

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Lais Claudine Schiavo Gomes

**Alocação Multicritério de Recursos
Aplicada à Construção de Portfólios de
Energia**

Belo Horizonte

2022

Lais Claudine Schiavo Gomes

**Alocação Multicritério de Recursos Aplicada à
Construção de Portfólios de Energia**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Petr Iakovlevitch Ekel, Dr.
Coorientador: Prof. Douglas Alexandre Gomes Vieira, Dr.

Belo Horizonte
2022

G633a	<p>Gomes, Lais Claudine Schiavo. Alocação multicritério de recursos aplicada à construção de portfólios de energia [recurso eletrônico] / Lais Claudine Schiavo Gomes. - 2022. 1 recurso online (66 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Petr Iakovlevitch Ekel. Coorientador: Douglas Alexandre Gomes Vieira.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 61-66. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Alocação de recursos - Teses. 3. Energia elétrica - Comercialização - Teses. 4. Processo decisório - Teses. I. Ekel, Petr Iakovlevitch. II. Vieira, Douglas Alexandre Gomes. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p>
-------	---

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"ALOCAÇÃO MULTICRITÉRIO DE RECURSOS APLICADA À CONSTRUÇÃO DE PORTFÓLIOS DE ENERGIA"

LAIS CLAUDINE SCHIAVO GOMES

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada em 09 de dezembro de 2022. Por:

Prof. Ph.D. Petr Iakovlevitch Ekel
PPGEE (UFMG) - Orientador

Dr. Livia Maria Leite da Silva
Thunders Tecnologia (Thunders Tecnologia)

Dr. Matheus Pereira Liborio
PPGINF (PUC-MG)



Documento assinado eletronicamente por **Petr Iakovlevitch Ekel, Usuário Externo**, em 19/12/2022, às 12:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Matheus Pereira Libório, Usuário Externo**, em 22/12/2022, às 19:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Livia Maria Leite da Silva, Usuário Externo**, em 03/01/2023, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1945800** e o código CRC **FD129254**.

A minha família.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus, quem é digno de toda glória, honra e louvor. Que me capacitou e me capacita a conquistar cada etapa em minha vida... Creio que "Deus faz todas as coisas cooperarem para o bem daqueles que o amam e que são chamados de acordo com seu propósito"(Romanos 8:28). É indescritível o quanto aprendi nessa etapa!

Agradeço a minha família de modo muito especial: ao meu pai que me ajudou em diversas reuniões e puxões de orelha, rsrs... ao Felipe que está ao meu lado em todo o tempo, me incentivando... a Laura por todas as sessões grátis de terapia e fonoterapia... a minha mãe, que também sempre me apoia. Vocês me inspiram.

Agradeço ao meu orientador Petr, pelos ensinamentos e todo o apoio. Em especial, agradeço aos meus líderes na ENACOM: Douglas e Gustavo, vocês foram essenciais nesse processo, que com certeza, é um grande avanço tanto pessoal quanto profissional.

A ENACOM e amigos que surgiram com ela, não poderia de forma alguma deixar de agradecer. Cito em especial: Pedro Feres, Marina Lima, Priscilla Costa, Bruna Nunes, Jerson Carvalho, Rafael Bambirra, Rodrigo Fonseca e Rafaela Landa. Vocês contribuíram em diversas e variadas formas. Meu muito obrigada!

Resumo

O setor elétrico brasileiro vem sofrendo mudanças significativas recentes no que tange à sua modernização. Uma dessas mudanças traz a expansão do mercado livre de energia, que visa tornar o mercado mais competitivo, favorecendo mais participantes e também exigindo maiores investimentos e uma melhor gestão de custos e riscos por parte dos agentes. Ao gerenciar seu portfólio de ativos de energia, os agentes geradores enfrentam desafios consideráveis, como, por exemplo, a incerteza da geração a partir de fontes renováveis e a variabilidade dos preços de energia. É importante decidir o que fazer e como fazer com base na posição atual do portfólio: manter essa posição, substituir ou expandir, e, para isso, é desejável utilizar-se de ferramentas que auxiliem essa tomada de decisão. Nesse sentido, este trabalho apresenta uma metodologia para construção e avaliação de portfólio de energia de um agente gerador, aplicando uma técnica de tomada de decisão multicritério para alocação de recursos. O trabalho explora também a adoção de um critério que representa a diversidade de ativos do portfólio como forma de mitigação de riscos em conjunto com os critérios de receita líquida esperada e exposição média ao mercado de curto prazo. Portanto, a aplicação da abordagem multicritério nesse tipo de problema é interessante, visto que os agentes aspiram por maximizar seu retorno financeiro e reduzir seus riscos, objetivos que são conflitantes, e então busca-se encontrar soluções robustas e harmoniosas entre esses objetivos. Os resultados, obtidos para dois estudos de caso de expansão de portfólio, evidenciam a aplicabilidade da metodologia.

Palavras-chave: Alocação de Recursos. Comercialização. Diversidade. Portfólio de Energia. Tomada de Decisão Multicritério.

Abstract

The Brazilian electricity sector has recently undergone significant changes in terms of its modernization. One of these changes is the expansion of the free electricity market, which aims to make the market more competitive, favoring more participants and also requiring greater investment and better cost and risk management by agents. In managing their energy portfolio, generators face significant challenges, such as the uncertainty of renewable generation and the variability of energy prices. It is important to decide what to do and how to do it, based on the current position of the portfolio: maintain, replace or expand this position, and for this it is desirable to use tools that help in this decision-making process. In this sense, this work presents a method to build and evaluate the energy portfolio of a generator, using a multi-criteria decision-making technique for resource allocation. The work explores the adoption of a criterion that represents the diversity of portfolio assets as a way to mitigate risk, along with the criteria of expected net income and average exposure to the short-term market. Therefore, the application of the multi-criteria approach is interesting in this type of problem. Agents seek to maximize their financial return and reduce their risks, goals that are in conflict with each other, and then robust and harmonious solutions are sought between these goals. The results obtained for two portfolio expansion case studies demonstrate the applicability of the methodology.

Keywords: Allocation of resources. Commercialization. Diversity. Energy Portfolio. Multi-criteria Decision Making.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Esquema representativo de balanço de energia na comercialização. . . .	34
Figura 2 – Fluxograma da metodologia de preços [Fonte: CCEE, 2022].	39
Figura 3 – Esquemático de horizontes de planejamento.	40
Figura 4 – Divisão dos submercados de energia no Brasil [Fonte: Witzler Energia .	41
Figura 5 – Esquema metodológico dos estudos de caso.	48
Figura 6 – PLD do submercado Sudeste	49
Figura 7 – PLD do submercado Sul	49
Figura 8 – PLD do submercado Nordeste	50
Figura 9 – Fator de capacidade mensal representativo para as opções de projeto .	51
Figura 10 – Fator de capacidade mensal representativo para as usinas solares	56
Figura 11 – Fator de capacidade mensal representativo para as usinas eólicas e as pequenas centrais hidrelétricas	56

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Matriz <i>payoff</i>	26
Tabela 2 – Matriz <i>payoff</i> com características estimadas	27
Tabela 3 – Matriz <i>payoff</i> modificada	28
Tabela 4 – Matriz <i>payoff</i> agregada com estimativas características	29
Tabela 5 – Matriz das estimativas dos critérios de escolha para p-ésima função objetivo	31
Tabela 6 – Matriz modificada das estimativas dos critérios de escolha para p-ésima função objetivo	31
Tabela 7 – Matriz <i>payoff</i> agregada final das estimativas dos critérios de escolha	31
Tabela 8 – Referências de parâmetros econômicos para fontes renováveis	38
Tabela 9 – Definição do portfólio atual de ativos	50
Tabela 10 – Opções de projetos para investimento	50
Tabela 11 – Dados financeiros utilizados nos estudos de caso	51
Tabela 12 – Matriz <i>payoff</i> para objetivo de retorno financeiro	52
Tabela 13 – Matriz <i>payoff</i> para objetivo de diversidade do portfólio	52
Tabela 14 – Matriz <i>payoff</i> para objetivo de exposição ao MCP	53
Tabela 15 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de retorno financeiro	53
Tabela 16 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de diversidade do portfólio	53
Tabela 17 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de exposição ao MCP	53
Tabela 18 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de retorno financeiro	54
Tabela 19 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de diversidade do portfólio	54
Tabela 20 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de exposição ao MCP	54
Tabela 21 – Matriz <i>payoff</i> agregada final para os critérios de escolha	54
Tabela 22 – Alternativas para investimento	55
Tabela 23 – Matriz <i>payoff</i> para objetivo de retorno financeiro	57
Tabela 24 – Matriz <i>payoff</i> para objetivo de diversidade do portfólio	57
Tabela 25 – Matriz <i>payoff</i> para objetivo de exposição ao MCP	57
Tabela 26 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de retorno financeiro	58

Tabela 27 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de diversidade do portfólio	58
Tabela 28 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de exposição ao MCP . . .	58
Tabela 29 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de retorno financeiro	59
Tabela 30 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de diversidade do portfólio	59
Tabela 31 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de exposição ao MCP	59
Tabela 32 – Matriz <i>payoff</i> agregada final para os critérios de escolha	60

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CMO	Custo Marginal de Operação
DM	Tomador de Decisão
EOL	Usina eólica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GSF	<i>Generation Scaling Factor</i>
MCP	Mercado de Curto Prazo
MRE	Mecanismo de Realocação de Energia
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NE	Submercado Nordeste
O&M	Operação e Manutenção
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PL	Projeto de Lei
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças

S	Submercado Sul
SE/CO	Submercado Sudeste/Centro-Oeste
UFV	Usina Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
VPL	Valor Presente Líquido

Lista de Símbolos

A	Limitação de recursos
B_i	Referência de capital para investimento na opção i
c	Identificador de contratos de venda
C_c	Conjunto dos contratos de compra
C_v	Conjunto dos contratos de venda
c_{pi}	Indicador relacionado à função objetivo
$d_{i,j}$	Distância no espaço de disparidade entre dois ativos
D_i	Demanda individual de cada alternativa
F_p	Vetor de funções objetivo
F^{max}	Nível máximo da função objetivo
\bar{F}	Nível médio da função objetivo
F^{min}	Nível mínimo da função objetivo
F^L	Função objetivo a partir do critério de escolha de <i>Laplace</i>
F^H	Função objetivo a partir do critério de escolha de <i>Hurwicz</i>
F^S	Função objetivo a partir do critério de escolha de <i>Savage</i>
F^W	Função objetivo a partir do critério de escolha de <i>Wald</i>
g_t^p	Garantia física total do portfólio
G^p	Geração que representa o recurso do portfólio, ou de acordo com o sobrescrito, a fonte de energia específica
\tilde{g}^h	Garantia física do MRE
h_t	Horas no instante t

i	Identificador do ativo/alternativa do portfólio
j	Identificador do ativo/alternativa do portfólio na diversidade
I	Conjunto de ativos do portfólio
k	Número de alternativas avaliadas na matriz
K	Número total de alternativas na matriz
l	Identificador de contratos de compra
L	Região factível para escolha das soluções
n	Número total de alternativas avaliadas
p	Identificador da função objetivo
P_c	Preço de contrato
p_i	Representação proporcional do ativo i no portfólio
$PLD_{k,t}$	Valor do PLD no instante t para o submercado k
q	Número total de funções objetivo
r	Número utilizados de critérios como funções objetivo
R	Recurso total disponível para alocação
R_t^-	Total de custos do portfólio no instante t
R^p	Receita total do portfólio
$R_t^{C_v}$	Receita do conjunto de contratos de venda
R^{max}	Nível de risco máximo
s	Número de cenários avaliados na matriz
S	Número total de cenários na matriz
t	Índice do instante de tempo
t_x	Taxa de desconto
T	Horizonte total de tempo
v_c	Volume de energia contratado
x_i	Variável de decisão

Y_s	Vetor de cenários
α	Índice representativo para combinação de estimativas
β	Expoente 1 para variação da heurística de diversidade
γ	Fator de ajuste de geração (GSF)
δ	Expoente 2 para variação da heurística de diversidade
Δ^p	Heurística para avaliação da diversidade do portfólio
ε_i	Fator de capacidade representativo do ativo i
θ_i	Custo com operação e manutenção por geração do ativo
κ	Índice de submercado
λ_p	Coefficiente de importância da p -ésima função objetivo
μ_{A_p}	Função de pertinência para correlação com a p -ésima função objetivo
μ_D	Forma de agregação das funções objetivo
ξ	Exposição de energia ao mercado de curto prazo
$\langle X, F \rangle$	Modelo multiobjetivo para tomada de decisão

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Motivação e Justificativa da Pesquisa	19
1.2	Objetivos: Geral e Específicos	21
1.3	Organização do Trabalho	21
2	Tomada de Decisão Multicritério e Alocação de Recursos	22
2.1	Alocação Multicritério de Recursos ou seus Déficits	24
2.2	Generalização da Abordagem Clássica para se Lidar com a Incerteza de Informação	26
2.2.1	Critério de <i>Wald</i>	26
2.2.2	Critério de <i>Laplace</i>	27
2.2.3	Critério de <i>Savage</i>	27
2.2.4	Critério de <i>Hurwicz</i>	27
2.2.5	Generalização da Abordagem Clássica para a Consideração do Fator de Incerteza em Problemas Multicritério	28
2.3	Critérios de Escolha como Funções Objetivo na Tomada de Decisão Multicritério	30
3	Portfólios de Energia e Revisão Bibliográfica	33
3.1	Receita esperada do portfólio	34
3.2	Análise de Diversidade	36
3.3	Caracterização das fontes de energia	37
3.4	Formação de preço de energia no mercado brasileiro	38
3.5	Revisão Bibliográfica	40
4	Aplicação e Estudo de Caso	44
4.1	Metodologia	44
4.1.1	Retorno Financeiro	45
4.1.2	Diversidade do Portfólio	46
4.1.3	Exposição ao mercado de curto prazo	46
4.1.4	Restrição do problema	47
4.1.5	Tomada de Decisão	47
4.2	Estudos de Caso	47
4.2.1	Horizonte de estudo	47
4.2.2	Estudo de caso 1: Alocação de recursos em projetos de geração	48
4.2.2.1	Resultados	51
4.2.3	Estudo de caso 2: Alocação de recursos em opções fixas	55
4.2.3.1	Resultados	55
5	Conclusão	61

Referências 63

Capítulo 1

Introdução

O Setor Elétrico Brasileiro apresenta diversos desafios relacionados aos diferentes tipos de atividades de planejamento e tomada de decisões (estratégico, expansão, operativo, entre outros). Recentemente, o Ministério de Minas e Energia instituiu um Grupo de Trabalho para elaboração de propostas que viabilizem a Modernização do Setor Elétrico (BRASIL [2019b]). Essa modernização visa uma reforma setorial na atualização de suas regras, práticas e áreas, em busca de se adequar aos movimentos de digitalização, descentralização, descarbonização e diversificação. Pode-se citar algumas das principais frentes de atuação relacionadas à modernização:

- Formação de Preços;
- Inserção de Novas Tecnologias;
- Abertura de Mercado.

Nesse contexto, uma área expressiva que apresenta necessidades voltadas para tomada de decisão é a atuação no mercado de energia elétrica brasileiro dos agentes de geração (empresa ou consórcio de empresas, ou seus acionistas, detentor de concessão ou autorização para produzir energia elétrica, conforme definido em BRASIL [2015]). Tais agentes possuem um portfólio de ativos em energia e buscam a melhor relação entre risco e retorno quando atuam na comercialização de sua energia, sob o ponto de vista do investidor.

Não somente relacionado à comercialização, a decisão sobre o portfólio ainda considera a utilização eficiente dos recursos naturais, visto a alta da procura por uma matriz elétrica mais sustentável (Cayir Ervural et al. [2018]). Tanto a modernização do setor, como os desafios em se ter uma matriz mais renovável, apresentam oportunidades para se alcançar maior eficiência na gestão dos ativos e dos possíveis investimentos.

Se o agente gerador deseja alterar o seu portfólio de ativos, ele busca respostas para as seguintes questões: o que fazer e como fazer? Dentre as alternativas que res-

ponderão a questão o que fazer, pode-se considerar manter o portfólio atual, substituir determinado volume de energia ou incluir um novo ativo. Essas ações se enquadram em um planejamento tático-operacional do agente, visando definir a atuação em relação ao portfólio principalmente em um horizonte de curto e médio prazo. Assim, critérios precisam ser definidos em busca de subsidiar a decisão do agente, em que se possa avaliar o retorno financeiro esperado das diversas fontes e os riscos inerentes.

1.1 Motivação e Justificativa da Pesquisa

A todo momento e em diversas áreas, a necessidade de tomada de decisão é uma realidade. O processo decisório consiste na avaliação de alternativas e na escolha daquela que melhor se enquadre aos critérios estabelecidos, que, em geral, são conflitantes. A solução almejada se torna um compromisso entre estes critérios. Outro fator relevante na tomada de decisão se associa às incertezas inerentes ao problema a ser analisado.

Ao gerenciar seu portfólio de ativos em energia, utilizando-se necessariamente de ferramentas para gerenciamento de risco, os agentes geradores enfrentam desafios consideráveis para atuação no mercado de energia elétrica brasileiro. A decisão a respeito da posição atual do portfólio: manter, substituir ou expandir se torna significativa, assim como, a decisão sobre como realizar essas ações. Na literatura, o gerenciamento de portfólio é objeto de diversas pesquisas, em variados contextos, como por exemplo:

- Em [Aravossis and Strantzali \[2016\]](#), os autores apresentam uma revisão do estado da arte sobre ferramentas que auxiliam a tomada de decisão sobre investimentos em energias renováveis e sustentáveis, com impactos no longo prazo;
- Os autores de [Coutinho et al. \[2019\]](#) buscaram uma estratégia para maximizar a receita de uma planta híbrida composta por fontes eólica, solar e armazenamento de energia, minimizando riscos financeiros na operação de compra e venda de energia no horizonte trimestral;
- Em [de Freitas et al. \[2020\]](#), os autores apresentam uma ferramenta para auxiliar a tomada de decisão em investimentos, também de fontes renováveis, de forma a expandir o portfólio de ativos. O autor explorou ainda a complementariedade das fontes e a atuação na comercialização de energia.

A incerteza de geração das fontes e a dos preços de energia são os tipos comumente mais abordados como fatores de risco, como sinalizam os trabalhos de [Tamashiro \[2014\]](#), [Cabral et al. \[2015\]](#), [de Freitas \[2019\]](#), [Bosa \[2018\]](#) e [Pedrini \[2019\]](#), por exemplo. Manter um portfólio diverso em relação ao tipo de fonte de energia é uma opção estratégica de forma a mitigar tais riscos ([Tamashiro \[2014\]](#), [Rocha et al. \[2022\]](#), [Kim et al. \[2021\]](#)).

O setor elétrico brasileiro vem sofrendo mudanças significativas recentes no que tange à sua modernização. Como exemplo, o projeto de lei PL 414/2021, atualmente em tramitação na Câmara dos Deputados (BRASIL [2021c]), tem o objetivo de prover aprimoramentos para o modelo regulatório e comercial do setor elétrico com vistas à expansão do mercado livre de energia. Esta expansão é uma tendência que visa tornar o mercado mais competitivo (BRASIL [2019a]), possibilitando mais participantes, maiores investimentos no setor e melhor gestão de custos e riscos por parte dos agentes. No entanto, a abertura do mercado possui uma interação significativa com a regulamentação governamental, impactando portfólios de ativos em energia atrelados ou não ao mercado livre. Além da abertura do mercado, a modificação na metodologia de formação dos preços de energia tem alta relevância.

Por todo o exposto até aqui, é diferencial para o agente gerador possuir ferramentas que o auxiliem a tomar decisões em relação ao seu portfólio, entendendo os fatores que influenciam o retorno financeiro, bem como gerenciar os riscos relativos à sua atuação no mercado. Se sua expectativa é melhorar a posição do seu portfólio (investir em expansão) ou mantê-la (mesmo que por substituição), os objetivos a considerar podem ser conflitantes e é necessário munir-se de estratégias que adequadamente representem o problema e auxiliem na tomada de decisão, como a abordagem multicritério, ou multiobjetivo.

Tal abordagem pode ser adotada para solucionar dois tipos de problemas segundo Ekel et al. [2007]:

- problemas em que as consequências da solução não podem ser estimadas baseando-se em um único critério, ou
- problemas que até podem ser representados em um único critério, porém suas soluções únicas não são alcançadas devido regiões de incertezas para tomada de decisão e, então, a adoção de outros objetivos auxiliam na redução de tais regiões.

Em uma etapa de planejamento tático-operacional, almeja-se poder tomar decisões de forma eficiente e válida, o que pode ser proporcionado pelo uso de modelos matemáticos adequados para representar o problema em questão (Pereira [2014], Ramalho et al. [2019]). Solucionar um problema de alocação de recursos, ou déficit de recursos, pode ser uma opção no gerenciamento de portfólio. Esse modelo consiste em determinar como distribuir o recurso disponível, considerando as demandas relativas ao que se está sendo avaliado, que podem ser alternativas para o portfólio: substituir montante de energia ou ampliar o portfólio.

Esta pesquisa apresenta uma metodologia fundamentada no esquema geral de tomada de decisão multicritério, de forma a auxiliar o agente gerador em sua tomada de decisão no gerenciamento do portfólio de energia. Ter uma ferramenta que auxilie neste

processo é importante considerando os desafios provenientes das atuais mudanças no setor elétrico e as incertezas inerentes de sua atividade.

1.2 Objetivos: Geral e Específicos

Este trabalho tem como objetivo principal propor uma metodologia para a construção de portfólio de energia por meio da aplicação de técnica de tomada de decisão multicritério para alocação de recursos.

Para alcance do objetivo descrito anteriormente, elenca-se:

- Representar o problema de gerenciamento do portfólio por meio de modelo de alocação de recursos;
- Utilizar modelos existentes de receita esperada para representação do portfólio e das alternativas;
- Definir e propor critérios (indicadores) pertinentes para avaliação das alternativas.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. Neste capítulo 1 estão expostos os objetivos, a contextualização e a motivação da pesquisa. No capítulo 2, são apresentados os conceitos relativos ao esquema geral de Tomada de Decisão Multicritério, assim como, ao modelo adotado de alocação de recursos.

No capítulo 3 são apresentados os conceitos referentes a portfólios de energia, a contextualização do setor elétrico brasileiro e a consideração sobre diversidade aplicada ao portfólio. No mesmo capítulo é também realizada uma revisão bibliográfica do tema.

No capítulo 4, apresenta-se a modelagem do problema para alocação multicritério de recursos aplicada a construção de portfólios e aplica-se tomada de decisão a dois estudos de caso. As conclusões, bem como propostas para futuros trabalhos serão expostas no capítulo 5.

Capítulo 2

Tomada de Decisão Multicritério e Alocação de Recursos

A tomada de decisão é uma ação presente na vida cotidiana em todas as áreas. Esse processo consiste basicamente em, dentre as opções avaliadas, escolher a de maior preferência, considerando o atendimento aos critérios, ou a maior parte deles. E, nesse intuito, a dimensão das consequências das decisões é, e deve ser, grande alvo de atenção.

Os problemas ou situações aos quais é necessário aplicar a tomada de decisão são comumente de natureza multicritério. O decisor deve levar em consideração para caracterizar suas alternativas, por exemplo, o conjunto de fatores que influenciam o problema, quais seus fatores de interesse e quais as consequências da escolha. Prever ou avaliar essas consequências em diversos cenários é relevante, por exemplo, o uso da água para geração de energia elétrica agora pode ter grandes impactos nos reservatórios em um momento futuro mediante chuvas ou escassez hídrica, sendo que essa decisão deve considerar ambas possibilidades.

O amplo conhecimento do problema é significativo para a tomada de decisão, pois favorece a especificação dos objetivos, restrições e preferências a serem considerados, mesmo sob condições incertas. Espera-se ainda a possibilidade de decisões ágeis, visto que o ambiente de decisão pode ser bem dinâmico.

Nos diversos tipos de atividades relativas a planejamento, seja operacional ou estratégico, surgem duas questões fundamentais: “O que fazer?” e “Como fazer?” (Ekel [2002]). Para obter respostas à primeira pergunta (“O que fazer?”), seja para alguma organização, algum departamento, etc., geralmente torna-se necessário (Ramalho et al. [2019]):

- definir objetivos e estabelecer metas para os níveis correspondentes da hierarquia de planejamento;

- avaliar, comparar, escolher, priorizar e/ou solicitar soluções ou alternativas (ações estratégicas, novos projetos de negócios, etc.) e assim construir portfólios.

Já para a segunda questão ("Como fazer?"), a resposta estará associada à alocação racional de vários tipos de recursos (financeiros, logísticos, etc.) ou à alocação de déficits de recursos entre as alternativas (que podem ser as ações estratégicas, os novos projetos de negócios, entre outros) para atingir os objetivos ou metas estabelecidos em seu grau máximo.

Embora a alocação de recursos ou seus déficits, de diferentes pontos de vista, seja baseada na aplicação de informações quantitativas (com diferentes níveis de incerteza) e informações qualitativas, na prática, ela é realizada levando em consideração apenas informações quantitativas, muitas vezes ignorando completamente sua incerteza. Diante disso, em [Ramalho et al. \[2019\]](#), destaca-se que os modelos de tomada de decisão multicritério são baseados em avaliações essencialmente determinísticas das consequências de cada ação expressas em função de cada critério, podendo submeter os resultados finais e recomendações a um grau de análise de sensibilidade. Essa abordagem pode ser justificada quando a fonte primária de complexidade na tomada de decisão está relacionada à natureza multicritério do problema e não à natureza incerta das consequências individuais.

Os modelos que podem ser aplicados para representar um problema de tomada de decisão (que não podem ser expressos somente por informações quantitativas, que possuem critérios múltiplos e conflitantes, que apresentam incertezas seja no objetivo ou nos dados) comumente refletirão o ponto de vista do tomador de decisão (DM), levando em consideração seu conhecimento, experiência e intuição. A abordagem possibilística permite avaliar uma combinação representativa dos dados iniciais, cenários ou estados da natureza, baseada no conhecimento, experiência e intuição dos especialistas envolvidos ([Ramalho et al. \[2019\]](#)).

A qualidade da solução é uma questão importante a considerar na otimização multicritério. A abordagem de *Bellman-Zadeh* aplicada à tomada de decisão em um ambiente *fuzzy* define sua solução "ótima" quando se tem o grau máximo de implementação de todos os objetivos ([Pereira \[2014\]](#), [Silva \[2020\]](#)): quanto mais próximos forem os níveis de satisfação dos critérios ou se forem iguais entre si, maior o nível de qualidade da solução. Chega-se, assim, a soluções harmoniosas, em que a importância das funções objetivos não são diferenciadas. E a generalização da abordagem clássica para se lidar com a incerteza da informação permite encontrar uma solução robusta: mais adequada nos cenários considerados ([Pereira \[2014\]](#), [Silva \[2020\]](#)).

2.1 Alocação Multicritério de Recursos ou seus Déficits

Para exemplificar a modelagem para alocação de recursos, considere um problema estratégico. Sejam, então, os seguintes objetivos listados, em que os dois primeiros consideram informações qualitativas em sua formulação, e os outros dois podem ser quantificados:

- Disponibilização predominante de recursos para projetos com maior nível de inovação;
- Disponibilização predominante de recursos para projetos com maior efeito social;
- Disponibilização predominante de recursos para projetos que geram maior nível de fornecimento para o exterior;
- Disponibilização predominante de recursos para projetos com maior lucro por cada R\$ 10.000,00 investido.

Os objetivos citados podem ser igualmente representados em uma formulação para alocação de déficits de recursos, conforme segue:

- Limitação predominante dos projetos com menor nível de inovação;
- Limitação predominante dos projetos com menor efeito social;
- Limitação predominante dos projetos que geram menor nível de fornecimento de produto para o exterior;
- Limitação predominante dos projetos com menor lucro R\$ 10.000,00 investido.

Estes modelos de alocação multicritério (Ramalho et al. [2019], Ekel et al. [2019]) podem ser aplicados para solução de diversos problemas de planejamento, inclusive construção e modificação de portfólios de energia.

De acordo com os objetivos-exemplo apresentados, pode-se representá-los por meio de funções lineares, em que se busca maximizar ou minimizar. A equação (2.1) representa a formulação de objetivos para a alocação de recursos e a (2.2), para a alocação de déficits.

$$F_p(X) = \sum_{i=1}^n c_{pi}x_i, p = 1, 2, \dots, q, \quad (2.1)$$

$$F_p(\Delta X) = \sum_{i=1}^n c_{pi}\Delta x_i, p = 1, 2, \dots, q, \quad (2.2)$$

em que x_i são as variáveis correspondentes aos volumes que se pretende alocar relativos às alternativas i , c_{pi} são os indicadores relacionados às funções objetivo p , n é o

número total de alternativas e q , o número total de funções. Outras formas de representar as funções podem ser utilizadas, dependendo das características do problema.

A partir da formulação das funções objetivos, têm-se duas modelagens de problema que são apresentados a seguir: a primeira relativa à alocação de recursos e a segunda, à alocação de déficits. Sendo D_i a demanda individual necessária de cada alternativa e $R < \sum_{i=1}^n D_i$, o total de recurso disponível, geralmente menor que o total de demandas. O problema multiobjetivo para alocação de recursos pode ser descrito como expresso em (2.3).

$$F_p(X) \rightarrow \max_{X \in L} \text{ ou } \min_{X \in L}, p = 1, 2, \dots, q, \quad (2.3)$$

sujeito às seguintes restrições:

$$0 \leq x_i \leq D_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = R, \quad (2.5)$$

em que L representa a região factível para escolha das soluções.

Já o modelo para alocação de déficits de recursos pode ser representado pelo expresso em (2.6), considerando que a limitação de recursos seja $A = \sum_{i=1}^n D_i - R$.

$$F_p(\Delta X) \rightarrow \max_{X \in L} \text{ ou } \min_{X \in L}, p = 1, 2, \dots, q, \quad (2.6)$$

sujeito às seguintes restrições:

$$\Delta x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.7)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = A. \quad (2.8)$$

A análise do problema representado pelo modelo (2.3) e suas restrições é iterativa. Entre as alternativas nas quais não se alocou o recurso suficiente ($x_i \leq D_i$), retira-se uma das opções com o menor recurso recebido e analisa-se o modelo novamente. O processo continua até todas as alternativas terem suas demandas satisfeitas.

Para o modelo (2.6) e suas restrições, que é considerado de cortes não limitados, a análise também é iterativa, em que as alternativas com maior corte de recurso (Δx) vão sendo desconsideradas.

2.2 Generalização da Abordagem Clássica para se Lidar com a Incerteza de Informação

A abordagem clássica para lidar com a incerteza da informação no processo de tomada de decisão (Raiffa and Luce [1989]; Raiffa [1968], Belyaev [1977]) se baseia na realização da análise de um determinado número K de alternativas $x_k, k = 1, \dots, K$ em S combinações representativas de dados iniciais (ou cenários) $Y_s, s = 1, \dots, S$. Assim, pode-se construir uma matriz de compromisso (matriz *payoff* apresentada na Tabela 1), que busca refletir os efeitos (ou consequências) da alternativa k no cenário s .

Tabela 1 – Matriz *payoff*

	Y_1	...	Y_s	...	Y_S
x_1	$F(x_1, Y_1)$	...	$F(x_1, Y_s)$	...	$F(x_1, Y_S)$
...
x_k	$F(x_k, Y_1)$	...	$F(x_k, Y_s)$	...	$F(x_k, Y_S)$
...
x_K	$F(x_K, Y_1)$	...	$F(x_K, Y_s)$	...	$F(x_K, Y_S)$

Para análise dessa matriz, adota-se o uso de critérios de escolha, de forma a encontrar soluções racionais para cada função (Belyaev [1977]). Os critérios mais utilizados na literatura por possuírem um caráter de aplicação geral são de *Wald*, *Laplace*, *Hurwics* e *Savage* (Figueiredo [2020]). Tais critérios são fundamentados nas características estimadas apresentadas a seguir:

- nível mínimo da função objetivo, $F^{min}(x_k)$;
- nível máximo da função objetivo, $F^{max}(x_k)$;
- nível médio da função objetivo, $\bar{F}(x_k)$;
- nível de risco (ou arrependimento) máximo, $R^{max}(x_k)$.

A Tabela 2 exibe a matriz com estas características adicionadas. Considerando, para efeito de exemplificação, uma função a ser minimizada, os critérios de escolhas podem ser definidos como mostrados nas próximas subseções.

2.2.1 Critério de *Wald*

Este critério utiliza a estimativa de nível máximo da função objetivo, favorecendo soluções para uma visão mais conservadora, visto que garante que o nível da função objetivo não seja maior do que certo valor em quaisquer das combinações de dados iniciais, incluindo as mais desfavoráveis. Ele escolhe as alternativas para as quais a estimativa é mínima, conforme (2.9).

Tabela 2 – Matriz *payoff* com características estimadas

	Y_1	...	Y_s	...	Y_S	$F^{min}(x_k)$	$F^{max}(x_k)$	$\bar{F}(x_k)$	$R^{max}(x_k)$
x_1	$F(x_1, Y_1)$	...	$F(x_1, Y_s)$	...	$F(x_1, Y_S)$	$F^{min}(x_1)$	$F^{max}(x_1)$	$\bar{F}(x_1)$	$R^{max}(x_1)$
...
x_k	$F(x_k, Y_1)$	...	$F(x_k, Y_s)$	...	$F(x_k, Y_S)$	$F^{min}(x_k)$	$F^{max}(x_k)$	$\bar{F}(x_k)$	$R^{max}(x_k)$
...
x_K	$F(x_K, Y_1)$	...	$F(x_K, Y_s)$	...	$F(x_K, Y_S)$	$F^{min}(x_K)$	$F^{max}(x_K)$	$\bar{F}(x_K)$	$R^{max}(x_K)$

$$\min_{l \leq k \leq K} F^{max}(x_k) = \min_{l \leq k \leq K} \max_{l \leq s \leq S} F(x_k, Y_s) \quad (2.9)$$

2.2.2 Critério de Laplace

A partir da estimativa de nível médio da função, este critério escolhe as alternativas de solução para a qual a estimativa é mínima, de acordo com (2.10). O critério se baseia na consideração de que os cenários são igualmente prováveis.

$$\min_{l \leq k \leq K} \bar{F}(x_k) = \min_{l \leq k \leq K} \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S F(x_k, Y_s) \quad (2.10)$$

2.2.3 Critério de Savage

O critério de *Savage* tem uma abordagem semelhante ao de *Wald*, baseando no princípio *minmax*. Apesar de ser considerado também conservador, pode levar a soluções mais ousadas. É definido a partir do nível de risco máximo, apresentado em (2.11).

$$\min_{l \leq k \leq K} R^{max}(x_k) = \min_{l \leq k \leq K} \max_{l \leq s \leq S} R(x_k, Y_s) \quad (2.11)$$

O nível de risco, ou de arrependimento, representa qual o prejuízo $R(x_k, Y_s)$ ocorre no cenário Y_s com a escolha da alternativa x_k em comparação com a alternativa que é a solução localmente ótima naquele cenário. O risco para qualquer alternativa e cenário pode ser avaliado pela equação (2.12), no caso de uma função a ser minimizada.

$$R(x_k, Y_s) = F(x_k, Y_s) - F^{min}(Y_s) \quad (2.12)$$

2.2.4 Critério de Hurwicz

O critério de *Hurwicz* é calculado por meio de uma combinação convexa dos níveis máximo e mínimo da função objetivo (equação (2.13)). O índice que representa a combinação das estimativas é definido pelo tomador de decisão, sendo que $\alpha \in [0, 1]$.

$$\min_{l \leq k \leq K} [\alpha F^{\max}(x_k) + (1 - \alpha) F^{\min}(x_k)] = \min_{l \leq k \leq K} [\alpha \max_{l \leq s \leq S} F(x_k, Y_s) + (1 - \alpha) \min_{l \leq s \leq S} F(x_k, Y_s)] \quad (2.13)$$

2.2.5 Generalização da Abordagem Clássica para a Consideração do Fator de Incerteza em Problemas Multicritério

A partir da aplicação da modificação da abordagem de *Bellman-Zadeh* (Bellman and Zadeh [1970]) para a tomada de decisão em ambiente *fuzzy*, foram obtidas soluções harmoniosas para os problemas *maxmin* associados na análise de modelos multiobjetivo (Ekel [2002]). Assim, tem-se uma generalização da abordagem clássica para lidar com a incerteza da informação para o tratamento de problemas multicritérios.

Pode-se, então, aplicar as correlações (μ_{A_p}) apresentadas em (2.14), para funções a serem minimizadas, e em (2.15), para funções a serem maximizadas, que definem o grau de pertinência aos conjuntos nebulosos (*fuzzy*) para as funções objetivo. Em seguida, pode-se montar as matrizes *payoff* modificadas (exemplo na Tabela 3).

$$\mu_{A_p}(x) = \left[\frac{\max_{x \in L} F_p(x) - F_p(x)}{\max_{x \in L} F_p(x) - \min_{x \in L} F_p(x)} \right]^{\lambda_p}, \quad (2.14)$$

$$\mu_{A_p}(x) = \left[\frac{F_p(x) - \min_{x \in L} F_p(x)}{\max_{x \in L} F_p(x) - \min_{x \in L} F_p(x)} \right]^{\lambda_p}, \quad (2.15)$$

em que λ_p é o coeficiente de importância da p -ésima função objetivo.

Tabela 3 – Matriz *payoff* modificada

	Y_1	...	Y_s	...	Y_S
x_1	$\mu_{A_p}(x_1, Y_1)$	...	$\mu_{A_p}(x_1, Y_s)$	...	$\mu_{A_p}(x_1, Y_S)$
...
x_k	$\mu_{A_p}(x_k, Y_1)$	...	$\mu_{A_p}(x_k, Y_s)$	...	$\mu_{A_p}(x_k, Y_S)$
...
x_K	$\mu_{A_p}(x_K, Y_1)$	...	$\mu_{A_p}(x_K, Y_s)$	...	$\mu_{A_p}(x_K, Y_S)$

A partir das matrizes construídas para cada função objetivo a ser considerada, pode-se definir a matriz *payoff* agregada (ver Tabela 4), de acordo com o exposto pelos autores de Ekel et al. [2011], Ekel et al. [2019], Ekel et al. [2016]. μ_D representa a forma de agregação dos objetivos.

As características estimadas são os níveis das funções, semelhante aos calculados anteriormente, porém, agora calculados para as funções de pertinência. Estas características são utilizadas para definir os critérios de escolha (Ekel et al. [2011], Ekel et al. [2008]).

Tabela 4 – Matriz *payoff* agregada com estimativas características

	Y_1	...	Y_s	...	Y_S	$\mu_D^{max}(x_k)$	$\mu_D^{min}(x_k)$	$\bar{\mu}_D(x_k)$	$R^{max}(x_k)$
x_1	$\mu_D(x_1, Y_1)$	...	$\mu_{A_p}(x_1, Y_s)$	...	$\mu_{A_p}(x_1, Y_S)$	$\mu_D^{max}(x_1)$	$\mu_D^{min}(x_1)$	$\bar{\mu}_D(x_1)$	$R^{max}(x_1)$
...
x_k	$\mu_D(x_k, Y_1)$	...	$\mu_{A_p}(x_k, Y_s)$	...	$\mu_{A_p}(x_k, Y_S)$	$\mu_D^{max}(x_k)$	$\mu_D^{min}(x_k)$	$\bar{\mu}_D(x_k)$	$R^{max}(x_k)$
...
x_K	$\mu_D(x_K, Y_1)$	...	$\mu_{A_p}(x_K, Y_s)$	...	$\mu_{A_p}(x_K, Y_S)$	$\mu_D^{max}(x_K)$	$\mu_D^{min}(x_K)$	$\bar{\mu}_D(x_K)$	$R^{max}(x_K)$
$\mu_D^{max}(Y_S)$	$\mu_D^{max}(Y_1)$	...	$\mu_D^{max}(Y_s)$	...	$\mu_D^{max}(Y_S)$				

As características estimadas considerando a aplicação das funções de pertinência são:

- máximo:

$$\mu_D^{max}(x_k) = \max_{1 \leq s \leq S} \mu_D(x_k, Y_s), \quad (2.16)$$

- mínimo:

$$\mu_D^{min}(x_k) = \min_{1 \leq s \leq S} \mu_D(x_k, Y_s), \quad (2.17)$$

- médio:

$$\bar{\mu}_D(x_k) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \mu_D(x_k, Y_s), \quad (2.18)$$

- risco máximo:

$$R(x_i, Y_s) = \mu_D^{max}(Y_s) - \mu_D(x_i, Y_s), \quad (2.19)$$

em que $\mu_D^{max}(Y_s) = \max_{1 \leq k \leq K} \mu_D(x_k, Y_s)$.

2.3 Critérios de Escolha como Funções Objetivo na Tomada de Decisão Multicritério

A generalização da abordagem clássica, apresentada na seção anterior, pode apresentar algumas limitações, como a indicação de soluções distintas entre a matriz final agregada e as originais. O trabalho de [Pereira et al. \[2015\]](#) demonstra em um exemplo hipotético tal limitação, em que o uso do critério de *Laplace* indica uma solução distinta daquela indicada pela matriz final agregada.

Portanto, nos trabalhos de [Ekel et al. \[2016\]](#), [Ekel et al. \[2019\]](#), [Pereira et al. \[2015\]](#), tem-se a proposta de uma abordagem que permite superar tais limitações utilizando-se os critérios de escolha de *Wald*, *Laplace*, *Savage* e *Hurwicz* como funções objetivo, formuladas nas equações (2.20), (2.21), (2.22), (2.23), respectivamente.

$$F^W(x_k) = F^{max}(x_k) = \max_{1 \leq s \leq S} F(x_k, Y_s) \quad (2.20)$$

$$F^L(x_k) = \bar{F}(x_k) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S F(x_k, Y_s) \quad (2.21)$$

$$F^S(x_k) = R^{max}(x_k) = \max_{1 \leq s \leq S} R(x_k, Y_s) \quad (2.22)$$

$$F^H(x_k) = \alpha F^{max}(x_k) + (1 - \alpha) F^{min}(x_k) = \alpha \max_{1 \leq s \leq S} F(x_k, Y_s) + (1 - \alpha) \min_{1 \leq s \leq S} F(x_k, Y_s) \quad (2.23)$$

A partir dos critérios, formula-se o problema considerando até as quatro funções, conforme (2.24), que pode ser resolvido de forma a garantir a escolha de alternativas de solução racional dentro do princípio de otimalidade de Pareto (Pareto [1964]). Chega-se a matriz das estimativas dos critérios de escolha apresentada na Tabela 5.

$$F_{r,p}(x) \rightarrow \text{extr}_{x \in L}, r = 1, \dots, 4, p = 1, \dots, q \quad (2.24)$$

Tabela 5 – Matriz das estimativas dos critérios de escolha para p-ésima função objetivo

	F_P^W	F_P^L	F_P^S	F_P^H
x_1	$F_P^W(x_1)$	$F_P^L(x_1)$	$F_P^S(x_1)$	$F_P^H(x_1)$
...
x_k	$F_P^W(x_k)$	$F_P^L(x_k)$	$F_P^S(x_k)$	$F_P^H(x_k)$
...
x_K	$F_P^W(x_K)$	$F_P^L(x_K)$	$F_P^S(x_K)$	$F_P^H(x_K)$
	$\min_{1 \leq k \leq K} F_P^W(x_k)$	$\min_{1 \leq k \leq K} F_P^L(x_k)$	$\min_{1 \leq k \leq K} F_P^S(x_k)$	$\min_{1 \leq k \leq K} F_P^H(x_k)$
	$\max_{1 \leq k \leq K} F_P^W(x_k)$	$\max_{1 \leq k \leq K} F_P^L(x_k)$	$\max_{1 \leq k \leq K} F_P^S(x_k)$	$\max_{1 \leq k \leq K} F_P^H(x_k)$

Aplicando-se a generalização da abordagem clássica com base na equação (2.14) no problema representado por (2.24), pode-se construir a matriz modificada apresentada na Tabela 6. Por fim, com as q matrizes modificadas (relacionadas às funções objetivo), constrói-se a matriz agregada final (Tabela 7) a ser utilizada para escolha da solução.

Tabela 6 – Matriz modificada das estimativas dos critérios de escolha para p-ésima função objetivo

	$\mu_{A_p}^W(x_k)$	$\mu_{A_p}^L(x_k)$	$\mu_{A_p}^S(x_k)$	$\mu_{A_p}^H(x_k)$
x_1	$\mu_{A_p}^W(x_1)$	$\mu_{A_p}^L(x_1)$	$\mu_{A_p}^S(x_1)$	$\mu_{A_p}^H(x_1)$
...
x_k	$\mu_{A_p}^W(x_k)$	$\mu_{A_p}^L(x_k)$	$\mu_{A_p}^S(x_k)$	$\mu_{A_p}^H(x_k)$
...
x_K	$\mu_{A_p}^W(x_K)$	$\mu_{A_p}^L(x_K)$	$\mu_{A_p}^S(x_K)$	$\mu_{A_p}^H(x_K)$

Tabela 7 – Matriz *payoff* agregada final das estimativas dos critérios de escolha

	$\mu_D^W(x_k)$	$\mu_D^L(x_k)$	$\mu_D^S(x_k)$	$\mu_D^H(x_k)$
x_1	$\mu_D^W(x_1)$	$\mu_D^L(x_1)$	$\mu_D^S(x_1)$	$\mu_D^H(x_1)$
...
x_k	$\mu_D^W(x_k)$	$\mu_D^L(x_k)$	$\mu_D^S(x_k)$	$\mu_D^H(x_k)$
...
x_K	$\mu_D^W(x_K)$	$\mu_D^L(x_K)$	$\mu_D^S(x_K)$	$\mu_D^H(x_K)$
	$\max_{1 \leq k \leq K} \mu_D^W(x_k)$	$\max_{1 \leq k \leq L} \mu_D^L(x_k)$	$\max_{1 \leq k \leq S} \mu_D^S(x_k)$	$\max_{1 \leq k \leq H} \mu_D^H(x_k)$

Levando em consideração o que foi exposto anteriormente, o presente trabalho visa à geração de soluções robustas e harmoniosas para o problema multiobjetivo de construção do portfólio de agentes geradores. Considera-se aplicar, em resumo, as seguintes etapas:

- Solucionar s problemas multicritério formalizados dentro da estrutura de modelos $\langle X, F \rangle$ e substituir as soluções por $F_p(x)$, $p = 1, \dots, q$;
- Construir q matrizes *payoff* de acordo com o número de funções objetivo para todas as combinações de cenários e alternativas de solução;
- Analisar as matrizes *payoff* obtidas na etapa anterior.

Assim, essas soluções são geradas a partir da construção de combinações representativas de dados iniciais, estados da natureza ou cenários. As funções objetivo são modeladas a partir da aplicação do modelo de alocação multicritério de recursos.

Capítulo 3

Portfólios de Energia e Revisão Bibliográfica

No âmbito da comercialização de energia elétrica no Brasil ¹, tem-se diversos agentes que atuam nos mercados livre ou regulado, são eles: geradores, distribuidores, comercializadores, consumidores livres e especiais. Os agentes geradores são aqueles que produzem energia e podem então atuar vendendo a energia gerada no mercado.

Segundo BRASIL [2007] e nos procedimentos e regras de comercialização, define-se o ambiente de contratação regulada (ACR) um modelo de compra e venda de energia que atende especificamente os consumidores cativos. Nele, a energia é vendida às distribuidoras através de leilões intermediados pela ANEEL, com preços estipulados pelo governo. Já no ambiente livre (ACL), as geradoras, comercializadoras e os consumidores negociam a compra e venda da energia diretamente entre si. Sendo assim, no mercado livre, as empresas podem conseguir melhores condições para negociação da sua energia quando comparado ao mercado regulado.

Considerando assim o ACL, os agentes geradores que comercializam sua energia podem negociar contratos de longo prazo, que asseguram uma receita fixa no período contratado, portanto, uma posição conservadora, ou negociar a energia em contratos com períodos menores, inclusive na exposição ao Mercado de Curto Prazo (MCP), através do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD).

O portfólio de energia de um gerador é composto por empreendimentos de geração dentre as diversas fontes e por contratos firmados de compra ou de venda de energia. Sendo um agente de mercado, o gerador deve possuir a totalidade de seus contratos de venda lastreados por meio de contratos de compra ou de garantia física das suas usinas. Sendo assim, a receita esperada do agente será advinda da comercialização dos contratos e da liquidação de curto prazo de sua geração de energia que não foi comprometida com

¹ No sítio da Câmara de Comercialização de Energia tem as principais informações do mercado brasileiro: <https://www.ccee.org.br/>.

contratos.

Essa particularidade do curto prazo representa um dos pontos incertos no mercado de energia e de grande atenção. O agente busca reduzir sua exposição a esse mercado quando em uma posição mais conservadora. A Figura 1 esquematiza o significado de exposição ao mercado considerando o balanço entre recurso e requisito do agente.

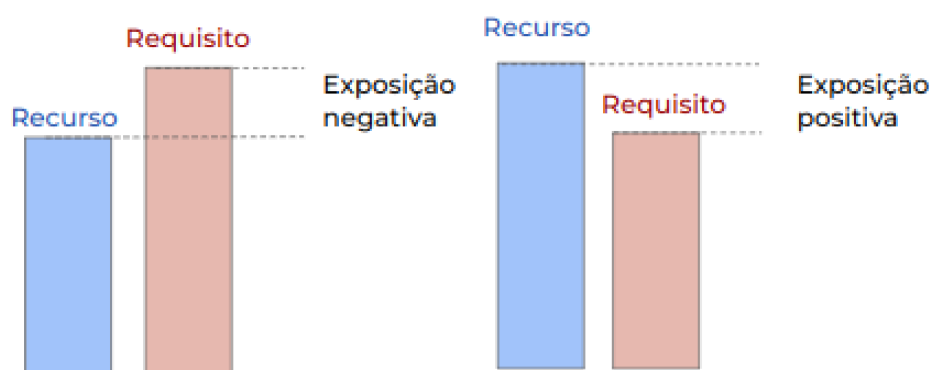


Figura 1 – Esquema representativo de balanço de energia na comercialização.

Se o recurso, que representa o volume de geração do portfólio e dos contratos de compra, for maior que o requisito, tem-se uma exposição positiva. Nessa posição, o agente pode lucrar no curto prazo, visto que terá que vender sua energia. Analogamente, a exposição negativa é quando o requisito, ou seja, o compromisso dos contratos de venda já firmados, é maior, fazendo com que o agente necessite comprar energia. A decisão está em garantir uma menor exposição ou apostar no ganho possível nesse mercado, caso os preços estejam atraentes.

3.1 Receita esperada do portfólio

O Brasil encontra-se em uma política de diversificação da matriz energética, além do almejo por uma matriz mais sustentável. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia de 2031 (BRASIL [2022]), plano que indica as perspectivas da expansão do setor de energia para os próximos dez anos, apresenta no enfoque dos estudos que:

O cenário de expansão do PDE 2031, ao priorizar a expansão de fontes renováveis de energia, mantém o Brasil no rumo da contribuição esperada do setor energético para a NDC brasileira.

Assim, busca-se neste trabalho, considerar um portfólio de ativos de energia, composto somente por fontes renováveis, tais como:

- Usinas hidrelétricas (UHE, PCH ou CGH);
- Usinas fotovoltaicas (UFV);

- Usinas eólicas (EOL).

A modelagem aqui considerada para receita do portfólio se baseia nos estudos apresentados nos trabalhos de [de Freitas et al. \[2020\]](#), [Neto et al. \[2017\]](#) e [dos Santos \[2013\]](#)), além dos conceitos presentes nos documentos oficiais da CCEE².

Considera-se que a garantia física total do portfólio (g_t^p), que é o somatório das garantias físicas de cada ativo de geração, é o máximo que o agente pode comprometer em contratos. Sendo assim, a receita do conjunto de contratos de venda do agente $R_t^{C_v}$, seu requisito, é expresso como em (3.1).

$$R_t^{C_v} = h_t \sum_{\kappa=1}^4 \left(\sum_{c=1}^{C_v} P_c \cdot v_{c,\kappa,t} \right), \mid \sum_{c=1}^{C_v} v_{c,t} \leq g_t^p, \quad (3.1)$$

em que h_t é o total de horas em cada período t , C_v é o total de contratos de venda do agente, P_c é o preço contratado, v_c é o volume contratado e κ é o submercado relacionado ao contrato.

O recurso esperado do agente $G_{\kappa,t}^p$ pode ser definido como o total de geração das diversas fontes presentes no seu portfólio somado ao total de contratos de compra, que porventura tenham sido firmados. A equação (3.2) representa o recurso do portfólio.

$$G_{\kappa,t}^p = G_{i,\kappa,t}^h + G_{i,\kappa,t}^s + G_{i,\kappa,t}^e + G_{i,\kappa,t}^c, \quad (3.2)$$

sendo $G_{i,\kappa,t}^s$ a geração solar, $G_{i,\kappa,t}^e$ a geração eólica, $G_{i,\kappa,t}^c$ o volume de geração contratado e $G_{i,\kappa,t}^h$ a geração proveniente de fonte hidrelétrica, podendo ser parte de ativos participantes do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE) ([BRASIL \[2022c\]](#)). Neste último caso, considera-se como recurso a garantia física da usina hidrelétrica multiplicada pelo fator de ajuste de geração γ (GSF), ou garantia física do MRE, como exposto na equação (3.3).

$$\tilde{g}_t^h = g_t^h \cdot \gamma_t. \quad (3.3)$$

Com as definições de recurso e requisito do portfólio, pode-se calcular a exposição ao mercado de curto prazo ξ (equação (3.4)). Essa exposição indica o volume de energia a ser liquidada ([BRASIL \[2020\]](#), [BRASIL \[2022a\]](#)).

$$\xi_{\kappa,t} = \left(G_{\kappa,t}^p - \sum_{c=1}^{C_v} v_{c,\kappa,t} \right). \quad (3.4)$$

² <https://www.ccee.org.br/web/guest/acervo-ccee>

Deve-se considerar custos referentes à operação dos ativos, como também, os custos com os contratos de compra. Pode-se definir o total de custos como expresso na equação (3.5).

$$R_t^- = h_t \sum_{i=1}^I (\theta_i \cdot G_{i,t}) + \sum_{\kappa=1}^4 \sum_{l=1}^{C_c} (P_c \cdot G_{l,\kappa,t}^c), \quad (3.5)$$

sendo θ_i uma constante cuja unidade é expressa em $R\$/MWh$ que modela o custo com operação e manutenção do ativo pertencente ao conjunto de usinas do portfólio I e C_c é o total de contratos de compra do agente.

Assim, a receita esperada líquida total do portfólio pode ser dada como expressa na equação (3.6).

$$R_t^p = R_t^{C_v} - R_t^- + h_t \sum_{\kappa=1}^4 (\xi_{\kappa,t} \cdot PLD_{\kappa,t}). \quad (3.6)$$

O que foi exposto busca representar a receita de um portfólio de ativos de geração, em um certo horizonte de tempo. A geração das fontes pode ser representada por cenários, assim como o PLD, e, portanto, a receita esperada dependeria ainda do cenário em questão.

3.2 Análise de Diversidade

O autor em [Stirling \[2010\]](#) apresenta uma heurística para avaliação de portfólios de energia considerando análise de diversidade multicritério. No estudo, o intuito é apresentar a diversidade como uma forma de auxiliar na formulação de políticas energéticas mais robustas, no entanto, traz uma abordagem interessante de análise. O autor apresenta que comumente considera-se avaliar diversidade de energia na busca de segurança de suprimento. Porém, outros benefícios são citados, sendo um deles, uma forma de fomentar competitividade no mercado.

Em [Rocha et al. \[2022\]](#), os autores aplicam o conceito de diversidade como objetivo no problema de otimização com vistas a auxiliar a construção de projetos híbridos eólico-fotovoltaico e a minimizar riscos. A diversidade também é analisada nos trabalhos de [Gozgor and Paramati \[2022\]](#) e [Ahmed et al. \[2022\]](#) com o objetivo de avaliar sua relação com o crescimento econômico de países. Estes trabalhos trazem uma abordagem diferente da avaliação de portfólios, porém, interessantes no quesito de definição de como medir esse parâmetro. Os autores em [Kim et al. \[2021\]](#) aplicam teoria moderna de portfólio para construção de portfólios com fontes de baixo impacto ambiental e consideram que a diversificação favorece a redução da dependência de uma única fonte de energia.

As propriedades gerais da diversidade, que são necessárias, mas insuficientes individualmente, são (Stirling [2010]):

- Variedade: representada pelo número de categorias de opções que se tem, como por exemplo, três opções: nuclear, solar ou eólica. Esse parâmetro responde à questão: quantas opções se tem?
- Balanço ou equilíbrio: quantifica a dependência de um sistema em relação a cada opção. Pode ser exemplificado pela capacidade de energia de cada alternativa. A função de balanço buscará responder: o quanto se depende de cada opção?
- Disparidade: busca medir o quanto as opções são diferentes entre si, mediante algum critério, respondendo: o quanto as opções diferem entre si?

Assim, um índice que considere a representação dessas três propriedades gerais pode trazer uma visão mais abrangente da diversidade. O autor de Stirling [2010] apresenta então uma heurística, como ele denomina, expressa em (3.7).

$$\Delta^P = \sum_{i,j(i \neq j)} (d_{i,j})^\beta (p_i p_j)^\delta, \quad (3.7)$$

em que p_i e p_j são representações proporcionais das opções i e j , respectivamente, de um conjunto P . Ao avaliar essa proporção, quantifica-se o balanço ou equilíbrio desse conjunto. $d_{i,j}$ é a distância em um espaço de disparidade entre as opções i e j . O somatório é realizado entre todas as opções do conjunto, e busca quantificar a diversidade do mesmo. Os expoentes δ e β podem ser utilizados para variar essa heurística, capturando mais ou menos uma das quatro propriedades de interesse: variedade, balanço, disparidade e diversidade.

3.3 Caracterização das fontes de energia

Na simulação e/ou otimização de portfólios de energia, no âmbito dessa pesquisa, para representação dos ativos é necessário considerar algumas características principais, são elas:

- Tipo de ativo: qual a fonte de energia ou se é um contrato de compra ou de venda;
- Capacidade instalada do empreendimento e seu fator de capacidade;
- Garantia física definida para o empreendimento, ou no caso de contratos, volume de energia contratado;

- Submercado (em relação ao mercado de energia) em que o ativo está inserido;
- Data considerada para entrada e saída do ativo no portfólio, que se relaciona à sua vida útil, ou tempo de concessão;
- Custos de operação e manutenção característico do empreendimento, ou no caso de contratos, preço de contrato;
- Perfil mensal de geração característico da fonte de energia.

Para a expansão do portfólio, é importante ter ainda:

- Custos de investimento em um empreendimento;
- Taxa mensal de depreciação do ativo;
- Taxa mensal de desconto.

A Empresa de Pesquisa Energética ³, empresa pública federal que tem por finalidade atuar na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético pelo Ministério de Minas e Energia, na publicação do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (BRASIL [2022]) traz o Caderno Parâmetros de Custos - Geração e Transmissão (BRASIL [2022b], BRASIL [2021b]), que contém referências para os valores atuais nessa área sumarizados na Tabela 8.

Tabela 8 – Referências de parâmetros econômicos para fontes renováveis

Tipo de Fonte	Vida útil [anos]	Faixa de CAPEX [R\$/kW]	Fator de capacidade médio [%]	Custos O&M [R\$/kW/ano]
<i>Eólica Onshore</i>	20	3.200 a 5.500	40 a 60	90
Solar Fotovoltaica	25	2.500 a 5.000	20 a 30	50
Pequenas Centrais Hidrelétricas	30	3.500 a 11.500	40 a 50	90

3.4 Formação de preço de energia no mercado brasileiro

No mercado de energia elétrica do Brasil, a CCEE é responsável por verificar as diferenças entre os recursos e requisitos de um agente no processo de contabilização do mercado (BRASIL [2021a]). Essa diferença é valorada ao PLD. Outras variáveis também

³ <https://www.epe.gov.br>

são consideradas nesse processo, mas que não fazem parte do escopo desta pesquisa, como encargos, penalidades e ajustes.

O PLD é calculado diariamente para cada hora do dia seguinte, proveniente de uma cadeia de modelos computacionais oficiais (Newave, Decomp e Dessem). Esses modelos fornecem o Custo Marginal de Operação (CMO) que é a base para calcular o PLD considerando limites estipulados pela ANEEL. O CMO é definido como o custo por unidade de energia produzida para atender a um acréscimo de carga no sistema. A partir do CMO, o cálculo do PLD é dado pela expressão apresentada em (3.8).

$$\begin{cases} PLD_h = CMO_h, & \text{se } PLD_{min,h} \leq CMO_h \leq PLD_{max,h} \\ PLD_h = \widehat{PLD}_h, & \text{se } \sum_{h=1}^{24} PLD_h > PLD_{est} \end{cases}, \quad (3.8)$$

sendo PLD_{est} o valor do PLD máximo estrutural definido (assim como os demais limites) em resolução normativa da agência (BRASIL [2022]). O \widehat{PLD}_h é o valor ajustado pela CCEE em cima da série de PLDs horários de forma a manter a média igual ao valor estrutural.

O fluxograma apresentado na Figura 2 mostra a relação entre os modelos computacionais e a periodicidade até a definição do PLD horário.

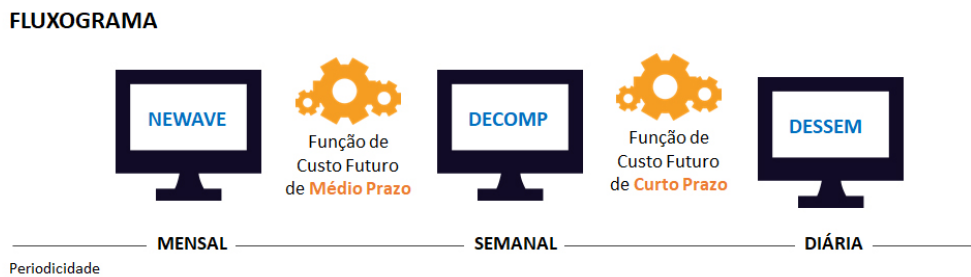


Figura 2 – Fluxograma da metodologia de preços [Fonte: CCEE, 2022].

O Newave (CEPEL [2022]), primeira etapa da cadeia de definição de preços, é o modelo utilizado no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos até cinco anos, em que almeja-se a estratégia de geração hidrotérmica que minimiza o valor esperado do CMO em todo o horizonte de planejamento. A saída deste modelo que se conecta ao modelo Decomp é a função de custo futuro. Extraí-se também séries de geração hidráulica e séries de custos marginais de operação, todas com discretização mensal.

Os modelos Decomp e Dessem são utilizados em sequência de forma a complementar o resultado do Newave e ampliar as características do sistema elétrico para planejamento da operação e definição do preço. Conforme mostrado na Figura 3, esses últimos modelos estariam enquadrados no horizonte de curto prazo.

Para definição do preço de energia, esses modelos buscam considerar as principais influências, que são: a afluência dos rios, os níveis de armazenamento do sistema, a



Figura 3 – Esquemático de horizontes de planejamento.

disponibilidade de geração elétrica das diversas fontes e a demanda de carga do país e de cada submercado. No mercado livre de energia, o PLD é atualmente considerado uma das principais referências para a negociação entre as partes (comprador e vendedor) (Mendonca et al. [2019], Cavaliere et al. [2019]).

A Figura 4 mostra a divisão do Sistema Interligado Nacional nos diferentes submercados. O principal aspecto que referencia a divisão dessas regiões são as restrições de escoamento da transmissão de energia elétrica. Nesse sentido, visto que as restrições são consideradas nos modelos, os valores de PLD se distinguem entre cada submercado, quantificando os intercâmbios de energia, quando ocorrem.

3.5 Revisão Bibliográfica

Para alteração do portfólio de energia de uma empresa, seja para sua expansão, ou para melhoria de sua posição, deve-se levar em conta diversos fatores. O autor em de Freitas [2019] e em de Freitas et al. [2020] apresenta como o crescimento de fontes renováveis na matriz elétrica traz benefícios assim como desafios. No trabalho, o autor mostra como a posição complementar de fontes geradoras podem reduzir o risco financeiro do portfólio do investidor. Seu objetivo é propor e testar um modelo para auxílio à tomada de decisão para investimentos em novos parques geradores pela perspectiva de análise de retornos e riscos, em que se é utilizado modelo de programação estocástica para solução do problema de otimização.

O crescimento do mercado livre de energia traz novos desafios para os agentes que comercializam sua energia. Os agentes passam a se expor a novos patamares de risco (instabilidade regulatória, diversos competidores no mercado livre, características do



Figura 4 – Divisão dos submercados de energia no Brasil [Fonte: Witzler Energia (<https://www.witzler.com.br/2021/12/23/mercado-livre-de-energia/>)].

sistema elétrico brasileiro) e surge, assim, a demanda de novas estratégias comerciais (Bosa [2018]). Então, o autor de Bosa [2018], traz uma metodologia para auxiliar na tomada de decisão sobre a carteira de contratos de compra e venda de uma agente comercializador, por meio de algoritmo para solução de problema multiobjetivo não linear, também considerando risco e retorno.

A otimização do conjunto de contratos alocados em um portfólio também é almejada no trabalho de Maia and Marzano [2018] para um agente gerador, nesse caso, para aumento do retorno ao atuar na comercialização de energia. É aplicada programação estocástica de dois estágios. Em todos os trabalhos anteriormente citados, aplica-se *Conditional Value-at-Risk* como métrica de risco. O trabalho de dos Santos [2013] traz a aplicação de métodos determinísticos de otimização multiobjetivo para maximização da receita esperada e redução do risco de uma carteira de contratos, sendo *Extreme Profit at Risk* a métrica de risco.

O trabalho de Pedrini [2019] apresenta a importância da gestão de portfólio de um agente consumidor, na escolha de contratação para atendimento de sua demanda. A autora

mostra que as fontes renováveis estão cada vez mais competitivas e atrativas no mercado. Ela desenvolve um modelo dois-estágios para otimização do portfólio do consumidor, com decisões binárias relativas à contratação de usina eólica e com decisões contínuas relativas às outras opções de contratação.

Os autores de [Neto et al. \[2017\]](#) trazem uma metodologia para otimização de portfólio e análise de risco de forma a construir um portfólio com fontes renováveis de energia atuando no mercado regulado. São apresentados modelos estocásticos aplicados à geração de cenários e utiliza-se a teoria de portfólio de Markowitz. O trabalho avalia ainda a ação da diversificação das fontes para mitigação de risco. [Tamashiro \[2014\]](#) também apresentou abordagem semelhante.

Outras metodologias são adotadas para análise de portfólio ou avaliação de investimentos. O autor de [de Souza Santos \[2017\]](#) utiliza a teoria de opções reais aplicada ao gerenciamento ativo de portfólios de projetos do setor elétrico, de forma a se ter a avaliação de investimentos considerando riscos, incertezas e estratégias diversas. É aplicado ainda métodos que auxiliam na tomada de decisão (método AHP e árvore de decisão). Em [Gökgöz and Atmaca \[2017\]](#), os autores aplicam teoria moderna de portfólio no problema em questão, comparando alguns métodos relacionados, de forma a melhorar a estratégia de agentes que comercializam geração na sua atuação no mercado. Outro método de decisão multicritério (ANP) foi aplicado no trabalho de [Ozorhon et al. \[2018\]](#) para auxílio na escolha de investimento em fontes renováveis, em que foi levado em consideração aspectos econômicos, sociais, ambientais e técnicos.

Em relação a métricas de risco, o trabalho de [Sousa et al. \[2019\]](#) avalia algumas métricas distintas e também a agregação das mesmas aplicada à comercialização no setor elétrico, como por exemplo, *Value at Risk*, *Conditional Value at Risk*, *Lower Partial Moments* e *Linear Weighted Sum Method*.

Dentre os trabalhos estudados, observa-se a indicação de que a iteração inerente com o mercado de curto prazo adiciona os riscos mais significativos às decisões do agente ([Tamashiro \[2014\]](#), [Cabral et al. \[2015\]](#), [Gökgöz and Atmaca \[2017\]](#), [Coutinho et al. \[2019\]](#)).

No trabalho de [da Silva \[2019\]](#) é apresentado um modelo de decisão para gestão de portfólio de projetos de uma organização. O autor utiliza o método PROMETHEE V e o conceito de portfólio c-ótimo, considerando ainda critérios de caráter subjetivos e restrições de ordem financeira, humana e operacional, de acordo com o problema.

A aplicação da tomada de decisão multicritério adotada neste trabalho (exposição apresentada no capítulo 2) foi utilizada em problemas relacionados ao setor elétrico, como:

- Planejamento e operação relacionados a sistemas de distribuição de energia- [Ekel et al. \[2016\]](#);

- Redução de risco operacional de subestações de energia- [Maia et al. \[2021\]](#);
- Determinação de locais para instalação de sistemas de geração renováveis- [Silva \[2020\]](#).

Destaca-se o trabalho de [Filho \[2022\]](#), que aplica o método para construção de portfólios de energia, no entanto, as principais funções objetivo consideradas relacionam receita esperada e a métrica *Conditional Value at Risk*.

O contexto atual brasileiro favorece o aumento de pesquisas relacionadas à formação de preços por oferta ([Nazare et al. \[2019\]](#), [PSR \[2021\]](#)) e a integração entre avaliar investimentos e considerar a análise de risco ([Aranha \[2021\]](#)). No trabalho [Pérez Odeh et al. \[2018\]](#), os autores apresentam algumas conclusões para desafios atuais de investidores e gestores do setor elétrico no que tange à otimização de portfólio. Destacam-se:

- Uso de estratégias de diversificação para mitigação de riscos (exemplo: variando capacidade instalada, tipo de fonte e localização geográfica) e que avalia a interação dentro do portfólio;
- Modelos mais dinâmicos para lidar com a alta variabilidade de preços de curto prazo e com a relação entre demanda e preço;
- Aprimorar estimativa de preços por meio de modelos estruturais e que representem mais realisticamente o sistema de energia (considerando maior inserção de renováveis, diferentes tecnologias de armazenamento, e outros).

Capítulo 4

Aplicação e Estudo de Caso

4.1 Metodologia

Ao gerenciar um portfólio de ativos de energia, comumente se realiza análises de risco e retorno, como mostrado no capítulo 3. Um dos fortes tipos de risco a que o agente gerador está sujeito são aos riscos de mercado de energia. Este agente tem a garantia física dos seus empreendimentos como um limitante para o montante de energia que pode ser usado na comercialização, de forma a minimizar a exposição ao mercado de curto prazo. Assim, a variabilidade associada às diversas fontes de energia acrescenta níveis de risco relacionados à diferença entre a geração efetiva e o montante comercializado.

Um agente gerador que deseja ampliar o seu portfólio (o que fazer) pode decidir entre opções distintas de investimento para compor seu portfólio de ativos (como fazer). O investimento em um novo empreendimento de geração a ser realizado pelo agente tem efeitos significativos a longo prazo. Mensurar e avaliar as consequências da decisão se torna um desafio.

No setor elétrico, comumente se utiliza métodos herdados da análise financeira para avaliação do risco ao gerenciar o portfólio, como exposto no capítulo 3. Considerando o impacto de longo prazo da decisão de investimento, que agrega maior incerteza para variáveis relacionadas, explorar critérios adicionais que independam do impacto da incerteza associada aos cenários pode ser uma opção.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, inicialmente caracteriza-se os parâmetros necessários para definição do modelo de portfólio de energia e quais as funções objetivo são significativas para sua avaliação. A partir dos critérios, obtêm-se o conjunto de soluções Pareto-ótimas.

Este problema pode ser modelado a partir da alocação de recursos considerando os seguintes objetivos específicos:

- Disponibilização predominante de recursos para projetos/ativos que agregam maior retorno financeiro;
- Disponibilização predominante de recursos para projetos que adicionam maior nível de diversidade ao portfólio;
- Disponibilização predominante de recursos para projetos que reduzem a exposição do portfólio ao mercado de curto prazo (MCP).

4.1.1 Retorno Financeiro

Para o primeiro critério, o retorno financeiro do agente gerador se dá a partir da sua receita líquida esperada, proveniente, basicamente, da venda de energia no mercado e da liquidação de diferenças no MCP. Ou seja, a receita líquida é composta por: o retorno financeiro dos contratos de venda menos os custos com contratos de compra, retorno ou despesas com o MCP, desconto dos custos operativos e de mercado (operação, manutenção, investimento, por exemplo) (de Freitas [2019]Neto et al. [2017]).

Assim, a receita total do portfólio pode ser dada como expressa na equação (4.1), considerando que a variável de decisão é dada pelo volume de energia x_i alocado para cada ativo a ser incluído no portfólio. Esse volume pode ser a capacidade instalada de uma usina ou o volume de energia a ser comprado em um contrato.

$$R_t^p(x_{i,k,t}) = h_t \sum_{\kappa=1}^4 \left(\sum_{c=1}^{C_v} P_c \cdot v_{c,\kappa,t} - \sum_{i=1}^I \theta_i \cdot (G_{i,t} + G(x_{i,\kappa,t})) + \xi_{\kappa,t}(x_{i,\kappa,t}) \cdot PLD_{\kappa,t} \right), \quad (4.1)$$

em que, caso o novo volume de energia seja via contrato de compra, x_i pertencerá ao conjunto de contratos C_c e o custo representado acima por θ_i será o preço do contrato P_c , como apresentado na equação (3.5). A exposição dependerá do recurso previsto (como mostrado na equação (4.3)) para o portfólio, conforme mostrado em (4.2).

$$\xi_{\kappa,t}(x_{i,\kappa,t}) = \left(\sum_{i=1}^I G(x_{i,\kappa,t}) - \sum_{c=1}^{C_v} v_{c,\kappa,t} \right). \quad (4.2)$$

$$G(x_{i,\kappa,t}) = \varepsilon_{i,t} \cdot x_{i,\kappa,t}, \quad (4.3)$$

em que $\varepsilon_{i,t}$ é uma fator de capacidade que representa a geração do ativo i no tempo t , de forma a modelar, por exemplo, o perfil de geração de uma usina no horizonte avaliado e representar o recurso disponível para o portfólio.

Para avaliar a viabilidade do investimento em novos ativos dentro da simulação do portfólio, calcula-se o valor presente líquido (VPL) (equação (4.4)). O VPL retrata o

resultado do fluxo de caixa do portfólio ao longo de um período, incluindo o investimento inicial de capital e o valor residual do investimento, de forma a estimar o lucro sobre o investimento.

$$VPL^p = \sum_{t=1}^T \frac{R_t^p}{(1 + t_x)^t}, \quad (4.4)$$

em que os custos de investimento são descontados em $t = 1$, e o valor residual, em $t = T$, e t_x representa a taxa de desconto aplicada.

4.1.2 Diversidade do Portfólio

Para avaliar o quanto o portfólio de ativos é diverso, utiliza-se a equação apresentada em (4.5). A distância no espaço de disparidade $d_{i,j}$ entre cada ativo é obtida considerando dois atributos: tipo de fonte e submercado ao qual está alocado. Comparando-se as diferenças de cada atributo para o par de ativos, tem-se a disparidade entre eles.

$$\Delta^P = \sum_{i,j(i \neq j)} (d_{i,j})(p_i p_j). \quad (4.5)$$

A parcela que representa a participação do ativo no portfólio (p_i ou p_j) busca quantificar a variedade e equilíbrio do conjunto. Esse valor é calculado de acordo com o expresso em (4.6), dado pela garantia física estimada das alternativas de investimento ou pela garantia física dos ativos. Portanto, a diversidade final é dada pelo somatório do comparativo aqui descrito entre cada ativo do portfólio, sem repetições.

$$\begin{cases} p_i = \frac{\bar{\varepsilon}_i \cdot x_{i,\kappa}}{g^p}, & x \notin I \\ p_i = \frac{g^i}{g^p}, & x \in I \end{cases}, \quad (4.6)$$

em que I é o conjunto portfólio, $\bar{\varepsilon}_i$ é o fator de capacidade médio da fonte para estimativa da garantia física e g^i é a garantia física dos ativos já pertencentes ao portfólio. No caso de contratos, avalia-se o volume de energia contratado como p_i . O denominador em (4.6) é a garantia física total do portfólio g^p , incluindo o valor estimado para as alternativas.

4.1.3 Exposição ao mercado de curto prazo

A equação (4.2) apresenta o cálculo da exposição ao MCP para cada instante de tempo. De forma a avaliar todo o horizonte estudado, pode-se calcular a exposição média no período, de acordo com o exposto em (4.7). Esse critério busca avaliar o quanto o portfólio está exposto à liquidação no MCP. Almeja-se minimizar o módulo da exposição média, objetivo de caráter conservador, visto que a preferência é manter o portfólio menos exposta positiva ou negativamente.

$$\bar{\xi}(x_{i,\kappa}) = \frac{\sum_{t=1}^T \left(h_t \cdot \sum_{\kappa=1}^4 \left(\sum_{i=1}^I G(x_{i,\kappa,t}) - \sum_{c=1}^{C_v} v_{c,\kappa,t} \right) \right)}{\sum_{t=1}^T h_t}. \quad (4.7)$$

4.1.4 Restrição do problema

Considerando que se deseja definir qual a alocação de recursos para expansão do portfólio, é necessário conhecer a disponibilidade total de recursos. Além disso, é importante definir se há alguma limitação entre as opções de investimento, por exemplo, valor mínimo (\underline{x}_i) e máximo (\bar{x}_i) para alocação. Essas questões estão expressas em (4.8).

$$\sum_{i=1}^I B_i \cdot x_i = R \mid \underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i, \quad (4.8)$$

em que B_i representa a referência de capital para investimento na opção i .

4.1.5 Tomada de Decisão

De posse das soluções inicialmente obtidas, a próxima etapa é a construção de matrizes *payoff*, que refletem as consequências da escolha de cada alternativa. A partir da análise dessas matrizes, é possível a escolher racionalmente as soluções. Aplica-se o que foi exposto ao longo do capítulo 2.

A partir do modelo adotado, são construídos estudos de caso em cima de um portfólio fictício de ativos em energia e aplicada a tomada de decisão multicritério para alocação de recursos na expansão desse portfólio.

4.2 Estudos de Caso

Nas próximas seções são apresentados os dois estudos de caso realizados com o objetivo de demonstrar a aplicação desta pesquisa. Os estudos montados são fictícios, porém, foram baseados em agentes de geração reais que atuam no mercado de energia brasileiro. O fluxograma mostrado na Figura 5 esquematiza os estudos.

4.2.1 Horizonte de estudo

Conforme apresentado no capítulo 3 e também explícito nas definições dos critérios apresentados nas seções anteriores, é necessário ter ao menos uma projeção de preços para o MCP. Nesse sentido, escolheu-se cinco projeções baseadas nas rodadas oficiais do modelo Newave disponíveis nos bancos de dados da EPE¹ e da CCEE².

¹ <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/>

² <https://www.ccee.org.br/acervo-ccee>

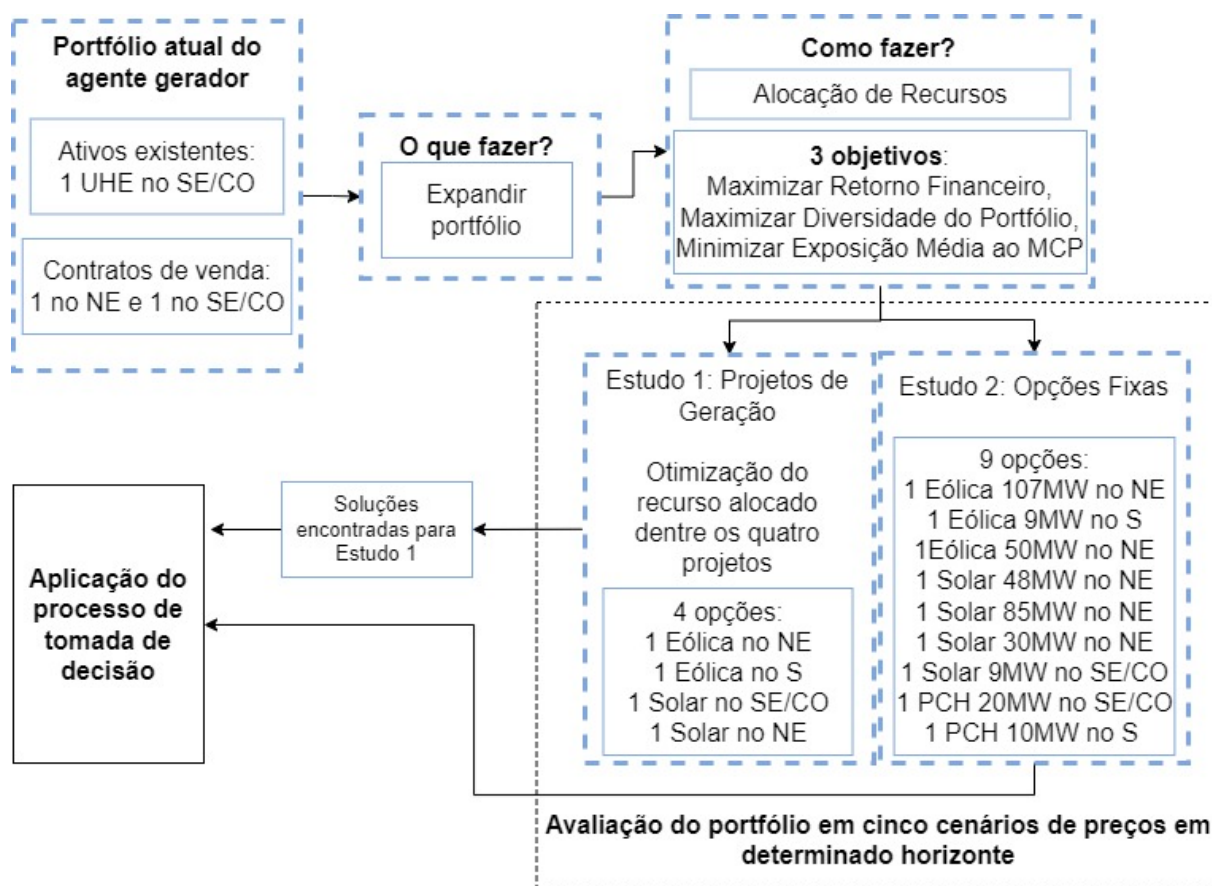


Figura 5 – Esquema metodológico dos estudos de caso.

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam os valores dos preços de liquidação das diferenças para os submercados: Sudeste (SE/CO), Sul (S) e Nordeste (NE), respectivamente. Esses PLDs foram obtidos das cinco rodadas de exemplo para o horizonte de estudo a ser considerado neste trabalho, entre 2023 e 2025.

Pode-se observar pelos gráficos apresentados que a rodada "PDE-2029" se destaca entre os valores de projeção de preço com uma média de $122,8 \text{ R\$/MWh}$ no Sudeste. A menor média no horizonte para este mesmo submercado está na rodada "PMO-10/2022": $59,33 \text{ R\$/MWh}$.

4.2.2 Estudo de caso 1: Alocação de recursos em projetos de geração

Considera-se um agente gerador que possui o portfólio atual composto pelos ativos apresentados na Tabela 9. Busca-se, então, uma solução de investimento que defina o recurso a ser alocado para cada opção de projeto através da capacidade instalada do ativo de geração. Para as alternativas de projeto a investir, foram consideradas as opções da Tabela 10, que são apresentadas pelas características definidas na seção 3.3.

No cálculo do recurso do portfólio, considera-se um perfil de geração representativo

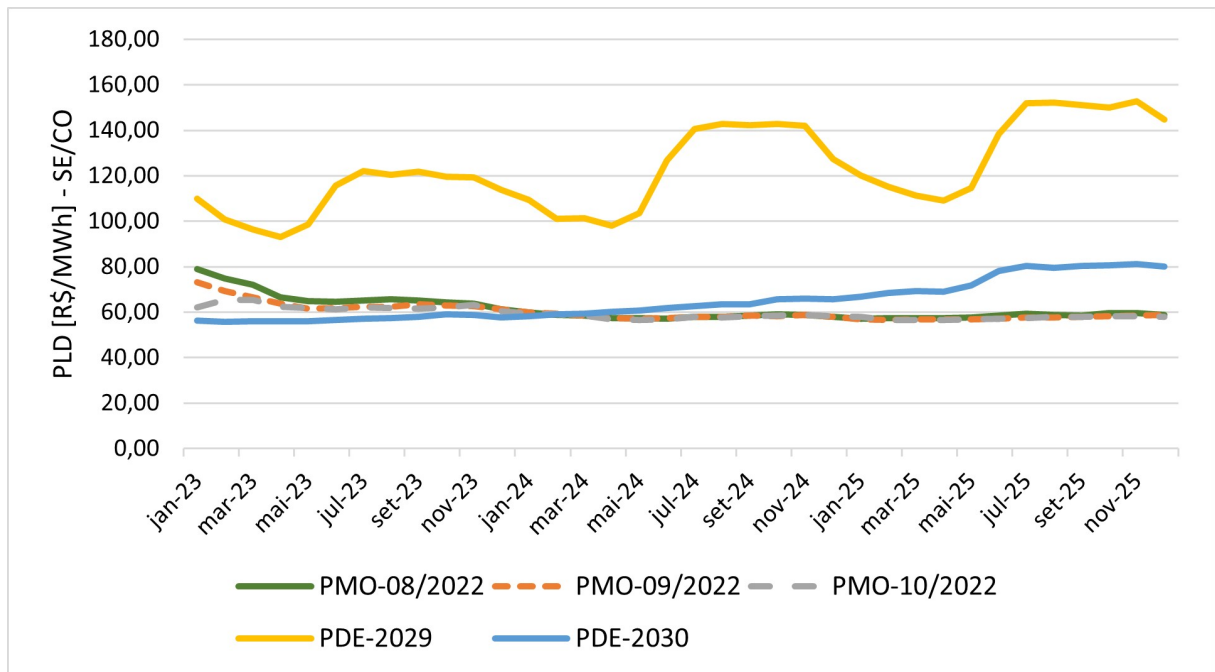


Figura 6 – PLD do submercado Sudeste

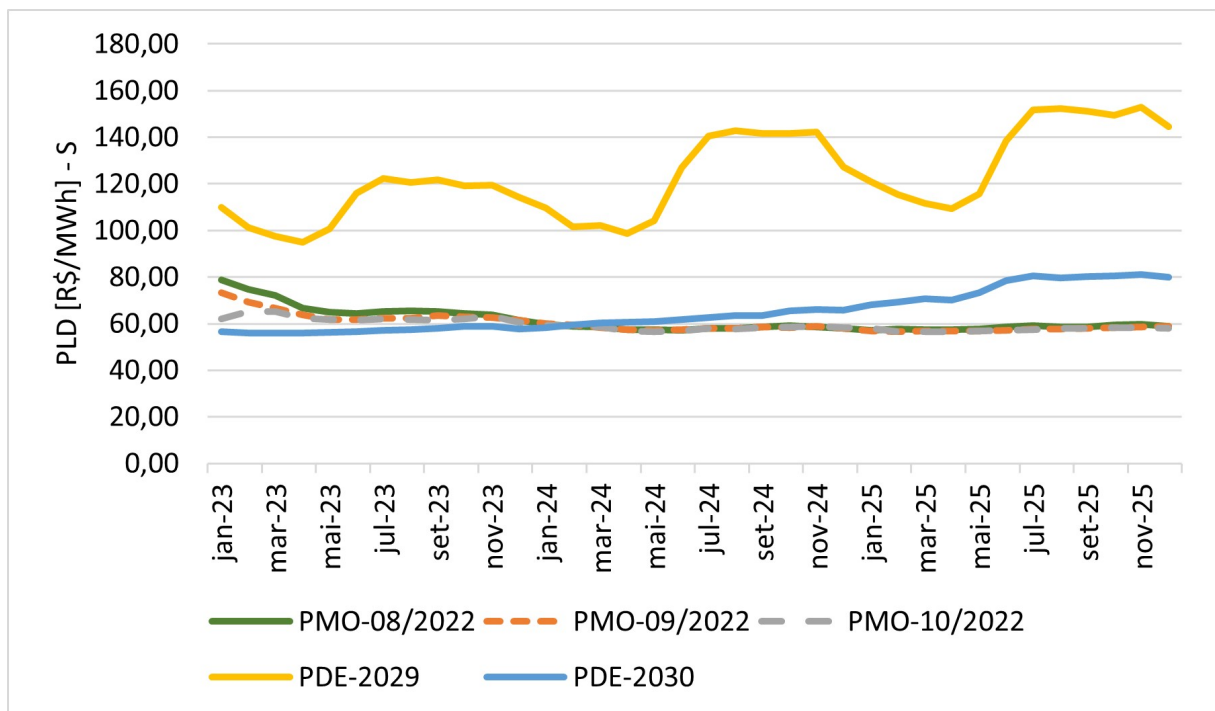


Figura 7 – PLD do submercado Sul

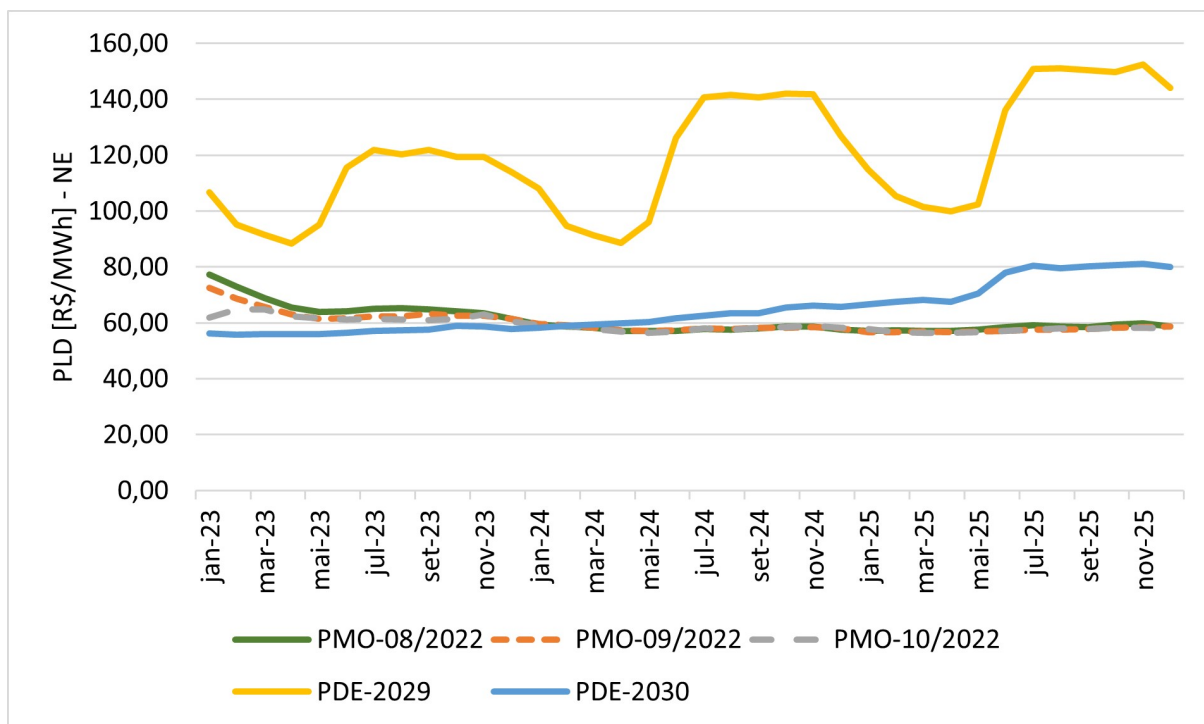


Figura 8 – PLD do submercado Nordeste

Tabela 9 – Definição do portfólio atual de ativos

Ativo	Tipo	Garantia Física/ Volume contratado	Custos [R\$/MWh]
UHE SE/CO	Hidrelétrica pertencente ao MRE	132 MWm	Não se aplica
Venda SE/CO	Contrato de Venda Firme	230 MWm	142
Venda NE	Contrato de Venda Firme	100 MWm	170

Tabela 10 – Opções de projetos para investimento

Alter-nativa	Tipo	Fator de Capacidade [%]	Sub-mercado	Vida útil [anos]	Custos de O&M [R\$/MWh]	Taxa de depreciação [% a. m.]
AE1	Eólica	52	NE	20	10,274	0,4074
AE2	Eólica	30	S	20	10,274	0,4074
AS1	Solar	18	SE/CO	25	5,708	0,3273
AS2	Solar	21	NE	25	5,708	0,3273

mensal definido através dos dados históricos disponíveis para a região do projeto entre os anos de 2015 e 2021 ³. Através dos dados históricos, obteve-se um fator de capacidade médio mensal para cada usina. Os valores estão apresentados no gráfico da Figura 9. Os valores de custos de operação e manutenção e taxa de depreciação foram definidos baseados em BRASIL [2022b] e BRASIL [2021b], assim como o custo de investimento por fonte e a taxa de desconto mensal considerada (apresentadas na Tabela 11).

Tabela 11 – Dados financeiros utilizados nos estudos de caso

Tipo de Fonte	Eólica	Solar	PCHs
Custo de investimento [R\$/kW]	4650	3650	8500
Taxa de desconto [% a. m.]	0,6434		

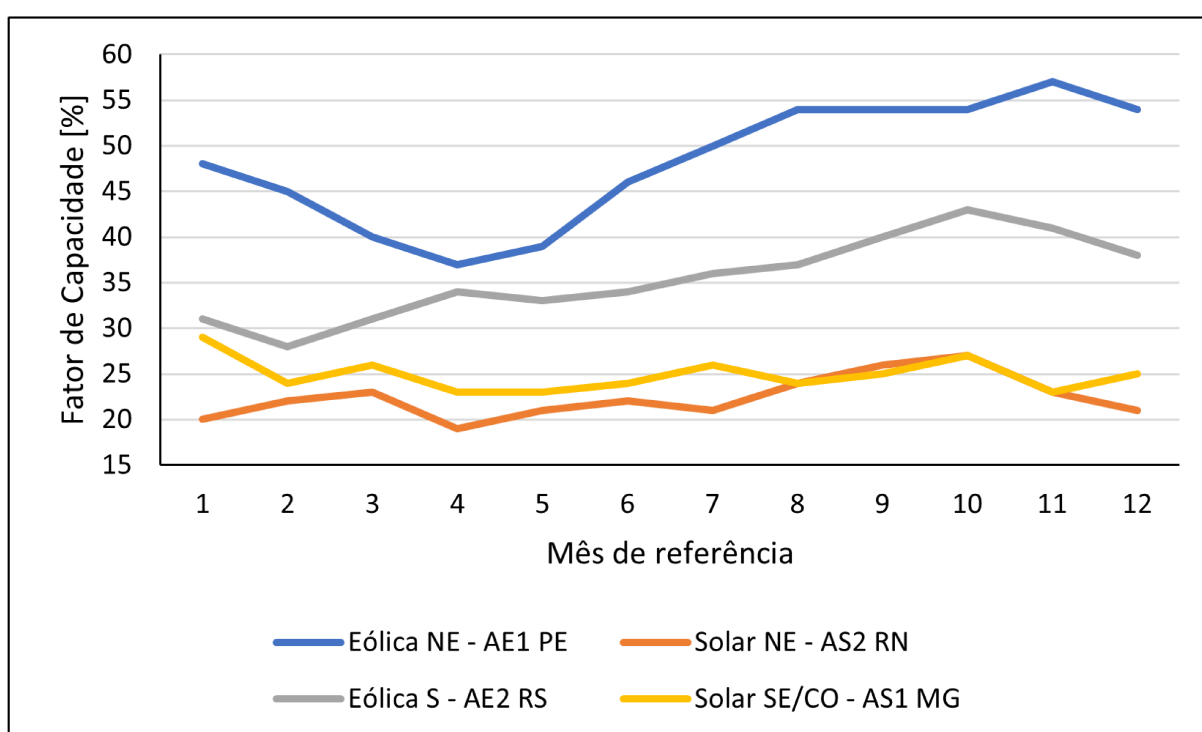


Figura 9 – Fator de capacidade mensal representativo para as opções de projeto

Na avaliação da diversidade do portfólio foi definido um espaço de disparidade entre os projetos. Para exemplificar, considere as opções AE2 e AS1 apresentadas na Tabela 10: elas são diferentes tanto em tipo de fonte quanto em qual submercado estão alocadas, portanto, tem valor 2 de disparidade. O nível de diversidade de cada versão do portfólio simulada foi calculado assim como apresentado na seção 4.1.2.

4.2.2.1 Resultados

Resolvendo o problema multiobjetivo apresentado para alocação de recursos, escolheu-se cinco soluções localmente ótimas. Esses resultados estão apresentados a seguir:

³ Dados históricos de geração disponíveis em <https://www.ccee.org.br/web/guest/dados-e-analises/dados-geracao>

- **S1:** 80 MW da usina eólica AE1, 55,1 MW da usina eólica AE2 e 19,85 MW da usina solar AS1;
- **S2:** 46,6 MW da usina eólica AE1, 46,6 MW da usina eólica AE2, 36,6 MW da usina solar AS1 e 36,6 MW da usina solar AS2;
- **S3:** 80 MW da usina eólica AE1, 10 MW da usina solar AS1 e 80 MW da usina solar AS2;
- **S4:** 80 MW da usina eólica AE1, 61,7 MW da usina solar AS1 e 28,3 MW da usina solar AS2;
- **S5:** 80 MW da usina eólica AE1, 40,45 MW da usina eólica AE2 e 38,5 MW da usina solar AS1.

Em todos os casos, foi considerada a restrição de recurso total igual a R\$ 700,5 milhões. Em cada projeto, a capacidade instalada poderia variar entre 0 e 80 MW, sendo que a expansão total deveria ser no mínimo de 10 MW. Algumas dessas soluções foram comuns em mais de um cenário considerado. A representação do perfil de geração dos ativos, conforme mostrado na Figura 9, foi importante para indicar o recurso do portfólio de forma adequada.

As matrizes *payoff* de cada objetivo estão apresentadas nas Tabelas 12, 13 e 14. Os objetivos de retorno e diversidade, espera-se maximizar, enquanto para a exposição, busca-se minimizar. No entanto, em todos os cálculos, pode-se considerar um problema de minimização, para o negativo de retorno e diversidade (assim como no Estudo de caso 2).

Tabela 12 – Matriz *payoff* para objetivo de retorno financeiro

Alternativas	PMO 09/2022	PDE 2030	PMO 10/2022	PMO 08/2022	PDE 2029
S1	730,37	730,33	732,25	726,93	558,89
S2	727,84	727,00	729,84	724,24	546,39
S3	732,42	731,78	734,35	728,77	553,37
S4	734,19	733,61	736,08	730,65	557,59
S5	731,64	731,47	733,52	728,19	559,16

Tabela 13 – Matriz *payoff* para objetivo de diversidade do portfólio

Alternativas	PMO 09/2022	PDE 2030	PMO 10/2022	PMO 08/2022	PDE 2029
S1	0,451	0,451	0,451	0,451	0,451
S2	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420
S3	0,448	0,448	0,448	0,448	0,448
S4	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420
S5	0,441	0,441	0,441	0,441	0,441

Tabela 14 – Matriz *payoff* para objetivo de exposição ao MCP

Alternativas	PMO 09/2022	PDE 2030	PMO 10/2022	PMO 08/2022	PDE 2029
S1	146,92	137,10	147,38	146,28	129,32
S2	153,65	143,84	154,11	153,01	136,05
S3	151,02	141,20	151,48	150,38	133,42
S4	149,72	139,90	150,18	149,07	132,12
S5	147,47	137,66	147,93	146,83	129,88

Com base nas matrizes *payoff* apresentadas, foi possível construir as matrizes dos critérios de escolha conforme as equações (2.20), (2.21), (2.22) e (2.23). As matrizes dos critérios podem ser vistas nas Tabelas 15, 16 e 17 para cada função objetivo.

Tabela 15 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de retorno financeiro

Alternativas	F_1^W	F_1^L	F_1^S	F_1^H
S1	558,89	695,75	-3,83	602,23
S2	546,39	691,06	-12,77	592,25
S3	553,37	696,14	-5,79	598,62
S4	557,59	698,42	-1,57	602,22
S5	559,16	696,80	-2,56	602,75

Tabela 16 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de diversidade do portfólio

Alternativas	F_2^W	F_2^L	F_2^S	F_2^H
S1	0,451	0,451	0,000	0,451
S2	0,420	0,420	-0,031	0,420
S3	0,448	0,448	-0,003	0,448
S4	0,420	0,420	-0,031	0,420
S5	0,441	0,441	-0,010	0,441

Tabela 17 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de exposição ao MCP

Alternativas	F_3^W	F_3^L	F_3^S	F_3^H
S1	147,38	141,40	0,00	142,86
S2	154,11	148,13	6,73	149,60
S3	151,48	145,50	4,10	146,97
S4	150,18	144,20	2,80	145,66
S5	147,93	141,95	0,56	143,42

A partir das matrizes dos critérios de escolha calculadas, pode-se aplicar a modificação apresentada na Tabela (6) da seção 2.3. Em seguida, a partir das matrizes modificadas (Tabelas 18 a 20), obteve-se a matriz agregada final (Tabela 21), em que os valores foram agregados pelo valor mínimo.

Tabela 18 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de retorno financeiro

Alternativas	μ_1^W	μ_1^L	μ_1^S	μ_1^H
S1	-0,98	-0,64	-0,80	-0,95
S2	0,00	0,00	0,00	0,00
S3	-0,55	-0,69	-0,62	-0,61
S4	-0,88	-1,00	-1,00	-0,95
S5	-1,00	-0,78	-0,91	-1,00

Tabela 19 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de diversidade do portfólio

Alternativas	μ_2^W	μ_2^L	μ_2^S	μ_2^H
S1	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
S2	0,00	0,00	0,00	0,00
S3	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89
S4	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
S5	-0,67	-0,67	-0,67	-0,67

Tabela 20 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de exposição ao MCP

Alternativas	μ_3^W	μ_3^L	μ_3^S	μ_3^H
S1	1,00	1,00	1,00	1,00
S2	0,00	0,00	0,00	0,00
S3	0,39	0,39	0,39	0,39
S4	0,58	0,58	0,58	0,58
S5	0,92	0,92	0,92	0,92

Tabela 21 – Matriz *payoff* agregada final para os critérios de escolha

Alternativas	μ^W	μ^L	μ^S	μ^H
S1	0,98	0,64	0,80	0,95
S2	0,00	0,00	0,00	0,00
S3	0,39	0,39	0,39	0,39
S4	0,01	0,01	0,01	0,01
S5	0,67	0,67	0,67	0,67

Com a matriz final agregada apresentada em 21, somente o critério de *Laplace* não apontou a solução 1. No entanto, essa solução teve o melhor desempenho nos outros critérios.

Observou-se que os cenários apresentaram comportamentos semelhantes, indicando soluções parecidas. Como apresentado na seção 4.2.1, os preços de três cenários tiveram variações pouco expressivas ao longo do horizonte de estudo, o que favoreceu esse desempenho. Considera-se que estes cenários podem não capturar fatores de incertezas suficientes, sendo ainda mais relevante um objetivo que independa dessa variação.

4.2.3 Estudo de caso 2: Alocação de recursos em opções fixas

Considerando o mesmo portfólio atual apresentado na Tabela 9, avalia-se a aplicação da metodologia de decisão ao decidir em cima de opções fixas para investimento. As alternativas são apresentadas na Tabela 22, em que a capacidade da usina já está definida, portanto, o investimento total também. Nesse caso, busca-se uma solução que componha o portfólio de acordo com os critérios apresentados.

Tabela 22 – Alternativas para investimento

Alter-nativa	Tipo	Garantia Física [MWm]	Sub-mercado	Capacidade Instalada [MW]	Custos de O&M [R\$/MWh]	Taxa de depreciação [% a. m.]
E1	Eólica	56,0	NE	107	10,274	0,4074
E2	Eólica	2,7	S	9	10,274	0,4074
E3	Eólica	15,0	NE	50	10,274	0,4074
S1	Solar	10,6	NE	48	5,708	0,3273
S2	Solar	17,8	NE	85	5,708	0,3273
S3	Solar	5,1	NE	30	5,708	0,3273
S4	Solar	1,7	SE/CO	9	5,708	0,3273
P1	PCH	10,0	SE/CO	20	10,274	0,2709
P2	PCH	5,0	S	10	10,274	0,2709

As Figuras 10 e 11 apresentam os perfis de geração representativos das usinas que são alternativas de solução. Para este estudo também são usados os mesmos dados apresentados na Tabela 11.

4.2.3.1 Resultados

Dentre as opções para investimento considerando os empreendimentos com a capacidade instalada definida, pode-se simular o desempenho do portfólio para cada perfil de preço (cenário) e cada critério. As matrizes *payoff* de cada objetivo estão apresentadas nas Tabelas 23, 24 e 25.

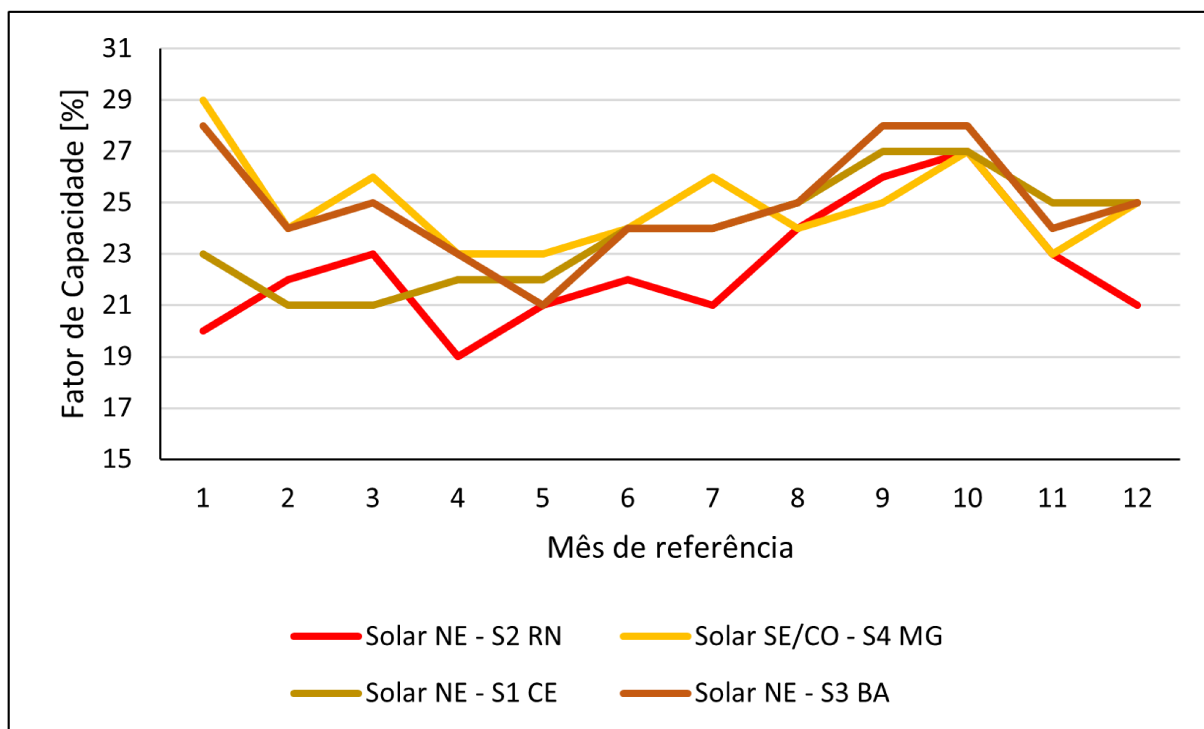


Figura 10 – Fator de capacidade mensal representativo para as usinas solares

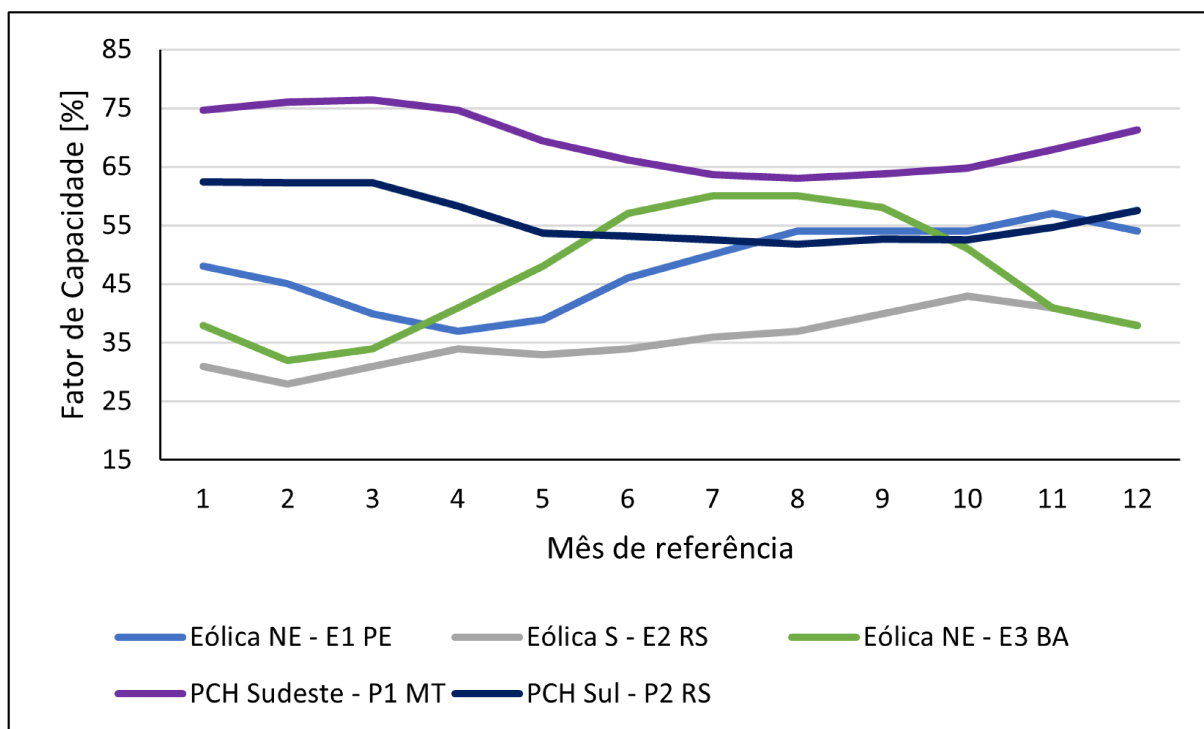


Figura 11 – Fator de capacidade mensal representativo para as usinas eólicas e as pequenas centrais hidrelétricas

Tabela 23 – Matriz *payoff* para objetivo de retorno financeiro

Alternativas	PMO 10/2022	PMO 09/2022	PDE 2030	PDE 2029	PMO 08/2022
P1	844,14	841,43	835,92	597,96	836,70
P2	857,98	855,12	848,87	599,88	850,13
E1	779,53	777,48	776,15	588,47	773,62
E2	865,59	862,67	856,23	604,11	857,59
E3	829,52	826,93	822,69	597,34	822,36
S1	838,39	835,63	830,01	588,54	830,74
S2	809,20	806,57	801,71	569,97	801,88
S3	852,55	849,73	843,66	596,85	844,75
S4	868,04	865,12	858,54	605,12	860,02

Tabela 24 – Matriz *payoff* para objetivo de diversidade do portfólio

Alternativas	PMO 10/2022	PMO 09/2022	PDE 2030	PDE 2029	PMO 08/2022
P1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P2	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
E1	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418
E2	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
E3	0,183	0,183	0,183	0,183	0,183
S1	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137
S2	0,209	0,209	0,209	0,209	0,209
S3	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072
S4	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013

Tabela 25 – Matriz *payoff* para objetivo de exposição ao MCP

Alternativas	PMO 10/2022	PMO 09/2022	PDE 2030	PDE 2029	PMO 08/2022
P1	196,60	196,14	186,32	178,54	195,50
P2	204,84	204,38	194,57	186,79	203,74
E1	158,71	158,24	148,43	140,65	157,60
E2	207,26	206,80	196,98	189,20	206,16
E3	187,17	186,71	176,89	169,11	186,07
S1	198,98	198,52	188,71	180,92	197,88
S2	191,48	191,02	181,21	173,43	190,38
S3	202,98	202,52	192,70	184,92	201,88
S4	208,16	207,70	197,89	190,11	207,06

De posse das matrizes *payoff* apresentadas, construiu-se as matrizes dos critérios de escolha, que podem ser vistas nas Tabelas 26, 27 e 28 para cada função objetivo.

Tabela 26 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de retorno financeiro

Alternativas	F_1^W	F_1^L	F_1^S	F_1^H
P1	597,96	791,23	-23,91	659,50
P2	599,88	802,40	-10,06	664,40
E1	588,47	739,05	-88,51	636,23
E2	604,11	809,24	-2,46	669,48
E3	597,34	779,77	-38,53	655,39
S1	588,54	784,66	-29,65	651,00
S2	569,97	757,87	-58,84	629,78
S3	596,85	797,51	-15,49	660,77
S4	605,12	811,37	0,00	670,85

Tabela 27 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de diversidade do portfólio

Alternativas	F_2^W	F_2^L	F_2^S	F_2^H
P1	0,000	0,000	-0,418	0,000
P2	0,035	0,035	-0,383	0,035
E1	0,418	0,418	0,000	0,418
E2	0,039	0,039	-0,379	0,039
E3	0,183	0,183	-0,235	0,183
S1	0,137	0,137	-0,281	0,137
S2	0,209	0,209	-0,209	0,209
S3	0,072	0,072	-0,347	0,072
S4	0,013	0,013	-0,406	0,013

Tabela 28 – Matriz dos critérios de escolha para objetivo de exposição ao MCP

Alternativas	F_3^W	F_3^L	F_3^S	F_3^H
P1	196,60	190,62	37,89	192,09
P2	204,84	198,86	46,14	200,33
E1	158,71	152,73	0,00	154,19
E2	207,26	201,28	48,55	202,75
E3	187,17	181,19	28,46	182,66
S1	198,98	193,00	40,28	194,47
S2	191,48	185,50	32,78	186,97
S3	202,98	197,00	44,27	198,47
S4	208,16	202,18	49,46	203,65

As matrizes modificadas calculadas estão apresentadas nas Tabelas 29 a 31, e, por fim, obteve-se a matriz agregada final (Tabela 32), em que os valores também foram agregados pelo valor mínimo.

A partir do resultado exposto na Tabela 32, a solução final indicada foi o investimento na alternativa E3, sendo que três dos quatro critérios apontaram para ela. Pode-se

Tabela 29 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de retorno financeiro

Alternativas	μ_1^W	μ_1^L	μ_1^S	μ_1^H
P1	-0,80	-0,72	-0,73	-0,72
P2	-0,85	-0,88	-0,89	-0,84
E1	-0,53	0,00	0,00	-0,16
E2	-0,97	-0,97	-0,97	-0,97
E3	-0,78	-0,56	-0,56	-0,62
S1	-0,53	-0,63	-0,66	-0,52
S2	0,00	-0,26	-0,34	0,00
S3	-0,76	-0,81	-0,82	-0,75
S4	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00

Tabela 30 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de diversidade do portfólio

Alternativas	μ_2^W	μ_2^L	μ_2^S	μ_2^H
P1	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08
E1	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
E2	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09
E3	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44
S1	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33
S2	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50
S3	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17
S4	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03

Tabela 31 – Matriz modificada para os critérios de escolha para objetivo de exposição ao MCP

Alternativas	μ_3^W	μ_3^L	μ_3^S	μ_3^H
P1	0,23	0,23	0,23	0,23
P2	0,07	0,07	0,07	0,07
E1	1,00	1,00	1,00	1,00
E2	0,02	0,02	0,02	0,02
E3	0,42	0,42	0,42	0,42
S1	0,19	0,19	0,19	0,19
S2	0,34	0,34	0,34	0,34
S3	0,10	0,10	0,10	0,10
S4	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 32 – Matriz *payoff* agregada final para os critérios de escolha

Alternativas	μ^W	μ^L	μ^S	μ^H
P1	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,07	0,07	0,07	0,07
E1	0,53	0,00	0,00	0,16
E2	0,02	0,02	0,02	0,02
E3	0,42	0,42	0,42	0,42
S1	0,19	0,19	0,19	0,19
S2	0,00	0,26	0,34	0,00
S3	0,10	0,10	0,10	0,10
S4	0,00	0,00	0,00	0,00

observar nesse exemplo que ao avaliar alternativas da forma como foi proposta: alternativas fixas sem garantia de otimalidade, as funções objetivo apresentaram comportamento semelhante. Nas matrizes *payoff* apresentadas (23 a 25), tem-se a mesma alternativa em destaque em todos os cenários, porém diferente entre si para os critérios. Portanto, visto que os objetivos são conflitantes, com essa metodologia, pode-se encontrar uma solução mais harmoniosa entre eles.

Capítulo 5

Conclusão

Esta pesquisa apresentou uma metodologia para construção de portfólio de energia de um agente gerador explorando como um dos critérios o nível de diversidade do portfólio. Aplicou-se a modelagem de alocação de recursos e o esquema geral de tomada de decisão multicritério sob condições de incerteza, conforme o objetivo estabelecido na seção 1.2.

Sabe-se que no planejamento de médio e longo prazo, a incerteza é um fator considerável. No entanto, ter cenários representativos que sejam significativos para avaliar o problema pode ser um desafio. Nesse sentido, a adoção proposta do critério de diversidade, cujo valor não varia com os cenários, se mostrou útil de acordo com os resultados apresentados para apontar uma solução que acrescenta variedade e disparidade ao portfólio. Em um contexto, conforme os estudos de caso consideraram, em que os cenários não se mostram amplos das diversas possibilidades, este critério se mostra coerente para a tomada de decisão.

Pode-se ver que os cenários utilizados nos estudos de caso que são projeções de preços de rodadas oficiais de estudos da EPE e CCEE não apresentaram variações significativas. O critério de diversidade busca apontar soluções que minimize riscos do portfólio independente das possibilidades de preços e pode ser considerado em conjunto aos critérios de retorno financeiro e exposição, conforme mostrado.

A análise de diversidade apresentada, apesar de inicial, auxilia o tomador de decisão a obter soluções que exploram variedade, equilíbrio e disparidade do portfólio, características que, quando consideradas em conjunto, são fundamentais para definir a diversidade. As soluções, dentro do limite de recurso disponível, possibilitaram a expansão do portfólio reduzindo a dependência em uma única fonte de geração e também em uma única região para atuação no mercado. O contexto considerado de investimento em fontes renováveis se adequa à busca atual por uma matriz mais sustentável.

Foi possível, nas aplicações realizadas, obter soluções harmoniosas para o problema multicritério explorado. Conclui-se que a metodologia pode ser uma ferramenta

importante para auxiliar o agente gerador ao tomar decisão sobre seu portfólio de energia, principalmente no quadro atual do setor elétrico brasileiro. E conforme observado na literatura, essa metodologia tem sido aplicada satisfatoriamente em vários problemas do setor e também de outras áreas.

Os demais critérios considerados, além da diversidade, integram o conceito de simulação do portfólio na comercialização: a estimativa de retorno esperado dos investimentos e da exposição ao mercado de curto prazo. Para os estudos de caso, considerou-se uma posição conservadora do tomador de decisão, buscando reduzir a exposição média do portfólio, independente se esta foi positiva ou negativa. Observou-se que considerar um perfil de geração dos ativos foi importante para caracterizar o recurso do portfólio adequadamente.

Por fim, algumas simplificações adotadas para esta pesquisa podem ser sugestões de trabalhos futuros:

- Adicionar mais atributos dentro do critério de diversidade, de forma a captar outras características dos ativos/alternativas;
- Considerar combinações de dados iniciais e/ou cenários para representar o perfil de geração das fontes;
- Ampliar as opções de investimento, adicionando, inclusive, contratos a serem firmados de venda e/ou compra.

Referências

- Ahmed, N. , Sheikh, A. A. , Mahboob, F. , Ali, M. S. e. , Jasińska, E. , Jasiński, M. , Leonowicz, Z. , and Burgio, A. . Energy diversification: A friend or foe to economic growth in nordic countries? a novel energy diversification approach. *Energies*, 15(15), 2022. ISSN 1996-1073. doi: 10.3390/en15155422. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/15/5422>.
- Aranha, A. S. V. D. . Risk-constrained Optimal Dynamic Trading Strategies Under Short- and Long-term Uncertainties. Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2021.
- Aravossis, K. and Strantzali, E. . Decision making in renewable energy investments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55:885–898, 2016.
- Bellman, R. E. and Zadeh, L. A. . Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*, 17(4):B-141–B-164, 1970. doi: 10.1287/mnsc.17.4.B141. URL <https://doi.org/10.1287/mnsc.17.4.B141>.
- Belyaev, L. S. . A practical approach to choosing alternate solutions to complex optimization problems under uncertainty. Iiasa research memorandum, IIASA, Laxenburg, Austria, January 1977. URL <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/808/>.
- Bosa, D. A. . Gerenciamento de Riscos e Otimização de Carteira de Contratos de Compra e Venda de Energia Elétrica. Master's thesis, Universidade Federal do Paraná, 2018.
- BRASIL. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. GLOSSÁRIO DE TERMOS DA CCEE, Março 2007.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 674, DE 11 DE AGOSTO DE 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015674.pdf>, Agosto 2015.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Relatório do Grupo Temático: Abertura de Mercado. Technical report, GT Modernização do Setor Elétrico - Portaria MME no 187/2019, Julho 2019a.

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. PORTARIA Nº 403, DE 29 DE OUTUBRO DE 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-403-de-29-de-outubro-de-2019-224516297>, Outubro 2019b.
- BRASIL. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Balanço Energético, Janeiro 2020.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 957, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021957.html>, Dezembro 2021a.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Caderno de Preços da Geração. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao>, Agosto 2021b.
- BRASIL. Senado Federal. PL 414/2021. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2270036>, Fevereiro 2021c.
- BRASIL. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Consolidação de Resultados, Março 2022a.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Parâmetros de Custos - Geração e Transmissão. Disponível em: 11nq.com/Fq4Y1, Fevereiro 2022b.
- BRASIL. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Mecanismo de Realocação de Energia, Fevereiro 2022c.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>, Fevereiro 2022.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.032, DE 26 DE JULHO DE 2022. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20221032.html>, Julho 2022.
- Cabral, R. S. , Sacchi, R. , Hansen, P. , Leme, H. , C Rosa, L. F. S. , de, Maciel, D. , Barroso, L. , and C Lobato, M. V. , de. Gestão de Risco na Comercialização de Energia: Situação Atual e Proposta de Melhores Práticas. *XVIII Seminário de Planejamento Econômico - Financeiro do Setor Elétrico - Rio de Janeiro/RJ*, 2015.
- Cavaliere, M. A. , Silva, E. G. , de Souza e, Bezerra, B. V. , Granville, S. , and Pereira, M. V. F. . Avaliação dos Impactos do Preço Horário na Precificação de Contratos no Ambiente de Comercialização Livre. *"XXV SNTPEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica"*, 2019.

- Cayir Ervural, B. , Evren, R. , and Delen, D. . A multi-objective decision-making approach for sustainable energy investment planning. *Renewable Energy*, 126:387–402, 2018. ISSN 0960-1481. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.051>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118303628>.
- CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. NEWAVE. Disponível em: <https://www.cepel.br/?s=newave>, Outubro 2022.
- Coutinho, A. , Sodré, E. , Salim, R. , Dantas, M. , and Neto, A. C. . Análise de Portfólio de Geração Eólica e Solar com Armazenamento em Mercados de Energia Horário. "XXV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica", 2019.
- Silva, L. B. L. , da. Modelo Multicritério para Alocação de Recursos no Setor Elétrico com Base no Promethee V Usando o Conceito de Portfólio C-Ótimo. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2019.
- Freitas, R. A. , de. Modelo estocástico para auxílio à tomada de decisão em investimentos de geração de energia renovável a partir do portfólio e da aversão ao risco do investidor. Master's thesis, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, 2019.
- Freitas, R. A. , de, Vogel, E. P. , Korzenowski, A. L. , and Rocha, L. A. O. . Stochastic model to aid decision making on investments in renewable energy generation: Portfolio diffusion and investor risk aversion. *Renewable Energy*, 162:1161–1176, 2020.
- Souza Santos, R. M. , de. Modelo de Gerenciamento Ativo de Portfólios de Projetos de Investimento em Energia Fundamentado pela Teoria de Opções Reais. Master's thesis, Faculdade IETEC, 2017.
- Santos, F. F. G. , dos. Gerenciamento de Riscos: Otimização Multiobjetivo e Análise de Portfólio de Compra e Venda de Energia. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- Ekel, P. , Martini, J. , and Palhares, R. . Multicriteria analysis in decision making under information uncertainty. *Applied Mathematics and Computation*, 200(2):501–516, 2008. ISSN 0096-3003. doi: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.11.024>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300307011307>. Special Issue on The Foz2006 Congress of Mathematics and its Applications.
- Ekel, P. , Kokshenev, I. , Palhares, R. , Parreiras, R. , and Neto, F. . Multicriteria analysis based on constructing payoff matrices and applying methods of decision making in fuzzy environment. *Optimization and Engineering*, 12:5–29, 03 2011. doi: 10.1007/s11081-010-9108-0.

- Ekel, P. , Kokshenev, I. , Parreiras, R. , Pedrycz, W. , and Pereira Jr., J. . Multiobjective and multiattribute decision making in a fuzzy environment and their power engineering applications. *Information Sciences*, 361-362:100–119, 2016. ISSN 0020-0255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.04.030>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025516302730>.
- Ekel, P. , Pedrycz, W. , and Jr., J. P. . *Multicriteria Decision-Making Under Conditions of Uncertainty: A Fuzzy Set Perspective*. Wiley, 2019.
- Ekel, P. Y. . Fuzzy sets and models of decision making. *Computers and Mathematics with Applications*, 44:863–875, 2002.
- Ekel, P. Y. , Menezes, M. , and Neto, F. H. S. . Decision making in a fuzzy environment and its application to multicriteria power engineering problems. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 1:527–536, 2007.
- Figueiredo, L. R. . Construção de Cenários em Problemas de Tomada de Decisão em Condições de Incerteza com Base em Informações Quantitativas e Qualitativas. Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2020.
- Filho, L. B. G. . Tomada de Decisão Multicritério e Gestão de Risco Aplicadas à Construção de Portfólios de Energias Renováveis. Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2022.
- Gozgor, G. and Paramati, S. R. . Does energy diversification cause an economic slowdown? evidence from a newly constructed energy diversification index. *Energy Economics*, 109: 105970, 2022. ISSN 0140-9883. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105970>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988322001463>.
- Gökgöz, F. and Atmaca, M. E. . Portfolio optimization under lower partial moments in emerging electricity markets: Evidence from Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67(C):437–449, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.02. URL <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v67y2017icp437-449.html>.
- Kim, Y. J. , Cho, S.-H. , and Sharma, B. P. . Constructing efficient portfolios of low-carbon technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150:111515, 2021. ISSN 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111515>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121007942>.
- Maia, D. N. and Marzano, L. G. B. . Otimização de Portfólio de Contratos de Energia sob a Ótica de uma Empresa com Vários Ativos de Geração. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2018.

- Maia, W. , Ekel, P. , Gomes Vieira, D. A. , Castro, E. , Antônio de, Oliveira, M. A. , Dorna de, Reis, I. M. , and Dos Santos, K. M. G. . Evaluation of operational risk in power substations and its rational reduction on the basis of multicriteria allocating resources. *IEEE Access*, 9:149383–149397, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3124529.
- Mendonca, M. O. , Pinto, P. H. A. , Santos, F. F. G. D. , Pires, D. S. D. C. , Vieira, D. A. G. , Lobato, M. V. D. C. , Silva, G. R. L. , Saldanha, R. R. , Resende, G. D. , Santiago, F. P. , and Horta, G. , de Lins e. Análise Comparativa entre Modelos de Inteligência Computacional para Previsão do Preço Futuro no Mercado de Energia Brasileiro. "*XXV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*", 2019.
- Nazare, F. L. F. G. , Cunha, G. R. , and Bastos, J. P. . Uma metodologia para ofertas de preços no Setor Elétrico Brasileiro: Avaliação e impactos. "*XXV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*", 2019.
- Neto, D. P. , Domingues, E. G. , Coimbra, A. P. , Almeida, A. T. , de, Alves, A. J. , and Calixto, W. P. . Portfolio optimization of renewable energy assets: Hydro, wind, and photovoltaic energy in the regulated market in brazil. *Energy Economics*, 64:238–250, 2017.
- Ozorhon, B. , Batmaz, A. , and Caglayan, S. . Generating a framework to facilitate decision making in renewable energy investments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95:217–226, 2018. ISSN 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.035>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118305434>.
- Pareto, V. . *Cours d'économie politique*. Librairie Droz, 1964.
- Pedrini, R. . *Modelo para gestão de portfólio de contratos de um consumidor livre com possibilidade de contratação de geração eólica*. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- Pereira, J. , Ekel, P. , Palhares, R. , and Parreiras, R. . On multicriteria decision making under conditions of uncertainty. *Information Sciences*, 324:44–59, 2015. ISSN 0020-0255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.06.013>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025515004454>.
- Pereira, J. G. . *Modelos e Métodos de Tomada de Decisões Multiobjetivo em Ambiente de Incertezas e Suas Aplicações*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2014.
- PSR. ANEEL - Programa de Pesquisa e Desenvolvimento. Propostas de metodologias para a formação de preços por oferta no Brasil. Disponível em: https://www.engie.com.br/uploads/2021/09/PeD_Engie_Rel3_DesenhoConceitual.pdf, Junho 2021.

- Pérez Odeh, R. , Watts, D. , and Negrete-Pincetic, M. . Portfolio applications in electricity markets review: Private investor and manager perspective trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:192–204, 2018. ISSN 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.031>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117311024>.
- Raiffa, H. . *Decision Analysis*. Longman Higher Education Division (a Pearson Education company), 1968.
- Raiffa, H. and Luce, R. D. . *Games and Decisions: Introduction and Critical Survey*. Dover Publications, 1989.
- Ramalho, F. D. , Ekel, P. Y. , Pedrycz, W. , Júnior, J. G. P. , and Soares, G. L. . Multi-criteria decision making under conditions of uncertainty in application to multiobjective allocation of resources. *Information Fusion*, 49:249–261, 2019.
- Rocha, L. C. S. , Rotella Junior, P. , Aquila, G. , and Maheri, A. . Multiobjective optimization of hybrid wind-photovoltaic plants with battery energy storage system: Current situation and possible regulatory changes. *Journal of Energy Storage*, 51: 104467, 2022. ISSN 2352-152X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104467>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22004893>.
- Silva, L. M. L. D. . *Modelos e Métodos para Análise Multicritério e Tomada de Decisão Espacial em Ambiente de Incertezas e suas Aplicações*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- Sousa, C. , Pereira, R. , Ekel, P. , Rocha, S. , and Machado-Coelho, T. . Risk metrics modeling as applied to electric energy commercialization problems. pages 2458–9403, 06 2019.
- Stirling, A. . Multicriteria diversity analysis: A novel heuristic framework for appraising energy portfolios. *Energy Policy*, 38(4):1622–1634, 2010. ISSN 0301-4215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.023>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509000901>. Energy Security - Concepts and Indicators with regular papers.
- Tamashiro, A. T. . Riscos de mercado na comercialização de energia: uma Abordagem via complementação energética e gestão de portfólio de projetos, considerando a mitigação de incertezas da geração eólica. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.