital dos investidores, influenciando preços e escolhas no setor energético. A partir das análises realizadas, conclui-se que sob a perspectiva das empresas nacionais e internacionais, o WACC da termoelétrica local estimado foi de 11,13% e 10,32%, respectivamente. Isso significa que o custo de capital para uma economia emergente é maior, quando comparado a uma economia estável. Percebeu-se que a melhoria do ambiente de negócios, acaba por reduzir os riscos, impactando positivamente na expectativa dos agentes econômicos. O estudo contribuiu com a tomada de decisão mais realista, trazendo implicações relevantes para o contexto de uma economia emergente, em que as empresas estão expostas a maiores riscos, e mensurando o risco econômico das termoelétricas de capital fechado.

O terceiro trabalho avaliou o descomissionamento da usina termoelétrica a óleo combustível a partir de métodos de avaliação econômica. O descomissionamento deve ser considerado como parte integrante do ciclo de vida de uma usina. Os resultados mostraram êxito do empreendimento, retratando lucro operacional após impostos, investimentos em capital de giro, equipamentos, instalações e outros ativos contabilizados no período. O VPL apresentou resultado positivo, mostrando aceitação do projeto em todos os cenários projetados. A

simulação de Monte Carlo indicou com 100% de certeza que o resultado das variáveis de saída, VPL e TIR, podem ser melhores do que o mínimo definido. Conclui-se que apesar do risco de uma possível descontinuidade para estes empreendimentos, do ponto de vista dos acionistas, existe uma grande capacidade de ganhos financeiros e geração de riqueza. O trabalho contribui para tomada de decisão, formulação de políticas nacionais e implementação de estratégias, observando alguns fatores críticos a respeito do meio ambiente e os impactos sociais.

O último artigo realizou uma revisão de literatura, apresentando aspectos positivos sobre o uso da energia solar térmica frente a caldeiras a gás natural em usinas térmicas que se utilizam de fonte de calor para manter o aquecimento do combustível primário líquido, como o óleo combustível. Apontou a vasta incidência solar no mundo, a viabilidade do uso da tecnologia em sistemas industriais convencionais, bem como sua contribuição para redução dos níveis de emissão dos Gases do Efeito Estufa (GEE). Contudo, percebe-se que o tema ainda necessita de mais estudos, diante do potencial técnico, econômico e ambiental, pouco explorado no contexto nacional. Outros fatores exógenos e endógenos, também podem interferir significativamente na aceitação econômica dos projetos. Sobre a análise econômica, a tecnologia solar térmica necessita de um grande montante de investimento inicial e, por conseguinte, esse aspecto pode ser crucial para tomada de decisão dos gestores, fato que poderá dificultar a implantação do sistema no primeiro momento do estudo de substituição entre os sistemas. Entretanto, observando os horizontes de planejamento, e a estimativa dos indicadores econômicos o projeto de investimento tornou-se mais atrativo, principalmente quando comparados ao custo anual, custo nivelado de eletricidade e criação de valor.

De modo geral, diante do cenário de expansão das energias renováveis este trabalho pode auxiliar em alavancar e servir de base a outros estudos de viabilidade, na implementação de políticas governamentais, regulatórias, processos de modernização, e reflexões para concepção de novos projetos de investimentos, que visem trazer mais subsídios teóricos e práticos para se entender mais claramente, o papel das termoeletricas na matriz energética em constante evolução.

REFERÊNCIAS

- AALBORG INDUSTRIES. **Catálogo de caldeira Aalborg 3-PASS**. Disponível em: <http://aalborgindustries.com.br/downloads/catalogo-caldeiras-aalborg.pdf>. Acesso em 02 abr. 2021.
- AHMADI, H. H. et al. Thermodynamic and economic analysis of performance evaluation of all the thermal power plants: A review. **Energy science & engineering**, v. 7, n. 1, p. 30-65, 2019.
- ALLOUHIA, A.; AGROUAZA, Y.; AMINEC, M. B.; REHMAND, S., BUKERE, M. S.; KOUSKSOUB, T.; JAMILA, A.; BENBASSOU, A. Design optimization of a multitemperature solar thermal heating system for an industrial process, **Applied Energy**, v. 206, p. 382-392, 2017.
- ALMEIDA, J.; ALMEIDA, E.; TORRES, E.; FREIRES, F. Economic value of underground natural gas storage for the Brazilian power sector. **Energy Policy**, v. 121, p. 488-497, 2018.
- ALVES F. J. **Matriz energética brasileira: da crise à grande esperança**. Rio de Janeiro: Mauad, 2003.
- AMINOV, Z.; NAKAGOSHI, N.; DANG X. T.; HIGASHI, O.; ALIKULOV, K. Evaluation of the energy efficiency of combined cycle gas turbine. Case study of Tashkent thermal power plant, Uzbekistan. **Applied Thermal Engineering**, v. 103, p. 501-509, 2016.
- AMIRABEDIN, E.; MCILVEEN-WRIGHT, D. A Feasibility Study of Co-Firing Biomass in the Thermal Power Plant at Soma in order to Reduce Emissions: an Exergy Approach. **International Journal of Environmental Research**, v. 7, p. 139-154, 2013.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 05 mai. 2022.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Estabelece os critérios e as condições do programa da Resposta da Demanda**, 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017792.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica 34/2021** – SGT-SRM/ANEEL, de 10/03/2021, Atualização da Taxa Regulatória de Remuneração do Capital. Brasília: ANEEL, 2021.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica 45/2020** - SRM/ANEEL, de 14/04/2020, conforme detalhado no item “III.4.1- Taxa Regulatória de Remuneração de Capital real e antes de impostos – Segmento de Distribuição – por alíquotas de IRPJ e CSLL”. Brasília: ANEEL, 2020.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 674, de 11 de Agosto de 2015. Taxas de depreciação aplicáveis aos ativos de Centrais de Geração Nucleoelétrica. Brasília, DF. Disponível em: www.aneel.gov.br/biblioteca/. 2015.
- AQUILA, G.; ROTELLA JUNIOR, P.; PAMPLONA, E.; DE QUEIROZ, A. (2017). Wind Power Feasibility Analysis under Uncertainty in the Brazilian Electricity Market. **Energy Economics**, v. 65, p. 127-136, 2017.
- ASSAF NETO, A. **Finanças Corporativas e Valor**. São Paulo: Atlas, 2014.
- B3 S.A. - BRASIL, BOLSA, BALCÃO (B3). **Índice de Energia Elétrica (IEE B3)**. Disponível em: <https://www.b3.com.br/>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- B3 S.A. - BRASIL, BOLSA, BALCÃO (B3). **Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE B3)**. Disponível em: <https://www.b3.com.br/>. Acesso em: 24 mai. 2022.
- BEIS - BUSINESS, ENERGY & INDUSTRIAL STRATEGY. **Decommissioning of offshore renewable energy installations under the energy Act 2004**. 2019.

- BEZERRA, M. C.; GOHR, C.; MORIOKA, S. Organizational capabilities for sustainability towards corporate sustainability benefits: a systematic literature review and an integrative framework proposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, n. 119114, 2020.
- BHANGU, N. S.; PAHUJA, G. L.; SINGH, R. Application of fault tree analysis for evaluating reliability and risk assessment of a thermal power plant. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 37, n. 18, p. 2004-2012, 2015.
- BOYACK, K.; KLAVANS, R. Co-citation analysis, bibliographic coupling, and direct citation: Which citation approach represents the research front most accurately? **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 61, n. 12, p. 2389-2404, 2010.
- BRANKER, K.; PATHAK, M. J. M.; PEARCE, J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 9, p. 4470-4482, 2011.
- BREALEY, R., Allen, F., STEWART, M. **Principles of Corporate Finance**. 13^a Ed: Mc Graw Hill, 2020.
- BRICL, M.; AVSEC, J. Evaluation of System for Economically Viable Thermal Power Plant Operation. **Tehnicki Vjesnik**, v. 28, p. 1038-1043, 2019.
- BURNS & MCDONNELL ENGINEERING COMPANY. **Decommissioning Cost Estimate Study**. Kansas. 2017.
- BYLKIN, B. et al. Composition and structure of simulation models for evaluating decommissioning costs for nuclear power plant units. **Atomic Energy**, v. 110, n. 2, 2011.
- CALZOLARI, T.; GENOVESE, A.; BRINT, A. Circular Economy indicators for supply chains: A systematic literature review. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 13, p. 100160, 2021.
- CARDOSO, J. S.; VALTER, E. D. Techno-economic analysis of a biomass gasification Power plant dealing with forestry residues blends for electricity production In Portugal. **Journal Of Cleaner Production**, v. 212, p. 741-753, 2018.
- CARDOSO, J.; SILVA, V.; EUSÉBIO, D. Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 10.1016, 2018.
- CARVALHO, J. M. C. **Logística**. 3^a ed. Lisboa: Edições Silabo, 2002.
- CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. H. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 9^a ed. São Paulo: Atlas, 2000.
- CHABOWSKI, B.; SAMIEE, S; HULT, G. A bibliometric analysis of the global branding literature and a research agenda. **J Int Bus Stud**, v. 44, p. 622–634, 2013.
- CHENG, C. Y. China's new development plan: strategy, Agenda, and prospects. **Asian Aff: Am. Rev**, v. 34, p. 47-59, 2007.
- COPELAND, T; KOLLER, T; MURRIN, J. **Avaliação de Empresas –Valuation: Calculando e gerenciando o valor das empresas**. 3a ed. São Paulo: Makron Books Ltda., 2002.
- CORREIA NETO, J. F. **Elaboração e avaliação de projetos de investimento considerando o risco**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- CRAIG, M. T.; COHEN, S.; MACKNICK, J.; DRAXL, C.; GUERRA, O. J.; SENGUPTA, M.; HAUPT, S. E.; HODGE, B. M.; BRANCUCCI, C. A review of the potential impacts of climate change on bulk power system planning and operations in the United States. **Renewable Sustainable Energy Rev.**, v. 98, p. 255–267, 2018.
- CUI, H.; ZHAO, T.; WU, R. An Investment Feasibility Analysis of CCS Retrofit Based on a Two-Stage Compound Real Options Model. **Energies**, v. 11, n. 7, p. 1711, 2018.
- DAMODARAN, A. What is the Riskfree Rate? A Search for the Basic Building Block. **SSRN Electronic Journal**. 2008.

- DOE - U.S DEPARTMENT OF ENERGY. **Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities**, 2015.
- DONG, L.; ZHANG, H.; FUJITA, T.; OHNISHI, S.; LI, H.; FUJII, M.; DONG, H. Environmental and economic gains of industrial symbiosis for Chinese iron/steel industry: Kawasaki's experience and practice in Liuzhou and Jinan. **J. Clean. Prod.**, v. 59, p. 226-238, 2013.
- EBN - ENERGIE BEHEER NEDERLAND. **Netherlands masterplan for decommissioning and re-use**. 2016.
- EC - EUROPEAN COMMISSION. **Closing the Loop - an EU Action Plan for the Circular Economy (Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions**. No. COM(2015) 614 Final). European Commission, Directorate General for the Environment. 2015.
- EC - EUROPEAN COMMISSION. Innovation for a Sustainable Future - the Eco-innovation Action Plan (Eco-AP), COM(2011) 899 Final. **Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions**. European Commission. 2011.
- EC - EUROPEAN COMMISSION. **The use of woody biomass for energy production in the EU**. European Union, 2021.
- EDISON ELECTRIC INSTITUTE – EEI. **Delivering The Future**. Disponível em: <<https://www.eei.org/>>. Acesso em: 24 mai. 2022.
- EID, M. S.; ELDIN, H. K. Evaluation of risk in investment alternatives. **Computers & Industrial Engineering**, v. 1, p. 185-197, 1977.
- ELO, S; KYNGÄS; H. The qualitative content analysis process. **Journal of advanced nursing**, v. 62, n. 1, p. 107-115, 2008
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro, 2020.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Energia Termoelétrica: Gás natural, biomassa, carvão, nuclear**. EPE: Rio de Janeiro. 2016
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Flexibilidade e Capacidade: Conceitos para a incorporação de atributos ao planejamento**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-316/NT_EPE_DEE-NT-067_2018-r0.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília, 2021.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília. 2007.
- EPE- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Expansão da Geração 2022**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes>>. Acesso em: 16 de jan. de 2022.
- ESEN, M.; YUKSEL, T. Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. **Energy Build**, v. 65, p. 340, 2013.
- FAN, J. L. et al. Benefit evaluation of investment in CCS retrofitting of coal-fired power plants and PV power plants in China based on real options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109350, 2019.
- FAROUK, H.; ZAHRAEE, S. M.; ATABANI, A.; MOHD JAAFAR, M. N.; ALHASSAN, F. H. Optimization of the esterification process of crude jatropha oil (CJO) containing high levels of free fatty acids: a Malaysian case study. **Biofuels**, v. 11, n. 6, p. 655-662, 2017.

- FRANCIA, G. Pilot plants of solar steam generation systems. **Solar Energy**, v. 12, p. 51–64, 1968.
- FRANKI, V.; VIŠKOVIĆ, A.; ŠAPIĆ, A. Carbon capture and storage retrofit: Case study for Croatia. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**. 2019.
- FREITAS, C. P. **Relatório de Avaliação de Projecto de Investimento Central Termoelectrica a Biomassa Florestal (CTBF)**. Polytechnic of Porto - School of Engineering. 2009.
- GINGERICH, D.; MAUTER, M. Quantity, Quality, and Availability of Waste Heat from United States Thermal Power Generation. **Environmental science & technology**, v. 19, n. 14, p. 8297-8306, 2015.
- GITMAN, L. J. **Princípios da Administração Financeira**. 12ª ed. Porto Alegre: Pearson, 2010.
- GOMES, J. M. **Elaboração e análise de viabilidade econômica de projetos: Tópicos práticos de finanças para gestores não financeiros**. São Paulo: Atlas, 2013.
- GUASTAROBA, G.; MANSINI, R.; SPERANZA, M. G. On the effectiveness of scenario generation techniques in single-period portfolio optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 192, n. 2, p. 500-511, 2009.
- GUPTA, S.; TEWARI, P. C. Maintenance performance evaluation of power generation system of a thermal power plant. *Iranian Journal Of Science And Technology Transaction B-Engineering*, v. 35, p. 47-59, 2011.
- GUTTIKUNDA, S.; JAWAHAR, P. Evaluation of Particulate Pollution and Health Impacts from Planned Expansion of Coal-Fired Thermal Power Plants in India Using WRF-CAMx Modeling System. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 18, p. 10.4209, 2018.
- HAWAWINI, G.; VIALLET, C. **Finanças para executivos: gestão para a criação de valor**. São Paulo: South-Western Cengage Learning, 2010.
- HELLER, L.; GAUCHÉ, P. Modeling of the Rock Bed Thermal Energy Storage System of a Combined Cycle Solar Thermal Power Plant in South Africa. **Solar Energy**, v. 93, p. 345-356, 2013.
- IAU - INSTITUT D'AMÉNAGEMENT ET D'URBANISME. **Économie circulaire, écologie industrielle Éléments de réflexion à l'échelle de l'Île-de-France**. IAU Ile-de-France, 2013. Disponível em: <https://www.iau-idf.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_1036/Economie_circulaire_Ecologie_industrielle_IdF.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2021.
- IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2020**; International Energy Agency: Paris, France, 2020.
- INDUSTRIAL SOLAR. **Fresnel Collector LF-11 Datasheet**. Disponível em: <<https://www.industrial-solar.de/>>. Acesso em 20 mai. 2021.2021.
- INVERNIZZI, D. L. An exploration of the relationship between nuclear decommissioning projects characteristics and cost performance. **Prog. Nucl. Energy**, p. 129–141. 2019.
- INVERNIZZI, D. L. Managing social challenges in the nuclear decommissioning industry: a responsible approach towards better performance. **Int. J. Proj. Manag.**, p. 1350–1364. 2017.
- JEONG, K. et al. An estimation to measure and to evaluate the work times following the trajectory of workers during decommissioning of nuclear facilities. **Annals of Nuclear Energy**, v. 94, p. 10-15, 2016.
- JEONG, K. et al. An evaluation of the dismantling technologies for decommissioning of nuclear power plants. **Annals of Nuclear Energy**, v. 69, p. 62-64, 2014.
- JEONG, K. et al. Approach to optimization of risk assessment based on an evaluation matrix for decommissioning processes of a nuclear facility. **Annals of Nuclear Energy**, v. 128, p. 53-62, 2019.

- JEONG, K. et al. The digital mock-up system to simulate and evaluate the dismantling scenarios for decommissioning of a NPP. **Annals of Nuclear Energy**, v. 69, p. 238-245, 2014.
- JEONG, K. S. et al. The safety assessment system based on virtual networked environment for evaluation on the hazards from human errors during decommissioning of nuclear facilities. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 156, p. 34-39, 2016.
- JESUS, A. D.; ANTUNES, P.; SANTOS, R.; MENDONÇA, S. Eco-Innovation in the transition to a circular economy: an analytical literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2999-3018, 2018.
- KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. Elsevier: USA, 2014.
- KALOGIROU, S. Environmental benefits of domestic solar energy systems. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 3075–3092, 2004.
- KATSAPRAKAKIS, D.; KALLIGEROS, S.; PASADAKIS, N.; MONIAKIS, M.; SKIAS, I. The feasibility of the introduction of natural gas into the electricity production system in the island of Crete (Greece). **Energy for Sustainable Development**, v. 27, p. 155-167, 2015.
- KEMP, R. Eco-innovation: definition, measurement and open research issues. **Econ. Polit.** v. 3, p. 397-420, 2010.
- KHANKARI, G.; KARMAKAR, S. Power generation from coal mill rejection using Kalina cycle. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 138, n. 5, 2016.
- KHATTAK, M. A.; BORHANA, A.; SALMAN, M.; ALI, H.; NAWAZ, S.; KHAN, Z. Cost evaluation of proposed decommissioning plan of CANDU reactor. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 13, p. 3173-3189, 2018.
- KILIÇ, O.; ACARKAN, B.; AY, S. FGD investments as part of energy policy: A case study for Turkey. **Energy policy**, v. 62, p. 1461-1469, 2013.
- KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews**. Keele, UK, Keele Univ. 33, 28. 2004. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/kitchenham.pdf>>. Acesso em 05 mai. 2021.
- LACERDA, L. S.; ROTELA JUNIOR, P.; PERUCHI, R. S.; CHICCO, G.; ROCHA, L. C. S.; AQUILA, G.; COELHO JUNIOR, L. M. Microgeneration of Wind Energy for Micro and Small Businesses: Application of ANN in Sensitivity Analysis for Stochastic Economic Feasibility. **IEEE Access**, v. 8, p. 73931-73946, 2020.
- LAMERS, P.; RONI, M. S.; TUMULURU, J. S.; JACOBSON, J. J.; CAFFERTY, K. G.; HANSEN, J. K.; KENNEY, K.; TEYMOURI, F.; BALS, B. Techno-economic analysis of decentralized biomass processing depots. **Bioresour. Technol**, v. 194, p. 205-213, 2015.
- LAPPONI, J.C. **Projetos de investimento na empresa**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2007.
- LAUER, M.; DOTZAUER, M.; HENNIG, C.; LEHMANN, M.; NEBEL, E.; POSTEL, J. Flexible power generation scenarios for biogas plants operated in Germany: impacts on economic viability and GHG emissions. **Int. J. Energy Res**, v. 41, n. 1, p. 63–80, 2017.
- LI, M. et al. The digital simulation and fuzzy evaluation to reduce the likelihood of unsafe behavior in nuclear decommissioning. **Annals of Nuclear Energy**, v. 119, p. 331-341, 2018.
- LI, N.; ZHAO, H. Performance evaluation of eco-industrial thermal power plants by using fuzzy GRA-VIKOR and combination weighting techniques. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 169-183, 2016.
- LI, S.; MA, X.; YANG, C. A combined thermal power plant investment decision-making model based on intelligent fuzzy grey model and its stochastic process and its application. **Energy**, v. 159, p. 1102-1117, 2018.
- LIANG, X.; REINER, D.; GIBBINS, J.; LI, J. Getting Ready for Carbon Capture and Storage by Issuing Capture Options. **Environment and Planning A**, v. 42, p. 1286-1307, 2010.

- LIMA, M. T. S. L.; SOUZA, M. C. Discorrendo Sobre o Uso das Termelétricas no Brasil. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 2, p. 17-23, 2015.
- LIN, L.; XU, B.; XIA, S. Multi-Angle Economic Analysis of Coal-Fired Units with Plasma Ignition and Oil Injection during Deep Peak Shaving in China. **Applied Sciences**, v. 9, n. 24 p. 5399, 2019.
- LIN, L.; XU, B.; XIA, S. Multi-Angle Economic Analysis of Coal-Fired Units with Plasma Ignition and Oil Injection during Deep Peak Shaving in China. **Applied Sciences**, v. 9, n. 24 p. 5399, 2019.
- LIU, C. H. et al. Evaluation of NO_x, Sox and CO₂ emissions of Taiwan's thermal power plants by data envelopment analysis. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 13, n. 6, p. 1815-1823, 2013.
- LIU, C. H.; LIN, S. J.; LEWIS, C. Evaluation of thermal power plant operational performance in Taiwan by data envelopment analysis. **Energy policy**, v. 38, n. 2, p. 1049-1058, 2010.
- LIU, C.; LIN, S.; LEWIS, C. Evaluation of thermal power plant operational in Taiwan by data envelopment analysis. **Energy Policy**, v. 38, p. 1049-1058, 2010.
- LUND, H.; MATHIESEN, B. V. The role of carbon capture and storage in a future sustainable energy system. **Energy**, v. 44, p. 469–76, 2012.
- MA, Y.; YANG, L.; LU, J.; PEI, Y. Techno-economic comparison of boiler cold-end exhaust gas heat recovery processes for efficient brown-coal-fired power generation. **Energy**, v. 116, p. 812-823, 2016.
- MAHMOUDI, R.; EMROUZNEJAD, A.; KHOSROSHAHI, H.; KHASHEI, M.; RAJABI, P. Performance evaluation of thermal power plants considering CO₂ emission: A multistage PCA, Clustering, Game theory and Data Envelopment Analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 10.1016, 2019.
- MALEK, A. B. M. A.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. A.; TURKI, Y. A. A. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of a 10 MW biomassbased power plant in Malaysia. **J. Clean. Prod.**, v. 141, p. 502-513, 2017.
- MARCUS, A.; KANE, A.; BODIE, Z. **ISE Investments**. 12^a ed. Mc Graw Hill, 2020.
- MARKOWITZ, H. Portfolio Selection. **The Journal of Finance**, v.7, n. 1, p.77-91, 1952.
- MARTELANC, R.; PASIN, R.; CAVALCANTE, F. **Avaliação de empresas: um guia parafusões e aquisições e gestão de valor**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- MARTINS, I. D.; MORAES, F.F.; TÁVORA G.; SOARES H.L.F.; INFANTE C.E.; ARRUDA E.F.; BAHIENSE, L.; CAPRACE, J.; LOURENÇO M.I. A review of the multicriteria decision analysis applied to oil and gas decommissioning problems. **Ocean & Coastal Management**, v. 184, 2020.
- MATARAZZO, D. C. **Análise financeira de balanços: abordagem gerencial**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- MAYER, F. D.; SALBEGO, P. R. S.; ALMEIDA, T. C. et al. Quantification and use of rice husk in decentralized electricity generation in Rio Grande do Sul State, Brazil. **Clean Techn Environ Policy**, v. 17, p. 993–1003, 2015.
- MELDRUM, J.; NETTLES-ANDERSON, S.; HEATH, G.; MACKNICK, J. Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates. **Environ. Res. Lett**, v. 8, n. 1, 2013.
- MENG, M.; MANDER, S.; ZHAO, X.; NIU, D. Have market-oriented reforms improved the electricity Generation efficiency of China's thermal power industry? An empirical analysis. **Energy**, v. 114, p. 734–741, 2016.
- MIARA, A. et al. Climate-water adaptation for future US electricity infrastructure. **Environmental science & technology**, v. 53, n. 23, p. 14029-14040, 2019.
- MIGNACCA, B.; LOCATELLI, G.; VELENTURF, A. Modularisation as enabler of circular economy in energy infrastructure. **Energy Pol**, v. 139, p. 111371, 2020.

- MILLS, D. R.; MORRISON, G. L. Compact linear Fresnel reflector solar thermal powerplants. **Solar Energy**, v. 68, p. 263–83, 2000.
- MODIGLIANI, F.; MILLER, M. H. The Cost of Capital, Corporation Finance and the Theory of Investment. **American Economic Review**, v. 48, p. 261-297, 1958.
- MONTES, M. J.; RUBBIA, C. A.; RUBÉN A.; MARTÍNEZ-VAL, J. M. [A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power](#). **Energy**, v. 73, p. 192-203, 2014.
- NAO - NATIONAL AUDIT OFFICE. **Oil and gas in the UK: offshore decommissioning**. 2019.
- NASDAQ - NATIONAL ASSOCIATION OF SECURITIES DEALERS AUTOMATIC QUOTATION SYSTEM. **Market activity**. Disponível em: < <https://www.nasdaq.com/>>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- NEA - NUCLEAR ENERGY AGENCY. **Decommissioning of Nuclear Power Plants- Policies, Strategies and Costs**. Nuclear Energy Agency, OECD. 2003.
- NYSE - NEW YORK STOCK EXCHANGE. **Listings**. Disponível em: <<https://www.nyse.com/index>>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD Environmental Outlook to 2050**. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris. 2012.
- ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Módulo 7 - Planejamento da Operação Energética > Submódulo 7.2 Planejamento anual da operação energética**. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, 2020. disponível em:<<http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%207%2FSubm%C3%B3dulo%207.2%2FSubm%C3%B3dulo%207.2%202017.12.pdf>>. Acesso em 10 dez. de 2021.
- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, Brasília, 2022. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 10 jun. 2022.
- PAPAVASILIOU, A. Scarcity pricing and the missing European market for real-time reserve capacity, **The Electricity Journal**, v. 33, p. 106863, 2020.
- PARENTE, V., FERREIRA, D., SANTOS, E. M., & LUCZYNSKI, E. Offshore decommissioning issues: deductibility and transferability. **Energy Policy**, p. 1992-2001. 2006.
- PARK, H. S. et al. A study of the decommissioning procedure of an activated structure through an evaluation of the decommissioning cost for a research reactor. **Progress in Nuclear Energy**, v. 91, p. 399-410, 2016.
- PARK, J.; SARKIS, J.; WU, Z. Creating integrated business and environmental value within the context of China’s circular economy and ecological modernization. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 15, p. 1494-1501, 2010.
- PENMAN, S. H. **Análise de Demonstrações Financeiras e Security Valuation**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- PROCESI, M. Geothermal potential evaluation for Northern Chile and suggestions for new energy plans. **Energies**, v. 7, n. 8, p. 5444-5459, 2014.
- RAIMI, D. Decommissioning US power plants. Decisions, costs, and key issues. **Resources for the Future (RFF)**. Report, October. 2017.
- ROCHA, L. C. S.; AQUILA, G.; ROTELA JUNIOR, P.; PAIVA, A. P.; PAMPLONA, E. O.; BALESTRASSI, P. P. A stochastic economic viability analysis of residential wind power generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 412-419, 2018.

- ROTELLA JUNIOR, P.; ROCHA, L. C. S.; MORIOKA, S. N.; BOLIS, I.; CHICCO, G.; MAZZA, A.; JANDA, K. Economic Analysis of the Investments in Battery Energy Storage Systems: Review and Current Perspectives. **Energies**, v. 14, p. 2503, 2021.
- SAGANI, A.; HAGIDIMITRIOU, M.; DEBOSSIS, V. Perennial tree pruning biomass waste exploitation for electricity generation: The perspective of Greece. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 31, p. 77-85, 2018.
- SALOTTI, B. M.; LIMA, G. A. S. F.; MURCIA, F. D.; MALACRIDA, M. J. C.; PIMENTEL, R. C. **Contabilidade financeira**. São Paulo: Atlas, 2019.
- SARTORIS, A. **Estatística e introdução à econometria**. São Paulo: Saraiva, 2003.
- SCHMIDT, F. Meta-analysis: A constantly evolving research integration tool. **Organizational Research Methods**, v. 11, n. 1, p. 96-113, 2008.
- SEHNEM, S.; PEREIRA, S. C. F. Rumo à Economia Circular: Sinergia Existente entre as Definições Conceituais Correlatas e Apropriação para a Literatura Brasileira. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, v.18, n.1, 35-62, 2019.
- SEMIN, A. N. et al. Optimization model for the Russian electric power generation structure to reduce energy intensity of the economy. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 9, p. 379-387, 2019.
- SETHI, M. Location of greenhouse gases (GHG) emissions from thermal power plants in India along the urban-rural continuum. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 586-600, 2015.
- SHARMA, A. K., SHARMA, C., MULLICK, S. C. E KANDPAL, T. C. Solar industrial process heating: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 78, p. 124–137, 2017.
- SILVA, C. P. C.; COELHO JUNIOR, L. M.; OLIVEIRA, A. D.; SCOLFORO, J. R. S.; REZENDE, J. L. P.; LIMA, I. C. G. Economic analysis of agroforestry systems with candeia. **CERNE**, v. 18, p. 585-594, 2012.
- SIVA R., V.; KAUSHIK, S. C.; TYAGI, S. K. Exergetic analysis and evaluation of coal-fired supercritical thermal power plant and natural gas-fired combined cycle power plant. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, n. 3, p. 489-499, 2014.
- SONG, C; LIU, Q.; JI, N.; DENG, S.; ZHAO, J.; KITAMURA, Y. Natural gas purification by heat pump assisted MEA absorption process. **Appl Energy**, v. 204, p. 353–61, 2017.
- STEFFEN, B.. Estimating the cost of capital for renewable energy projects. **Energy Economics**, v. 88, p. 104783, 2020.
- SUN, J.; ZHANG, Z.; WANG, L.; ZHANG, Z.; WEI, JINJIA. Comprehensive Review of Line-Focus Concentrating Solar Thermal Technologies: Parabolic Trough Collector (PTC) vs Linear Fresnel Reflector (LFR). **J. Therm. Sci**, v. 29, p. 1097–1124, 2020.
- SURESH, M.V. J. J.; REDDY, S.; KOLAR, A. 4-E (Energy, Exergy, Environment, and Economic) analysis of solar thermal aided coal-fired power plants. **Energy for Sustainable Development**, v. 14, p. 267-279, 2010.
- THAKUR, A. Development and usability of solar thermal collectors in different fields: An overview, **Materials Today**, p. 2214-7853, 2021.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence informed management knowledge by means of systematic review. **Br. J. Manag**, v. 14, p. 207-222, 2003.
- U.S DEPARTMENT OF ENERGY - DOE. **Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities**, 2015.
- UNDERSCHULTZ, J.; DODDS, K.; MICHAEL, K.; SHARMA, S.; WALL, T.; WHITTAKER, S. **Carbon capture and storage**. Taylor&Francis Group, 2017.

- UNDP - UNITED NATIONS LEAD AGENCY ON INTERNATIONAL DEVELOPMENT. **Sustainable Development Goals (SDGs)**. Disponível em: <<https://www.undp.org/sustainable-development-goals>>. Acesso em: 24 mai. 2022.
- VAN, V. M. T. H.; WIBERG, D.; LEDUC, S.; RIAHI, K. Powergeneration system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. **Nat. Clim. Change**, v. 6, n. 4, p. 375–380, 2016.
- VESELOV, F. V. et al. Comprehensive assessment of the effective scope of modernization of thermal power plants to substantiate the rational structure of the generating capacities for the future until 2035. **Thermal engineering**, v. 64, n. 3, p. 161-169, 2017.
- WANG, L. et al. A review of evaluation, optimization and synthesis of energy systems: methodology and application to thermal power plants. **Energies**, v. 12, n. 1, p. 73, 2018.
- WANG, Y.; YAN, W.; KOMONPIPAT, S. How does the capacity utilization of thermal power generation affect pollutant emissions? Evidence from the panel data of China's provinces. **Energy Policy**, v. 132, p. 440-451, 2019.
- WASSERBAUR, R.; SAKAO, T.; MILIOS, L. Interactions of governmental policies and business models for a circular economy: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 337, p. 130329, 2022.
- WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. **MIS Q**, v. 26, p. 13-23, 2002.
- WEN, C. F.; ZHAO, Y. L.; LIANG, R. Z. Recycle of low chemical potential substance. **Res. Conservat. Recycl**, v. 51, p. 475-486, 2007.
- WHITE, M.; MARSH, E. Content analysis: a flexible methodology. **Libr. Trends**, v. 55, n. 1, p. 22-45, 2006.
- WORLD BANK. International Finance Corporation. World Bank Group. Converting Biomass to Energy. **A Guide for Developers and Investors**. 2017.
- XIE, J. et al. Efficiency evaluation of thermal power plants in China based on the weighted Russell directional distance method. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 573-583, 2019.
- XIE, W.T.; DAI, Y.; WANG, R. Z.; SUMATHY, K. Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2588-2606, 2011.
- YE, M.; SUN, J.; HUANG, S. Comprehensive evaluation of cleaner production in thermal power plants based on an improved least squares support vector machine model. **Environmental Engineering Research**, v. 24, n. 4, 2018.
- ZHANG, W.; XIA, X.; LI, J. Comparison of energy and environmental regulations for thermal power plants in China. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 13, p. 1221-1227, 2014.
- ZHANG, Y.; QIN, F.; SHAO, S.; LIU, S. L.; CHEN, Y.; ZHANG, S. S. An Evaluation of the Sustainability of Thermal Power Plants Based on Emergy and Exergy Theory. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 34, p. 1249-1258, 2012.
- ZHOU, K.; BONET FERNANDEZ, D.; WAN, C.; DENIS, A.; JUILLARD, G. M. A study on circular economy implementation in China. **Working Paper IPAG Business School**, n. 312, v. 3, p.2014-312, 2014.
- ZHOU, Q.; HANASAKI, N.; FUJIMORI, S. Economic Consequences of Cooling Water Insufficiency in the Thermal Power Sector under Climate Change Scenarios. **Energies**, v. 11, n. 10, p. 2686, 2018.
- ZHU, G.; WENDELIN, T.; WAGNER, M. J.; Kutscher, C. History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors. **Solar Energy**, v. 103, p. 639-652, 2014.

ZUPIC, T. C. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015.