



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

Michel Becker

**Análises de opções reais para decisões de investimento em usinas
geotérmicas**

Florianópolis
2023

Michel Becker

**Análises de opções reais para decisões de investimento em usinas
geotérmicas**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Administração da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Administração, Finanças e Desenvolvimento Econômico.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Andrade de Lima.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Becker, Michel

Análises de opções reais para decisões de investimento
em usinas geotérmicas / Michel Becker ; orientador, Marcus
Vinicius Andrade de Lima, 2023.

55 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Sócio-Econômico, Programa de Pós-Graduação em
Administração, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Administração. 2. Opções reais; análises de
investimento; energia renovável; geotérmica.. I. Lima,
Marcus Vinicius Andrade de. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Administração.
III. Título.

Michel Becker

**Análises de opções reais para decisões de investimento em usinas
geotérmicas**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros

Prof. Dr. Marcus Vinicius Andrade de Lima
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. André Luís Da Silva Leite
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Marcelo Haendchen Dutra
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Administração, Finanças e
Desenvolvimento Econômico.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Marcus Vinicius Andrade de Lima
Orientador

Florianópolis, 2023

Para minha mãe (in memoriam), a maior mulher que conheci e minha inspiração.

Meus amores Juliana, Pedro, e Lucas.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação resultou de um conjunto de processos não planejados como pandemia, Covid, fechamento de negócios, isolamento social, impedimentos dos mais diversos... 2020, ao menos pra mim, foi um ano muito diferente, quando também pude aproveitar para explorar o tema finanças, que sempre tive interesse e me perseguiu na vida profissional e pessoal.

Os processos me levaram para este mestrado, então primeiramente sou grato a esta “aleatoriedade” da vida, ou como prefiro acreditar, pelas linhas tortas que Deus escreveu.

Agradeço ao meu orientador Marcus Vinícius, por ter acolhido a minha proposta de pesquisa e orientado meus estudos, nada disto teria ocorrido não fosse seu irrestrito apoio. Nossa entrevista de apresentação do projeto foi o melhor encontro que eu poderia ter tido neste trajeto. Obrigado pela confiança, pelas mudanças sugeridas e, principalmente, pelo convívio durante estes dois anos, ganhei na loteria nesta orientação! Seu incentivo permitiu eu me dedicar a um tema de pesquisa que sempre me fascinou, me realiza, e impulsiona a continuar.

Gratidão a minha banca que, com muita generosidade, se empenhou em avaliar este trabalho, após já ter cooperado com sugestões e correções durante a qualificação. Ao timaço da Universidade Federal de Santa Catarina, mais precisamente ao Departamento de pós-graduação em Administração, por todo apoio e estrutura disponibilizados.

A professora Paulina Aldunce e a Universidad de Chile, pela oportunidade do intercambio, e compartilhamento de conhecimento relativo às adaptações climáticas, a experiência com suas aulas tornaram-se minhas referências para docência.

Aos meus irmãos, meu eterno obrigado, vocês são parceiros pra tudo! Nenhuma palavra de agradecimento é suficiente para expressar minha gratidão.

Por todo carinho e compreensão da minha família, esposa e filhos, Deus é quem nos permite, mas são estes que mandam, portanto, obrigado por tudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Obrigado a todos!

“A reavaliação da economia não é uma tarefa meramente intelectual, mas deverá envolver profundas mudanças em nossos sistemas de valores.”

Capra Fritjof – O ponto de mutação.

RESUMO

A energia renovável geotérmica tem um grande potencial para contribuir com a redução da emissão dos gases de efeito estufa, mas tem encontrado dificuldades em seu desenvolvimento. É caracterizada por investimento de alto risco e grande irreversibilidade, onde as técnicas tradicionais de análise de investimentos tem suas aplicações limitadas. A teoria das opções reais, como uma ferramenta para avaliação de investimento em energia, permite que flexibilidades sejam incorporadas ao design do projeto, em face de um ambiente incerto, e tem demonstrado a capacidade de agregar valor econômico aos investimentos. Essa dissertação busca primeiramente encontrar o estado da arte na literatura sobre os conceitos e aplicações de opções reais em investimentos de energias renováveis, sobretudo geotérmicas, por meio de uma análise sistemática de literatura e estudos bibliométricos, posteriormente analisa e aplica a teoria da teoria das opções reais numa simulação de estudo de caso de projeto geotérmico implantado no Brasil, demonstra que a ferramenta se mostra eficiente ao acrescentar valor econômico na análise, e fornece uma visão abrangente do projeto, identificando as flexibilidades gerenciais e as incertezas que mais influenciam no lucro. Espera-se que o modelo utilizado estimule pesquisadores e investidores a considerar a avaliação de projetos de energia geotérmica no Brasil.

Palavras-chave: análise de investimentos; opções reais; geotérmica; energias renováveis; tomada de decisão.

ABSTRACT

Geothermal renewable energy has great potential to contribute to the reduction of greenhouse gas emissions, but has encountered difficulties in its development. It is characterized by high risk investment and great irreversibility, where traditional investment analysis techniques have limited applications. Real options theory, as a tool for evaluating energy investments, allows flexibilities to be incorporated into project design, in the face of an uncertain environment, and has demonstrated the ability to add economic value to investments. This master thesis seeks firstly to find the state of the art in the literature on the concepts and applications of real options in renewable energy investments, especially geothermal, through a systematic analysis of literature and bibliometric studies, subsequently analyzes and applies the theory of options theory real data in a simulation of a case study of a geothermal project implemented in Brazil, demonstrates that the tool is efficient in adding economic value to the analysis, and provides a comprehensive view of the project, identifying the managerial flexibilities and uncertainties that most influence profit. It is expected that the model used will stimulate researchers and investors to consider the evaluation of geothermal energy projects in Brazil.

Keywords: investments; real option; geothermal; renewable energy; decision making.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável	14
Figura 2 – Acompanhamento do progresso geotérmica.....	15
Figura A1.1 – Enquadramento Metodológico	21
Figura A1.2 – Levantamento Inicial para seleção do PB	23
Figura A1.3 – Etapas de Filtragem.....	24
Figura A1.4 – Seleção de Artigos por Reconhecimento Científico	24
Figura A1.5 – Principais Autores do PB	27
Figura A1.6 – Principais Periódicos do PB	28
Figura A1.7 – Palavras-Chave do PB.....	29
Figura A1.8 – Principais Autores nas Referências do PB	30
Figura A1.9 – Principais Periódicos nas Referências do PB	30
Figura A1.10 – Periódicos Destaque do PB e Referências do PB	31
Figura A1.11 – Classificação dos Artigos Conforme sua Relevância Acadêmica.	32
Figura A2.1 – Estrutura de análise de investimento	41
Figura A2.2 – Modelo de opções compostas	42
Figura A2.3 – Oferta de energia por fonte	44
Figura A2.4 – Emissões de GEE.....	45
Figura A2.5 – Histórico parâmetros implantação usinas geotérmicas.....	47
Figura A2.6 – Preço crédito carbono futuros	48
Figura A2.7 – Modelo opção composta estudo de caso.....	49
Figura A2.8 – Fluxo de caixa com principais variáveis.....	49
Figura A2.9 – Rede binomial para cálculo da opção composta	50
Figura A2.10 – Análise de sensibilidade	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Organização geral da dissertação.....	16
Quadro A1.1 – Artigos do PB	26
Quadro A2.1 – Variáveis de entrada usando cenários abordados	43
Quadro A2.2 – Fluxos de caixa conforme cenários	43
Quadro A2.3 –Premissas do projeto	46
Quadro A2.4 – Cenários das variáveis avaliadas.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ER	Energia renovável
GEE	Gases de Efeito Estufa
MAD	Marketed Asset Disclaimer
MDL	Mecanismo de desenvolvimento limpo
O&M	Operação e manutenção
OR	Opções Reais
PB	Portfólio Bibliográfico
RCE	Redução Certificada de Emissão
TMA	Taxa mínima de atratividade
TOR	Teoria das Opções Reais
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	14
2	ARTIGO 1 – FINANÇAS SUSTENTÁVEIS: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO DE OPÇÕES REAIS COMO FERRAMENTA FINANCEIRA PARA VIABILIZAR ENERGIA GEOTÉRMICA RENOVÁVEL.....	17
	RESUMO	17
2.1	INTRODUÇÃO.....	17
2.2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.3	METODOLOGIA	21
2.3.1	Enquadramento metodológico	21
2.3.2	Instrumento de Intervenção.....	22
2.3.3	Levantamento inicial para seleção do portfólio.....	22
2.3.4	Escolha dos artigos para compor o PB	23
2.4	RESULTADOS	25
2.4.1	Análise bibliométrica do PB	26
2.4.1.1	<i>Artigos</i>	27
2.4.1.2	<i>Autores</i>	27
2.4.1.3	<i>Periódicos.....</i>	27
2.4.1.4	<i>Palavras-Chave</i>	28
2.4.2	Análise bibliométrica das referências do PB	29
2.4.2.1	<i>Autores de destaque.....</i>	29
2.4.2.2	<i>Periódicos.....</i>	30
2.4.3	Análise bibliométrica, PB versus referências do PB.....	31
2.4.3.1	<i>Periódicos.....</i>	31
2.4.3.2	<i>Classificação dos artigos conforme relevância acadêmica na amostra</i>	31
2.5	CONCLUSÃO	32
2.6	REFERÊNCIAS	33
3	ARTIGO 2 – ANÁLISE DE OPÇÕES REAIS PARA DECISÕES DE INVESTIMENTO EM ENERGIA GEOTÉRMICA.....	36
	RESUMO	36
3.1	INTRODUÇÃO.....	36
3.2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	37
3.2.1	Teoria das Opções Reais (TOR)	37

3.2.2	Usinas geotérmicas	39
3.3	METODOLOGIA.....	39
3.3.1	Estrutura para decisão de investimento em projetos geotérmicos no Brasil	39
3.3.2	Modelo de opção composta	41
3.3.3	Avaliação da opção	42
3.4	ESTUDO DE CASO PARA DECISÕES DE INVESTIMENTO COM SIMULAÇÃO DE PROJETO GEOTÉRMICO NO BRASIL POR MEIO DA TOR.....	44
3.4.1	Descrição do caso	44
3.4.2	Análise de OR	46
3.5	CONCLUSÃO	51
3.6	REFERÊNCIAS	52
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO GERAL

As mudanças climáticas associadas às emissões antrópicas de gases de efeito estufa constituem-se numa das principais questões a serem enfrentadas na atualidade. As pesquisas em energia renovável (ER) não convencionais caracterizam uma importante ferramenta neste enfrentamento, favorecendo a transição energética para uma economia de baixo carbono, além de alinhar-se com os indicadores 7 e 13 dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (Figura 1), e das metas ambientais acordadas pelo Brasil (ARENT; WISE; GELMAN, 2011; KOZLOVA, 2017).

Figura 1 – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

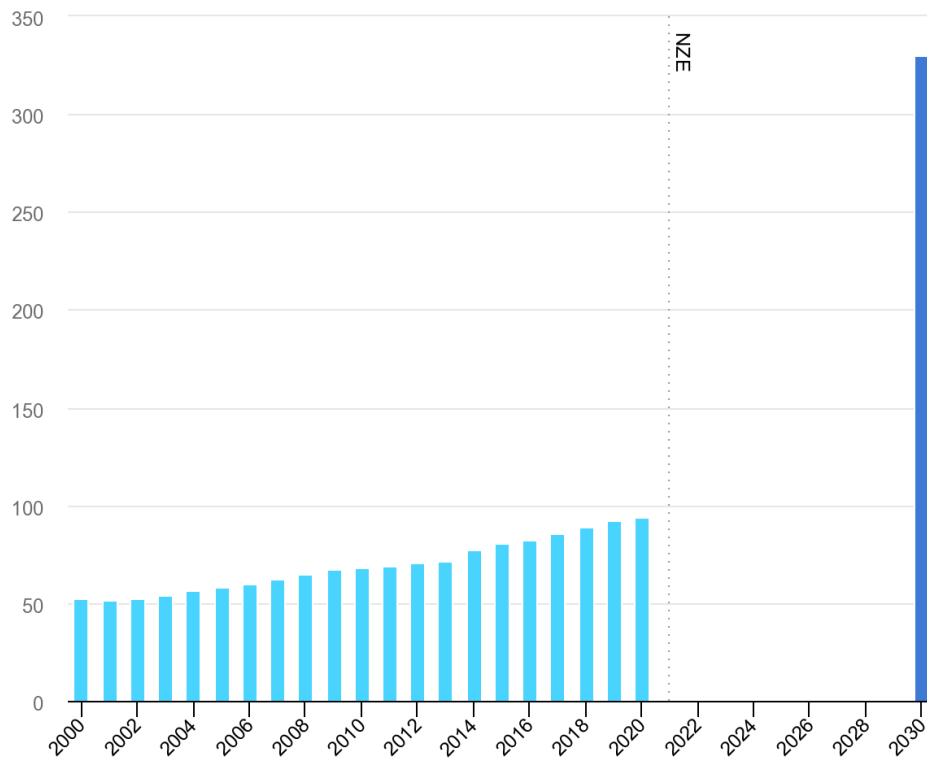


Fonte: United Nations (2022).

A ER geotérmica tem um papel significativo a desempenhar na transição energética baixo carbono, mas não tem ampliado sua participação na matriz energética mundial, por envolver grandes riscos de investimento, decorrente principalmente de múltiplas fontes de incerteza (BARASA KABEYI; OLANREWAJU, 2022). A expansão do nível de informação e o desenvolvimento de uma metodologia mais robusta para analisar estes investimentos, podem melhorar substancialmente as condições de risco para tomada de decisão.

Segundo a International Energy Agency, a geração de eletricidade geotérmica não está no caminho certo, necessitando de muito mais esforço para colocá-la na trajetória do zero carbono, exigindo aumentos anuais de 13% na geração entre 2021-2030, correspondendo a expansões de capacidade anual média de ~3,6 GW, muito superior ao histórico, como pode ser observado na Figura 2. Políticas para ajudar a reduzir custos e mitigar riscos de pré-desenvolvimento são necessárias para aumentar a geração de desta fonte energética.

Figura 2 – Acompanhamento do progresso geotérmica



Fonte: Agência Internacional de Energia (IEA, 2021).

Pesquisas demonstram que a abordagem por opções reais tem capacidade de capturar flexibilidades gerenciais e acrescentar valor nas análises econômico-financeira em projetos de ER, entretanto, nota-se a ausência de estudos abordando a Teoria das Opções Reais (TOR) para análise de investimentos em usinas geotérmicas, e a inexistência, ou escassez, de pesquisas com viés econômico-financeira, sobre usinas geotérmicas no território brasileiro (KIM; PARK; KIM, 2017; KOZLOVA, 2017).

Diante desta problemática visualiza-se como oportuno o desenvolvimento de estudos que abordem ferramentas financeiras que possam contribuir para viabilidade de projetos em usinas geotérmicas, auxiliando na promoção de instrumentos mitigadores do aquecimento global.

No Brasil, mesmo diante de um significativo potencial geotérmico, não há perspectiva desta fonte compor a matriz elétrica nos próximos 30 anos (BRASIL, 2020), o que reforça a necessidade de estudos para análises de possíveis impedimentos.

Portanto, a pergunta principal desta dissertação é como modelar a TOR para auxiliar nas análises de investimentos em usinas geotérmicas?

Para respondê-la, este estudo está dividido em dois artigos, independentes e complementares, utilizando-se de uma abordagem multimétodos. Os artigos estão interligados pelo mesmo contexto (CAUCHICK-MIGUEL, 2019), ou seja, aplicações da TOR para análise de investimentos em usinas geotérmicas. Acredita-se que essa estrutura forneça maior confiabilidade nos resultados e contribua de modo mais significativo para o marco teórico e conceitual existente, podendo também apoiar o desenvolvimento da diversificação da matriz energética brasileira. A estrutura da dissertação pode ser observada no Quadro 1, no qual o estudo é apresentado de modo geral e simplificado, contendo suas abordagens, questões de pesquisa, metodologia e resultados.

Quadro 1 – Organização geral da dissertação.

Pergunta principal de pesquisa:	Como modelar a TOR para análise de investimentos em usinas geotérmicas?	
Artigos	Artigo 1	Artigo 2
Abordagem	Quali-quantitativa	Quantitativa
Questão de pesquisa	Como a abordagem de opções reais poderia contribuir nas análises de investimentos em usinas geotérmicas?	Como estruturar, aplicar e analisar uma estrutura da TOR, numa usina geotérmica
Objetivo	Expandir o entendimento sobre investimentos e opções reais em usinas geotérmicas, sobretudo ao: i. Selecionar referências bibliográficas sobre análise de investimentos e opções reais em usinas geotérmicas; e ii. Realizar análises bibliométricas sobre os artigos e suas referências, autores e periódicos proeminentes nesse tema.	Identificar as principais variáveis que afetam as análises econômicas de projetos de ER geotérmicas, analisando a influência das incertezas no lucro do projeto; e avaliar a viabilidade econômica de um projeto de usina geotérmica no Brasil, capturando as incertezas levantadas.
Metodologia	Bibliometria; Proknow-C	TOR; simulação Monte Carlo, VPL
Resultados	Portfólio bibliográfico teórico relevante, detalhando num processo sistemático, contendo 25 artigos; nas análises bibliométricas entre os destaques, os periódicos Energy Policy, Energy Economics e Renewable and Sustainable Energy Reviews; e os artigos (Boomsma et al., 2012) e (Fernandes et al., 2011)	Adaptou uma estrutura da TOR como ferramenta de suporte a tomada de decisão, aplicando na análise de investimento em projetos de energia geotérmica, contemplando flexibilidades gerenciais e consideramos quatro fatores incertos: investimento; fator de capacidade da usina; faturamento com CER; e O&M; Simulou de implantação de usina geotérmica de 5MW no Brasil, e mostrou um valor de opção de 39,44 milhões de reais.

Fonte: elaboração própria.

2 ARTIGO 1

FINANÇAS SUSTENTÁVEIS: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO DE OPÇÕES REAIS COMO FERRAMENTA FINANCEIRA PARA VIABILIZAR ENERGIA GEOTÉRMICA RENOVÁVEL

RESUMO

Os setores de finanças, investimentos e de Energia Renovável (ER), são basilares para qualquer programa de alterações do clima e a associação entre eles têm sido alvo de um crescente interesse. Avaliações financeiras têm dificultado o desenvolvimento da energia geotérmica e a abordagem com opções reais poderia contribuir. O artigo tem por objetivo expandir o entendimento sobre investimentos e opções reais em usinas geotérmicas, selecionando referências bibliográficas sobre o tema e realizando análises bibliométricas sobre as referências encontradas. A teoria das opções reais é conhecida por aumentar o valor de projetos sob incerteza, modelando sua flexibilidade, em resposta às mudanças em seus ambientes e poderia ser usada para lidar com questões ambientais e energia geotérmica, que tem uma baixa pegada de carbono e a capacidade de fornecer energia e calor contínuos. Utilizou-se o processo estruturado para a seleção e análise da literatura científica ProKnow-C, sobre as bases Scopus e WoS, a partir dos eixos de pesquisa análise de investimento e energia renovável, encontrando artigos que foram triados de maneira sistemática, resultando num Portfólio Bibliográfico (PB) de 25 artigos. Estes subsidiaram as análises bibliométricas, cujos destaques são: a) periódicos - Energy Policy, Energy Economics e Renewable and Sustainable Energy Reviews; b) autores - Ferreira, P. participou de 3 trabalhos no PB selecionado e Fleten S. E. teve mais de 10 trabalhos compondo as referências do PB; e c) artigos - Boomsma *et al.* (2012) e Fernandes *et al.* (2011) se sobressaíram na classificação de relevância acadêmica.

Palavras-chave: investimentos; opções reais; geotérmica; energias renováveis; finanças sustentáveis.

2.1 INTRODUÇÃO

As mudanças recentes ocorridas no clima mundial não têm precedentes e todas as regiões do mundo já são afetadas por eventos extremos como ondas de calor, chuvas fortes, secas e ciclones provocados pelo aquecimento global. É o que diz relatório AR6, aprovado e divulgado pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), divulgado em Agosto/21 e que pela primeira vez afirma ser inequívoco que as atividades humanas causaram as mudanças climáticas. Em 2019 a concentração de dióxido de carbono (CO²) na atmosfera era maior do que em qualquer outro momento e a concentração de metano e óxido nitroso era a maior em 800 mil anos, porém, se

houver uma significativa redução na emissão dos Gases de Efeito Estufa (GEE), pode-se limitar as mudanças climáticas (MASSON-DELMOTTE *et al.*, 2021).

Os setores de finanças/investimentos e de Energia Renovável (ER), são basilares para qualquer programa de alterações do clima. O primeiro, embora tenham respondido de forma lenta ao alinhamento às novas demandas da economia sustentável (RYSZAWSKA, 2016), foi identificado como fundamental para o avanço da transição energética zero-carbono, atuando como facilitador e catalisador determinante desta transformação econômica climática (CHENET *et al.*, 2019). Já o segundo, é componente principal de qualquer estratégia de mitigação das mudanças climáticas (ARENT *et al.*, 2011) e suas tecnologias associadas tem sido alvo de um crescente interesse, tornando-se realidade nos últimos anos (DRANKA *et al.*, 2020).

Apesar do aumento da participação da geração de ER no mundo (ARENT *et al.*, 2011) a geração renovável geotérmica, derivada da energia térmica do interior da Terra, com produção de baixo carbono e capacidade de fornecimento contínuo, não tem ganho escala e cresce abaixo das metas estabelecidas para esta fonte, sendo o financiamento apontado como uma das principais barreiras e as análises econômicas, aparentemente, sido limitadas a cálculos tradicionais de Valor Presente Líquido (VPL) (LUKAWSKI *et al.*, 2016).

Outros obstáculos como altos e incertos custos de investimento de capital contribuem para que a geotérmica continue marginalizada, porém avaliações utilizando opções reais permitiriam sua progressão e já provaram que podem gerar resultados melhores do que as limitadas técnicas tradicionais, diferindo significativamente de um cálculo de VPL padrão e oferecendo percepções muito mais profundas sobre os riscos associados ao desenvolvimento desta fonte (COMPERNOLLE *et al.*, 2019; FERNANDES *et al.*, 2011). Nos investimentos de energia, o método das opções reais tem se mostrado eficaz por apresentar um valor mais realista dos projetos, permitindo que investidores possam agregar valor, utilizando a flexibilidade diante de flutuações imprevisíveis, incluindo maior precisão no cálculo de subsídios e possibilidade de utilizar certificados, importantes para o desenvolvimento sustentável e viabilidade da ER (LIU; RONN, 2020).

Os investimentos de longo prazo envolvem incertezas relevantes que podem determinar o comportamento dos investidores e do mercado, e a influência de elementos sustentáveis neste mercado de longo prazo é complexa (FERREIRA *et al.*, 2016). Projetos de ER estão frequentemente entre os tipos mais arriscados e a forma

como os investidores avaliam seus investimentos exige o uso de técnicas de avaliação mais sofisticadas (DRANKA *et al.*, 2020).

Diante desta problemática é oportuno estabelecer um conhecimento, com reconhecimento científico e de forma sistematizada, para responder à pergunta: Como a abordagem de opções reais poderia contribuir nas análises de investimentos em usinas geotérmicas?

Assim, este artigo tem por objetivo expandir o entendimento sobre investimentos e opções reais em usinas geotérmicas, sobretudo ao:

- a) selecionar referências bibliográficas sobre análise de investimentos e opções reais em usinas geotérmicas; e
- b) realizar análises bibliométricas sobre os artigos e suas referências, autores e periódicos proeminentes nesse tema.

Para atingir estes objetivos utilizou-se a ferramenta Knowledge Development Process – Constructivist (ProKnowC). Trata-se de um processo estruturado para seleção e análise da literatura científica, com perspectiva construtivista, considerando o propósito do pesquisador sobre um determinado tema, permitindo gerar a fundamentação necessária para o início de uma pesquisa científica (LACERDA, 2021; LACERDA *et al.*, 2012).

A construção desse conhecimento no pesquisador é aqui representada pela seleção dos artigos científicos relevantes que comporão o portfólio bibliográfico (PB) relacionado a análise de investimentos e opções reais em usinas geotérmicas, bem como a análise bibliométrica desses artigos.

O conceito de análise bibliométrica, popularizado por Pritchard em 1969, é constituído por um conjunto de métodos e técnicas para visualização da informação, com a finalidade de elaborar mapas que possam representar adequadamente os aspectos quantitativos e cognitivos da ciência (MACEDO DOS SANTOS; KOBASHI, 2009; VANTI, 2002). Os parâmetros observáveis nesta pesquisa são: os artigos selecionados, suas referências, autores, número de citações e periódicos mais relevantes

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma: A seção 2 contém a fundamentação teórica; na seção 3 se encontra o enquadramento metodológico e os procedimentos utilizados nesta pesquisa; a seção 4 descreve as análises e os resultados bibliométricos; conclusões e apontamentos estão na seção 5; por fim, a última seção dedica-se às referências bibliográficas.

2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Financiamento em ER e finanças sustentáveis – O financiamento de ER promove o sistema financeiro sustentável por meio do seu alinhamento às necessidades de longo prazo de uma economia sustentável. Ele contempla os aspectos das finanças climáticas, ao trabalhar a redução de GEE; finanças verdes, ao buscar resultados ambientais regenerativos; e finanças sustentáveis, ao melhorar os resultados ambientais, sociais e econômicos (RYSZAWSKA, 2016). Além disto, as finanças sustentáveis também buscam, através de métricas mais robustas, modelos nos quais todos os custos e benefícios relevantes sejam devidamente contabilizados, incluindo, além do conjunto usual de fluxos de caixa, o reconhecimento explícito de fluxos de caixa incrementais atribuíveis à sustentabilidade (POPESCU *et al.*, 2021).

A avaliação econômica dos investimentos em energia - Os investimentos em energia têm características específicas que os diferenciam em relação a outros como: investimento praticamente irreversível uma vez que o capital torna-se imobilizado, impedindo de ser utilizado para outras áreas, ou empresas; há flexibilidade temporal, permitindo ao investidor adiar a decisão para obter o melhor momento do investimento; e há a disposição diversas tecnologias de geração que podem ser escolhidas, associadas a diferentes níveis de incerteza que devem ser considerados. Portanto, torna-se obrigatório aos investidores ferramentas adequadas para análises dos investimentos, que contemplem esta matriz de riscos e incertezas (SANTOS *et al.*, 2014).

Opções reais - A teoria das opções reais é conhecida por aumentar o valor de projetos sob incerteza. Isso é alcançado modelando a flexibilidade que os gerentes possuem para ajustar os projetos em resposta às mudanças em seus ambientes. Com base nisso, esta teoria poderia ser usada para lidar com questões ambientais e de energia atuais, aumentando o valor dos projetos de geração de eletricidade, especialmente projetos de energia renovável (MARTÍNEZ CESEÑA *et al.*, 2013).

Energia geotérmica - A energia geotérmica é uma fonte energética renovável, derivada da energia térmica gerada e armazenada no interior da Terra. A produção de energia geotérmica tem uma baixa pegada de carbono (Carbon footprint) e a capacidade de fornecer energia e calor contínuos. É considerada um recurso energético abundante, mas apesar de seus benefícios ambientais e econômicos e em oposição à maioria das outras energias renováveis, o desenvolvimento da energia

geotérmica está abaixo da trajetória prevista para esta fonte. Custos de investimento iniciais e múltiplas fontes de incerteza resultam em um grande risco de investimento, dificultando a mobilização do capital necessário (COMPERNOLLE *et al.*, 2019).

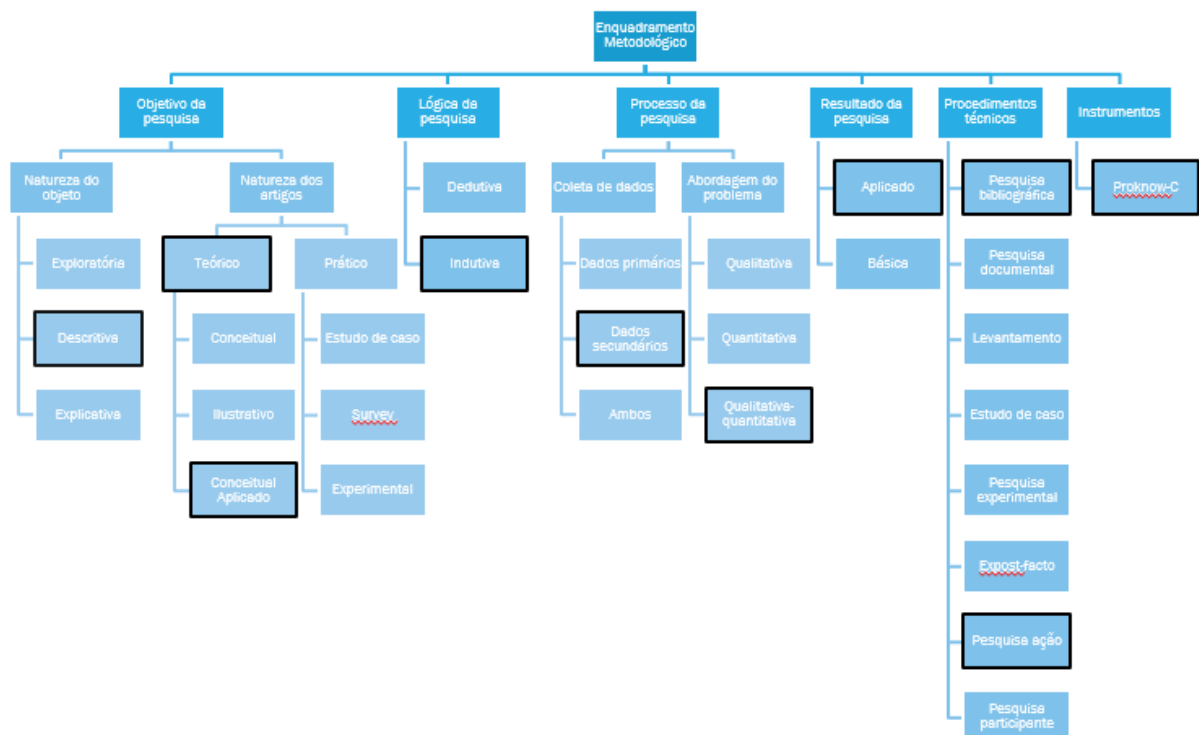
2.3 METODOLOGIA

Considerando que não existe uma maneira melhor de realizar todas as pesquisas, que as escolhas metodológicas têm impacto sobre a descoberta, que as abordagens, estratégias e métodos mais adequados para pesquisa relacionam-se com o problema abordado (CALVETTI, 2019; SAUNDERS, 2009), esta seção objetiva fornecer ao leitor informações suficientes para fazer uma estimativa da confiabilidade e validade dos métodos utilizados nesta pesquisa.

2.3.1 Enquadramento metodológico

As opções selecionadas quanto aos métodos, técnicas e procedimentos aplicados nesta pesquisa estão dispostos na Figura A1.1.

Figura A1.1 – Enquadramento Metodológico



Fonte: adaptado de Lacerda *et al.* (2012).

2.3.2 Instrumento de Intervenção

A revisão de literatura é um passo inicial para fornecer a base sobre a qual uma pesquisa é construída, tendo como principais objetivos ajudar a desenvolver uma boa compreensão e visão sobre pesquisas anteriores, tendências e revisar as mais relevantes e significativas pesquisas sobre o tema de interesse. Ainda segundo o autor, uma análise eficaz permite familiaridade com o estado atual de conhecimento sobre determinado assunto e as respectivas limitações nas pesquisas (SAUNDERS, 2009).

Assim, objetivando estabelecer um referencial que retrate uma amostra representativa do tema, utilizou-se como instrumento de intervenção o processo estruturado para a seleção e análise da literatura científica denominado Knowledge Development Process-Constructivist - ProKnow-C, concebido no Laboratório de Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão (LabMCDA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (ENSSLIN *et al.*, 2017).

Dentre os processos do ProKnow-C, esta pesquisa limita-se a abordar as etapas correspondentes da seleção do PB e as etapas que envolvem a análise bibliométrica. Adiante caracterizar-se-á detalhadamente os procedimentos adotados, com este instrumento, em cada uma das fases da investigação.

2.3.3 Levantamento inicial para seleção do portfólio

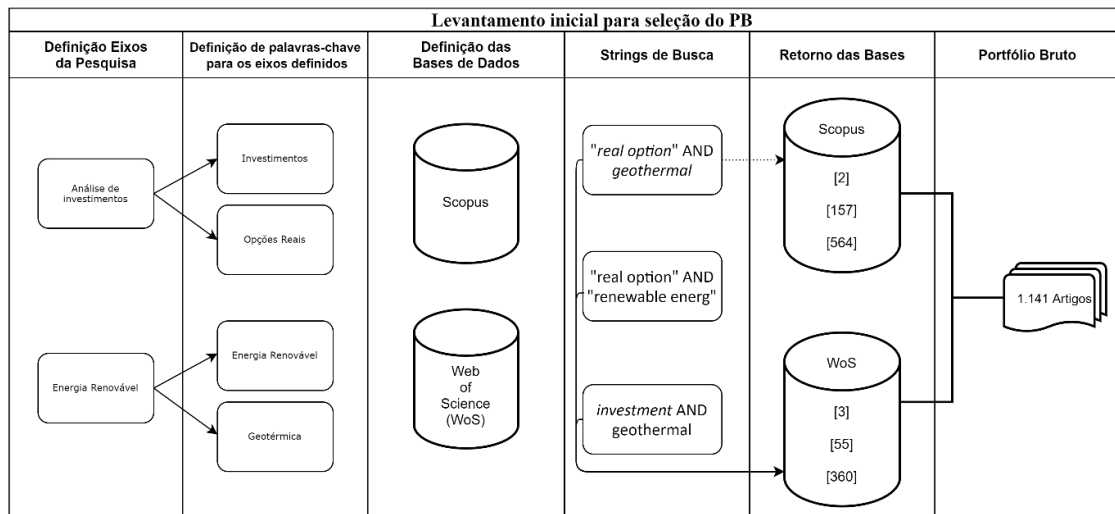
O levantamento inicial é composto pela etapa de seleção de artigos que formarão um banco de dados brutos, permanecendo posteriormente, apenas artigos julgados de maior expressividade na área de conhecimento ao tema da pesquisa.

Os procedimentos descritos neste estudo foram realizados em Junho de 2021 e somente foram considerados os artigos publicados, nas bases mencionadas, nos últimos 10 anos (de 2011 a 2021).

Foram definidas duas bases de dados científicas, a Scopus e a Web of Science, ambas por serem consideradas expoentes relevantes na comunidade científica internacional, além de oferecer possibilidades de busca e filtros avançados, com uso de expressões booleanas. Por conta disto, entende os autores que as bases selecionadas são adequadas para proposta desta pesquisa.

Dois eixos de pesquisa foram combinados, análise de investimentos e energia renováveis, e definidas as palavras chaves que subsidiaram as buscas nas bases selecionadas. As combinações das palavras, realizadas por meio das strings de busca, e o número de artigos encontrados em cada base, podem ser visualizadas na Figura A1.2.

Figura A1.2 – Levantamento Inicial para seleção do PB



Fonte: elaboração própria.

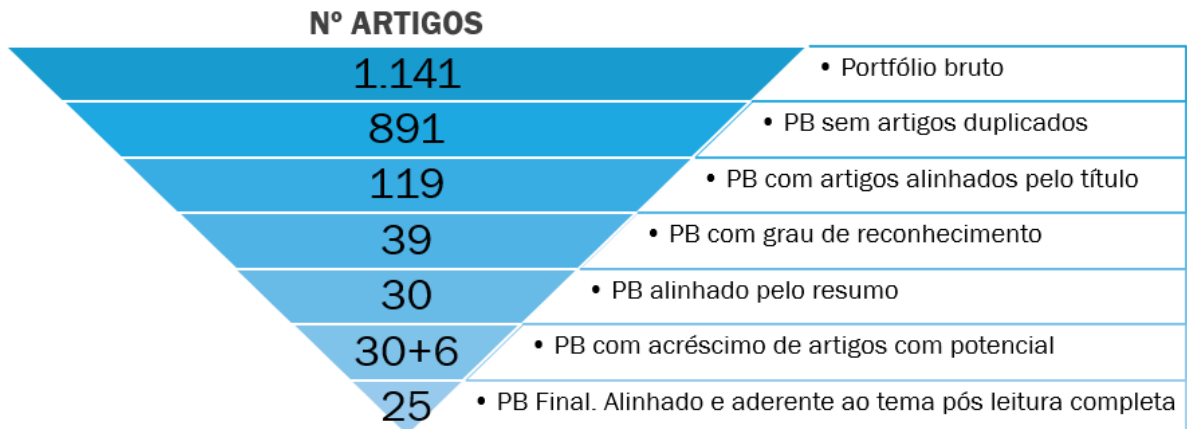
Como resultado desta etapa foram obtidos 1.141 artigos, que passam a compor o Banco de Artigos Bruto.

2.3.4 Escolha dos artigos para compor o PB

Prosseguindo com o processo ProKnow-C, com o auxílio do software EndNote20, a próxima etapa constituiu-se na identificação e exclusão de artigos duplicados, resultando na eliminação de 250 referências. Dos 891 documentos restantes, foi realizada a leitura dos títulos dos artigos, para eliminação dos desalinhados aos eixos de pesquisa inicialmente definidos, resultando em 119 artigos.

O processo com as etapas de filtragem dos artigos do PB bruto, é ilustrado na Figura A1.3.

Figura A1.3 – Etapas de Filtragem

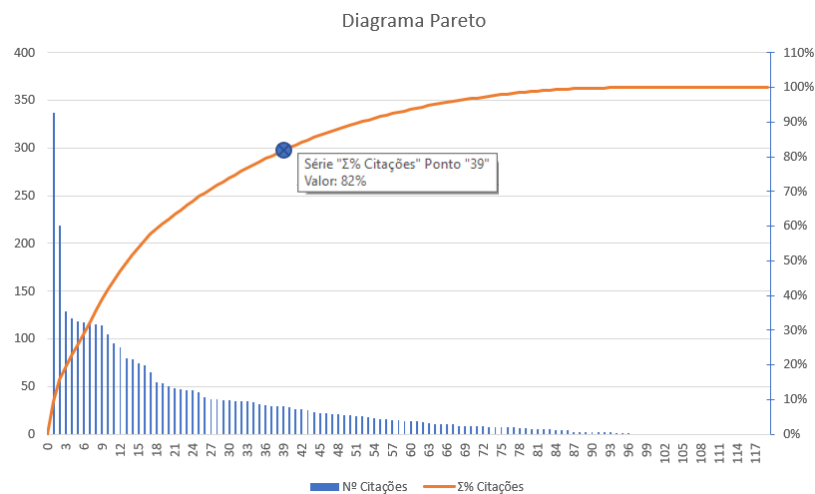


Fonte: elaboração própria.

O passo seguinte compreendeu a análise do reconhecimento científico desses 119 artigos, embasado no número de citações de cada um, com auxílio da ferramenta online identificada por Google Scholar (2021) e com apoio do software ZOTERO. Estes artigos foram classificados em ordem decrescente, permitindo a identificação dos mais relevantes.

Os autores dessa pesquisa adotaram o indicador de 82% dos artigos mais citados, para valor de corte, que correspondem a 39 artigos, totalizando 2.909 citações, conforme Figura A1.4. Os 80 artigos não selecionados, com reconhecimento científico ainda não confirmado, em consonância com o ProKnow-C, passarão por novas análises e avaliações.

Figura A1.4 – Seleção de Artigos por Reconhecimento Científico



Fonte: elaboração própria.

Sobre os 39 artigos selecionados, foram analisados quanto ao alinhamento à pesquisa e aderência ao tema proposto, a partir da leitura dos respectivos resumos, sendo eliminado 9 artigos nesta fase, restando selecionados 30 artigos.

Na etapa seguinte foram recuperados os 80 artigos, que representam 18% das citações, com provável potencial de reconhecimento científico e pendentes de confirmação. Destes, os que tiveram sua publicação realizadas nos dois últimos anos (pós 2019), por entender que tiveram pouca possibilidade de serem citados, tiveram seu resumo lido para conferir o alinhamento ao tema. Para os documentos com mais de dois anos, o autor da obra foi confrontado com o banco de autores que compuseram os artigos selecionados na etapa anterior, não havendo coincidência entre nenhum dos autores eliminou-se o artigo, do contrário, o resumo também foi lido para confirmar aderência. Nesta etapa foram selecionados 6 artigos.

Todos os 36 artigos selecionados tiveram a leitura integral realizada, para identificação de alinhamento à pesquisa e aderência ao tema proposto, tendo sido eliminados 11 documentos nesta fase, resultando num PB composto por 25 artigos, os quais formaram o PB desta pesquisa. A partir deste PB, efetuaram-se as análises bibliométricas que subsidiaram os resultados e a descrição deste relatório.

2.4 RESULTADOS

Como resultado do processo metodológico apresentado na etapa anterior, formou-se um PB composto por 25 artigos, que estão dispostos em ordem decrescente de citações, conforme o Quadro A1.1.

Quadro A1.1 – Artigos do PB

Seq.	Autores	Título	Ano	Nº Citações
1	T. K. Boomsma, N. Meade and S. E. Fleten	Renewable energy investments under different support schemes: A real options approach	2012	337
2	B. Fernandes, J. Cunha and P. Ferreira	The use of real options approach in energy sector investments	2011	219
3	E. A. Martínez Ceseña, J. Mutale and F. Rivas-Dávalos	Real options theory applied to electricity generation projects: A review	2013	121
4	S. Fuss, J. Szolgayová, N. Khabarov and M. Obersteiner	Renewables and climate change mitigation: Irreversible energy investment under uncertainty and portfolio effects	2012	118
5	E. A. Martínez-Ceseña and J. Mutale	Application of an advanced real options approach for renewable energy generation projects planning	2011	115
6	L. Santos, I. Soares, C. Mendes and P. Ferreira	Real Options versus Traditional Methods to assess Renewable Energy Projects	2014	115
7	K. Kim, H. Park and H. Kim	Real options analysis for renewable energy investment decisions in developing countries	2017	114
8	I. Ritzenhofen and S. Spinler	Optimal design of feed-in-tariffs to stimulate renewable energy investments under regulatory uncertainty – A real options analysis	2016	105
9	S. Bruno, S. Ahmed, A. Shapiro and A. Street	Risk neutral and risk averse approaches to multistage renewable investment planning under uncertainty	2016	80
10	J. A. Schachter and P. Mancarella	A critical review of Real Options thinking for valuing investment flexibility in Smart Grids and low carbon energy systems	2016	74
11	N. Detert and K. Kotani	Real options approach to renewable energy investments in Mongolia	2013	72
12	P. K. Wesseh, Jr. and B. Lin	Renewable energy technologies as beacon of cleaner production: A real options valuation analysis for Liberia	2015	65
13	M. Kozlova	Real option valuation in renewable energy literature: Research focus, trends and design	2017	55
14	T. K. Boomsma and K. Linnerud	Market and policy risk under different renewable electricity support schemes	2015	53
15	M. Z. Lukowski, R. L. Silverman and J. W. Tester	Uncertainty analysis of geothermal well drilling and completion costs	2016	48
16	S. E. Fleten, K. Linnerud, P. Molnár and M. Tandberg Nygaard	Green electricity investment timing in practice: Real options or net present value?	2016	47
17	M. M. Zhang, D. Q. Zhou, P. Zhou and H. T. Chen	Optimal design of subsidy to stimulate renewable energy investments: The case of China	2017	46
18	H. X. Li, D. J. Edwards, M. R. Hosseini and G. P. Costin	A review on renewable energy transition in Australia: An updated depiction	2020	44
19	C. Y. Chang	A critical analysis of recent advances in the techniques for the evaluation of renewable energy projects	2013	39
20	M. Cárdenas Rodríguez, I. Haščić, N. Johnstone, J. Silva and A. Ferey	Renewable Energy Policies and Private Sector Investment: Evidence from Financial Microdata	2015	37
21	M. M. Zhang, Q. Wang, D. Zhou and H. Ding	Evaluating uncertain investment decisions in low-carbon transition toward renewable energy	2019	26
22	A. C. Passos, A. Street and L. A. Barroso	A Dynamic Real Option-Based Investment Model for Renewable Energy Portfolios	2017	15
23	G. G. Dranka, J. Cunha, J. D. de Lima and P. Ferreira	Economic evaluation methodologies for renewable energy projects	2020	9
24	T. Compernelle, K. Welkenhuysen, E. Petitclerc, D. Maes and K.	The impact of policy measures on profitability and risk in geothermal energy investments	2019	9
25	X. Liu and E. I. Ronn	Using the binomial model for the valuation of real options in computing optimal subsidies for Chinese renewable energy investments	2020	8

Fonte: elaboração própria.

2.4.1 Análise bibliométrica do PB

A bibliometria é uma técnica quantitativa e estatística para medir índices de produção e disseminação do conhecimento, bem como acompanhar o desenvolvimento de diversas áreas científicas e os padrões de autoria, publicação e uso dos resultados de investigação (COSTA, 2012). Esta seção tem por finalidade apresentar as análises e estudos de bibliometria realizados sobre o PB.

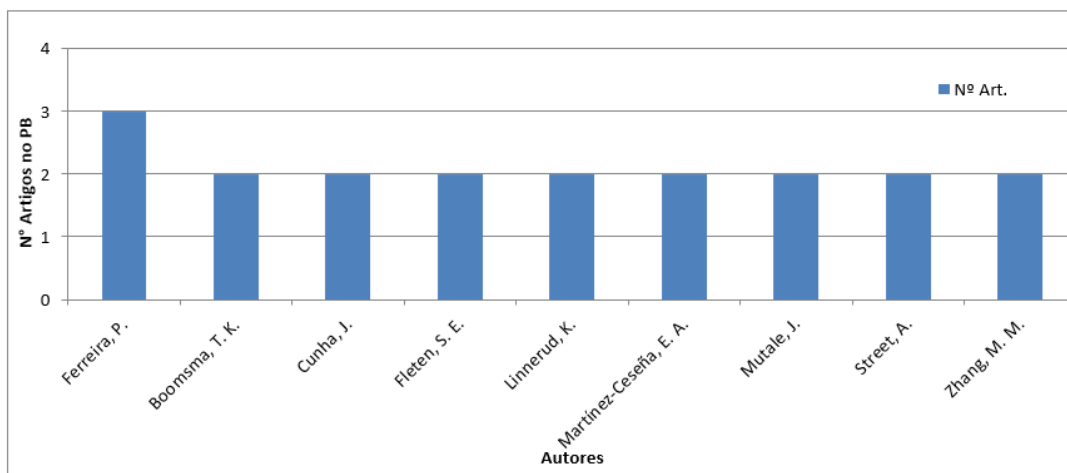
2.4.1.1 Artigos

Ao analisar o reconhecimento científico dos artigos do PB, identificado através da maior quantidade de citações no Google Acadêmico em junho de 2020, coluna “Nº de citações” do Quadro A1.1, é possível destacar os artigos de Boomsma *et al.* (2012) e Fernandes *et al.* (2011), com 337 e 219 citações respectivamente, que correspondem a 28% do total de citações.

2.4.1.2 Autores

Os autores dos artigos que compuseram o referencial teórico selecionado, que participaram em mais de um artigo da amostra, estão expostos na Figura A1.5. Destaca-se Ferreira, P. como o de maior relevância, participando com três artigos publicados.

Figura A1.5 – Principais Autores do PB

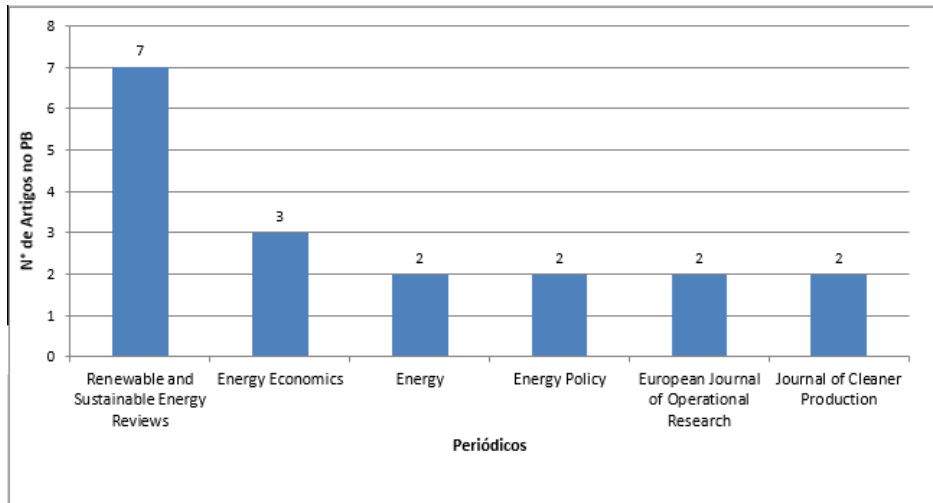


Fonte: elaboração própria.

2.4.1.3 Periódicos

Seis periódicos tiveram mais de uma publicação no PB estão apresentados na Figura A1.6. Destaca-se a revista Renewable and Sustainable Energy Reviews como a de maior relevância, com sete artigos publicados (28%), mais que o dobro de publicação em relação aos demais.

Figura A1.6 – Principais Periódicos do PB

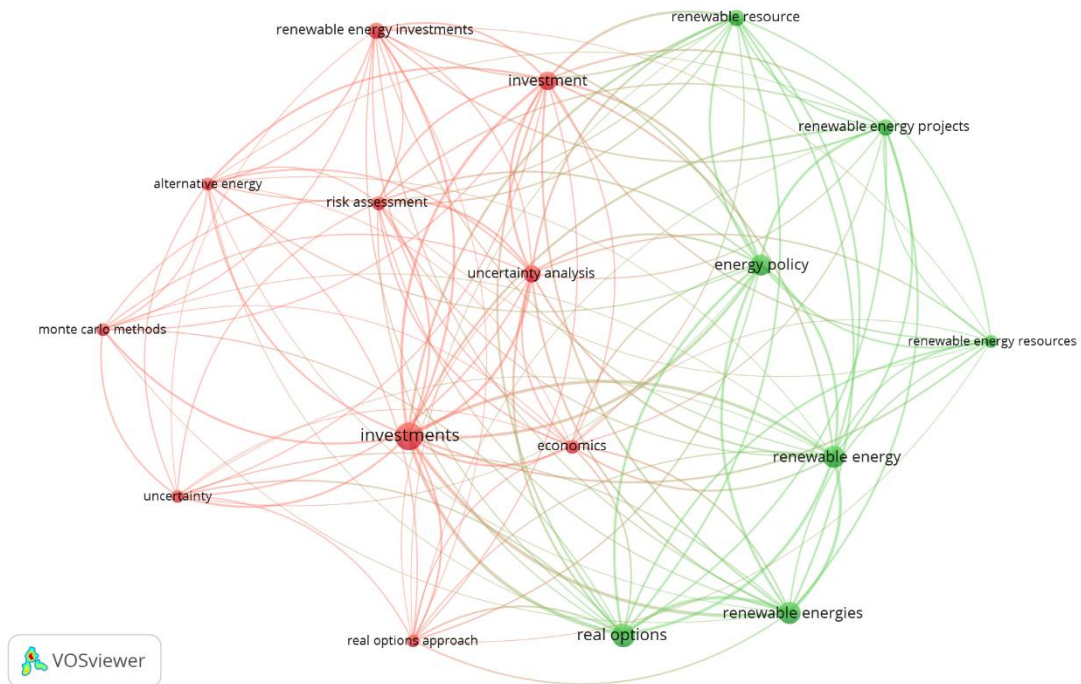


Fonte: elaboração própria.

2.4.1.4 Palavras-Chave

A análise das palavras chaves em destaque foi realizada através de rede de co-ocorrências dos artigos do PB, com auxílio do software VOSviewer, constituindo-se para a base de análise as sessões do título, resumo e a lista de palavras-chave dos documentos. A Figura A1.7 demonstra através do tamanho do círculo a frequência de ocorrências das palavras-chave e a força de associação é representada pela proximidade entre elas.

Figura A1.7 – Palavras-Chave do PB



Fonte: elaboração própria.

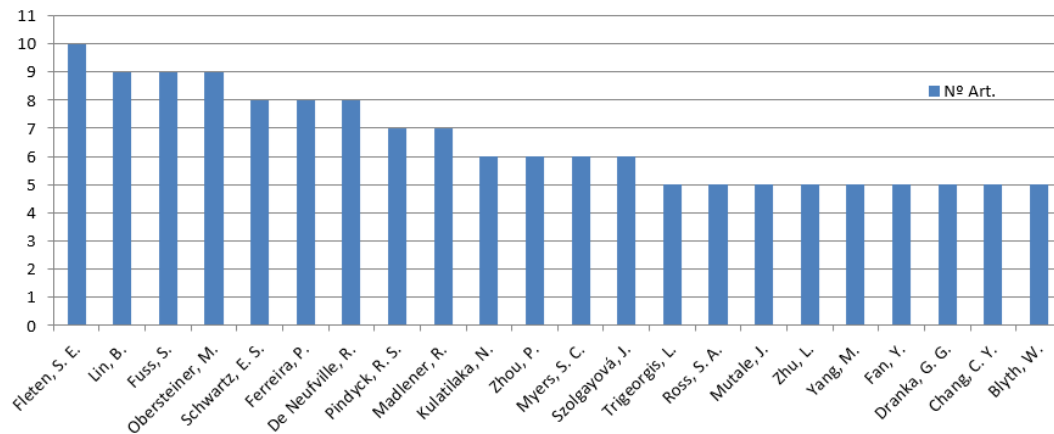
2.4.2 Análise bibliométrica das referências do PB

Com vistas a aperfeiçoar a identificação dos autores, artigos e periódicos que se destacam no contexto desta pesquisa, foram analisados os 703 artigos citados nas referências do PB, cujos resultados seguem descritos.

2.4.2.1 Autores de destaque

O autor de maior relevância entre os artigos que compuseram as referências do PB, é Fleten S. E., tendo publicado dez artigos. Sua posição entre os autores que tiveram mais de 5 publicações nas referências do PB pode ser observada na Figura A1.8.

Figura A1.8 – Principais Autores nas Referências do PB

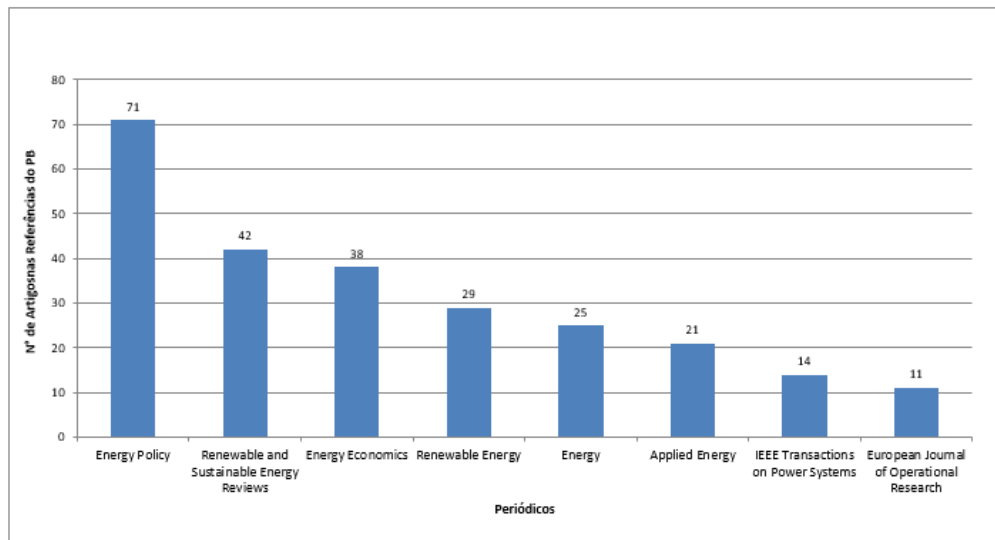


Fonte: elaboração própria.

2.4.2.2 Periódicos

Os periódicos que publicaram mais de dez artigos citados nas referências do PB, estão apresentados na Figura A1.9. Destaca-se a revista Energy Policy com a publicação de setenta e um artigos, representando mais que o dobro da média de publicação entre os periódicos destacados.

Figura A1.9 – Principais Periódicos nas Referências do PB



Fonte: elaboração própria.

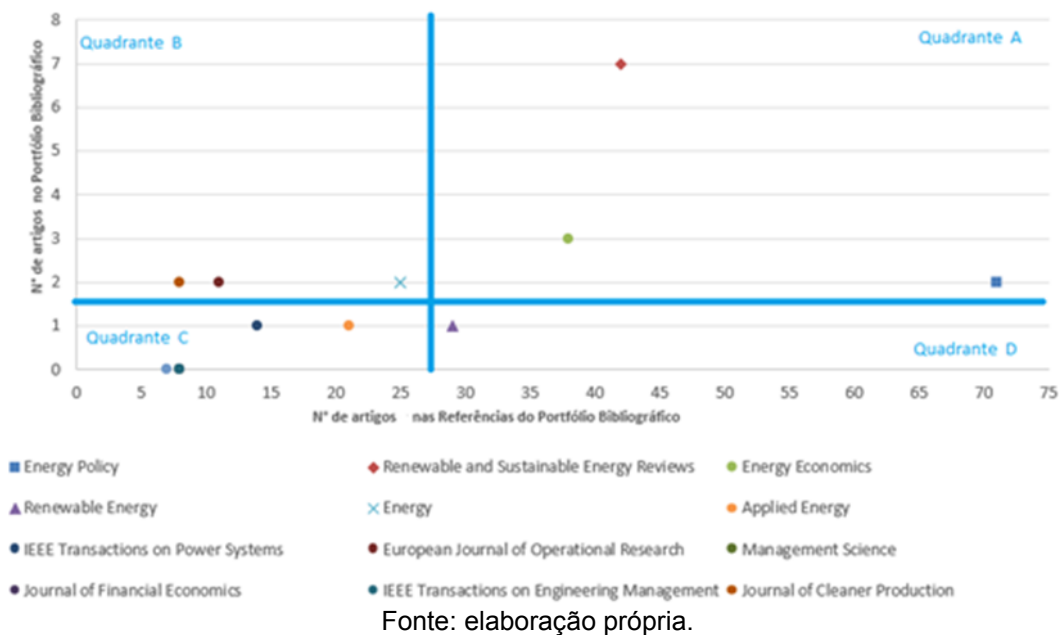
2.4.3 Análise bibliométrica, PB versus referências do PB

Prosseguindo com o objetivo de eleger um conjunto relevante de artigos, autores e periódicos proeminentes no tema, por meio da bibliometria, confrontou-se os dados do PB, com os das suas referências, aprimorando as análises.

2.4.3.1 Periódicos

Os periódicos com mais de seis publicações de artigos relativos as referências do PB, foram confrontados com os periódicos do PB, conforme ilustrado na Figura A1.10. Destacaram-se as revistas posicionadas no quadrante A, Energy Policy, Energy Economics e Renewable and Sustainable Energy Reviews, que se sobressaíram tanto no PB, quanto em suas referências.

Figura A1.10 – Periódicos Destaque do PB e Referências do PB

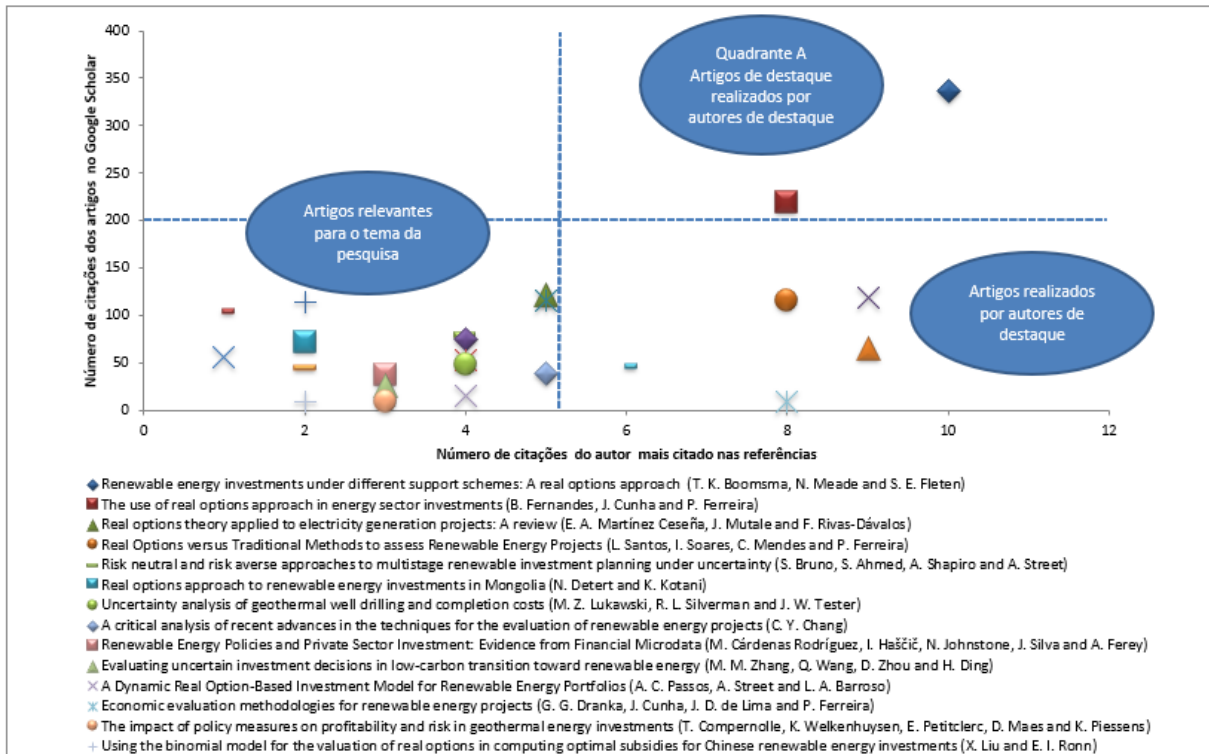


2.4.3.2 Classificação dos artigos conforme relevância acadêmica na amostra

Para classificar os artigos do PB pela sua relevância acadêmica, foram adotados dois eixos de avaliação: 1) número de citações no Google Scholar (2021) que o artigo obteve desde sua publicação; 2) número de citações do autor mais citado

na análise das referências bibliográficas dos artigos do portfólio, conforme Figura A1.11.

Figura A1.11 – Classificação dos Artigos Conforme sua Relevância Acadêmica.



Fonte: elaboração própria.

Para análise foram traçadas uma linha horizontal e outra vertical, delimitando quatro quadrantes, que acomodam as combinações entre o número de citações do artigo em função da citação do autor mais citado nas referências. O quadrante A é o que identifica os artigos que possuem um maior potencial contributivo para o tema desta pesquisa, contendo artigos que foram destaque, elaborados por autores destacados, sendo representado por (BOOMSMA *et al.*, 2012; FERNANDES *et al.*, 2011).

2.5 CONCLUSÃO

Diante da iminente necessidade de se criar mecanismos mitigadores do aquecimento global, o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas em torno de ferramentas financeiras, que possam viabilizar projetos em energias renováveis, torna-se elementar.

Amparado neste contexto, a presente pesquisa se propôs a apresentar um portfólio bibliográfico teórico relevante, detalhando o processo sistemático utilizado (Proknow-c), que partiu da avaliação de 1.141 artigos, os quais perfizeram um portfólio de 25 artigos dispostos no Quadro A1.1.

Também foram realizadas análises bibliométricas a partir do PB e das referências do PB, evidenciando: a) que os periódicos destaques foram o Energy Policy, Energy Economics e Renewable and Sustainable Energy Reviews; b) como autores o pesquisador Ferreira, P. foi o único que participou com três trabalhos no PB selecionado e Fleten S. E. teve mais de dez trabalhos compondo as referências do PB; e c) os artigos de Boomsma *et al.* (2012) e Fernandes *et al.* (2011) se sobressaíram na classificação de relevância acadêmica realizada sob a ótica de número de citações e como autores mais citados nas referências bibliográficas dos artigos selecionados no portfólio final.

Com análises da produção científica sobre investimentos e opções reais, em usinas geotérmicas, esta pesquisa oportuniza uma melhor compreensão do tema pela comunidade científica, empresarial e pela sociedade, podendo subsidiar o planejamento e otimização de pesquisas futuras, dentre as possíveis, uma análise sistêmica de conteúdo, do portfólio selecionado, com vistas a identificar oportunidades de pesquisa.

Este estudo limitou suas análises em publicações de artigos, indexados à base de dados Scopus e Web of Science, entre 2011 a 2021.

2.6 REFERÊNCIAS

ARENT, D. J.; WISE, A.; GELMAN, R. The status and prospects of renewable energy for combating global warming. **Energy Economics**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 584-593, 2011.

BOOMSMA, T. K.; MEADE, N.; FLETEN, S. E. Renewable energy investments under different support schemes: A real options approach. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 220, n. 1, p. 225-237, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.01.017>.

CALVETTI, E. S.; LACERDA, R. T. O.; BERNARDES, M. L. Um estudo bibliométrico sobre avaliação de desempenho no processo de desenvolvimento ágil de software sob a perspectiva do construtivismo. **Revista Brasileira de Gestão e Inovação**, [s. l.], v. 6, p. 1-28, 2019. DOI: <https://doi.org/10.18226/23190639.v6n3.01>.

CHENET, H. *et al.* **From transformational climate finance to transforming the financial system for climate.** [S. l.: s. n.], 2019.

COMPERNOLLE, T. *et al.* The impact of policy measures on profitability and risk in geothermal energy investments. **Energy Economics**, [s. l.], v. 84., 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104524>.

COSTA, T. *et al.* A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica: indicadores e ferramentas. In: CONGRESSO NACIONAL DE BIBLIOTECÁRIOS, ARQUIVISTAS E DOCUMENTALISTAS, 2012, Portugal. **Actas [...]**. [S. l.: s. n.], 2012.

DRANKA, G. G. *et al.* Economic evaluation methodologies for renewable energy projects. **AIMS Energy**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 339-364, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3934/ENERGY.2020.2.339>.

ENSSLIN, L. *et al.* BPM governance: a literature analysis of performance evaluation. **Business Process Management Journal**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 71-86, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1108/BPMJ-11-2015-0159>.

FERNANDES, B.; CUNHA, J.; FERREIRA, P. The use of real options approach in energy sector investments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 15, n. 9, p. 4491-4497, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.102>.

FERREIRA, M. C. R. C. *et al.* A systematic review of literature about finance and Sustainability. **Journal of Sustainable Finance and Investment**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 112-147, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/20430795.2016.1177438>.

LACERDA, R. T. D. O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gestão & Produção**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 59-78, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2012000100005>.

LACERDA, R. T. O. **Disciplina de revisão sistemática da literatura**: bibliometria, análise de conteúdo e identificação de oportunidades de pesquisa do Programa de Pós Graduação em Administração. Florianópolis: UFSC, 2021.

LIU, X.; RONN, E. I. Using the binomial model for the valuation of real options in computing optimal subsidies for Chinese renewable energy investments. **Energy Economics**, [s. l.], v. 87, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104692>.

LUKAWSKI, M. Z.; SILVERMAN, R. L.; TESTER, J. W. Uncertainty analysis of geothermal well drilling and completion costs. **Geothermics**, [s. l.], v. 64, p. 382-391, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.06.017>.

MACEDO DOS SANTOS, R.; KOBASHI, N. Bibliometria, cientometria, infometria: conceitos e aplicações. **Pesq Bras Ci Inf**, Brasília, DF, v. 2, n. 1, p. 155-172, 2009.

MARTÍNEZ CESEÑA, E. A.; MUTALE, J.; RIVAS-DÁVALOS, F. Real options theory applied to electricity generation projects: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 19, p. 573-581, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.059>.

MASSON-DELMOTTE, V. P. *et al.* (eds.). **IPCC, 2021**: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth. Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

POPESCU, I. S.; HITAJ, C.; BENETTO, E. Measuring the sustainability of investment funds: A critical review of methods and frameworks in sustainable finance. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 314, p. 128016, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128016>.

RYSZAWSKA, B. Sustainability transition needs sustainable finance [sustainability transition; sustainable finance; climate finance; green finance]. **Copernican Journal of Finance & Accounting**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 10, 2016. DOI: <https://doi.org/10.12775/cjfa.2016.011>.

SANTOS, L. *et al.* Real Options versus Traditional Methods to assess Renewable Energy Projects. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 68, p. 588-594, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.038>.

SAUNDERS, M. N. K.; LEWIS, P.; THORNHILL, A. **Research methods for business students**. 5th ed. [S. l.]: Harlow, 2009.

VANTI, N. A. P. Da bibliometria à webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento. **Ciência da Informação**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 369-379, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-19652002000200016>.

3 ARTIGO 2

ANÁLISE DE OPÇÕES REAIS PARA DECISÕES DE INVESTIMENTO EM ENERGIA GEOTÉRMICA

RESUMO

A energia renovável geotérmica tem um grande potencial para contribuir com a redução da emissão dos gases de efeito estufa, mas tem encontrado dificuldades em seu desenvolvimento. É caracterizada por investimento de alto risco e grande irreversibilidade, onde as técnicas tradicionais de análise de investimentos tem suas aplicações limitadas. A teoria das opções reais, como uma ferramenta para avaliação de investimento em energia, permite que flexibilidades sejam incorporadas ao design do projeto, em face de um ambiente incerto, e tem demonstrado a capacidade de agregar valor econômico aos investimentos. Este artigo, baseando-se em simulações de um projeto geotérmico implantado no Brasil, numa estrutura de opções reais adaptada especificamente para a análise de investimentos em geotérmicas, demonstra que a ferramenta se mostra eficiente ao acrescentar valor econômico na análise, e fornece uma visão abrangente do projeto, identificando as flexibilidades gerenciais e as incertezas que mais influenciam no lucro. Espera-se que o modelo utilizado estimule pesquisadores e investidores a considerar a avaliação de projetos de energia geotérmica no Brasil.

Palavras-chave: investimentos; opções reais; geotérmica; energias renováveis.

3.1 INTRODUÇÃO

As mudanças recentes ocorridas no clima mundial não têm precedentes e todas as regiões do mundo já são afetadas por eventos extremos como ondas de calor, chuvas fortes, secas e ciclones provocados pelo aquecimento global, tornando as questões de mudanças climáticas, agendas prioritárias nacionais. Entre medidas de mitigação e adaptação, o desenvolvimento de energia renovável (ER) tem um potencial contributivo considerável para redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (BECKER, 2022; KIM; PARK; KIM, 2017; KOZLOVA, 2017).

Os projetos de ER classificam-se frequentemente entre os tipos de investimentos mais arriscados e a forma como os gestores os avaliam exige o uso de técnicas mais sofisticadas (DRANKA *et al.*, 2020), nestes projetos a tomada de decisão, suportada por métodos das opções reais, tem se mostrado eficaz por apresentar um valor mais realista na avaliação, permitindo agregar valor, utilizando a

flexibilidade diante de flutuações imprevisíveis e certificados - importantes para o desenvolvimento sustentável e viabilidade da ER (LIU; RONN, 2020).

Dentre as fontes de ER, a geotérmica não tem crescido conforme a expectativa, necessitando de muito mais esforço para colocá-la na trajetória do carbono zero, exigindo aumentos da expansão muito superior ao histórico atual (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA – IEA, 2021). O financiamento tem sido apontado como uma das principais barreiras e as análises econômicas, aparentemente, têm sido limitadas a cálculos tradicionais de Valor Presente Líquido (VPL) (LUKAWSKI; SILVERMAN; TESTER, 2016). Outros obstáculos como a grande necessidade de capital e altos riscos do projeto contribuem para que a geotérmica continue marginalizada (BARASA KABEYI; OLANREWAJU, 2022; COMPERNOLLE *et al.*, 2019).

Este trabalho adapta uma estrutura de análise de Opções Reais (OR) (KIM; PARK; KIM, 2017) como suporte para tomada de decisão, aplicado à uma avaliação de investimento em um projeto de ER geotérmica e, tem como objetivos: identificar as principais variáveis que afetam as análises econômicas de projetos de ER geotérmicas, analisando a influência das incertezas no lucro do projeto; e avaliar a viabilidade econômica de um projeto de usina geotérmica no Brasil, capturando as incertezas levantadas.

O procedimento descrito permite que pesquisadores e investidores avaliem projetos geotérmicos com mais precisão, em relação aos principais riscos associados, numa estrutura que contempla as macrofases de exploração, perfuração, construção e operação.

3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.2.1 Teoria das Opções Reais (TOR)

As decisões em investimentos voláteis, em projetos caracterizados pela irreversibilidade, alto risco e incerteza, carregam deficiências se avaliadas pelos métodos tradicionais, por serem incapazes de incorporar tais características (AGATON *et al.*, 2020), mas investidores e gestores avaliam tais projetos usando a tradicional técnica do VPL, sendo a ferramenta de tomada de decisão mais utilizada para estas análises (KIM; PARK; KIM, 2017). Por outro lado, a TOR permitiriam considerar numa

avaliação conjunta a flexibilidade, irreversibilidade e incertezas, em investimentos, inclusive de energia (DIXIT; DIXIT; PINDYCK, 1994).

A TOR incorpora flexibilidade gerencial vislumbrando às incertezas futuras, ajustando-se as mudanças do projeto, permitindo aumentar sua rentabilidade, agregando valor. Fundamenta-se nos métodos de avaliação de “opções financeiras” e, de forma análoga, é um direito, não uma obrigação (CAMPISI; GITTO; MOREA, 2018; KOZLOVA, 2017; PENIZZOTTO; PRINGLES; OLSINA, 2019).

Tem crescido a utilização da TOR em análise de viabilidade econômica de projetos em condições de volatilidade, em relação aos métodos tradicionais, como por exemplo FCD, e estudos revisados ilustram sua superioridade sobre as técnicas tradicionais de orçamento de capital (DALBEM; BRANDÃO; GOMES, 2014; KOZLOVA, 2017).

Os tipos de OR podem ser: opção de adiar o investimento, para obter mais informações; opção de desmembramento do projeto em fases, permitindo escolher quais executar; opção de abandono do projeto; opção de mudar de escala, permitindo aos gestores reduzir ou expandir o projeto; opção de parar/reiniciar operações, sugestivo para oscilações da demanda; opção crescer, permitindo melhora dos ganhos caso alguns fatores fiquem melhor que o esperado; opção de alternar entradas ou saídas, como em veículos bicombustíveis (TRIGEORGIS, 1996).

Por suas vantagens a TOR passou a ser considerada para avaliação de projetos de investimento no setor de energia, em muitos campos de tomada de decisão, desde a avaliação de tecnologias de geração de eletricidade até a avaliação de políticas (FERNANDES; CUNHA; FERREIRA, 2011).

Há pesquisa que envolvem a aplicação da TOR em projetos de ER de forma mais genérica, em problemáticas como: diferentes esquemas de apoio (BOOMSMA; MEADE; FLETEN, 2012), incertezas e efeitos de portfólio (FUSS *et al.*, 2012), no planejamento de projetos (MARTÍNEZ-CESEÑA; MUTALE, 2011), comparando à métodos tradicionais (SANTOS *et al.*, 2014), ou decisões de investimento em países em desenvolvimento (KIM; PARK; KIM, 2017). A maior parte dos artigos, quando tratam de fontes de ER específicas, concentra-se em energia eólica, seguidos por solar e pequenas hidrelétricas, evidenciando uma carência de estudos que considerem tecnologias emergentes de ER (KOZLOVA, 2017). Não foi encontrado na literatura trabalhos que abordassem a análise de investimentos com a TOR em usinas geotérmicas.

3.2.2 Usinas geotérmicas

A energia geotérmica origina-se da diferença de temperaturas entre a superfície e o núcleo da terra, que impulsiona um fluxo contínuo de energia térmica em direção à superfície, não dependente do clima, ou níveis de água (WONG; TAN, 2015), sendo frequentemente considerada uma fonte de energia renovável e sustentável (HACKSTEIN; MADLENER, 2021).

A fonte tem um papel significativo a desempenhar na transição energética baixo carbono, devido à sua capacidade de fornecer eletricidade estável e flexível, e custos baixos de operação quando comparadas a fontes térmicas com características semelhantes (BARASA KABEYI; OLANREWAJU, 2022).

Desde 1904 existe registros da sua exploração para geração de energia elétrica e hoje apenas 29 países produzem eletricidade a partir de recursos geotérmicos, contribuindo com menos de 1% da capacidade global de geração de eletricidade (BARASA KABEYI; OLANREWAJU, 2022).

O lento desenvolvimento acarretado principalmente por entraves relacionado aos Custos de investimento iniciais e múltiplas fontes de incerteza, resultam em um grande risco de investimento, dificultando a mobilização do capital (COMPERNOLLE *et al.*, 2019).

O Brasil apresenta um considerável potencial geotérmico (ARBOIT *et al.*, 2013), com estudos revelando recursos de alta entalpia localizados nas estruturas estruturais do Tocantins e da Borborema (LACASSE *et al.*, 2022), porém não existe previsão para implantação de usinas geotérmica até 2050 (BRASIL, 2020), e hoje, a energia geotérmica quando utilizada, atende majoritariamente a recreação em parques de fontes termais como Caldas Novas/GO, Piratuba/SC e Araxá/MG (ARBOIT *et al.*, 2013).

3.3 METODOLOGIA

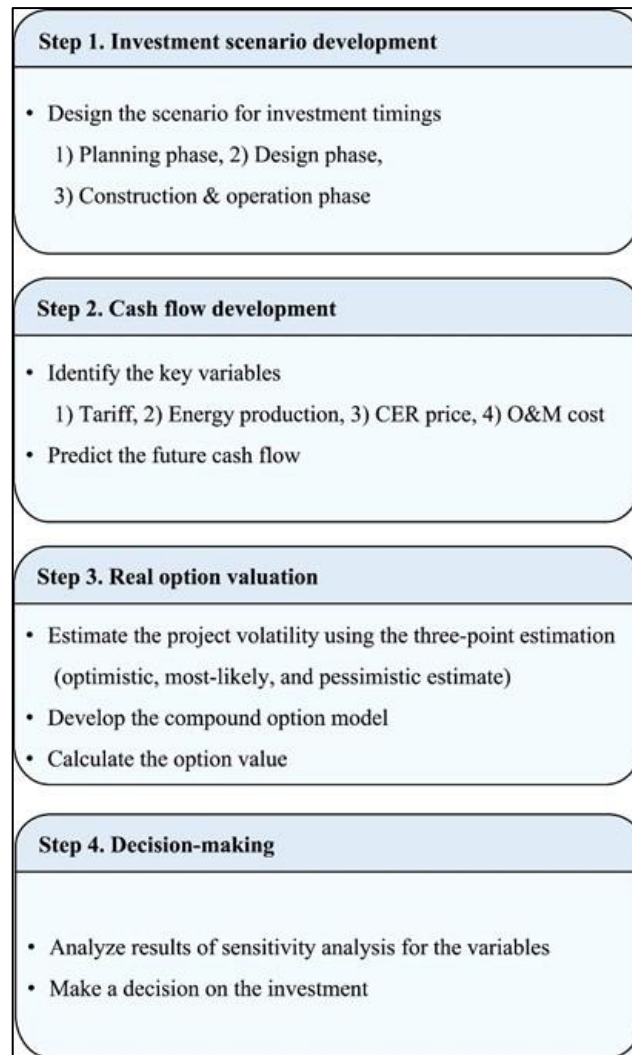
3.3.1 Estrutura para decisão de investimento em projetos geotérmicos no Brasil

A estrutura seguida nesta pesquisa baseou-se na proposta de (KIM; PARK; KIM, 2017) que apresenta um processo para decisões de investimento em projetos de

ER, com OR, em países em desenvolvimento, composta por 4 etapas principais ilustradas na Figura A2.1, as quais são:

- a) passo 1 consiste no desenvolvimento do cenário para um projeto de ER considerando cada fonte específica, neste caso geotérmica. O cronograma do projeto é desenvolvido e originalmente distingue as diferentes fases do planejamento, projeto, e construção e operação. Cada uma destas deve ser acompanhadas pela decisão gerencial da opção de aporte de caixa no projeto. As fases foram adaptadas para exploração, perfuração, e construção e operação (MARTÍNEZ RUIZ; DUQUE; RAMÍREZ MALULE, 2022), atendendo a requisitos específicos para fontes geotérmicas;
- b) passo 2 é o desenvolvimento da previsão do fluxo de caixa. As principais variáveis seriam a produção de energia, tarifa, preço de redução certificadas de emissões de carbono (RCEs) e custos de operação e manutenção (O&M). Retirou-se a variável tarifa, para utilizar tarifas feed-in fixas, utilizadas para o estímulo do desenvolvimento de novas fontes de ER no Brasil (DALVI; OLIVEIRA FILHO; RODRIGUES, 2017), e substituiu-se a produção de energia, por fator de capacidade líquido, variáveis que possuem relação direta;
- c) passo 3 é a avaliação das OR em cada fase do projeto. Para o cálculo da volatilidade do valor do projeto, utiliza-se uma abordagem *Marketed Asset Disclaimer* (MAD) (BORISON, 2005) sobre as estimativas dos três cenários, otimista, pessimista e mais provável. Um modelo de opções compostas com uma estrutura de rede binomial também é adotado para representar a natureza sequencial dos projetos;
- d) passo 4 é o suporte para decisão final sobre o investimento no projeto, permitindo a comparação do valor das OR com o VPL. Esta etapa inclui uma análise de sensibilidade, via simulação de Monte Carlo, das variáveis levantadas no passo 2, para quantificar o impacto destas no resultado do projeto.

Figura A2.1 – Estrutura de análise de investimento

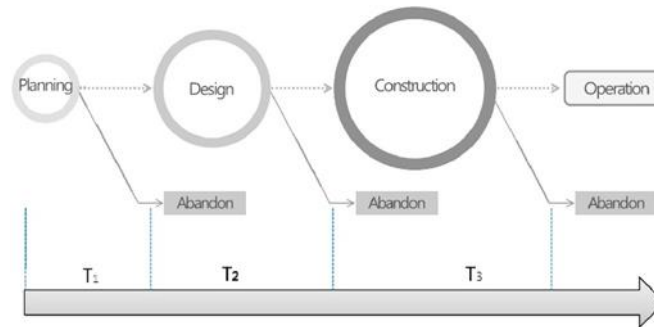


Fonte: Kim, Park e Kim (2017).

3.3.2 Modelo de opção composta

O modelo de opção composta é baseado em um ciclo de vida de projetos em três fases, Planejamento, projeto e construção e operação ilustrado na Figura A2.2 (KIM; PARK; KIM, 2017). Os estágios de decisão são flexibilidades gerenciais que os investidores podem, dentro do ciclo de vida de projetos de ER, analisar a pertinência da continuidade ou abandono do projeto analisado.

Figura A2.2 – Modelo de opções compostas



Fonte: Kim, Park e Kim (2017).

A fase de planejamento é onde os investidores realizam estudos de viabilidade financeira e técnica, considerando limites disponíveis de informações, prazos dos estudos, e recursos. Esta fase foi ajustada e identificada como exploração, atendendo a requisitos específicos de fontes geotérmicas (MARTÍNEZ RUIZ; DUQUE; RAMÍREZ MALULE, 2022).

Na fase de projeto, aumentam e refinam-se as informações disponíveis, tornando mais claro o escopo. Esta fase foi ajustada e identificada como perfuração, e possui fatores intimamente relacionados com o projeto da planta geotérmica (MARTÍNEZ RUIZ; DUQUE; RAMÍREZ MALULE, 2022).

A fase de construção e operação é o período mais longo, quando os investidores aportam maior parte do capital previsto e recebem seu retorno da operação.

3.3.3 Avaliação da opção

A abordagem MAD e a estimativa de três cenários da metodologia proposta, utiliza o fluxo de caixa descontado, contido no cenário de fluxo de caixa mais provável, como o valor do ativo subjacente. Os fluxos de caixa para cada um dos três cenários são obtidos combinando as múltiplas incertezas das variáveis do passo 2, dispostos no Quadro A2.1, sendo o cenário mais provável (moderado), a situação entre o cenário otimista e o pessimista, o cenário otimista considera as melhores situações para estas variáveis, e o cenário pessimista utilizando o pior caso para elas.

Quadro A2.1 – Variáveis de entrada usando cenários abordados

Variable	Best case	Moderate case	Worst case
O&M Cost	O&M Cost best	O&M Cost moderate	O&M Cost worst
Capacity factors	Capacity factors best	Capacity factors moderate	Capacity factors worst
Investment costs	Investment costs best	Investment costs moderate	Investment costs worst
CER price	CER price best	CER price moderate	CER price worst
Combined	Cash flow best	Cash flow moderate	Cash flow worst

Fonte: adaptado de Kim, Park e Kim (2017).

O Quadro A2.2 apresenta os fluxos de caixa para cada período nos três cenários.

Quadro A2.2 – Fluxos de caixa conforme cenários

Period (<i>n</i>)	Best case	Moderate case	Worst case
1	Cash flow <i>best_1</i>	Cash flow <i>moderate_1</i>	Cash flow <i>worst_1</i>
2	Cash flow <i>best_2</i>	Cash flow <i>moderate_2</i>	Cash flow <i>worst_2</i>
3	Cash flow <i>best_3</i>	Cash flow <i>moderate_3</i>	Cash flow <i>worst_3</i>
:	:	:	:
<i>n</i>	Cash flow <i>best_n</i>	Cash flow <i>moderate_n</i>	Cash flow <i>worst_n</i>

Fonte: adaptado de Kim, Park e Kim (2017).

Para o cálculo da volatilidade utilizou a equação (KIM; PARK; KIM, 2017; KODUKULA; PAPUDESU, 2006):

$$\sigma = \frac{\ln\left(\frac{S_{opt}}{S_{pes}}\right)}{4\sqrt{t}} \quad (1)$$

Onde *Sopt* é o valor do ativo subjacente no cenário otimista, *Spes* é o valor do ativo subjacente no cenário pessimista, e *t* é o período do projeto.

Os valores são calculados pelo modelo de rede binomial. O movimento para cima (*u*), movimento descendente (*d*), a probabilidade neutra ao risco (*q*), e o valor da opção (*C*) são calculadas utilizando as equações (2) a (5), respectivamente.

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (2)$$

$$d = \frac{1}{u} \quad (3)$$

$$q = \frac{(e^{rt} - d)}{u - d} \quad (4)$$

$$C = e^{-rt} [qC_u + (1 - q)C_d] \quad (5)$$

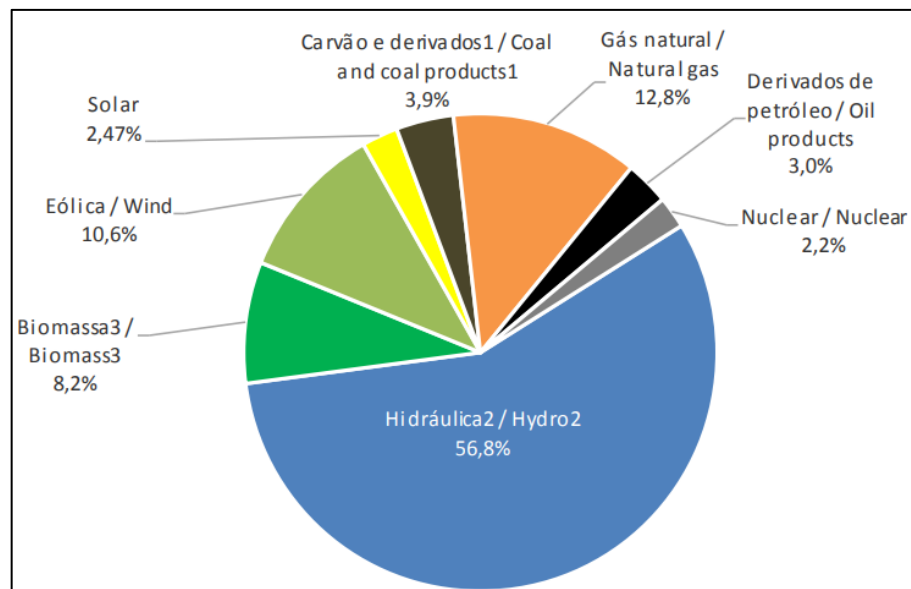
Na equação (5) r é taxa livre de risco e C_u e C_d são os valores das opções associadas ao movimento de subidas e descidas, respectivamente.

3.4 ESTUDO DE CASO PARA DECISÕES DE INVESTIMENTO COM SIMULAÇÃO DE PROJETO GEOTÉRMICO NO BRASIL POR MEIO DA TOR

3.4.1 Descrição do caso

O Brasil possui um sistema elétrico interligado de dimensões continentais, com 181,6 GW de capacidade instalada, sendo a matriz composta majoritariamente por usinas hidráulicas, seguidas por térmicas, eólicas, solares e nuclear como pode ser observado na Figura A2.3 (BRASIL, 2022).

Figura A2.3 – Oferta de energia por fonte



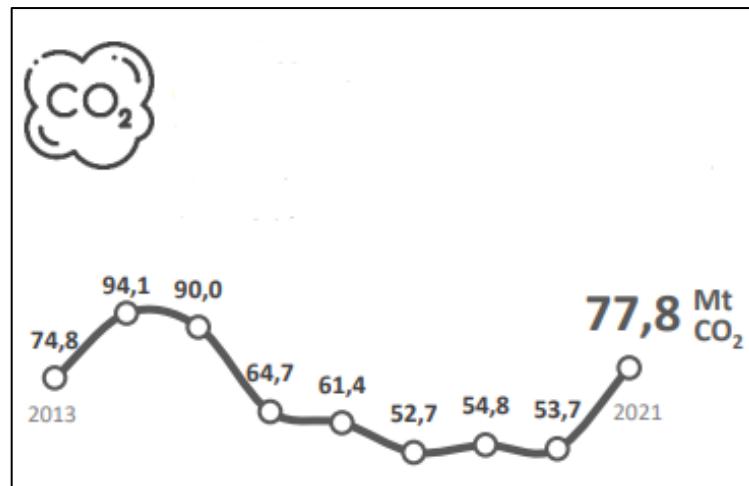
Fonte: Brasil (2021).

Apesar da significativa participação das fontes renováveis, estas são extremamente dependentes das variações climáticas e em 2021, o Brasil teve um

acréscimo de 113,2% da geração de eletricidade a partir do uso de derivados de petróleo, passando de 8.556 GWh em 2020 para 18.243 GWh em 2021. Já sua principal fonte, hidráulica, reduziu sua participação variando de 396.381 GWh em 2020 para 362.818 GWh em 2021. Não há na matriz elétrica brasileira usinas geotérmicas, tampouco perspectiva para implantação até 2050 (BRASIL, 2020).

As emissões de GEE provenientes da geração elétrica no Brasil totalizaram 77,8 milhões de toneladas (Mt) de CO₂ em 2021, cerca de 45% superior a 2020 conforme ilustra a Figura A2.4.

Figura A2.4 – Emissões de GEE



Fonte: Brasil (2021).

O projeto de estudo de caso simulado é uma usina geotérmica com capacidade de geração de 5MW, com investimento total, num cenário moderado, de 192 milhões de reais. As principais premissas utilizadas neste estudo estão dispostas no Quadro A2.3.

Quadro A2.3 –Premissas do projeto

Itens	Valores
Capacidade instalado do gerador	5 MW
Período de exploração	1 ano
Período de perfuração	1 ano
Período de construção	3 anos
Período de operação/concessão	20 anos
Tarifa Feed-in em Nov/22	R\$787,83
TMA	9,75%
Taxa de juros de longo prazo	3,62%
Conversão Dolar para Real	R\$5,22
Conversão Euro para Real	R\$5,55
Taxa livre de risco	6,00%

Fonte: elaboração própria.

Os períodos de exploração, perfuração, construção e operação são de 1, 1, 3 e 20 anos, respectivamente, e os investidores terão três oportunidades para tomar decisões de investimento, conforme seção 3.2 (1) agora – ou ano zero, sobre investir na fase de exploração; (2) no ano 1, sobre continuar na fase de perfuração; e (3), no ano 2, sobre construir ou não o projeto geotérmico.

3.4.2 Análise de OR

A partir da estrutura de OR exposta na Figura A2.1, realizou-se a avaliação do projeto geotérmico. Na etapa 1 definiram-se os parâmetros de investimento em seus respectivos tempos. Os investimentos das fases de exploração e perfuração foram de R\$ 22.635.496,98 e R\$ 28.671.629,51, correspondentes a 15% e 19%, respectivamente, dos custos de implantação de usinas geotérmica em 2020 (IRENA, 2021; MARTÍNEZ RUIZ; DUQUE; RAMÍREZ MALULE, 2022).

No Quadro A2.4 são apresentadas as variáveis avaliadas, com a identificação das suas respectivas referências de valores para os cenários otimista, moderado, e pessimista, oportunizando calcular os fluxos de caixa e a volatilidade do valor do projeto. O fluxo de caixa do cenário moderado, ilustrado na Figura A2.8 também é utilizado para estimar o valor atual do ativo subjacente. A receita foi composta pela venda da produção de energia, considerada constante por toda a vida do projeto, com tarifa fixa, anualmente reajustada pela inflação, e pela venda dos RCE. A estimativa do custo do O&M foi considerado de US\$ 20 por MWh (HACKSTEIN; MADLENER, 2021), a partir dos cenários de geração.

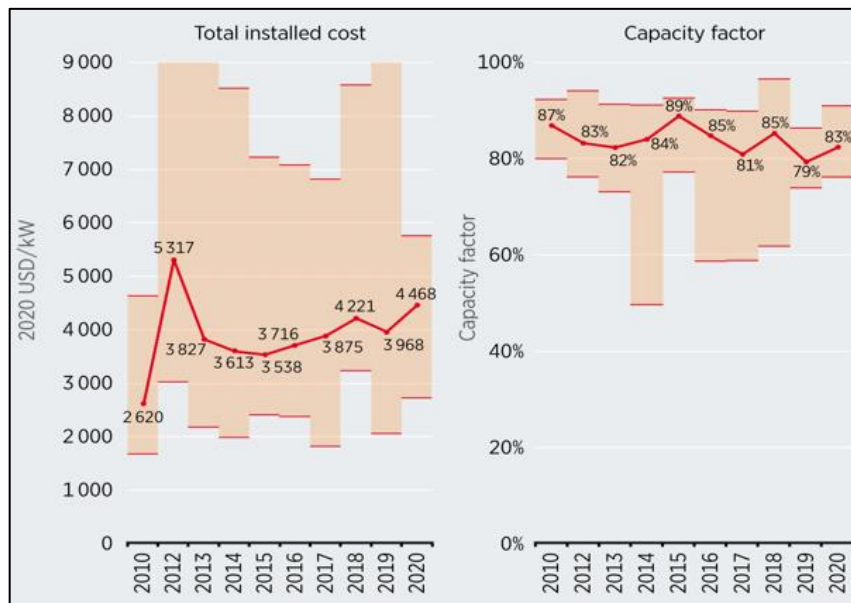
Quadro A2.4 – Cenários das variáveis avaliadas

Variable	Best case	Moderate case	Worst case
O&M Cost	R\$ 4.090 M	R\$ 4441 M	R\$ 4.905 M
Capacity factors	86,70%	78,50%	72,29%
Investment costs	R\$ 95.522 M	141.561	R\$ 175.903 M
CER price	€ 99,22	€ 43,91	€ 14,04

Fonte: elaboração própria.

A Figura A2.5, mostra a variação dos custos de instalação e do fator de capacidade de usinas geotérmicas implantadas nos últimos dez anos pelo mundo. As simulações desta pesquisa consideraram os valores e variações identificadas em 2020. Para o fator de capacidade também foram considerados 97% de fator de disponibilidade e 2% perdas elétricas até a medição (COPEL, 2007). O VPL convencional foi de R\$ 119,4 milhões no caso moderado.

Figura A2.5 – Histórico parâmetros implantação usinas geotérmicas

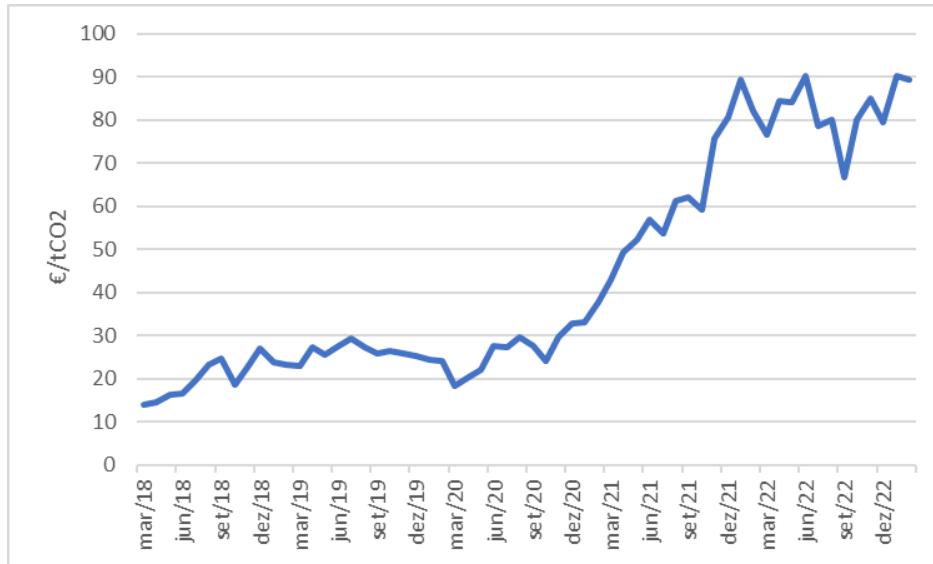


Fonte: IRENA (2021).

Considerando o contexto e a natureza do projeto, foi pressuposto a elegibilidade deste para RCE sob o mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL), conforme protocolo de Quioto. Utilizou-se como referência a metodologia ACM0002/Versão 13 para indústria de energia, recursos renováveis e, inexistindo usina geotérmica no Brasil, referenciou-se por um projeto MDL geotérmico no Chile (ENEL, 2012), resultando num crédito de 0,3309 tCO₂/MWh. O preço do RCE foi

estimado a partir dos dados históricos dos últimos 5 anos, conforme Figura A2.6, assumindo para o cenário pessimista o valor mais baixo do período € 14,04, o otimista o valor mais alto € 99,22, e o valor moderado, a média de € 43,91.

Figura A2.6 – Preço crédito carbono futuros

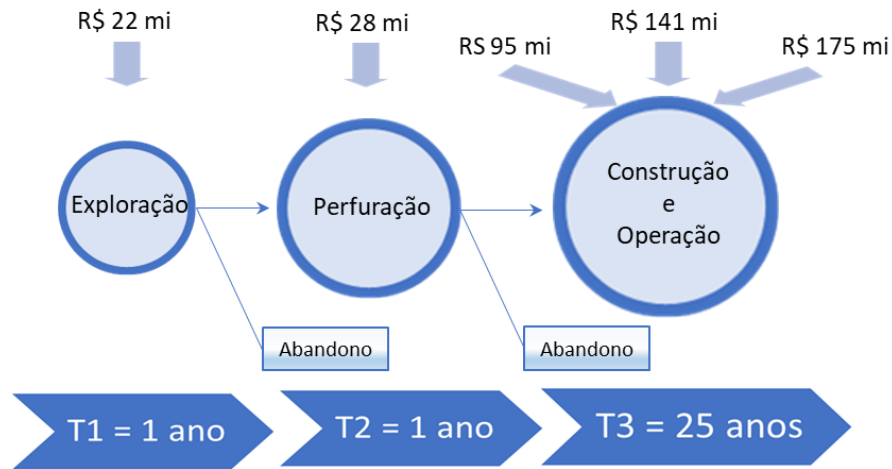


Fonte: Investing.com (2023).

Com uma abordagem MAD, ao descontar os fluxos de caixa considerando a taxa mínima de atratividade (TMA) do cenário moderado, obtém-se o valor do ativo para o tempo presente. Este valor é o considerado para o ativo subjacente, que foi de R\$ 144.299 milhões. A volatilidade anual do de retorno do projeto foi calculada utilizando os fluxos de caixa gerados nos cenários otimistas e pessimista, para encontrar os ativos subjacentes destes cenários, e aplicados na Eq. (1), que resultou em 22%. Com as equações (2) a (4), obteve-se o movimento para cima (u), o movimento descendente (d), e a probabilidade neutra ao risco (q), que foram 1,2409, 0,8059, e 0,5884, respectivamente. A

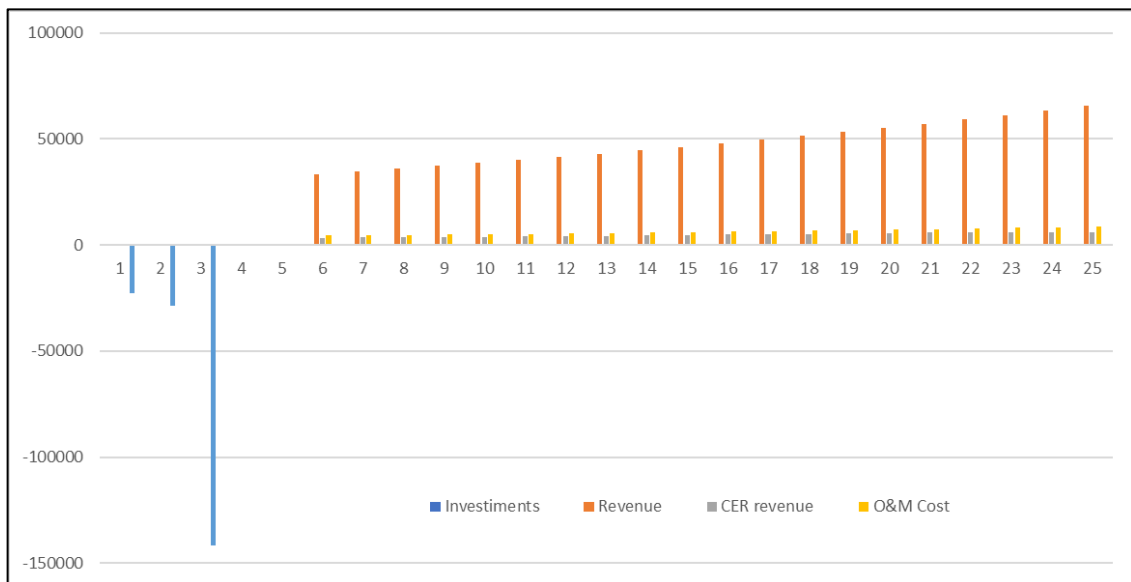
Figura A2.7 ilustra a as fases multiestágio para tomada de decisão no tempo de vida do projeto, em conjuntos com os valores requeridos para cada etapa. As opções compostas foram calculadas usando a rede binomial e a Eq (5). O Valor da opção calculado foi de R\$ 39.436 milhões.

Figura A2.7 – Modelo opção composta estudo de caso



Fonte: elaboração própria.

Figura A2.8 – Fluxo de caixa com principais variáveis



Fonte: elaboração própria.

Os investidores podem tomar utilizar as flexibilidades em cada nó da rede binomial conforme Figura A2.9. No nó 1, se o custo do investimento inicial (22.635 milhões), for maior que o valor da opção (39.436 milhões), o projeto deveria ser abandonado, não foi o caso. Ao prosseguir se as incertezas se mantiverem até a fase final de perfuração, o projeto deverá ser abandonado. No nó 2, a execução da opção ao custo de (R\$ 28.617 milhões), geraria uma opção para fase de construção e operação, no valor de (R\$ 71.167 milhões). No nó 3 a conjuntura não se demonstrou favorável, sugerindo o abandono do projeto. No ano 2, deve-se tomar a decisão final de construir e operar a unidade. Caso o projeto confirme a viabilidade, estabelecendo-

se no nó 4 ou 5, o valor da opção será de (126.556 milhões), para um investimento de (R\$ 95.522 milhões), e (2.668 milhões), para um investimento de (R\$ 141.561 milhões), respectivamente. O nó 6 caracteriza o pior caso, onde o investimento na construção seria recusado.

Figura A2.9 – Rede binomial para cálculo da opção composta

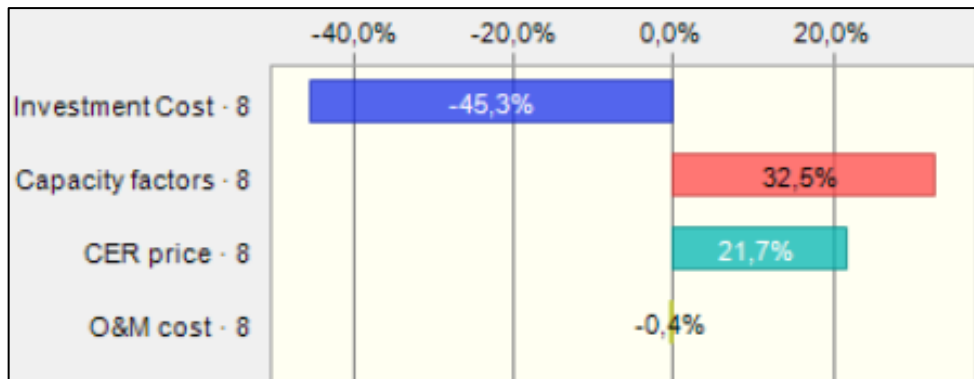
Year	Year 0 (Time now)	Year 1	Year 2
Asset value			222.087
		178.973	
	144.229		144.229
		116.230	93.666
Options value			4 126.565
		2 71.168	
	1 39.436		5 2.668
		3 0	
		Don't Invest	6 0
			Don't Invest

Fonte: elaboração própria.

Na etapa 4, para análise de sensibilidade das quatro variáveis apontadas no projeto, realizou-se uma simulação de Monte Carlo, com 10.000 interações. Cada variável assumiu uma distribuição uniforme, ou seja, tendo a mesma probabilidade de ocorrência a cada interação, pra qualquer valor situado entre o intervalo do melhor e pior cenário apresentado no Quadro A2.4. O resultado, ilustrado na

Figura A2.10, mostra que o custo de implantação da unidade representa aproximadamente a metade da influência (-45,3%) no valor da opção do projeto deste estudo de caso, enquanto a O&M quase não afetou (-0,4%). O Fator de capacidade exerceu 32,5% de influência e o faturamento com as vendas de RCE 21,7%. Neste cenário o foco no valor do investimento para construção da usina e o fator de capacidade da unidade, são os itens que mais podem influenciar na lucratividade deste projeto para o investidor.

Figura A2.10 – Análise de sensibilidade



Fonte: elaborado pelo autor com Oracle Crystal Ball.

3.5 CONCLUSÃO

Impulsionado pela iminente necessidade de se criar mecanismos mitigadores do aquecimento global, fontes de ER tem sido instrumentos fundamentais no planejamento das metas de redução de GEE. A ER geotérmica já compõe a matriz energética de muitos países, entretanto, seus custos de investimentos, associados as incertezas técnicas e operacionais intrínsecas desta fonte, tornam-se barreiras para sua implantação no Brasil, suscitando a necessidade de modelos de avaliação adequados para incentivar investimentos nessa área. À vista disto, este artigo adaptou uma estrutura de OR como ferramenta de suporte a tomada de decisão, aplicando na análise de investimento em projetos de energia geotérmica, contemplando flexibilidades gerenciais e consideramos quatro fatores incertos: investimento; fator de capacidade da usina; faturamento com RCE e O&M.

A ferramenta mostrou-se eficiente para o auxílio à tomada de decisões de investimento geotérmicas, apresentando um valor econômico obtido com a análise de opções reais superior ao obtido com a análise de VPL, pois conseguiu considerar algumas flexibilidades do projeto e volatilidade em preços. O estudo de caso analisou uma simulação de implantação de usina geotérmica de 5MW no Brasil, e mostrou um valor de opção de 39,44 milhões de reais, que pode ser acrescido na análise do VPL tradicional desta unidade.

Os resultados também mostraram que os gestores podem otimizar o lucro se focarem nas variáveis capital investido e fator de capacidade da planta avaliada, pois estes itens influenciaram mais de 77% no valor da opção.

Como o Brasil não possui usinas geotérmicas instaladas, vários dados foram obtidos de fontes oficiais e projetos internacionais, que carecem acurácia quando replicados no Brasil, todavia o modelo se apresenta com uma ferramenta adequada, pois permite incorporar redução de incertezas com o aumento de informação.

Para o cálculo do preço futuro das RCE, utilizou-se simulações estocásticas tendo como referência apenas os dados históricos. Uma previsão mais robusta dos preços da RCE pode fornecer dados importantes para alimentar o modelo.

Pesquisas futuras também podem considerar outras incertezas técnicas relevantes, como as diferentes opções de tecnologia, custos de perfuração, além de outros fatores considerados no processo de tomada de decisão em análises de projetos de geotérmicos.

3.6 REFERÊNCIAS

AGATON, C. B. *et al.* Economic analysis of waste-to-energy investment in the Philippines: A real options approach. **Applied Energy**, [s. l.], v. 275, p. 115265, 2020.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Energia geotérmica**. Paris: IEA, 2021.

ARBOIT, N. *et al.* Potential of geothermal energy use in Brazil: Review. **Geography Department USP**, São Paulo, v. 26, p. 155-168, 2013.

BARASA KABEYI, M. J.; OLANREWAJU, O. A. Geothermal wellhead technology power plants in grid electricity generation: A review. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], v. 39, p. 100735, 2022.

BECKER, M.; LACERDA, D. R.; LIMA, D. M. Sustainable finance: A bibliometric study of real options as a financial tool for making geothermal renewable energy feasible. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 45-56, 2022.

BOOMSMA, T. K.; MEADE, N.; FLETEN, S. E. Renewable energy investments under different support schemes: A real options approach. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 220, n. 1, p. 225-237, 2012.

BORISON, A. Real options analysis: Where are the emperor's clothes? **Journal of Applied Corporate Finance**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 17-31, 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Anuário estatístico de energia elétrica 2022**: ano base 2021. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2021**: ano base 2020. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2050**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

CAMPISI, D.; GITTO, S.; MOREA, D. Economic feasibility of energy efficiency improvements in street lighting systems in Rome. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 175, p. 190-198, 2018.

COMPERNOLLE, T. *et al.* The impact of policy measures on profitability and risk in geothermal energy investments. **Energy Economics**, [s. l.], v. 84, 2019.

COPEL. **Manual de avaliação técnico-econômica de empreendimentos eólio-elétricos**. Curitiba: COPEL, 2007.

DALBEM, M. C.; BRANDÃO, L. E. T.; GOMES, L. L. Can the regulated market help foster a free market for wind energy in Brazil?. **Energy Policy**, [s. l.], v. 66, p. 303-311, 2014.

DALVI, G. G.; OLIVEIRA FILHO, D.; RODRIGUES, É. M. B. Feed-in tariff como alternativa de incentivo ao desenvolvimento da geração de energia elétrica por fontes renováveis no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, [s. l.], v. 23, n. 2, 2017.

DIXIT, R. K.; DIXIT, A. K.; PINDYCK, R. S. **Investment under uncertainty**. Princeton: Princeton University Press, 1994.

DRANKA, G. G. *et al.* Economic evaluation methodologies for renewable energy projects. **AIMS Energy**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 339-364, 2020.

ENEL, L. **Project design document (PDD)**: Cerro Pabellon Geothermal Project - Apacheta. Bonn: UNFCCC, 2012.

FERNANDES, B.; CUNHA, J.; FERREIRA, P. The use of real options approach in energy sector investments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 15, n. 9, p. 4491-4497, 2011.

FUSS, S. *et al.* Renewables and climate change mitigation: Irreversible energy investment under uncertainty and portfolio effects. **Energy Policy**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 59-68, 2012.

HACKSTEIN, F. V.; MADLENER, R. Sustainable operation of geothermal power plants: why economics matters. **Geothermal Energy**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 10, 2021.

INVESTING.COM. **Crédito carbono futuros**: dados históricos. Madrid, 2023. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>. Acesso em: 3 fev. 2023.

IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2020**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021.

KIM, K.; PARK, H.; KIM, H. Real options analysis for renewable energy investment decisions in developing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 75, p. 918-926, 2017.

KODUKULA, P.; PAPUDESU, C. **Project valuation using real options: a practitioner's guide**. [S. l.]: J. Ross Publishing, 2006.

KOZLOVA, M. Real option valuation in renewable energy literature: Research focus, trends and design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 80, p. 180-196, 2017.

LACASSE, C. M. *et al.* Integrated assessment and prospectivity mapping of geothermal resources for EGS in Brazil. **Geothermics**, [s. l.], v. 100, p. 102321, 2022.

LIU, X.; RONN, E. I. Using the binomial model for the valuation of real options in computing optimal subsidies for Chinese renewable energy investments. **Energy Economics**, [s. l.], v. 87, 2020.

LUKAWSKI, M. Z.; SILVERMAN, R. L.; TESTER, J. W. Uncertainty analysis of geothermal well drilling and completion costs. **Geothermics**, [s. l.], v. 64, p. 382-391, 2016.

MARTÍNEZ RUIZ, Y.; DUQUE, D. F. M.; RAMÍREZ MALULE, H. Geothermal Power Projects Valuation Model. *In*: ALGORITHMS and Computational Techniques Applied to Industry. [S. l.]: Springer, 2022. p. 29-46.

MARTÍNEZ-CESEÑA, E. A.; MUTALE, J. Application of an advanced real options approach for renewable energy generation projects planning. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 2087-2094, 2011.

PENIZZOTTO, F.; PRINGLES, R.; OLSINA, F. Real options valuation of photovoltaic power investments in existing buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 114, p. 109308, 2019.

SANTOS, L. *et al.* Real options versus traditional methods to assess renewable energy projects. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 68, p. 588-594, 2014.

TRIGEORGIS, L. **Real options: Managerial flexibility and strategy in resource allocation**. [S. l.]: MIT Press, 1996.

WONG, K. V.; TAN, N. Feasibility of using more geothermal energy to generate electricity. **Journal of Energy Resources Technology**, [s. l.], v. 137, n. 4, 2015.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Energia geotérmica**. Paris: IEA, 2021.
- ARENT, D. J.; WISE, A.; GELMAN, R. The status and prospects of renewable energy for combating global warming. **Energy Economics**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 584-593, 2011.
- BARASA KABEYI, M. J.; OLANREWAJU, O. A. Geothermal wellhead technology power plants in grid electricity generation: A review. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], v. 39, p. 100735, 2022.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2050**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.
- CAUCHICK-MIGUEL, P. A. **Metodologia científica para engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- KIM, K.; PARK, H.; KIM, H. Real options analysis for renewable energy investment decisions in developing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 75, p. 918-926, 2017.
- KOZLOVA, M. Real option valuation in renewable energy literature: Research focus, trends and design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 80, p. 180-196, 2017.
- UNITED NATIONS. **Sustainable Development Goals 2022**. Geneva: United Nations, 2022.