

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Rafael Bambirra Pereira

**PLANEJAMENTO E TOMADA DE DECISÃO NO LONGO
PRAZO NA CONSTRUÇÃO DE PORTFÓLIOS DE
ENERGIA**

Belo Horizonte
2024

Rafael Bambirra Pereira

**PLANEJAMENTO E TOMADA DE DECISÃO NO LONGO
PRAZO NA CONSTRUÇÃO DE PORTFÓLIOS DE
ENERGIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor(a) em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Petr Iakovlevitch Ekel

Coorientador: Prof. Dr. Douglas Alexandre Gomes
Vieira

Belo Horizonte
2024

P436p

Pereira, Rafael Bambirra.

Planejamento e tomada de decisão no longo prazo na construção de portfólios de energia [recurso eletrônico] / Rafael Bambirra Pereira. - 2024. 1 recurso online (97 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Petr Iakovlevitch Ekel.

Coorientador: Douglas Alexandre Gomes Vieira.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 87-97.

Bibliografia: f. 77-85.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Mapas cognitivos (Psicologia) - Teses. 3. Processo decisório - Teses. 4. Energia elétrica - Teses. 5. Planejamento - Teses. I. Ekel, Petr Iakovlevitch. II. Vieira, Douglas Alexandre Gomes. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

"PLANEJAMENTO E TOMADA DE DECISÃO NO LONGO PRAZO NA CONSTRUÇÃO DE PORTFÓLIOS DE ENERGIA"

RAFAEL BAMBIRRA PEREIRA

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada em 27 de fevereiro de 2024. Por:

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

Prof. Dr. Douglas Alexandre Gomes Vieira
Research Department (ENACOM) - Coorientador

Prof. Dr. Rodney Rezende Saldanha
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Adriano Chaves Lisboa
Research Department (Gaia Soluções em Engenharia)

Prof. Dr. Matheus Pereira Libório
PUC-Minas Virtual (PUC MG)

Prof. Dr. Marcos Flávio Silveira Vasconcelos D'Angelo
Universidade Estadual de Montes Claros



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Mazoni Andrade Marcal Mendes, Subcoordenador(a)**, em 12/03/2024, às 15:34, 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 **3102092** e o código CRC **60CC8CE0**.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão e apreço a algumas pessoas especiais que desempenharam papéis fundamentais em minha jornada durante a elaboração desta tese.

Em primeiro lugar, um agradecimento muito especial aos meus pais, Paulo Pereira e Maria Bambirra, e à minha irmã, Luisa Bambirra, cujo amor, apoio e orientação foram inestimáveis em todos os momentos da minha vida. Por estarem sempre ao meu lado, vocês são a minha maior fonte de inspiração e força.

À minha companheira de vida, Nicole Azevedo, por sua compreensão, paciência e companheirismo. Seu apoio contínuo foram fundamentais para o meu crescimento.

Aos meus orientadores, Petr Ekel e Douglas Vieira, sou imensamente grato pelas discussões enriquecedoras, pelos aprendizados compartilhados e, especialmente, pela fé depositada em mim e em meu trabalho. Sua orientação e sabedoria foram cruciais para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Ao meu grande amigo e sócio Thiago Coelho, cuja amizade e apoio inestimáveis serviram como um farol nos mares de dúvida e incertezas, reacendendo minha fé e energia.

Às minhas colegas de trabalho, Lais Schiavo e Marina Lima, agradeço pela parceria e colaboração. A experiência de trabalhar ao lado de vocês foi extremamente enriquecedora e gratificante.

Também agradeço às pessoas das empresas que colaboraram conosco, em especial a Antônio Andrade, Alynne Santos, Leôncio Filho e Fernanda Laender; e também a Tatiane Teixeira, Claudemir Sousa e Bernardo Vicente, cuja contribuição e envolvimento foram essenciais para o sucesso dos nossos projetos.

Por fim, sou grato pelo suporte financeiro providenciado pelo CNPq, cuja assistência foi indispensável para a realização desta pesquisa.

A todos vocês, meu sincero obrigado.

"However good our futures research may be, we shall never be able to escape from the ultimate dilemma that all our knowledge is about the past, and all our decisions are about the future"([RALSTON; WILSON, 2006](#))

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para planejamento e tomada de decisão no longo prazo em ambientes dinâmicos. O objetivo é superar as limitações das abordagens tradicionais que dependem excessivamente de dados históricos e tendências passadas, que se mostram insuficientes para planejar o futuro em cenários complexos. A metodologia proposta avalia a necessidade das pessoas envolvidas na decisão, e integra as disciplinas de planejamento em cenários e tomada de decisão multicritério, utilizando uma combinação de informações quantitativas e qualitativas. Os resultados do trabalho são demonstrados através de dois estudos de caso aplicados a empresas para a construção de portfólios de energia no longo prazo. Nestes estudos, a metodologia permitiu avaliar de forma eficaz alternativas de investimento, considerando objetivos diversos. Os estudos refletem a aplicabilidade prática da metodologia e sua capacidade de capturar as necessidades atuais dos tomadores de decisão. Este trabalho oferece um framework robusto e adaptável para decisões no longo prazo em ambientes de incertezas dinâmicas.

Palavras-chave: planejamento em cenários; mapas cognitivos fuzzy; tomada de decisão; longo prazo; comercialização de energia.

Abstract

This work presents a methodology for long-term planning and decision-making in dynamic environments. The aim is to overcome the limitations of traditional approaches that overly depend on historical data and past trends, which prove insufficient for planning the future in complex scenarios. The proposed methodology assesses the needs of the people involved in the decision, and integrates the disciplines of scenario planning and multi-criteria decision-making, using a combination of quantitative and qualitative information. The results of the work are demonstrated through two case studies applied to companies for the construction of long-term energy portfolios. In these studies, the methodology allowed for the effective evaluation of investment alternatives, considering diverse objectives. The studies reflect the practical applicability of the methodology and its ability to capture the current needs of decision-makers. This work offers a robust and adaptable framework for long-term decisions in environments with dynamic uncertainties.

Keywords: scenario planning; fuzzy cognitive maps; decision making; long term; energy trade.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Metodologia Proposta	44
Figura 2 – PLD médio dos cenários e preço futuro de balcão	52
Figura 3 – Perfil de geração previsto das usinas	53
Figura 4 – GSF médio nos cenários	54
Figura 5 – Estimativas da distribuição de VPLs	56
Figura 6 – VPL x CVaR	58
Figura 7 – VPL X RaR	59
Figura 8 – Escalas qualitativas baseadas em conjuntos fuzzy usadas para objetivos base- ados em informações qualitativas	61
Figura 9 – Balanço de energia	65
Figura 10 – Função de pertinência para a defuzzificação dos pesos	69
Figura 11 – Mapa construído	69
Figura 12 – Evolução do preço da energia nos cenários	71

Lista de quadros

Quadro 1 – Definições de planejamento de cenários (até 1995)	30
Quadro 2 – Definições de planejamento de cenários (depois de 1995)	31
Quadro 3 – Exemplos de aplicação de FCM	35
Quadro 4 – Conceitos do FCM	68

Lista de tabelas

Tabela 1 – Matriz Payoff	36
Tabela 2 – Matriz de arrependimentos	37
Tabela 3 – Matriz com Características Estimadas para a p -ésima função objetivo	37
Tabela 4 – Matriz com as estimativas dos critérios de escolha para a p -ésima função objetivo	38
Tabela 5 – Matriz modificada com as estimativas dos critérios de escolha para a p -ésima função objetivo	39
Tabela 6 – Matriz com os critérios de escolha agregados	39
Tabela 7 – Composição do portfólio	53
Tabela 8 – Descrição das alternativas	54
Tabela 9 – Características das alternativas	54
Tabela 10 – Matriz de payoff do VPL esperado (MR\$)	59
Tabela 11 – Matriz de payoff de CVaR (MR\$)	60
Tabela 12 – Matriz de payoff de RaR (MR\$)	60
Tabela 13 – Matriz de payoff de InS	60
Tabela 14 – Resultado do modelo $\langle X, F \rangle$	61
Tabela 15 – Projeção atual de carga e geração da empresa	64
Tabela 16 – Projeção dos contratos de energia	64
Tabela 17 – Pesos do FCM	70
Tabela 18 – Parametros das variáveis	71
Tabela 19 – Parâmetros de exposição	72
Tabela 20 – Soluções (MWm)	72
Tabela 21 – Matriz Payoff de VPL (MR\$)	72
Tabela 22 – Matriz Payoff de Risco (MR\$/Ano)	72
Tabela 23 – Matriz com Critérios de Escolha Agregados	73
Tabela 24 – Matriz de payoff de VPL esperado (MR\$)	88
Tabela 25 – Matriz de Arrependimento de VPL esperado (MR\$)	88
Tabela 26 – Matriz com os Critérios de Escolha para VPL esperado (MR\$)	88
Tabela 27 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para VPL esperado	89
Tabela 28 – Matriz de payoff de CVaR (MR\$)	89
Tabela 29 – Matriz de Arrependimento de CVaR (MR\$)	89
Tabela 30 – Matriz com os Critérios de Escolha para CVaR (MR\$)	90
Tabela 31 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para CVaR	90
Tabela 32 – Matriz de payoff de RaR (MR\$)	90
Tabela 33 – Matriz de Arrependimento de RaR (MR\$)	90
Tabela 34 – Matriz com os Critérios de Escolha para RaR (MR\$)	91

Tabela 35 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para RaR	91
Tabela 36 – Matriz de payoff de InS	91
Tabela 37 – Matriz de Arrependimento de InS	92
Tabela 38 – Matriz com os Critérios de Escolha para InS	92
Tabela 39 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para InS	92
Tabela 40 – Matriz Agregada com os Critérios de Escolha Normalizados	92
Tabela 41 – Matriz de payoff de VPL (MR\$)	93
Tabela 42 – Matriz de Arrependimento de VPL (MR\$)	93
Tabela 43 – Matriz com os Critérios de Escolha para VPL (MR\$)	93
Tabela 44 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para VPL	93
Tabela 45 – Matriz de payoff de Risco dos Recursos (MR\$/Ano)	94
Tabela 46 – Matriz de Arrependimento de Risco dos Recursos (MR\$/Ano)	94
Tabela 47 – Matriz com os Critérios de Escolha para Risco dos Recursos (MR\$/Ano)	94
Tabela 48 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para Risco dos Recursos	94
Tabela 49 – Matriz Agregada com os Critérios de Escolha Normalizados	94
Tabela 50 – Cenário Base	95
Tabela 51 – Cenário Pouca Chuva	96
Tabela 52 – Cenário Desenvolvimento Mundial	97
Tabela 53 – Cenário Subsídio para Usinas Renováveis	98

Lista de abreviaturas e siglas

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCM	<i>Fuzzy Cognitive Maps</i>
GSF	<i>Generation Scaling Factor</i>
LPM	<i>Lower Partial Moments</i>
MRE	Mecanismo de Realocação de Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
OTC	<i>Over The Counter</i>
OWA	<i>Ordered Weighted Averaging</i>
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
SIN	Sistema Interligado Nacional

Lista de símbolos

Índices:

c	Índice de contrato, de 1 até C
C	Numero total de contratos
i	Índice de ativo, de 1 até I
I	Número total de ativos
k	Índice de alternativa, de 1 até K
K	Número total de alternativas
m	Número total de critérios de escolha
n, j	Índices de conceitos, de 1 até N
N	Número total de Conceitos
p	Índice de funções objetivo, de 1 até q
q	Número total de funções objetivo
r	Índice do critério de escolha
s	Índice de cenário, de 1 até S
S	Número total de cenários
t	Índice de período de tempo, de 1 até t
T	Horizonte temporal
u	Índice de coeficientes das funções objetivo, de 1 até U
U	Número total de coeficientes das funções objetivos
η	Índice de série do NEWAVE, de 1 até 2000

Conjuntos:

A	Funções objetivo <i>fuzzy</i>
-----	-------------------------------

B	Arrependimentos
E	Pontos do hipercubo transformado
F	Funções objetivo
F^W	Critério de Wald
F^L	Critério de Laplace
F^S	Critério de Savage
F^H	Critério de Hurwicz
L	Região de soluções factíveis
ND	Matriz de pertinência do conjunto fuzzy de alternativas não-dominadas
P	Matriz de pertinência da relação de preferência fuzzy estrita
R	Relações de preferência fuzzy
W	Ativos de energia de um portfólio
W_c	Ativos que são contratos de energia
X	Alternativas
Y	Cenários
Z	Pontos no hipercubo unitário

Funções objetivo:

$CVaR_s(X)$	Valor em risco condicional, no cenário s
$ID(X)$	Índice de diversidade de recursos do portfólio
$InS_s(X)$	Índice de seguro, no cenário s
$RaR_s(X)$	Receita em risco, no cenário s
$VPL_s(X)$	Valor presente líquido, no cenário s
$E[VPL]_s(X)$	Valor presente líquido esperado, no cenário s
$\varpi_s(X)$	Risco dos recursos do portfólio, no cenário s

Variáveis:

$e_{s,u}$	Coordenadas correspondentes ao hipercubo transformado
$x_{i,t}$	Varição de volume de garantia física do ativo i no período t
$z_{s,u}$	Coordenadas correspondentes ao hipercubo unitário
ς_n	Conceito n do FCM

Parâmetros:

a	Taxa de desconto
\hat{C}	Custos de investimento
D	Intercessão das funções A_p
e'_u	Limite inferior do coeficiente u
e''_u	Limite superior do coeficiente u
$g_{i,t,s}$	Garantia física do ativo i , no período t , no cenário s
h_t	Número de horas dentro do período t
$M_{n,j}$	Influência (peso) do conceito n sobre o conceito j
$v_{c,t}$	Volume de energia do contrato c já existente no portfólio no período t
$\hat{V}_{t,s}$	Volume total de energia comprada no período t , no cenário s
$\check{V}_{t,s}$	Volume total de energia vendida no período t , no cenário s
\hat{V}	Valor residual
α	Coefficiente de "pessimismo-otimismo" do critério de Hurwicz
β	Limite de definição dos piores cenários
$\gamma_{t,s}$	GSF no período t , no cenário s
Γ	Recurso disponível
λ_p	Importância do objetivo p
Λ	Deficit total de recursos
μ_{A_p}	Pertinência de A_p

μ_D	Pertinência de D
μ_n	Pertinência (valor normalizado) do conceito n
μ_{R_p}	Pertinência da p -ésima relação de preferência fuzzy não recíproca
$\hat{\mu}_{R_p}$	Pertinência da p -ésima relação de preferência fuzzy recíproca
μ^{ND}	Pertinência do conjunto de alternativas não dominadas
μ_R^{ND}	Pertinência do conjunto de alternativas não dominadas da matriz não recíproca
μ_R^{Strict}	Pertinência da relação de preferência estrita da matriz não recíproca
ϕ_{spot}	Coefficiente de risco de energia do mercado $spot$
ϕ_i	Coefficiente de risco de energia da fonte i
$\psi_{i,t}$	Preço do contrato/ativo i no período t
$\rho_{t,s}$	PLD no período t , no cenário s
σ_{spot}	Coefficiente de risco de preço do mercado $spot$
σ_i	Coefficiente de risco de preço da fonte i
θ_i	Índice de custo de operação e manutenção do ativo i
Υ_i	Demanda do ativo i
Υ_i^m	Demanda minimamente aceitável para o ativo i
ϱ_t^E	Receita/despesa da negociação dos ativos de energia de um portfólio
$\varrho_{t,s}^M$	Custo de operação e manutenção dos ativos no período t , no cenário s
$\varrho_{t,s}^P$	Receita/despesa resultante da exposição de energia ao mercado $spot$
$\varrho_{t,s}$	Resultado (receita/despesa) total do portfólio de energia no período t , no cenário s
$\xi_{t,s}$	Exposição de energia ao mercado $spot$ no período t , no cenário s
ζ	Limite de probabilidade
$\hat{\zeta}_{t,s}(X)$	Componente de risco de preço de energia da função objetivo ϖ , no período t , no cenário s
$\check{\zeta}_{t,s}(X)$	Componente de risco de energia disponível da função objetivo ϖ , no período t , no cenário s

$\omega_{i,t}(X)$ Proporção de energia do portfólio composto pela fonte i , no período t

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos	23
1.2	Publicações	23
2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	Solução de problemas na presença de informações determinísticas	25
2.2	Construção e Planejamento de cenários	28
2.2.1	Uso de LP_τ -sequencias para construção de cenários	32
2.2.2	Uso de Mapas Cognitivos Fuzzy para construção de cenários	33
2.3	Generalização da abordagem clássica de tomada de decisão para lidar com as incertezas da informação	36
2.4	Modelos de tomada de decisão $\langle X, R \rangle$	39
3	CONEXÃO ENTRE CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS E TOMADA DE DECISÃO PARA PLANEJAMENTO EM LONGO PRAZO	43
4	ESTUDOS DE CASO	47
4.1	Estudo de caso I: Aquisição de ativos de energia em uma empresa de geração	51
4.1.1	Definição dos cenários, parâmetros de portfólio e alternativas	52
4.1.2	Funções objetivo	55
4.1.3	Construção e avaliação das matrizes payoff	58
4.1.4	Avaliação das alternativas remanescentes nos modelos $\langle X, R \rangle$	60
4.1.5	Considerações finais sobre o Estudo de Caso I	62
4.2	Estudo de caso II: Construção de cenários dinâmicos em uma empresa eletrointensiva	63
4.2.1	Funções objetivo	65
4.2.2	Construção dos cenários	67
4.2.3	Definição dos cenários	68
4.2.4	Avaliação do portfólio	71
4.2.5	Considerações finais sobre o Estudo de caso II	74
5	CONCLUSÕES	76
5.1	Contribuições	76
5.2	Trabalhos futuros	77

	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICES	87
	APÊNDICE A – MEMÓRIA DE CÁLCULO DAS MATRIZES DO ESTUDO DE CASO I	88
	APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULO DAS MATRIZES DO ESTUDO DE CASO II	93
	APÊNDICE C – CENÁRIOS CONSTRUÍDOS NO ESTUDO DE CASO II	95
C.1	Cenário Base	95
C.2	Cenário Pouca Chuva	96
C.3	Cenário Desenvolvimento mundial	97
C.4	Cenário Subsídio para Usinas Renováveis	98

1 Introdução

Comumente em problemas de sistemas complexos de várias naturezas, faz-se necessário sua modelagem para que, com o desenvolvimento de simulações, se obtenha informações que possam dar suporte a análise. Entretanto, por mais completa e cuidadosa que seja a criação das ferramentas de modelagem, elas somente traduzem a realidade para modelos computacionais, sendo, conseqüentemente, imperfeitos (EKEL et al., 2016).

Durante a modelagem de sistemas reais, é possível se deparar com fenômenos de natureza aleatória, ou com objetivos e restrições mal definidos em tarefas de projeto, planejamento, operação e controle. Também é possível encontrar situações em que se tenha que tomar decisões com a insuficiência ou pouca confiabilidade de informações, ou também sem que se consiga medir as conseqüências dessas decisões. Por fim, substancialmente, a incerteza é uma condição inerente ao contexto de problemas de planejamento e tomada de decisão (EKEL; MARTINI; PALHARES, 2008; RAMALHO et al., 2019).

A disciplina de planejamento em cenários foi desenvolvida como uma abordagem que facilita o processo de identificação de fatores incertos e incontroláveis, que podem ter impacto sobre as conseqüências das decisões tomadas. Apesar da análise de cenários ter sido amplamente aceita como uma componente essencial dos diversos tipos de planejamento, e em particular, do planejamento estratégico, existe uma negligência em conectá-la com as abordagens de tomada de decisão multicritério (STEWART; DURBACH, 2016). Outro problema relacionado com planejamento em cenários, é a escassez de abordagens de planejamento em cenários que utilizem métodos quantitativos e qualitativos de construção de cenários de forma complementar. De modo que a falta de associação entre métodos quantitativos e qualitativos reduz a capacidade de se modelar incertezas das metodologias de planejamento em cenários (AMER; DAIM; JETTER, 2013; KOK, 2009).

Da mesma maneira, a fim de conduzir o processo decisório de maneira racional, a disciplina de tomada de decisão possibilitou a criação de um amplo conjunto de ferramentas que auxiliam os tomadores de decisão no planejamento e execução de atividades (FIGUEIRA; GRECO; EHRGOTT, 2005; PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011). Neste contexto, surge a necessidade de modelos robustos de tomada de decisão para o longo prazo, especialmente diante da complexidade e incerteza inerentes a ambientes dinâmicos. Entende-se por ambientes dinâmicos aqueles caracterizados por mudanças frequentes e imprevisíveis, onde variáveis e condições podem alterar-se rapidamente, exigindo adaptações constantes por parte das organizações e indivíduos envolvidos. Modelar estas incertezas é um desafio significativo, e pesquisadores têm abordado isso construindo cenários constituídos por informações qualitativas, muitas vezes baseadas em opiniões e perspectivas humanas (RALSTON; WILSON, 2006). Tal abordagem é

vantajosa pois permite incorporar elementos que não são imediatamente evidentes nos dados históricos, abrindo espaço para uma visão mais abrangente e criativa do futuro (CHERMACK, 2011). Entretanto, a dependência exclusiva de informações qualitativas na construção de cenários pode gerar implicações na relevância desses cenários e na dificuldade de integrá-los às decisões operacionais das empresas, limitando assim sua aplicabilidade prática (AMER; DAIM; JETTER, 2013; STEWART; DURBACH, 2016).

De forma análoga, informações quantitativas também podem ser utilizadas para a construção de cenários. Uma abordagem quantitativa para a modelagem de incertezas e construção de cenários envolve o uso das LP_τ -seqüências, conforme exemplificado nos trabalhos (EKEL et al., 2016; EKEL; MARTINI; PALHARES, 2008; RAMALHO et al., 2019) e (FIGUEIREDO et al., 2021). No entanto, o emprego dessa abordagem enfrenta desafios particulares quando aplicado a problemas de planejamento de longo prazo em ambientes dinâmicos. O primeiro problema é que, ao definir cenários, é necessário detalhar uma história coerente e estabelecer um contexto específico para a evolução dos fatores e conceitos ao longo do tempo. O segundo desafio é que diferentes situações podem levar a resultados semelhantes nas variáveis de incerteza, ou seja, cenários distintos pode ocasionar uma resposta parecida.

De forma geral, métodos quantitativos são frequentemente criticados pela sua dependência em dados para a construção dos cenários, seja através de limites inferiores ou superiores para delimitar as variáveis ou o uso de dados históricos para definir tendências. Estes métodos também enfrentam a armadilha de presumir a continuidade das tendências passadas no futuro (AMER; DAIM; JETTER, 2013). Geralmente, considera-se que os métodos quantitativos são mais adequados para projetos de escopo restrito e com horizonte de tempo curto, enquanto os métodos qualitativos são vistos como mais apropriados para projetos de amplo escopo e longo horizonte de tempo (AMER; DAIM; JETTER, 2013). Observa-se que a utilidade dos métodos quantitativos tende a diminuir à medida que o foco se estende para o futuro, ao passo que a eficácia das abordagens qualitativas aumenta nesse contexto. No entanto, há uma lacuna significativa na literatura quanto à integração dessas duas metodologias para desenvolver uma abordagem que combine informações quantitativas e qualitativas (STEWART; DURBACH, 2016).

No setor de energia, a avaliação de incertezas e a tomada de decisão são críticas, especialmente quando se trata de manter a estabilidade operacional das empresas (DENTON et al., 2003). Neste cenário, diferentes metodologias são empregadas pelas empresas do setor para avaliar riscos na compra e venda de ativos de energia durante o planejamento e a construção de portfólios de energia. Cada tipo de investimento traz consigo um tipo específico de risco. Por exemplo, a geração intermitente das usinas renováveis pode comprometer a garantia física disponível para a empresa, enquanto mudanças regulatórias ou inovações tecnológicas podem alterar os fluxos de caixa de investimentos, e os efeitos econômicos e climáticos podem impactar no preço de curto prazo da energia. Devido a essas questões, é essencial o desenvolvimento de estratégias de comercialização e de modelagem de incertezas que consigam capturar as características inerentes

ao setor de energia (CAMARGO et al., 2020; ILBAHAR; KAHRAMAN; CEBI, 2022).

Considerando essa situação, é fundamental reconhecer que não é possível planejar o futuro com base exclusivamente nas tendências passadas. Dessa forma, torna-se evidente a importância de se adotar uma abordagem possibilística, capaz de incorporar informações tanto quantitativas quanto qualitativas para acessar a incerteza. É desejável que as informações possam ser provenientes de diferentes fontes, a fim de abranger uma variedade de aspectos significativos para a modelagem das incertezas. Dada a natureza da incerteza, soluções ótimas absolutas são um conceito ilusório. Uma solução que pode ser ideal em um cenário específico pode não ser a melhor em outro. Portanto, a ênfase é dada às soluções robustas, que são aquelas que conseguem satisfazer os requisitos de uma gama mais ampla de cenários possíveis, em vez de focar em uma única situação ótima.

1.1 Objetivos

Diante dessas limitações, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma nova metodologia para o planejamento e tomada de decisão no longo prazo, buscando superar essas barreiras e fornecer um framework mais robusto e adaptável para a atividade de tomada de decisão no longo prazo em ambientes dinâmicos. Enquanto métodos e estratégias convencionais de pesquisa operacional se baseiam na busca por soluções ótimas, considerando a ausência de soluções ótimas em cenários de incerteza, este trabalho foca na identificação e eliminação de soluções dominadas.

A metodologia proposta permite avaliar as consequências das decisões tomadas, incluindo os seus riscos, e produzir soluções robustas (não dominadas) multicritério, enquanto se concentra na conexão entre as disciplinas de tomada de decisão e planejamento em cenários. Isso permite construir cenários com a aplicação direta de informações qualitativas em conjunto com informações quantitativas, o que resulta em uma fusão de informações dentro de modelos multiobjetivo.

Adicionalmente, nos estudos de caso apresentados, novas funções objetivo serão propostas, visando capturar de forma mais completa as necessidades atuais dos tomadores de decisão nos contextos específicos abordados. Estas funções objetivo têm o intuito de refletir não apenas os objetivos tradicionais de tomada de decisão nestes contextos, mas também incorporar elementos emergentes relevantes para uma decisão estratégica eficaz no contexto atual.

1.2 Publicações

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, os pontos abordados demonstraram profundidade e relevância, e resultaram diretamente na produção das publicações (PEIXOTO et al., 2019), (GOMES et al., 2022b), (GOMES et al., 2022a) e (BAMBIRRA et al., 2023). Essas

publicações são cruciais para o diálogo entre teoria e prática, enriquecendo o campo de estudo com novas perspectivas e abordagens inovadoras.

2 Referencial teórico

2.1 Solução de problemas na presença de informações determinísticas

A definição de alternativas de solução é reduzida à análise de modelos $\langle X, F \rangle$ quando um vetor de funções objetivo $F(X) = [F_1(X), F_2(X), \dots, F_p(X), \dots, F_q(X)]$ é considerado, e o problema consiste na otimização simultânea de todas as funções

$$F_p(X) \rightarrow \underset{X \in L}{\text{extr}}, p = 1, \dots, q, \quad (2.1)$$

onde L é a região de soluções factíveis. O passo formal na análise da [Equação 2.1](#) é a determinação de um conjunto de soluções ótimas de Pareto ([HWANG; MASUD, 1979](#)). Este passo é útil, mas não permite obter soluções únicas. Aplicando informações fornecidas pelo tomador de decisão, uma solução de Pareto particular pode ser escolhida. Existem três abordagens para o uso dessas informações ([PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011](#)): *a priori*, *a posteriori* e adaptativa.

No campo da tomada de decisão multi-objetivo, diversas metodologias foram apresentadas por pesquisadores como citado em ([HWANG; MASUD, 1979](#); [MATTHIAS, 2005](#)). Uma preocupação crucial que rege a avaliação desses métodos é a qualidade das soluções geradas. Soluções de alta qualidade são caracterizadas por níveis equilibrados de satisfação em múltiplos objetivos, produzindo resultados harmoniosos, conforme mencionado em ([EKEL, 2002](#); [PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011](#)). É pertinente notar que muitos métodos citados em ([HWANG; MASUD, 1979](#); [MATTHIAS, 2005](#)) podem gerar soluções que se destacam em alguns objetivos enquanto apresentam desempenho insatisfatório em outros ([PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011](#)).

Na resolução de problemas multiobjetivo, um desafio metodológico chave é a ambiguidade em torno do termo "solução multiobjetivo ótima". A abordagem de Bellman-Zadeh ([BELLMAN; ZADEH, 1970](#); [PEDRYCZ; GOMIDE, 1998](#)), quando aplicada em um contexto de tomada de decisão, define esse conceito pelo grau máximo de cumprimento dos objetivos, alinhando-se ao princípio do resultado garantido e possibilitando soluções harmoniosas. Como mostrado em ([EKEL, 2002](#); [PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011](#)), esta abordagem oferece um método rigoroso e computacionalmente eficiente para lidar com questões multiobjetivo, enquanto também acomoda índices, critérios e restrições qualitativas.

Nesse contexto, a abordagem de Bellman-Zadeh identifica soluções multiobjetivo para cada cenário, iniciando a busca a partir de um ponto localmente ótimo. O uso dessa abordagem garante que a solução encontrada para cada cenário atenda não só a múltiplos objetivos de maneira equilibrada, mas também respeite o princípio da otimalidade de Pareto.

Nesta abordagem, as funções objetivo $F_p(x)$, $p = 1, \dots, q$, são substituídas por conjuntos fuzzy $A_p = \{X, \mu_{A_p}(X)\}$, $X \in L$, $p = 1, \dots, q$, onde μ_{A_p} é a pertinência da função A_p , que permitem construir uma solução fuzzy como uma interseção $D = \bigcap_{p=1}^q A_p$. Sua função de pertinência é expressa da seguinte forma:

$$\mu_D(X) = \min_{1 \leq p \leq q} \mu_{A_p}(X), X \in L. \quad (2.2)$$

Deve-se notar que a equação (2.2) pode ser modificada para ajustar o grau de “otimismo-pessimismo” da decisão por meio do uso do operador OWA (YAGER, 1988). O uso da equação (2.2) permite formar uma solução com:

$$\max \mu_D(X) = \max_{X \in L} \min_{1 \leq p \leq q} \mu_{A_p}(X), X \in L, \quad (2.3)$$

de forma à buscar

$$X^\circ = \arg \max_{X \in L} \min_{1 \leq p \leq q} \mu_{A_p}(X). \quad (2.4)$$

As funções de pertinência $\mu_{A_p}(X)$, $p = 1, \dots, q$, podem ser expressas, de acordo com (EKEL, 2002; PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011), como

$$\mu_{A_p}(X) = \left(\frac{F_p(X) - \min_{X \in L} F_p(X)}{\max_{X \in L} F_p(X) - \min_{X \in L} F_p(X)} \right)^{\lambda_p}, \quad (2.5)$$

para funções objetivo maximizadas, e

$$\mu_{A_p}(X) = \left(\frac{\max_{X \in L} F_p(X) - F_p(X)}{\max_{X \in L} F_p(X) - \min_{X \in L} F_p(X)} \right)^{\lambda_p}, \quad (2.6)$$

para funções objetivo minimizadas. Nas equações (2.5) e (2.6), λ_p , $p = 1, \dots, q$ são fatores de importância.

No processo de resolução de problemas de planejamento, emergem duas questões cruciais: "o que fazer?" e "como fazer?". As soluções para a primeira questão são derivadas do exame de informações sob várias perspectivas ou critérios, tais como a atratividade do investimento, o grau de inovação, o impacto político, a capacidade de expansão, a eficiência operacional, e a flexibilidade de manutenção, entre outros. Por outro lado, a resposta à segunda questão crucial, "como fazer?", envolve a alocação eficiente de diferentes tipos de recursos (financeiros, humanos, logísticos, etc.) entre várias opções ou alternativas. Estas podem incluir estratégias de ação, projetos de novos negócios, inovações, expansões, operações, e manutenções, com o objetivo de atender aos objetivos estabelecidos para o planejamento. Esta abordagem facilita a otimização dos resultados, maximizando os impactos positivos e minimizando os negativos decorrentes da distribuição de recursos ou de suas limitações. Dentro deste contexto, é possível identificar três modelos principais de alocação de recursos.

- **Alocação de recursos disponíveis:** Dado uma distribuição de um recurso disponível Γ entre várias demandas $\Upsilon_i, i = 1, 2, \dots, I$. O objetivo é otimizar uma série de funções objetivo $F_p(x)$, onde $p = 1, 2, \dots, q$. A estrutura do problema é a seguinte:

$$F_p(x) \Rightarrow \max_{X \in L} \text{ ou } \min_{X \in L}, p = 1, 2, \dots, q. \quad (2.7)$$

Sujeito a

$$0 \leq x_i \leq \Upsilon_i, i = 1, 2, \dots, I, \quad (2.8)$$

$$\sum_{i=1}^I x_i = \Gamma. \quad (2.9)$$

Neste problema, as variáveis x_i representam as quantidades de recursos alocadas para cada demanda Υ_i . A primeira restrição assegura que a quantidade de recurso alocado para cada demanda não exceda a demanda própria e seja não negativa. A segunda restrição garante que a soma total dos recursos alocados seja igual ao recurso total disponível, Γ . As funções objetivo $F_p(x)$ podem representar diferentes critérios de otimização, como maximização de eficiência, minimização de custos, ou outros critérios relevantes, dependendo do contexto específico do problema.

- **Alocação de déficit de recursos com cortes ilimitados:** o problema apresentado dessa forma lida com a distribuição de um déficit de recursos entre várias demandas $\Upsilon_i, i = 1, 2, \dots, I$. O déficit total de recursos é $\Lambda = \sum_{i=1}^I \Upsilon_i - \Gamma$, onde Γ é a quantidade de recursos disponíveis, que é menor do que a soma total das demandas. A estrutura do problema é a seguinte:

$$F_p(\Delta x) \Rightarrow \max_{X \in L} \text{ ou } \min_{X \in L}, p = 1, 2, \dots, q. \quad (2.10)$$

Sujeito a

$$\Delta x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, I, \quad (2.11)$$

$$\sum_{i=1}^I \Delta x_i = \Lambda. \quad (2.12)$$

Neste contexto, Δx_i representa a quantidade do deficit de recursos a ser distribuída para cada demanda Υ_i . A primeira restrição assegura que a alocação do deficit para cada demanda seja não negativa. A segunda restrição estabelece que a soma total das alocações do deficit seja igual ao deficit total de recursos, Λ .

- **Alocação de deficit de recursos com cortes limitados:** o problema aborda a distribuição de um deficit de recursos, considerando as demandas $\Upsilon_i, i = 1, 2, \dots, I$ e as demandas minimamente aceitáveis $\Upsilon_i^m, i = 1, 2, \dots, I$. Este problema segue a mesma estrutura que a **Alocação de deficit de recursos com cortes ilimitados**, com a seguinte alteração na restrição definida pela [Equação 2.11](#):

$$0 \leq \Delta x_i \leq \Lambda_i = \Upsilon_i - \Upsilon_i^m, i = 1, 2, \dots, I. \quad (2.13)$$

Neste caso, Δx_i representa a quantidade do deficit de recursos que pode ser alocada para cada demanda Υ_i , com a restrição de que esta alocação não pode ser menor que zero nem exceder Λ_i , que é a diferença entre a demanda total Υ_i e a demanda minimamente aceitável Υ_i^m para cada consumidor.

2.2 Construção e Planejamento de cenários

A relação entre as ações do presente e suas consequências no futuro tem sido uma preocupação constante da humanidade em toda sua história. Este desejo de prever o futuro amenizando a incerteza em relação ao amanhã fez com que muitas decisões tenham sido suportadas por abordagens não científicas. Gradualmente as abordagens empíricas foram dando lugar ao pensamento científico. A fim de se conhecer o futuro, para que possamos tomar a melhor decisão, foram desenvolvidas ferramentas para modelar as incertezas e construir planejamentos (RALSTON; WILSON, 2006). Uma dessas ferramentas, é a utilização de cenários.

Cenários são definidos por (HAAG, 1968) como um conjunto hipotético de eventos futuros, construídos para esclarecer uma possível cadeia de eventos, bem como seus pontos de decisão. Segundo (GODET, 2000), cenários são descrições de situações futuras, e das suas respectivas sucessões causais, capazes de explicar as consequências das ações atuais no futuro. Em contrapartida, para (RALSTON; WILSON, 2006) cenários são estruturas para a organizar as percepções das pessoas sobre futuros alternativos, no qual suas decisões podem se manifestar. E, portanto, não são previsões e nem variações ao redor de algum caso base; eles devem ser descrições plausíveis de futuros alternativos, e representar significativamente diferentes futuros.

Embora seja utilizado de forma vaga em muitos casos, o termo “Cenário” se tornou parte do cotidiano da humanidade e é aplicado em diversas áreas do conhecimento. A maior complexidade e incerteza no ambiente de análise ressalta a importância de identificar tendências futuras e os cenários esperados. Utilizar de cenários para avaliar as possibilidades de ação, permite mensurar o impacto de quebras estruturais do modelo em foco (AMER; DAIM; JETTER, 2013). Diferentemente das previsões, que frequentemente se baseiam em dados passados e tendências para estimar um resultado futuro, os cenários abordam uma variedade de possíveis futuros. Enquanto as previsões tentam quantificar e prever o futuro, os cenários exploram diferentes realidades possíveis, ajudando a preparar para o inesperado (RALSTON; WILSON, 2006). A utilização de informações determinísticas na consideração de múltiplas alternativas futuras possíveis ajuda a conduzir o planejamento futuro de maneira holística e aumenta significativamente a capacidade de lidar com a incerteza e a utilidade do processo decisório geral (HEIJDEN, 1997). Os cenários fornecem uma visão geral do ambiente e destacam as interações entre várias tendências e eventos futuros (MARTINO, 2003). Os cenários também são muito úteis para destacar as implicações de possíveis descontinuações futuras do sistema, identificar a natureza e o tempo dessas implicações e projetar as consequências de uma determinada ação ou decisão

política (STRAUSS; RADNOR, 2004). O trabalho (MERISTö, 1989) defende que o processo de construção, as ideias e as visões que surgem nas mentes dos envolvidos são tão importantes quanto os próprios cenários em si. Apesar de sua utilidade, o planejamento de cenários ainda é considerado uma disciplina jovem (CHERMACK, 2011; STEWART; DURBACH, 2016).

O uso sistêmico de cenários para esclarecer pensamentos acerca do futuro teve seu início após a segunda guerra mundial, quando o departamento de defesa estadunidense, juntamente com a corporação RAND, os utilizaram como método para planejamento militar na década de 1950. Posteriormente, o aprimoramento da metodologia da utilização de cenários ocorreu na década de 1960 em (HAAG, 1968), onde foram desenvolvidas narrativas para descrever os possíveis usos de tecnologias nucleares das nações. Na mesma década, O Instituto de Pesquisa de Stanford começou a oferecer planejamentos de negócio em longo prazo para empresas que consideram forças políticas e econômicas como essenciais para o desenvolvimento do seu negócio (CHERMACK, 2011).

A consolidação do uso de múltiplos cenários para planejamento se deu na década de 1970 com a companhia petrolífera Shell, que buscou por eventos que pudessem afetar o preço do petróleo, apesar de apresentar-se de forma constante desde o fim da segunda guerra mundial e haver uma crescente demanda desse produto. Assim, a equipe de planejamento da Shell percebeu que os árabes eram determinantes para o preço do petróleo e que podiam elevar o preço de 2 para inimagináveis 10 dólares o barril. O anúncio feito em 1972 foi recebido com descrédito pelas outras organizações e pelos próprios executivos, contudo a empresa aderiu algumas medidas contingenciais. No período de 1973 a 1979 o preço do barril de petróleo evoluiu de 2 dólares para 37 dólares, e a Shell, uma das empresas mais pobres das sete grandes companhias de petróleo da época, se tornou uma das mais lucrativas (JR; OLIVEIRA; KILIMNIK, 2010; MERISTö, 1989). Diante dessa conjuntura histórica, foi criado o planejamento de cenários.

O planejamento de cenários é um conjunto de metodologias que apresenta variações de acordo com o objetivo de aplicação (CHERMACK, 2011). A diversidade de pensamentos resulta em uma gama de interpretações sobre o conceito de planejamento de cenários. O [Quadro 1](#) e o [Quadro 2](#) apresentam uma lista das diferentes visões encontradas na literatura sobre a sua definição e seus resultados

Apesar das diferentes visões encontradas no [Quadro 1](#) e [Quadro 2](#), o propósito do planejamento de cenários pode ser classificado em quatro categorias: mudança de pensamento; construção de narrativas acerca do futuro; melhoria da tomada de decisão e seus efeitos no futuro; melhoria da imaginação e aprendizado humano e organizacional (CHERMACK, 2011).

Não há uma única abordagem para o planejamento e construção de cenários, e a literatura revela que existem várias metodologias com características diferentes para construí-los (AMER; DAIM; JETTER, 2013; BRADFIELD et al., 2005; VARUM; MELO, 2010). Alguns modelos de construção se apresentam com maior evidência, como os trabalhos (RALSTON; WILSON, 2006) e (SCHOEMAKER, 1991), por terem uma forma genérica e apresentarem fácil aplicação.

Quadro 1 – Definições de planejamento de cenários (até 1995)

Referência	Definição	Resultado
(PORTER, 1985)	"Uma visão internamente consistente do que o futuro pode vir a ser - não uma previsão, mas um possível resultado futuro."	Uma visão de um possível resultado futuro.
(SCHWARTZ, 1991)	"Uma ferramenta para ordenar a percepção de uma pessoa sobre os futuros ambientes alternativos em que as decisões da pessoa podem ser tomadas."	Ordenação das percepções sobre ambientes de tomada de decisão de futuros alternativos.
(SIMPSON, 1992)	"O processo de construção de futuros distintos do ambiente externo de um negócio".	Construção de diferentes futuros.
(BLOOM; MENEFEE, 1994)	"Uma descrição de um futuro possível ou provável".	Descrição de um futuro possível ou provável.
(THOMAS, 1994)	"O planejamento de cenários são inerentemente um processo de aprendizado que desafia a sabedoria convencional confortável da organização, concentrando a atenção em quantos anos o futuro pode ser diferente do presente".	Desafio à sabedoria convencional e confortável sobre o futuro.
(SCHOEMAKER, 1995)	"Uma metodologia disciplinada para imaginar possíveis futuros em que as decisões organizacionais podem ser executadas".	Imaginar possíveis tomadas de decisão futuras.

Fonte: ([CHERMACK, 2011](#))

Trabalhos como os de ([CHERMACK, 2011](#)) e ([KEOUGH; SHANAHAN, 2008](#)) também apresentam formas genéricas de construção de cenários por meio da visão de especialistas. De modo geral, esses trabalhos enfatizam a definição das questões, identificando os principais fatores, as partes interessadas, as tendências, as restrições e outras questões importantes de maneira sistemática classificando esses itens por importância e incerteza.

No planejamento de longo prazo, considerar tanto informações qualitativas quanto quantitativas torna o modelo de construção de cenários mais flexível e adaptável ([STEWART; DURBACH, 2016](#); [KOKKINOS et al., 2023](#)). Possibilitar o uso de informações de diferentes fontes de informação é particularmente valioso em contextos onde a incerteza é uma característica marcante, como no setor elétrico ou gestão pública ([ILBAHAR; KAHRAMAN; CEBI, 2023](#)). Utilizar cenários para modelar incertezas permite incorporar uma gama mais ampla de opiniões e perspectivas, inclusive contemplando eventos disruptivos como mudanças climáticas, regulatórias ou culturais ([KOKKINOS et al., 2023](#)).

Dessa forma, as próximas subseções exploram em detalhes dois métodos de construção de cenários específicos. As LP_{τ} -sequências, e os FCM.

Quadro 2 – Definições de planejamento de cenários (depois de 1995)

Referência	Definição	Resultado
(HEIJDEN, 1997)	(1) Cenários externos são "descrições internamente consistentes e desafiadoras de possíveis futuros"; (2) um cenário interno é "uma linha de argumentação causal, ligando uma opção de ação a um objetivo" ou "um caminho através do mapa cognitivo de uma pessoa".	Descrições de futuros possíveis; mapas cognitivos explícitos.
(GEUS, 1997)	"Ferramentas para discussões prospectivas e documentos cuja finalidade não é uma previsão ou um plano, mas uma mudança na mentalidade das pessoas que os usam".	Modificação de pontos de vista.
(FAHEY; RANDALL, 1997)	"Cenários são narrativas descritivas de projeções alternativas plausíveis de uma parte específica do futuro".	Criar projeções alternativas plausíveis de uma parte específica do futuro.
(RINGLAND, 1998)	"Essa parte do planejamento estratégico que se relaciona com as ferramentas e tecnologias para gerenciar as incertezas do futuro".	Gerenciamento das incertezas futuras.
(ALEXANDER; SERFASS, 1998)	"O planejamento de cenários é uma ferramenta eficaz de futuro que permite aos planejadores examinar o que é provável e o que é improvável que aconteça, sabendo que elementos improváveis em uma organização são aqueles que podem determinar seu relativo sucesso"	Examinar probabilidades e improbabilidades futuras.
(TUCKER, 1999)	"Criar histórias de futuros e planos igualmente plausíveis, como se qualquer um pudesse avançar".	Histórias de futuros igualmente plausíveis que informam o planejamento.
(KLOSS, 1999)	"Cenários são literalmente histórias sobre o futuro que são plausíveis e baseadas na análise da interação de um número de variáveis ambientais".	Histórias plausíveis e informadas sobre o futuro.
(WILSON, 2000)	"Os cenários são uma ferramenta de gerenciamento usada para melhorar a qualidade da tomada de decisões executivas e ajudar os executivos a tomar decisões estratégicas melhores e mais resilientes".	Melhoria na tomada de decisões estratégicas executivas.
(GODET, 2000)	"Um cenário é simplesmente um meio de representar uma realidade futura, a fim de lançar luz sobre a ação atual em vista de futuros possíveis e desejáveis".	Uma realidade futura representada.
(KAHANE, 2004)	"Uma série de histórias imaginativas, mas plausíveis e bem focalizadas do futuro".	Histórias plausíveis do futuro.

Fonte: (CHERMACK, 2011)

2.2.1 Uso de LP_τ -sequências para construção de cenários

Ao se levar em consideração as recomendações apresentadas em (PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011), é possível utilizarmos as chamadas LP_τ -sequências (originalmente propostas em (SOBOL, 1979)) para a construção de estados de natureza representativos, provenientes de dados iniciais (cenários). Estas sequências possuem características superiores de uniformidade entre outras sequências distribuídas uniformemente (SOBOL, 1979; SOBOL; STATNIKOV, 2006). Os resultados de (SOBOL, 1979; SOBOL; STATNIKOV, 2006) fornecem pontos $Z_s, s = 1, \dots, S$, onde S é o número total de combinações representativas de dados iniciais, estados da natureza ou cenários, com coordenadas $z_{s,u}, s = 1, \dots, S$ e $u = 1, \dots, U$ no correspondente hipercubo unitário Z^U , onde U é o número de coeficientes das funções objetivos.

Em essência, a construção dos estados representativos da natureza é reduzida à formação de pontos de sequências uniformemente distribuídas em Z^U e sua transformação para o hipercubo E^U definido pelos limites inferiores $e'_u, u = 1, \dots, U$, e superiores $e''_u, u = 1, \dots, U$, dos correspondentes coeficientes da seguinte forma:

$$e_{s,u} = e'_u + (e''_u - e'_u)z_{s,u}, \quad s = 1, \dots, S, \quad u = 1, \dots, U, \quad (2.14)$$

para formar uma sequência uniformemente distribuída em E^U .

As LP_τ -sequências são um método comprovado para a modelagem de incertezas, úteis na definição de cenários a partir de diferentes formatos de preferências, informações intervalares ou probabilísticas (EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020; RAMALHO et al., 2019). Entretanto, embora as LP_τ -sequências ofereça um meio eficaz para mapear incertezas, ela apresenta limitações significativas quando aplicada ao planejamento de longo prazo. Uma das principais restrições é a ausência de uma narrativa subjacente que explique a evolução dos valores das variáveis de incerteza ao longo do tempo. Sem um caminho claro que ilustre como e por que certos cenários podem se desenvolver, os tomadores de decisão enfrentam desafios ao tentar antecipar oportunidades e identificar potenciais riscos. A falta de um contexto ou de uma história que guie a progressão das variáveis de incerteza deixa os decisores com uma compreensão superficial dos cenários, limitando sua capacidade de planejar eficazmente para o futuro.

Outra desvantagem crítica dessa abordagem é a dificuldade em criar múltiplas situações distintas que possam resultar em respostas semelhantes. Esta limitação impede a formação de uma gama abrangente de cenários que são essenciais para entender completamente o espectro de possíveis futuros em um ambiente incerto e dinâmico.

Essas limitações destacam a necessidade de um método mais robusto para a construção de cenários, especialmente em contextos de longo prazo. Um método ideal deveria ser capaz de gerar uma variedade de cenários distintos, cada um com sua própria trajetória e lógica interna, fornecendo assim uma base mais sólida para a tomada de decisão estratégica. Além disso, seria essencial incorporar uma dimensão temporal que detalhe a evolução das variáveis ao longo do

tempo, permitindo aos tomadores de decisão entender melhor os caminhos potenciais e ajustar suas estratégias em conformidade.

2.2.2 Uso de Mapas Cognitivos Fuzzy para construção de cenários

Dentre as abordagens existentes de construção de cenários, os FCM possuem a capacidade de produzir resultados confiáveis mesmo quando a qualidade dos dados disponíveis é baixa. Esta característica é particularmente valiosa em ambientes onde as informações são incertas ou incompletas (KYRIAKARAKOS et al., 2014). Além disso, os FCM se destacam pela facilidade de construção e pela capacidade de gerar resultados tanto quantitativos quanto qualitativos. Essa flexibilidade os torna adequados para uma variedade de aplicações, incluindo aquelas que requerem insights qualitativos sobre a dinâmica dos sistemas (ÖZESMI; ÖZESMI, 2004). Após uma revisão dos trabalhos (AMER; DAIM; JETTER, 2013; STEWART; DURBACH, 2016; PEREIRA, 2019), os FCM se apresentaram como uma escolha ideal para se integrar ao modelo de decisão de (EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020), especialmente considerando sua aplicabilidade no contexto de planejamento de longo prazo.

Os FCM são um método de inteligência computacional proposto por (KOSKO, 1986) como uma evolução dos mapas cognitivos, que é utilizado para modelar a dinâmica de sistemas (GLYKAS, 2010). Os FCM são baseados em variáveis definidas – denominadas de conceitos – que interagem entre si. A estrutura gráfica dos mapas permite a propagação causal sistêmica e a representação simbólica da experiência humana e dos dados operacionais do sistema, oferecendo um meio eficaz para capturar a complexidade e as interconexões dentro dos sistemas modelados. (ILBAHAR; KAHRAMAN; CEBI, 2023; STACH et al., 2005).

Na representação gráfica dos FCM, os conceitos ς são considerados nós e são usados para representar diferentes aspectos do modelo, como entradas, saídas, regras, estados, entre outros. Então, $\varsigma_n, n = 1, \dots, N$ sendo N o número total de conceitos (nós). O valor de cada conceito é normalizado no intervalo de $[0, 1]$. Portanto, $\mu_n \in [0, 1], n = 1, \dots, N$, sendo μ_n o valor normalizado (pertinência) do conceito ς_n . Os conceitos, por sua vez, são conectados por ramos que possuem diferentes pesos e direções a fim de representar a causalidade entre os nós. Os pesos $M_{n,j}$ se originam da experiência e conhecimento humano ou dados históricos, e assumem um valor de -1 à $+1$, onde um peso negativo representa uma correlação inversa entre os conceitos, e um peso positivo, uma correlação direta, então $M_{n,j} \in [-1, 1], n, j = 1, \dots, N$ (GLYKAS, 2010; KYRIAKARAKOS et al., 2014).

Os mapas cognitivos são estruturas complexas, pois são compostos por um grande número de variáveis que possuem muitas interconexões e ciclos de feedback. Essas estruturas resultam em um comportamento sistêmico geral. A análise de uma estrutura de FCM requer o uso de ferramentas de álgebra matricial e teoria dos grafos. Ao examinar a estrutura dos mapas, é possível determinar como as partes interessadas entendem o sistema, por exemplo, se elas percebem muitas funções forçando o sistema que estão fora de seu controle, ou se veem o

sistema como hierárquico ou mais democrático (GLYKAS, 2010). Outras informações sobre como analisar as características de um FCM podem ser encontradas no trabalho (ÖZESMI; ÖZESMI, 2004).

Portanto, o primeiro passo na análise de mapas cognitivos é descrever e tabular o número de variáveis suas conexões. Uma vez que o FCM tenha sido construído e sua matriz de pesos codificada, é possível aplicar o modelo e simular o estado estacionário do sistema (para onde as coisas estão caminhando se tudo continuar como está - Cenário Base). De acordo com (KOSKO, 1986), o valor dos conceitos, na iteração $t + 1$, é influenciado pelos outros, na iteração t , de acordo com a equação

$$\mu_{n,t+1} = f\left(\mu_{n,t} + \sum_{j=1 \wedge j \neq n}^N M_{n,j} \mu_{j,t}\right). \quad (2.15)$$

Na Equação 2.15, f é uma função de ativação. De acordo com (BUENO; SALMERON, 2009), a função sigmoideal apresenta vantagens específicas em relação a outros conceitos. Além disso, a saída necessária precisa ser mapeada no espaço $[0, 1]$. Esta é a razão de seu uso extensivo na literatura, incluindo neste trabalho.

De acordo com (KYRIAKARAKOS et al., 2014), a construção dos FCM acontece em quatro etapas, sendo elas:

- **Investigação de Parâmetros:** Esta etapa envolve a identificação de todos os parâmetros que podem influenciar o sistema em análise, como a avaliação de um investimento. O estudo sugere categorizar os parâmetros em cinco grupos: legal/regulamentar/administrativo, financeiro, técnico, social e ambiental. A seleção destes parâmetros é feita com base em entrevistas com especialistas, tomadores de decisão e partes interessadas.
- **Escolha de Indicadores:** Após a identificação dos parâmetros, esta etapa foca na avaliação e seleção daqueles com maior relevância.
- **Implementação do FCM:** Baseando-se nos resultados das etapas anteriores, o FCM é desenvolvido para avaliar o sistema em questão. Esta etapa é proposta em cinco passos:
 - Passo 1: Definição dos dados de entrada que o usuário deve fornecer.
 - Passo 2: Definição de conceitos.
 - Passo 3: Fuzzificação dos dados de entrada.
 - Passo 4: Definição de pesos.
 - Passo 5: Defuzzificação da saída.
- **Implementação da Decisão:** Esta etapa envolve a aplicação prática das conclusões obtidas através do FCM no processo de tomada de decisão.

Essa estrutura é eficaz a construção de cenários, proporcionando cenários detalhados e sistemáticos. No entanto, o aspecto de tomada de decisão nesse trabalho é consideravelmente menos desenvolvido. A metodologia proposta em (KYRIAKARAKOS et al., 2014) carece de uma abordagem mais sólida e abrangente para a aplicação dos cenários construídos no processo decisório, o que limita sua utilidade prática em situações de decisões complexas e de longo prazo.

De forma geral, dado que na construção de causa e efeito dos conceitos dos FCM são consideradas variáveis e relações de diversas naturezas, o uso do modelo ocorre tanto em um escopo qualitativo (AMER; JETTER; DAIM, 2011; GLYKAS, 2010; GRAY; ZANRE; GRAY, 2014), quanto quantitativo (AMER; DAIM; JETTER, 2013; JETTER; SCHWEINFORT, 2011; KOK, 2009). Esta característica apresenta-se como uma clara vantagem da abordagem FCM sobre outros métodos de construção de cenários, já que o principal obstáculo à construção de cenários integrados é a fraca relação entre metodologias qualitativas e quantitativas (AMER; DAIM; JETTER, 2013; KOK, 2009; KOK; DELDEN, 2009).

Um fato que comprova essa vantagem é a extensa aplicação de FCMs em várias áreas da ciência, para resolver problemas de diferentes naturezas. O Quadro 3 mostra alguns trabalhos que utilizaram FCM, com suas respectivas áreas de aplicação.

Quadro 3 – Exemplos de aplicação de FCM

Referência	Aplicação
(LEE et al., 1998)	Problemas de saúde pública
(GROUMPOS, 2000)	Modelo supervisor para desempenho de trocador de calor
(STYLIOS; GROUMPOS, 2004)	Modelo supervisor de planta
(ÖZESMI; ÖZESMI, 2004)	Modelo socioecológico
(AGUILAR, 2005)	Modelo simples de um país
(TSADIRAS, 2008)	Planejamento estratégico de uma empresa de comércio eletrônico
(TSADIRAS; PEMPETZOGLOU; VIKTORATOS, 2021)	Impactos do aquecimento global

Além das áreas mencionadas na Quadro 3, especificamente no campo da energia, os FCMs foram usados em (KONTI; DAMIGOS, 2018) para avaliar a produção de bioetanol na Grécia, em (ALIPOUR et al., 2017) para construir cenários para a produção de petróleo no Irã, em (KYRIAKARAKOS et al., 2012) para a gestão de micro-redes autônomas, em (KYRIAKARAKOS et al., 2014) para auxiliar na tomada de decisão para a construção de usinas de energia renovável, em (AMER; JETTER; DAIM, 2011) para construir cenários para energia eólica, em (JETTER; SCHWEINFORT, 2011) para construir cenários para energia solar, em (ZIV et al., 2018) para avaliar o potencial impacto do Brexit no fornecimento de energia, água e alimentos, em (ILBAHAR; KAHRAMAN; CEBI, 2023) para o planejamento de políticas

energéticas, e em (KOKKINOS et al., 2023) para avaliar as implicações políticas, econômicas, sociais, tecnológicas, ambientais e legais na produção de hidrogênio.

2.3 Generalização da abordagem clássica de tomada de decisão para lidar com as incertezas da informação

Uma maneira racional de lidar com o fator de incerteza na tomada de decisão multi-critério (multi-objetivo) (EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020; PEREIRA et al., 2015; EKEL; MARTINI; PALHARES, 2008), baseada na abordagem possibilística, está associada à generalização da abordagem clássica para considerar a incerteza da informação na tomada de decisão mono-critério (LUCE; RAIFFA, 1957; RAIFFA, 1968; BELYAEV, 1977). A abordagem clássica consiste na construção e análise de matrizes de resultado. Essas matrizes refletem efeitos que podem ser obtidos para diferentes combinações de alternativas de solução e combinações representativas de dados iniciais, estados da natureza ou cenários, para gerar soluções robustas.

Utilizando a Equação 2.4 para abordar o problema (2.1), obtêm-se S soluções correspondentes aos cenários considerados. Um subconjunto dessas soluções, especificamente $K \leq S$ soluções distintas, é escolhido para a construção de matrizes de resultado (Tabela 1). Para qualquer função objetivo $F_p, p = 1, \dots, q$, a matriz de resultado é gerada aplicando cada solução selecionada $X_k, k = 1, \dots, K$ à $F_p(X_k, Y_s)$ em todos os cenários $Y_s, s = 1, \dots, S$. Assim, podemos construir q matrizes de resultado.

Tabela 1 – Matriz Payoff

	Y_1	...	Y_s	...	Y_S
X_1	$F_p(X_1, Y_1)$	...	$F_p(X_1, Y_s)$	...	$F_p(X_1, Y_S)$
...
X_k	$F_p(X_k, Y_1)$	...	$F_p(X_k, Y_s)$	...	$F_p(X_k, Y_S)$
...
X_K	$F_p(X_K, Y_1)$	...	$F_p(X_K, Y_s)$	...	$F_p(X_K, Y_S)$

A análise das matrizes de resultado e a escolha das alternativas de solução racional são baseadas no uso de critérios de escolha, também conhecidos como (LUCE; RAIFFA, 1957; RAIFFA, 1968; BELYAEV, 1977). Neste trabalho, os critérios de escolha de Wald, Laplace, Savage e Hurwicz são aplicados. Esses critérios de escolha têm um caráter geral e foram aplicados com sucesso na prática (BELYAEV, 1977; EKEL; MARTINI; PALHARES, 2008; PEREIRA et al., 2015; EKEL et al., 2016). Seu uso está associado às seguintes estimativas características: o nível mínimo da função objetivo $F_p^{\min}(X_k) = \min_{1 \leq s \leq S} F_p(X_k, Y_s)$; o nível máximo da função objetivo $F_p^{\max}(X_k) = \max_{1 \leq s \leq S} F_p(X_k, Y_s)$; o nível médio da função objetivo $\bar{F}_p(X_k) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S F_p(X_k, Y_s)$; o nível máximo de arrependimento $B_p^{\max}(X_k) = \max_{1 \leq s \leq S} B_p(X_k, Y_s)$, onde $B_p(X_k, Y_s)$ é um excesso de gastos ocorrendo sob a combinação do estado da natureza Y_s e a

escolha da alternativa de solução X_k em vez da alternativa de solução que é localmente ótima para o dado Y_s .

Para determinar o arrependimento $B_p(X_k, Y_s)$, é necessário definir para cada cenário os valores máximos, $F_p^{\max}(Y_s) = \max_{1 \leq k \leq K} F_p(X_k, Y_s)$, se o objetivo é maximizar a função objetivo, ou os valores mínimos, $F_p^{\min}(Y_s) = \min_{1 \leq k \leq K} F_p(X_k, Y_s)$, se o objetivo é minimizar. Após isso, o arrependimento associado à alternativa X_k e ao cenário Y_s pode ser avaliado como

$$B_p(X_k, Y_s) = F_p^{\max}(Y_s) - F_p(X_k, Y_s), \quad (2.16)$$

se o objetivo é maximizar, ou

$$B_p(X_k, Y_s) = F_p(X_k, Y_s) - F_p^{\min}(Y_s), \quad (2.17)$$

se o objetivo é minimizar, resultando em uma matriz de arrependimento (Tabela 2).

Tabela 2 – Matriz de arrependimentos

	Y_1	...	Y_s	...	Y_S	$B_p^{\max}(X_k)$
X_1	$B_p(X_1, Y_1)$	...	$B_p(X_1, Y_s)$	...	$B_p(X_1, Y_S)$	$B_p^{\max}(X_1)$
...
X_k	$B_p(X_k, Y_1)$	...	$B_p(X_k, Y_s)$	...	$B_p(X_k, Y_S)$	$B_p^{\max}(X_k)$
...
X_K	$B_p(X_K, Y_1)$	...	$B_p(X_K, Y_s)$	...	$B_p(X_K, Y_S)$	$B_p^{\max}(X_K)$

Tabela 3 – Matriz com Características Estimadas para a p -ésima função objetivo

	$F_p^{\min}(X_k)$	$F_p^{\max}(X_k)$	$\bar{F}_p(X_k)$	$B_p^{\max}(X_k)$
X_1	$F_p^{\min}(X_1)$	$F_p^{\max}(X_1)$	$\bar{F}_p(X_1)$	$B_p^{\max}(X_1)$
...
X_k	$F_p^{\min}(X_k)$	$F_p^{\max}(X_k)$	$\bar{F}_p(X_k)$	$B_p^{\max}(X_k)$
...
X_K	$F_p^{\min}(X_K)$	$F_p^{\max}(X_K)$	$\bar{F}_p(X_K)$	$B_p^{\max}(X_K)$

Os critérios de escolha de Wald, Laplace, Savage e Hurwicz baseiam-se no uso das características representadas na Tabela 3. A análise dos valores desses critérios de escolha, descritos abaixo, é apresentada sob a suposição de que as funções objetivo devem ser minimizadas (PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011). Em particular:

- O critério de Wald F_p^W utiliza a estimativa $F_p^{\max}(X_k)$, e permite escolher as alternativas de solução X_p^W , para as quais esta estimativa alcança o mínimo:

$$\min_{1 \leq k \leq K} F_p^{\max}(X_k) = \min_{1 \leq k \leq K} \max_{1 \leq s \leq S} F_p(X_k, Y_s). \quad (2.18)$$

- O critério de Laplace F_p^L baseia-se na estimativa $\bar{F}_p(X_k)$ e concentra-se na escolha das alternativas de solução X_p^L , para as quais esta estimativa é mínima:

$$\min_{1 \leq k \leq K} \bar{F}_p(X_k) = \min_{1 \leq k \leq K} \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S F_p(X_k, Y_s). \quad (2.19)$$

- O critério de Savage F_p^S está associado à aplicação da estimativa $B_p^{\max}(X_k)$ e permite escolher as alternativas de solução X_p^S , fornecendo o mínimo para esta estimativa:

$$\min_{1 \leq k \leq K} B_p^{\max}(X_k) = \min_{1 \leq k \leq K} \max_{1 \leq s \leq S} B_p(X_k, Y_s). \quad (2.20)$$

- Por último, o critério de Hurwicz F_p^H usa uma combinação convexa de $F_p^{\min}(X_k)$ e $F_p^{\max}(X_k)$, permitindo escolher as alternativas de solução X_p^H , para as quais esta combinação é mínima:

$$\begin{aligned} \min_{1 \leq k \leq K} \left(\alpha F_p^{\max}(X_k) + (1 - \alpha) F_p^{\min}(X_k) \right) = \\ \min_{1 \leq k \leq K} \left(\alpha \max_{1 \leq s \leq S} F_p(X_k, Y_s) + (1 - \alpha) \min_{1 \leq s \leq S} F_p(X_k, Y_s) \right), \end{aligned} \quad (2.21)$$

onde $\alpha \in [0, 1]$ é o coeficiente de "pessimismo-otimismo", e sua magnitude é previamente definida pelo tomador de decisão.

A representação dos critérios de escolha como funções objetivo permite construir $m \leq 4$ problemas (de acordo com o número de critérios de escolha aplicados) da seguinte forma:

$$F_{r,p}(X) \rightarrow \text{extr}_{X \in L}, \quad r = 1, \dots, m \leq 4, \quad p = 1, \dots, q, \quad (2.22)$$

onde $F_{1,p} = F_p^W$, $F_{2,p} = F_p^L$, $F_{3,p} = F_p^S$, e $F_{4,p} = F_p^H$.

Aplicando a [Equação 2.22](#) a q matrizes com estimativas características ([Tabela 3](#)), é possível construir matrizes com estimativas de critérios de escolha mostradas na [Tabela 4](#), que refletem o desempenho de cada alternativa de solução com base nos critérios de escolha de Wald, Laplace, Savage e Hurwicz.

Tabela 4 – Matriz com as estimativas dos critérios de escolha para a p -ésima função objetivo

	$F_p^W(X_k)$	$F_p^L(X_k)$	$F_p^S(X_k)$	$F_p^H(X_k)$
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	$F_p^W(X_k)$	$F_p^L(X_k)$	$F_p^S(X_k)$	$F_p^H(X_k)$
	$\min_{1 \leq k \leq K} F_p^W(X_k)$	$\min_{1 \leq k \leq K} F_p^L(X_k)$	$\min_{1 \leq k \leq K} F_p^S(X_k)$	$\min_{1 \leq k \leq K} F_p^H(X_k)$
	$\max_{1 \leq k \leq K} F_p^W(X_k)$	$\max_{1 \leq k \leq K} F_p^L(X_k)$	$\max_{1 \leq k \leq K} F_p^S(X_k)$	$\max_{1 \leq k \leq K} F_p^H(X_k)$

Os resultados delineados na Seção 3 fornecem um arcabouço para a análise de problemas multi-objetivo no contexto de incerteza. Tal análise pode ser conduzida aplicando-se a [Equação 2.6](#) ou [2.5](#) à [Tabela 4](#). Esse processo possibilita a construção de funções de pertinência para $F_{r,p}$, $r = 1, 2, \dots, m$, gerando níveis de critérios de escolha fuzzy para a p -ésima função objetivo. Consequentemente, empregando q matrizes de níveis de critérios de escolha, é possível gerar

Tabela 5 – Matriz modificada com as estimativas dos critérios de escolha para a 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	$\mu_{A_p}^W(X_k)$	$\mu_{A_p}^L(X_k)$	$\mu_{A_p}^S(X_k)$	$\mu_{A_p}^H(X_k)$

q matrizes modificadas que representam os níveis dos respectivos critérios de escolha, como mostrado na Tabela 5.

Finalmente, aplicando a Equação 2.2, é possível agregar q matrizes com estimativas características dos critérios de escolha para obter a matriz agregada correspondente, apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Matriz com os critérios de escolha agregados

	$\mu_D^W(X_k)$	$\mu_D^L(X_k)$	$\mu_D^S(X_k)$	$\mu_D^H(X_k)$
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	$\mu_D^W(X_k)$	$\mu_D^L(X_k)$	$\mu_D^S(X_k)$	$\mu_D^H(X_k)$
	$\max_{1 \leq k \leq K} \mu_D^W(X_k)$	$\max_{1 \leq k \leq K} \mu_D^L(X_k)$	$\max_{1 \leq k \leq K} \mu_D^S(X_k)$	$\max_{1 \leq k \leq K} \mu_D^H(X_k)$

Em resumo, as informações na Tabela 6 permitem identificar e descartar as alternativas menos viáveis na tomada de decisão. Uma vez que essa tabela considera todos os cenários e funções objetivos, as alternativas com as notas mais baixas e que se destoam das demais devem ser excluídas do processo de decisão. Se a escolha entre as opções remanescentes se mostrar complexa, o modelo $\langle X, R \rangle$ de tomada de decisão pode ser aplicado. Este modelo permite uma avaliação mais detalhada com base em critérios qualitativos adicionais, garantindo uma seleção que esteja alinhada com os objetivos estratégicos desejados.

2.4 Modelos de tomada de decisão $\langle X, R \rangle$

Os modelos $\langle X, R \rangle$ de tomada de decisão permitem levar em conta e processar informações quantitativas bem como qualitativas para avaliar, comparar, selecionar, ordenar e/ou priorizar alternativas de solução. A capacidade de considerar informações qualitativas é importante e útil quando há falta de dados confiáveis ou quando o processo decisório encontra situações complexas ou ambíguas. Esses modelos permitem a inclusão de fatores como experiência pessoal, conhecimento especializado e intuição. Embora isso possa parecer menos confiável do que dados quantitativos, informações qualitativas podem ser inestimáveis em situações onde não há dados

confiáveis disponíveis ou onde a decisão é baseada em comportamento humano, emoções ou crenças (RALSTON; WILSON, 2006).

Outra característica dos modelos de tomada de decisão baseados em informações qualitativas é que eles são frequentemente utilizados em situações onde o tomador de decisão enfrenta incerteza ou ambiguidade de informações. Uma das vantagens dos modelos de decisão qualitativos é que eles podem ser mais flexíveis do que os modelos quantitativos. Como não dependem de dados numéricos específicos, eles podem ser adaptados para atender a diferentes situações e circunstâncias. Isso pode ser particularmente útil ao tomar decisões em ambientes dinâmicos ou em mudança, onde os dados podem estar incompletos ou serem não confiáveis (AMER; DAIM; JETTER, 2013).

Além disso, muitas situações que requerem a aplicação da abordagem multicritério estão associadas a problemas que inicialmente podem ser resolvidos com base em um único critério ou múltiplos critérios. Contudo, se a incerteza da informação não permitir definir uma solução única, é possível utilizar critérios adicionais, incluindo critérios de caráter qualitativo, para distinguir as alternativas.

Existem diversos formatos de representação de preferências, como discutido, por exemplo, em (PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011). Levando isso em conta, é necessário indicar que os resultados de (RAMALHO et al., 2019) permitem transformar diferentes formatos, bem como informações de caráter quantitativo, em relações de preferência fuzzy não recíprocas, aplicando as chamadas funções de transformação. Isso nos permite concentrar a atenção nos procedimentos de tomada de decisão em um ambiente fuzzy.

Suponha que exista um conjunto X de alternativas provenientes da região de incerteza de decisão e/ou alternativas predeterminadas, que devem ser avaliadas em q critérios. O problema de tomada de decisão pode ser apresentado pelo par $\langle X, R \rangle$ onde $R = \{R_1, \dots, R_p, \dots, R_q\}$ é um vetor de relações de preferência fuzzy (EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020; PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011), que podem ser apresentadas como:

$$R_p = [X \times X, \mu_{R_p}(x_k, x_l)], p = 1, 2, \dots, q, x_k, x_l \in X, \quad (2.23)$$

onde $\mu_{R_p}(x_k, x_l)$ é a função de pertinência da p -ésima relação de preferência fuzzy.

Na Equação 2.23, R_p é definido como um conjunto fuzzy de todos os pares do produto cartesiano $X \times X$, onde a função de pertinência $\mu_{R_p}(x_k, x_l)$ representa o grau em que x_k domina fracamente x_l , e conseqüentemente, o grau em que x_k não é pior que x_l para o p -ésimo critério. Deve-se notar que relações de preferência fuzzy não-recíprocas e estimativas fuzzy são de certa forma equivalentes. Em particular, se duas alternativas $x_k \in X$ e $x_l \in X$ têm estimativas fuzzy com funções de pertinência $\mu(x_k)$ e $\mu(x_l)$, então a quantidade $R(x_k, x_l)$ é o grau de preferência $\mu(x_k) \succeq \mu(x_l)$, enquanto a quantidade $R(x_l, x_k)$ é o grau de preferência $\mu(x_l) \succeq \mu(x_k)$. De acordo com (EKEL et al., 2006; EKEL et al., 1998; RAMALHO et al., 2019), as quantidades

$R(x_k, x_l)$ e $R(x_l, x_k)$ podem ser avaliadas da seguinte forma:

$$R(x_k, x_l) = \sup_{\substack{x_k, x_l \in X \\ x_k \leq x_l}} \min \{ \mu(x_k), \mu(x_l) \}, \quad (2.24)$$

$$R(x_l, x_k) = \sup_{\substack{x_k, x_l \in X \\ x_l \leq x_k}} \min \{ \mu(x_k), \mu(x_l) \}. \quad (2.25)$$

Se o indicador tiver um caráter de maximização, as equações (2.24) e (2.25) devem ser escritas para $x_k \geq x_l$ e $x_l \geq x_k$, respectivamente.

No caso da entrada ser informação quantitativa, é possível transformá-la em uma relação de preferência recíproca, de acordo com (EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020), com

$$\hat{\mu}_{R_p}(X_k, X_l) = \frac{F_p(X_k) - F_p(X_l)}{2 [\max F_p(X) - \min F_p(X)]} + 0.5, \quad (2.26)$$

se a função objetivo $F_p(X)$ deve ser minimizada, ou

$$\hat{\mu}_{R_p}(X_k, X_l) = \frac{F_p(X_l) - F_p(X_k)}{2 [\max F_p(X) - \min F_p(X)]} + 0.5, \quad (2.27)$$

se a função objetivo deve ser maximizada.

Posteriormente, é possível transformar relações de preferência fuzzy recíprocas em relações de preferência fuzzy não recíprocas de acordo com:

$$\mu_{R_p}(X_k, X_l) = \begin{cases} 1 + \hat{\mu}_{R_p}(X_k, X_l) - \hat{\mu}_{R_p}(X_l, X_k) & \text{if } \hat{\mu}_{R_p}(X_k, X_l) < 0.5 \\ 1 & \text{if } \hat{\mu}_{R_p}(X_k, X_l) \geq 0.5 \end{cases}. \quad (2.28)$$

Além de dados quantitativos, os especialistas podem fornecer informações qualitativas que são igualmente importantes. Esse tipo de informação têm grande valor, pois refletem a experiência e as perspectivas daqueles que participarão do processo decisório. Especificamente, o trabalho (ZHANG; WANG; YANG, 2007) destaca oito métodos distintos para definir preferências. Entre esses métodos estão: a ordenação de alternativas; a relação de preferência fuzzy recíproca aditiva; a relação de preferência fuzzy não-recíproca; a estimativa fuzzy; e a relação de preferência multiplicativa.

Cada um desses métodos pode ser transformado em outro, resultando na formação da relação de preferência fuzzy não-recíproca, que serve como entrada para o modelo $\langle X, R \rangle$ de tomada de decisão. Detalhes adicionais sobre esses formatos de preferência e seus processos de conversão para a relação de preferência fuzzy não-recíproca estão disponíveis nas referências (EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020; RAMALHO et al., 2019).

As matrizes de relação de preferência fuzzy podem ser processadas para construir matrizes de relação de preferência estrita de acordo com a seguinte equação:

$$R^S = R \setminus R^{-1}, \quad (2.29)$$

onde R^{-1} é a relação de preferência fuzzy inversa.

A função de pertinência correspondente a [Equação 2.29](#) pode ser descrita da seguinte forma:

$$\mu_R^{\text{Strict}}(X_k, X_l) = \max \{ \mu_R(X_k, X_l) - \mu_R(X_l, X_k), 0 \}. \quad (2.30)$$

A utilização da [Equação 2.30](#) permite construir o conjunto de alternativas não dominadas com a função de pertinência que possibilita avaliar o nível de não dominação de cada alternativa X_k de acordo com a seguinte equação:

$$\mu_R^{\text{ND}}(X_k) = \inf_{X_l \in X} [1 - \mu_R^{\text{Strict}}(X_k, X_l)] = 1 - \sup_{X_l \in X} \mu_R^{\text{Strict}}(X_k, X_l). \quad (2.31)$$

Considerando que é natural escolher alternativas que proporcionam o mais alto nível de não dominação, pode-se escolher alternativas X^{ND} de acordo com:

$$X^{\text{ND}} = \left\{ X_k^{\text{ND}} \mid X_k^{\text{ND}} \in X, \mu_R^{\text{ND}}(X_k^{\text{ND}}) = \sup_{X_l \in X} \mu_R^{\text{ND}}(X_k) \right\}. \quad (2.32)$$

As equações (2.30) - (2.32) podem ser utilizadas para a solução de problemas de escolha, bem como para avaliação, comparação, classificação e/ou priorização de alternativas para algum critério. Essas equações também podem ser aplicadas quando R é um vetor de relações de preferência fuzzy, sob diferentes abordagens para análise multi-atributo. A aplicação utilizada neste trabalho consiste na abordagem flexível com ajuste do grau de otimismo, embora outras abordagens possam ser encontradas em ([EKEL et al., 2016](#); [EKEL](#); [PEDRYCZ; JR, 2020](#)). Esta abordagem de aplicação é realizada utilizando o operador OWA, originalmente introduzido em ([YAGER, 1988](#)), da seguinte forma:

$$\mu^{\text{ND}}(X_k) = \text{OWA} \left(\mu_{R_1}^{\text{ND}}(X_k), \mu_{R_2}^{\text{ND}}(X_k), \dots, \mu_{R_q}^{\text{ND}}(X_k), \right) = \sum_{p=1}^q w_p G_p(X_k), \quad (2.33)$$

onde $G_p(X_k)$ é o maior valor entre $\mu_{R_1}^{\text{ND}}(X_k), \mu_{R_2}^{\text{ND}}(X_k), \dots, \mu_{R_q}^{\text{ND}}(X_k)$. Os pesos na [Equação 2.33](#) precisam satisfazer as seguintes restrições: $w_p > 0, p = 1, \dots, q$ e também $\sum_{p=1}^q w_p = 1$. Estes pesos podem ser indiretamente definidos pelos tomadores de decisão como descrito em ([EKEL et al., 2016](#); [EKEL](#); [PEDRYCZ; JR, 2020](#)).

3 Conexão entre construção de cenários e tomada de decisão para planejamento em longo prazo

Considerando o que foi exposto no [Capítulo 2](#), propõe-se uma melhoria ao esquema geral de tomada de decisão em ambientes de incerteza. Essa melhoria consiste na inclusão de um estágio antes e outro após a abordagem presente em ([EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020](#)). A inclusão dessas duas etapas adicionais modifica o esquema geral para decisões no longo prazo.

De forma a estabelecer uma conexão entre o planejamento e construção de cenários e a tomada de decisão, no Estágio 0 objetiva-se modelar o sistema, mapear e encapsular as incertezas associadas ao problema em questão. Nos casos em que é interessante observar o comportamento sistêmico dos agentes, propõe-se o uso de FCM para construção de cenários, pois é possível monitorar a condição de cada componente do modelo ao longo do tempo, e as relações entre os componentes podem ser estabelecidas através da equação [2.15](#) ou substituídas por qualquer outra função que relacione os conceitos.

Como o foco são problemas de longo prazo, passado um período após a decisão (6 meses, 1 ano, etc) faz sentido o estabelecimento do Estágio 4. nele, avalia-se o contexto atual um tempo após a decisão, e se levanta questões sobre a relevância e validade das alternativas, objetivos e dos cenários previamente estabelecidos.

Portanto, o método de construção de cenários é inspirado nos trabalhos ([KYRIAKARAKOS et al., 2014](#); [RALSTON; WILSON, 2006](#)), e o método de tomada de decisão tem suas bases descritas em ([EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020](#); [RAMALHO et al., 2019](#)). A principal proposta é combinar as forças desses trabalhos, possibilitando a avaliação sistêmica e dinâmica da relação das variáveis e das possíveis alternativas de decisão.

O trabalho ([RALSTON; WILSON, 2006](#)) tem uma descrição extensa sobre a construção de cenários, e suas etapas de preparação do projeto e identificação das principais variáveis e pontos de decisão foram as mais sensíveis e adequadas para as necessidades deste trabalho, considerando a revisão de literatura realizada. O uso de FCM foi ideal para análise em ambientes dinâmicos, onde é necessário combinar dados de diversas naturezas e opiniões de especialistas. Os trabalhos ([KYRIAKARAKOS et al., 2014](#); [ÖZESMI; ÖZESMI, 2004](#)) apresentam métodos de construção de cenários a partir do FCM, que possuem flexibilidade de aplicação. Os métodos e modelos de tomada de decisão apresentados em ([EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020](#)) estão na fronteira tecnológica desta área de pesquisa e já foram utilizados para resolver diversos problemas, conforme apresentado em ([PEREIRA et al., 2015](#); [PEREIRA et al., 2016](#); [RAMALHO et](#)

al., 2019; BAMBIRRA et al., 2023). Considerando o exposto, e com o objetivo de aplicar os resultados de (EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020) para problemas de tomada de decisão de longo prazo em ambientes dinâmicos, este trabalho propõe uma variação do esquema geral de tomada de decisão multicritério em ambientes de incerteza ilustrado na Figura 1.

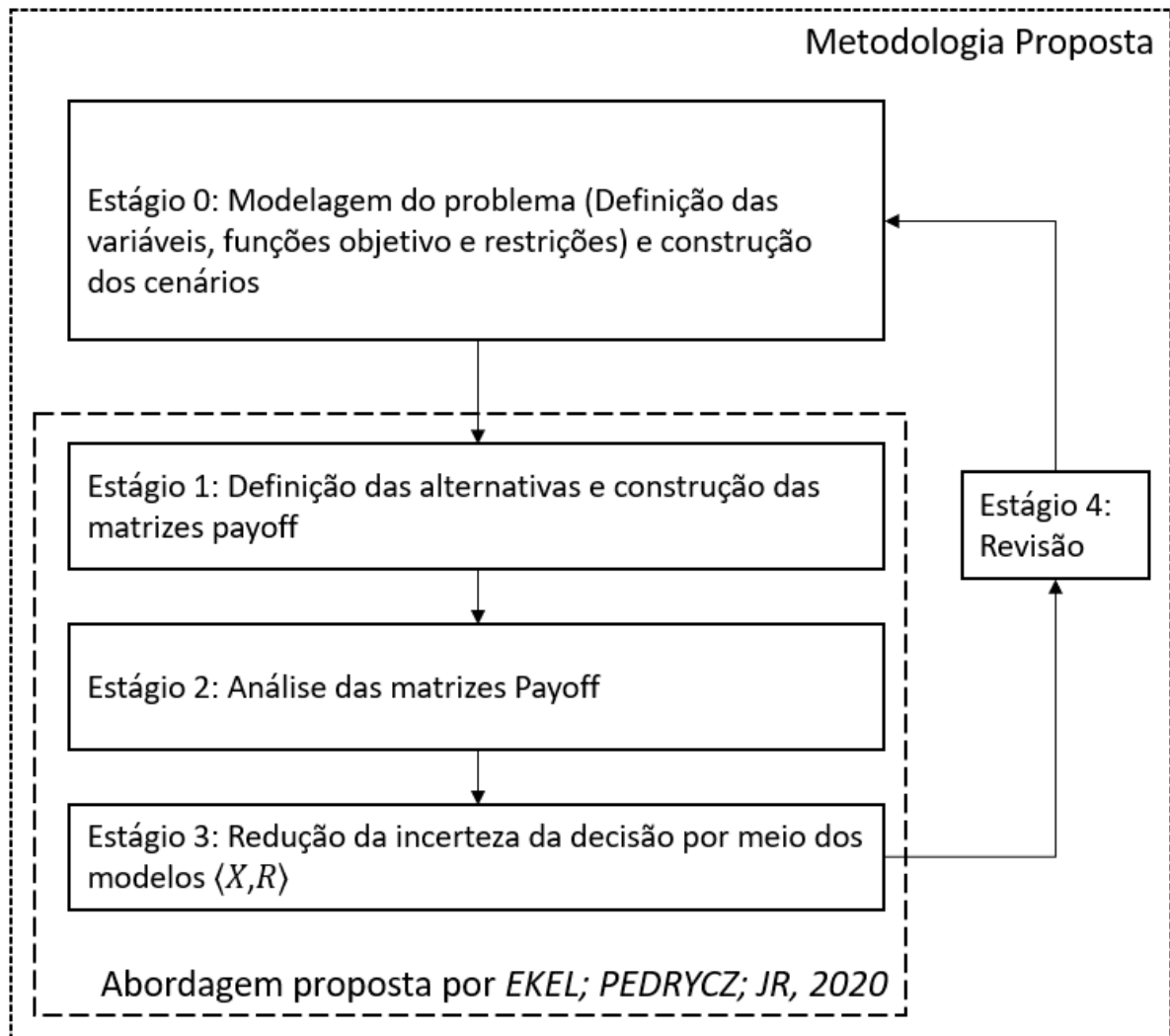


Figura 1 – Metodologia Proposta

- A Etapa zero do processo, objetiva essencialmente a compreensão profunda do problema e o reconhecimento do ambiente específico de incerteza no qual o problema se situa. Esta fase inicial é estruturada em várias ações críticas, detalhadas a seguir:
 - Compreensão do Problema: Inicia-se com uma análise detalhada do problema em questão, buscando entender suas nuances, seus componentes e sua importância. Isso inclui a identificação clara dos objetivos que se deseja atingir e dos desafios que se pretende superar.
 - Identificação do Contexto de Incerteza: Avalia-se o ambiente no qual o problema existe, focando especialmente nas incertezas que influenciam nos objetivos. Esta

análise abrange a identificação dos tipos de incerteza (por exemplo, incertezas de mercado, tecnológicas, regulatórias, etc.) e a determinação de como estas podem afetar as decisões e os resultados.

- Seleção da Técnica de Construção de Cenários: Com base no tipo de incerteza identificado, escolhe-se a técnica mais apropriada para a construção de cenários. Esta escolha acontece para garantir que os cenários desenvolvidos sejam capazes de modelar eficazmente as incertezas relevantes. O trabalho (PEREIRA et al., 2015) sugere o uso de LP_τ -sequências (SOBOL, 1979) para a construção dos estados da natureza no caso de definição de parâmetros por intervalo. As LP_τ -sequências também podem ser usadas em definições probabilísticas, assim como em configurações fuzzy e qualitativas de parâmetros (RAMALHO et al., 2019; FIGUEIREDO et al., 2021). Entretanto outro método de construção de cenários pode ser utilizado, como os apresentados em (PEREIRA, 2019).
 - Desenvolvimento de Cenários: Após a seleção da técnica, procede-se à construção dos cenários propriamente ditos. Esta etapa envolve a modelagem das diferentes incertezas identificadas, traduzindo-as em cenários que refletem possíveis futuros. Os cenários são desenvolvidos para abranger um espectro amplo de possibilidades, permitindo uma análise abrangente das opções de decisão.
 - Validação dos Cenários: Finalmente, os cenários construídos são submetidos a um processo de validação para assegurar sua relevância e aplicabilidade. Isso pode envolver a revisão por parte de especialistas no domínio em questão ou a comparação com dados e tendências atuais para verificar sua plausibilidade.
- A primeira etapa consiste em construir q matrizes de resultados, de acordo com o número de funções objetivo que se deseja considerar, para todas as combinações das alternativas de solução $X_k, k = 1, \dots, K$, e um determinado número de estados da natureza (cenários) $Y_s, s = 1, \dots, S$. Para construir matrizes de resultados, é necessário resolver S problemas multicritérios formalizados dentro da estrutura dos modelos $\langle X, F \rangle$. Ao resolvê-los, é possível obter as alternativas de solução $X_k, k = 1, \dots, K$, para $K \leq S$. Conseqüentemente, $X_k, k = 1, \dots, K$ são substituídos por $F_p(X), p = 1, \dots, q$ para $Y_s, s = 1, \dots, S$. Essas substituições fornecem as q matrizes de resultados.
 - A segunda etapa está relacionada à análise das matrizes de resultados obtidas. A execução desta fase é baseada na abordagem proposta em (EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020) discutida anteriormente. No entanto, a capacidade de resolução insuficiente desta etapa pode levar a soluções não únicas ou mal distinguíveis e essa circunstância requer a aplicação da terceira etapa.
 - A terceira etapa está associada à construção e análise de modelos $\langle X, R \rangle$ para a redução de regiões de incerteza na tomada de decisão. Como indicado em (EKEL; PEDRYCZ; JR,

2020; RAMALHO et al., 2019), o uso desses modelos permite a inclusão de índices de caráter qualitativo na análise, que são baseados no conhecimento, experiência e intuição dos especialistas envolvidos.

- A quarta etapa do processo, focada na revisão e monitoramento, inicia-se após um intervalo de tempo previamente determinado (6 meses, 1 ano, etc). Esta etapa acontece para garantir que o planejamento permaneça alinhado com o ambiente dinâmico em que se insere. Dessa forma, são componentes dessa etapa:
 - Avaliação do Contexto Atual: Realiza-se uma análise detalhada do contexto atual, considerando novas informações e mudanças significativas no ambiente externo e interno que possam afetar os objetivos e estratégias inicialmente estabelecidos.
 - Relevância e Validade das Alternativas: Examina-se a adequação e eficácia das alternativas de ação previamente selecionadas. Questiona-se se estas alternativas continuam sendo as mais eficientes para alcançar os objetivos propostos ou se tornaram menos efetivas devido a mudanças nas condições ou nos requisitos.
 - Análise da Pertinência dos Cenários: Questiona-se quais cenários desenvolvidos anteriormente ainda são relevantes e quais se tornaram obsoletos. Essa análise objetiva identificar cenários se tornaram obsoletos e, portanto, não são mais úteis para o planejamento.
 - Identificação de Incertezas Emergentes: Avalia-se a emergência de novas incertezas que não foram previstas ou consideradas anteriormente. Isso inclui a identificação de novos desafios, oportunidades e riscos que surgiram desde a última tomada de decisão.
 - Desenvolvimento de Novos Cenários: Com base nas incertezas emergentes e nas mudanças no contexto, considera-se a necessidade de desenvolver novos cenários. Estes devem abordar adequadamente as novas condições e possibilitar uma reavaliação das estratégias e alternativas.
 - Redefinição do Problema: Analisa-se se as mudanças no ambiente ou nas condições internas exigem uma redefinição do problema inicial. Isso pode incluir a revisão dos objetivos, metas e restrições do planejamento.
 - Exploração de Alternativas Adicionais: Explora-se a possibilidade de adicionar novas alternativas de ação que possam ser mais adequadas às condições atuais ou futuras.

Este detalhamento busca esclarecer cada passo da etapa de revisão e monitoramento. Concluída essa revisão, o processo retorna ao estágio inicial para um novo ciclo de planejamento e tomada de decisão.

4 Estudos de caso

Durante a década de 1960, o trabalho (MARKOWITZ, 1968) iniciou a discussão sobre modelos de construção de carteiras de investimento. A teoria apresentada neste trabalho é a base de qualquer estudo que aborde o assunto. Várias releituras podem ser encontradas, por exemplo, em (MARKOWITZ, 1999) e (MANGRAM, 2013). Um dos principais resultados desses trabalhos é que o risco das carteiras pode ser reduzido pela alocação de recursos em diferentes ativos. Ao considerar a diversidade da carteira, o valor do portfólio é protegido contra eventos inesperados. Embora tenha sido projetada para aplicação em mercados de ações, os conceitos dessa aplicação estendem-se a qualquer tipo de carteira de investimentos, incluindo carteiras de energia, como em (WERON, 2000; CHARWAND; GITIZADEH; SIANO, 2017) e (ODEH; WATTS; FLORES, 2018).

No contexto da operação de mercados de energia, as empresas compram e vendem energia para garantir sua estabilidade operacional. Para melhorar a forma como realizam essa tarefa, as empresas começaram a aplicar modelos de gestão de risco financeiro e passaram a realizar a negociação de energia com base em uma abordagem multicritério, considerando as receitas de mercado e os riscos diretamente na construção de suas carteiras de energia (DAHLGREN; LIU; LAWARREE, 2003).

Do ponto de vista de um grande consumidor de energia, como uma empresa de mineração, por exemplo, o principal objetivo é reduzir os custos com energia. Deve-se garantir ao consumidor um fornecimento de energia barato com baixa volatilidade de preços para assegurar sua estabilidade operacional a longo prazo (CANELAS; PINTO-VARELA; SAWIK, 2020; BOŽIĆ et al., 2020). Para resolver esse problema, existem opções de compra de usinas para autoprodução de energia ou de aquisição de contratos de *hedge* de longo prazo. No entanto, essas alternativas acarretam riscos que devem ser considerados no processo de tomada de decisão. Por sua vez, do ponto de vista de um gerador de energia, seu principal objetivo é a maximização de receita, ao mesmo tempo que se tenta diminuir os riscos de exposição ao preço de mercado do seu portfólio. Portanto entende-se que tanto gerador, e consumidor compartilham os mesmos objetivos (sendo que custo com energia pode ser análogo ao oposto da receita com energia).

Considerando que este trabalho, do ponto de vista da aplicação prática, possui aplicação na gestão de risco de carteiras de energia, é necessário indicar os resultados de (WERON, 2000; DENTON et al., 2003; DAHLGREN; LIU; LAWARREE, 2003) e (SADEGHI; SHAVVALPOUR, 2006). Estes trabalhos podem ser considerados como as bases teóricas iniciais da discussão do problema da gestão de risco em carteiras de energia, que continua atualmente. Esses trabalhos apresentam a razão pela qual os preços da energia são parâmetros voláteis e discutem abordagens de engenharia financeira para medir riscos no mercado de energia.

Os resultados apresentados em (SADEGHI; SHAVVALPOUR, 2006) abordaram a modelagem da métrica de risco VaR. Os autores de (SADEGHI; SHAVVALPOUR, 2006) explicam como a metodologia deve ser usada, apresentando requisitos como previsões de retorno. A métrica VaR também é abordada em (DAHLGREN; LIU; LAWARREE, 2003), assim como CVaR e outras métricas. Expõe alguns exemplos e comparações de resultados dos métodos utilizados. Em (DENTON et al., 2003), diferentes métricas de risco são apresentadas, e como os riscos de mercado podem ser medidos e geridos utilizando modelos de opções reais e técnicas de otimização estocástica. Além disso, em (WERON, 2000), há uma discussão sobre como os preços da energia podem flutuar e os riscos associados à precificação e hedge de derivativos de eletricidade.

No que diz respeito à negociação, em geral, os agentes buscam estratégias comerciais que contemplam as produções sazonais de cada fonte em cada período do ano, a fim de oferecer a melhor negociação. O trabalho (CAMARGO et al., 2020) trata da gestão de contratos de comercialização de energia por meio da formação de carteiras compostas por fontes de energia renováveis, sob a perspectiva do gerador, consumidor e comerciante. Do ponto de vista do gerador, este trabalho analisa políticas de gestão de risco definidas com base na contabilização periódica do CVaR e sua influência nas estratégias de contratação. Adicionalmente, este trabalho explora como os contratos de *Swap* são usados para proporcionar segurança às partes em momentos em que o mercado de curto prazo está vulnerável, dadas as condições de preços de compra e venda, o equilíbrio contratual do gerador hidráulico, a aversão ao risco do agente e as projeções do PLD e do GSF no horizonte de planejamento.

Para definir essas projeções no mercado brasileiro, os agentes usam um modelo computacional chamado NEWAVE. No entanto, como é uma ferramenta em constante mudança, usá-la como única referência na tomada de decisão pode ser inadequado (MACEIRAL et al., 2018; PEREIRA et al., 2018). O fato de o sistema elétrico passar por constantes evoluções regulatórias e o uso de novas tecnologias também podem invalidar essas projeções a longo prazo (BRADSHAW, 2017). O uso de estimativas puramente probabilísticas no planejamento de longo prazo, incluindo o planejamento de carteiras de energia, coloca em dúvida os resultados obtidos, pois com o tempo, a realidade sofre mudanças (DURBACH; STEWART, 2012; STEWART; DURBACH, 2016). Exemplos de distorções entre os valores previstos e reais podem ser ocasionados por: modificações na legislação, o surgimento de novas tecnologias de geração que alteram os custos de geração, mudanças climáticas e alterações nas precipitações, etc. Enquanto modelos probabilísticos podem gerar erros significativos no planejamento e na tomada de decisão de longo prazo, estimativas possibilísticas, como cenários, bem como o uso de informações qualitativas permitem a avaliação de rupturas estruturais e a avaliação das consequências de diferentes resultados (AMER; DAIM; JETTER, 2013; RALSTON; WILSON, 2006). Utilizando cenários para modelar incertezas, é possível levar em conta várias opiniões apresentadas por especialistas. Situações como mudanças climáticas ou pandemias, por exemplo, podem ser modeladas e consideradas nos processos de tomada de decisão.

Para abordar as limitações dos métodos convencionais de avaliação de risco, o trabalho de (ILBAHAR; KAHRAMAN; CEBI, 2022) incorpora o julgamento subjetivo dos tomadores de decisão para mapear incertezas nos fatores de risco de projetos de energia renovável. No geral, o artigo apresenta uma abordagem nova e abrangente para avaliar riscos em investimentos em energia renovável que supera as limitações dos métodos tradicionais. No entanto, a abordagem proposta pode exigir um nível mais elevado de especialização e esforço na coleta e análise de dados, o que pode limitar sua aplicação prática em alguns contextos.

Outro trabalho que lida com a tomada de decisão em investimentos em energia é (MARTÍNEZ; DINÇER; YÜKSEL, 2023). Este trabalho propõe uma abordagem que combina um processo analítico hierárquico *fuzzy* (FAHP) e uma técnica para a ordem de preferência por similaridade à solução ideal (TOPSIS) para avaliar a adequação de novos serviços potenciais no setor de energia renovável. Os desafios e complexidades associados ao processo de desenvolvimento de novos serviços no setor de energia renovável também são discutidos, incluindo incerteza tecnológica e a necessidade de colaboração entre as partes interessadas para se encontrar soluções robustas.

Seguindo o mesmo caminho, os autores de (de Freitas et al., 2020) propõem um modelo de apoio à decisão estocástico para investimentos em energia renovável no Brasil que considera retornos esperados e CVaR como funções objetivos e dados de saída do NEWAVE para criação de cenários. O estudo revela que o risco associado a fontes intermitentes pode ser gerido por meio de avaliações de CVaR, embora o nível de aversão ao risco do tomador de decisão influencie significativamente a posição de mercado da empresa. Os autores descobriram que uma base de ativos diversificada da empresa, juntamente com a natureza complementar das fontes de geração, pode reduzir significativamente os riscos financeiros do portfólio do investidor, esses resultados mostraram que a decisão de um novo investimento deve considerar o portfólio atual da empresa.

Estudos recentes discutindo a tomada de decisão multiobjetivo na comercialização de energia também incluem os trabalhos (YANG et al., 2022) e (WANG et al., 2022). Os autores de (YANG et al., 2022) propõem um mecanismo de negociação híbrido que opera em múltiplas escalas de tempo, levando em conta as velocidades e limites de transmissão de várias fontes de energia, enquanto desenvolvem uma estratégia baseada no processo de decisão de Markov. Por outro lado, os autores de (WANG et al., 2022) exploram estratégias de negociação de energia em um sistema de energia residencial. Embora ambos os estudos apresentem estratégias que melhoram os custos de energia para os agentes envolvidos, estes estudos tendem a ignorar outras necessidades dos agentes, comprometendo assim a construção de um portfólio robusto. Além disso, eles se concentram em análises de curto prazo, o que pode limitar a abrangência e a aplicabilidade prática de suas estratégias.

Ao tomar decisões de longo prazo, é essencial considerar a incerteza e a variabilidade do futuro. É aí que as informações possibilísticas se tornam cruciais. Diferentemente das informações probabilísticas, que se baseiam na análise estatística e fornecem a probabilidade de certos resultados ocorrerem, as informações possibilísticas consideram a incerteza do futuro e

concentram-se na gama de possíveis resultados sem atribuir probabilidades (EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020). Isso é necessário, pois o futuro está em constante evolução, com mudanças regulatórias, tecnológicas e outras alterando continuamente a gama de possíveis resultados, e é isso que torna este trabalho diferente dos mencionados acima. Portanto, os tomadores de decisão devem estar cientes de que as probabilidades podem rapidamente se tornar obsoletas e devem estar preparados para adaptar seus planos de acordo. Nesse sentido, uma visão possibilística da tomada de decisão, focando na gama de possíveis resultados em vez de atribuir probabilidades, pode ser mais confiável a longo prazo (PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011).

De acordo com (SANTOS et al., 2014), para contabilizar a receita de um portfólio de energia, seja W o conjunto de ativos de energia, entende-se que $x_{i,t} \in W$ é o volume resultante da compra (ou venda, se negativo) de um ativo de energia i no período t . Portanto, o resultado (receita ou despesa) da negociação dos ativos de energia de um agente ϱ_t^E pode ser descrito da seguinte forma:

$$\varrho_t^E(x_t) = h_t \left(\sum_{c=1}^C \psi_{c,t} v_{c,t} + \sum_{\forall i \in W_c} \psi_{i,t} x_{i,t} \right), \quad (4.1)$$

onde h_t é o número de horas dentro do período t , W_c é o conjunto de ativos que são contratos de energia, C é o número total de contratos, I é o número total de ativos de um certo tipo, v é o volume de energia comprada/vendida já existente no portfólio, e ψ é o preço do contrato/ativo.

O custo de operação e manutenção dos ativos do agente $\varrho_{t,s}^M$ pode ser descrito como:

$$\varrho_{t,s}^M(x_t) = h_t \sum_{\forall i \in W \wedge \neg W_c} -\theta_i (g_{i,t,s} + x_{i,t}), \quad (4.2)$$

onde θ_i é o custo de operação e manutenção da planta, modelado por uma constante cuja unidade é expressa em R\$/MWh, e $g_{i,t,s}$ é garantia física do ativo.

E a receita, ou despesa, resultante da exposição de energia ao mercado *spot* $\varrho_{t,s}^P$ pode ser descrita como:

$$\varrho_{t,s}^P(x_t) = h_t \rho_{t,s} \xi_{t,s}(x_t), \quad (4.3)$$

onde ρ é o preço de liquidação das diferenças, e ξ a exposição de energia ao mercado *spot*. A exposição por sua vez é calculada da seguinte forma:

$$\xi_{t,s}(x_t) = \sum_{i=1}^I \gamma_{t,s} x_{i,t} + \sum_{\forall i \in W \wedge \neg W_c} \gamma_{t,s} g_{i,t,s} + \hat{V}_{t,s} - \check{V}_{t,s}. \quad (4.4)$$

Na equação (4.4), $\gamma_{t,s}$ é igual a 1 para todos os ativos, exceto para hidráulicas, participando do MRE, já que γ é o GSF. O valor da garantia física, em geral, define a quantidade máxima de energia que o projeto pode comercializar (SANTOS et al., 2014). Os volumes totais resultantes de contratos de compra ou venda de energia são representados pelos termos $\hat{V}_{t,s}$ e $\check{V}_{t,s}$, respectivamente. Em outras palavras, a porção que compõe o resultado da exposição consiste no valor do saldo entre o recurso e a exigência.

Portanto, a receita total de um agente com múltiplos ativos de diferentes tipos $\varrho_{t,s}$ pode ser definida pela seguinte equação:

$$\varrho_{t,s}(x_t) = \varrho_t^E(x_t) + \varrho_{t,s}^M(x_t) + \varrho_{t,s}^P(x_t). \quad (4.5)$$

Considerando que esta é uma abordagem de avaliação de investimentos de longo prazo, a sazonalidade e a modulação de energia, práticas utilizadas pelos agentes do mercado brasileiro para operação de portfólio em prazos mensais e diários, como as apresentadas em (SANTOS et al., 2022), não serão consideradas.

4.1 Estudo de caso I: Aquisição de ativos de energia em uma empresa de geração

A energia elétrica é uma *commodity* com alta volatilidade e incerteza em seu preço. Com a evolução dos mercados de energia, criou-se a possibilidade para agentes de mercado negociarem livremente essa *commodity*. Esse fato torna os mercados mais dinâmicos e competitivos (BOŽIĆ et al., 2020; SADEGHI; SHAVVALPOUR, 2006). Com as mudanças no setor elétrico e avanços na abertura do mercado de energia, que levaram a um aumento no número de transações, os agentes perceberam que uma gestão de risco eficiente é essencial para o desempenho saudável dessa atividade (WERON, 2000).

A análise de risco é estrategicamente importante, pois é necessário identificar fatores que influenciarão o retorno financeiro de um investimento (CHAWDA; BHAKAR; MATHURIA, 2016). A aquisição de novos ativos de energia por um agente gerador não pode ser decidida baseando-se apenas em seus custos, seja de investimento ou geração (operacional), pois é uma atividade com impactos de longo prazo. Durante a tomada de decisão sobre uma mudança no portfólio, riscos de diferentes naturezas devem ser considerados (DAHLGREN; LIU; LAWARREE, 2003; DENTON et al., 2003; Pérez Odeh; WATTS; NEGRETE-PINCETIC, 2018).

Como mencionado na [Capítulo 4](#), o mercado de energia brasileiro opera e é orientado para um modelo autorregressivo periódico utilizado pelo Operador Nacional do Sistema para seu controle e operação (MACEIRAL et al., 2018). Por sua vez, outros participantes do mercado também utilizam esta ferramenta para a gestão de riscos comerciais e operacionais. No entanto, devido às características do setor, as previsões de preço e geração retornadas por este sistema são sensíveis às condições iniciais e às previsões climáticas. Essa sensibilidade pode influenciar a precisão do resultado do modelo, e confiar em uma única previsão pode não ser suficiente para a tomada de decisão.

Caracterizando isso, é necessário enfatizar que a maioria dos métodos relacionados à comercialização de energia e à gestão de portfólio é baseada na abordagem probabilística (ABBA; BALTA-OZKAN; HART, 2022). No entanto, não é possível falar sobre o futuro e

construir o futuro com base em informações e tendências passadas para o planejamento e tomada de decisão no longo prazo (como evidenciado por eventos como a crise financeira global de 2008 e a pandemia de COVID em 2020). Portanto, este estudo de caso consiste na utilização da metodologia proposta para a avaliação de alternativas de investimento para um portfólio de energia de um agente gerador de energia elétrica. Este problema se originou de uma aplicação prática e foi inspirado em uma situação real enfrentada por uma empresa no setor energético, refletindo desafios específicos do ambiente de mercado atual, que resultou com a publicação de (BAMBIRRA et al., 2023).

4.1.1 Definição dos cenários, parâmetros de portfólio e alternativas

Por escolha dos tomadores de decisão, a análise feita com base em possibilidades utiliza dois cenários previamente definidos pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2020; Empresa de Pesquisa Energética, 2021), e também conta com um universo restrito de alternativas previamente definidas. O horizonte de estudo de 2023 a 2033 foi considerado.

A Figura 2 mostra o comportamento médio dos preços ao longo do tempo em cada cenário, bem como a definição adotada do preço de balcão OTC. O preço futuro OTC representará o perfil de preço que os agentes estão dispostos a negociar no mercado livre ao longo do horizonte.

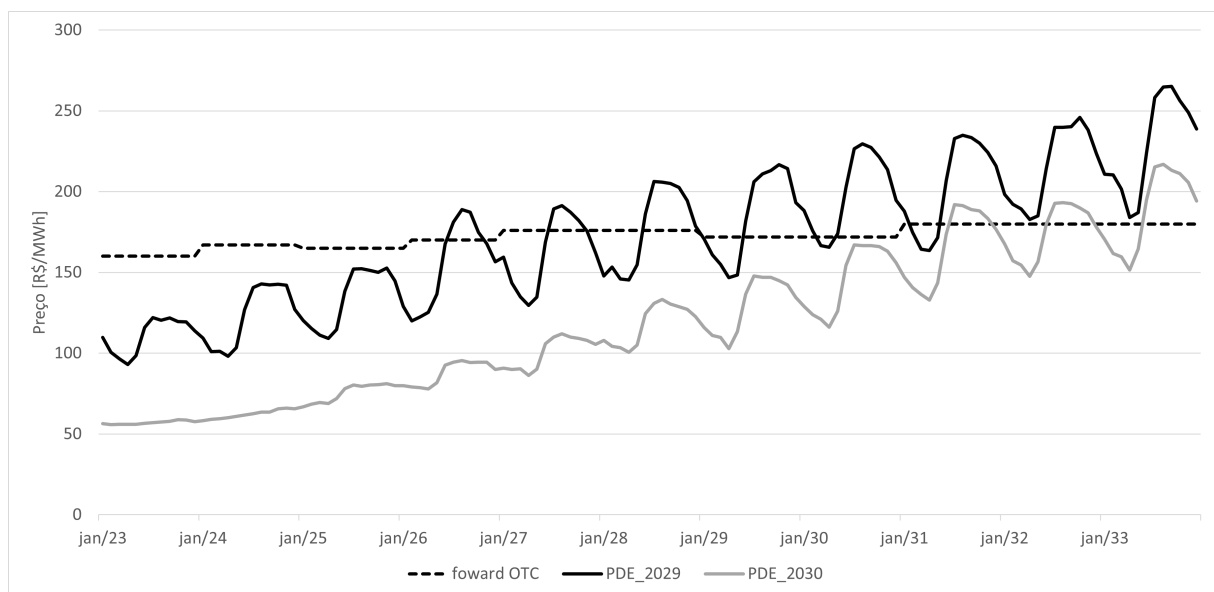


Figura 2 – PLD médio dos cenários e preço futuro de balcão

O conjunto existente de ativos para o produtor de energia examinado neste estudo pode ser vista na Tabela 7. Esta tabela compila os recursos da empresa (onde a coluna **Garantia física total** > 0) e os requisitos (onde a coluna **Garantia física total** ≤ 0), categorizando-os pelo tipo de fonte.

O recurso considerado para as usinas depende do seu perfil de geração associado, como mostrado na Figura 3. As usinas hidrelétricas do portfólio dependem do cenário avaliado, uma

Tabela 7 – Composição do portfólio

Tipo	Garantia física total [MWm]	Custo médio de operação e manutenção [R\$/MWh]	Expiração da concessão
Usinas hidrelétricas - grupo 1	38,3	0,54	31/05/2028
Usinas hidrelétricas - grupo 2	36,0	0,54	31/07/2032
Usinas hidrelétricas - grupo 3	128,6	0,54	31/12/2035
Usinas hidrelétricas - grupo 4	122,8	0,54	25/08/2036
Usinas eólicas	67,5	0,21	31/12/2033
Contratos de venda 1	-325,0	225,00	31/12/2033
Contratos de venda 2	-23,0	230,00	31/12/2033

vez que seu recurso é caracterizado pela projeção do GSF para o futuro (mostrado na [Figura 4](#)), pois pertencem ao MRE.

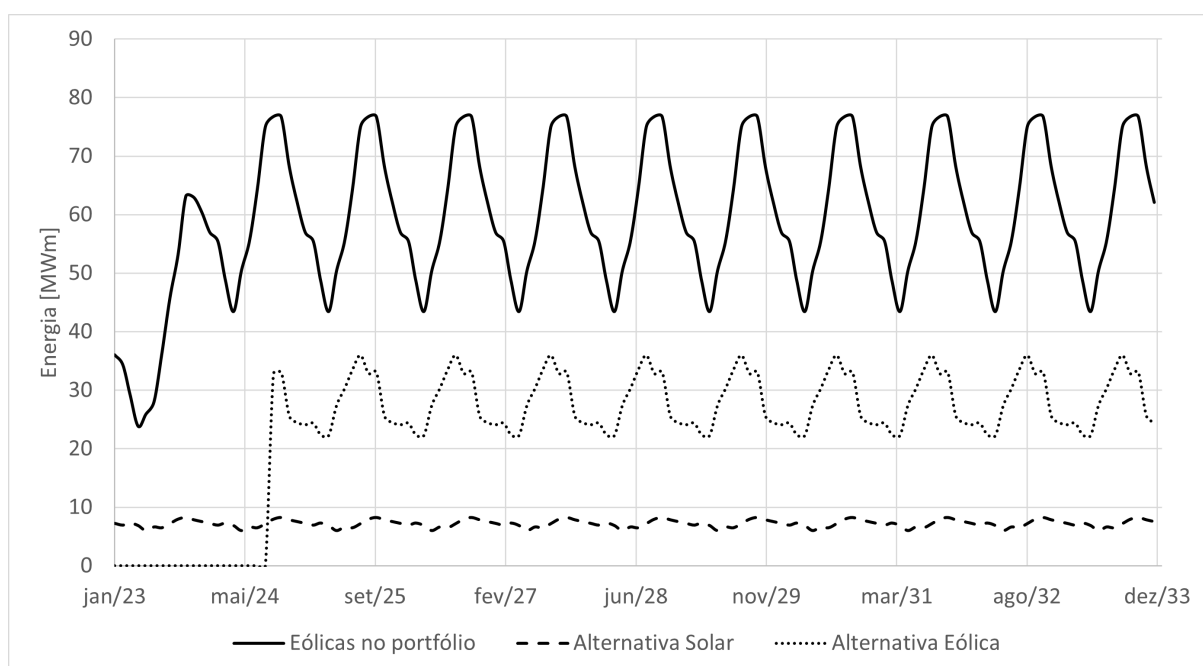


Figura 3 – Perfil de geração previsto das usinas

As alternativas de investimento são descritas na [Tabela 8](#), e as características das usinas em questão são dadas na [Tabela 9](#). Portanto, estas alternativas serão avaliadas considerando ou a compra individual de cada usina combinada com a venda total ou parcial de energia, ou a aquisição das usinas juntas para formar a composição do portfólio. Em todos os casos de contratação, apenas contratos firmes são considerados, que são contratos com valores fixos volume e preço ao longo do horizonte de contratação, sem qualquer flexibilidade ou prêmio.

As alternativas finais para tomada de decisão são definidas da seguinte forma:

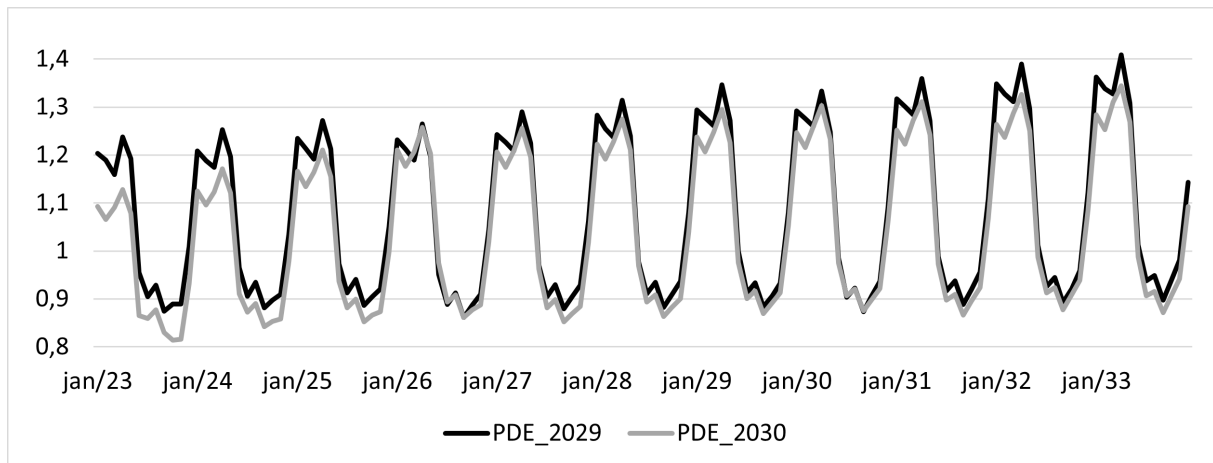


Figura 4 – GSF médio nos cenários

Tabela 8 – Descrição das alternativas

Tipo de Alternativa	Garantia Física [MWm]	Custo de Operação [R\$/MWh]	Entrada no Portfólio	Expiração da Concessão
Usina eólica	28,0	0,00	01/09/2024	31/05/2057
Usina solar	8,0	0,00	01/01/2022	31/12/2033
Contrato de venda de usina eólica	-28,0	210,00	01/01/2022	31/12/2033
Contrato de venda de usina solar	-8,0	197,50	01/09/2024	31/12/2033

Tabela 9 – Características das alternativas

Nome	Capacidade Instalada [MW]	Fator de Capacidade	Custo de Investimento [M R\$]
Usina eólica	53,7	0,52	250,00
Usina solar	47,0	0,17	172,00

- X_0 : Manter o portfólio atual;
- X_1 : Portfólio atual com a adição da usina solar com venda contratual de 100% de sua garantia física;
- X_2 : Portfólio atual com a adição da usina eólica com venda contratual de 100% de sua garantia física;
- X_3 : Portfólio atual com a adição da usina eólica com venda contratual de 80% de sua garantia física;
- X_4 : Portfólio atual com a adição da usina eólica com venda contratual de 50% de sua garantia física;

- X_5 : Portfólio atual com a adição das usinas eólica e solar com venda contratual de 100% de suas garantias físicas;
- X_6 : Portfólio atual com a adição da usina solar com venda contratual de 75% de sua garantia física;
- X_7 : Portfólio atual com a adição da usina solar com venda contratual de 75% de sua garantia física e da usina eólica com venda contratual de 80% de sua garantia física.

Neste estudo de caso, seis funções objetivos são considerados a fim de atender especificamente às demandas únicas do agente de geração de energia envolvido na aquisição de ativos. Todas as alternativas são simuladas para obter seu desempenho em cada objetivo para cada um dos cenários. O VPL é calculado considerando uma taxa de desconto anual de 8%.

4.1.2 Funções objetivo

A decisão de investir em um novo ativo juntamente com um portfólio existente é frequentemente avaliada usando o VPL, um dos fatores mais comuns na avaliação de investimentos. O VPL retrata o resultado do fluxo de caixa do portfólio ao longo de um período, incluindo o investimento inicial de capital para a aquisição do ativo, a estimativa de lucro relacionada a esse investimento e o valor residual do investimento. A equação adotada é expressa da seguinte forma:

$$\text{VPL}_\eta(X) = -\hat{C}(X) + \sum_{t=1}^T \frac{Q_{t,\eta}(X)}{(1+a)^t} + \frac{\hat{V}(X)}{(1+a)^T}, \quad (4.6)$$

onde a é a taxa de desconto, η é o índice da série originada do NEWAVE, os custos de investimento \hat{C} são descontados em $t = 1$, e o valor residual \hat{V} é adicionado em T . Portanto, a primeira função objetivo considerada, avaliada para $s = 1, \dots, S$, é o valor presente líquido esperado do portfólio (NETO et al., 2017a; de Freitas et al., 2020), que pode ser calculado da seguinte forma:

$$E[\text{VPL}]_s(X) = \frac{1}{2000} \sum_{\eta=1}^{2000} \text{VPL}_\eta(X). \quad (4.7)$$

Como descrito anteriormente, este estudo considera um cenário como sendo o conjunto de 2000 séries provenientes do NEWAVE. Neste estudo, a avaliação do risco do portfólio fundamenta-se no CVaR, uma variante específica do VaR, conforme proposto em (ROCKAFELLAR; URYASEV, 2000). O CVaR ilustra a receita esperada nos cenários mais adversos, correspondendo a $\alpha\%$ dos casos, promovendo uma decisão conservadora que se concentra nas condições menos rentáveis. Para um determinado histograma, a probabilidade de $f(X, y)$ não exceder um limite ζ pode ser calculada com $\Psi(X, \zeta)_s = \int_{f(x,y) \leq \zeta} b(y) dy$, onde $b(y)$ é a função de densidade de probabilidade, e Ψ a função de distribuição cumulativa de probabilidade.

Portanto, os valores de VaR e CVaR para um nível β , avaliados para $s = 1, \dots, S$, podem ser descritos respectivamente por:

$$\text{VaR}_s(X) = \min \{ \zeta \in \mathbb{R} : \Psi_s(X, \zeta) \geq \beta \}, \quad (4.8)$$

$$\text{CVaR}_s(X) = (1 - \beta)^{-1} \int_{f(X,y) \leq \text{VaR}_s(X)} f(X,y)b(y)dy. \quad (4.9)$$

onde $\text{CVaR}(X)_s$ é a segunda função objetivo.

Por sua vez, a terceira função objetivo, RaR, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\text{RaR}_s(X) = E[\text{VPL}]_s(X) - \text{CVaR}_s(X), \quad s = 1, \dots, S. \quad (4.10)$$

Essas funções objetivo estão graficamente representadas na [Figura 5](#). Como apresentado nessa figura, para um determinado histograma de VPLs, deve-se identificar os piores VPLs de $\beta\%$ (área destacada na [Figura 5](#)). O valor do VaR representa o VPL que delimita essa área, e o valor do CVaR reflete a média dos piores valores de VPL. O RaR pode ser calculada a partir da diferença entre o VPL esperado e o CVaR. Portanto, a segunda função objetivo considerada é o CVaR, e a terceira é o RaR. A escolha do CVaR como a segunda função objetivo é explicada por suas vantagens sobre o VaR ([ROCKAFELLAR; URYASEV, 2000](#); [DAHLGREN; LIU; LAWARREE, 2003](#)).

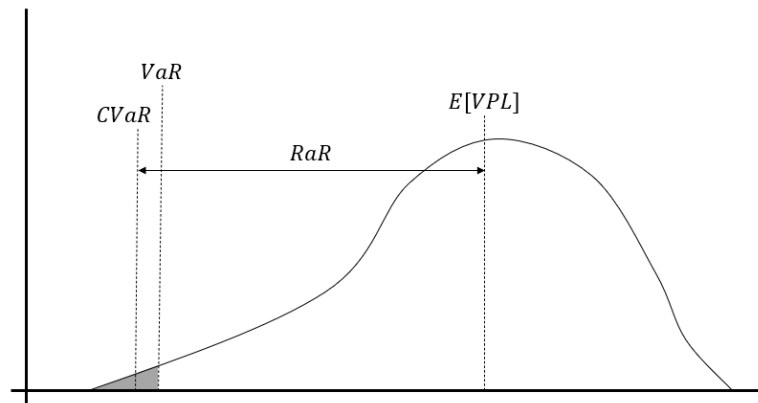


Figura 5 – Estimativas da distribuição de VPLs

Considerando as complexidades e incertezas associadas à tomada de decisão no longo prazo, os responsáveis pela decisão expressaram preocupações em utilizar uma taxa livre de risco para a definição do índice Sharpe. Esta hesitação surgiu devido à dificuldade em prever o comportamento futuro das taxas de juros e outros fatores econômicos. Como alternativa, preferiram utilizar a posição atual da empresa como referência para avaliação. Esta abordagem levou ao desenvolvimento do InS como a quarta função objetivo, concebida para refletir de forma mais precisa a realidade e as expectativas dos tomadores de decisão. O desenvolvimento de novos objetivos, como o InS, constitui uma das propostas desta tese, destacando a inovação e a

contribuição ao campo da tomada de decisão em ambientes de incerteza envolvidas na aquisição de ativos de energia.

O InS, portanto, quantifica o grau de melhoria no CVaR em comparação ao $E[VPL]$ quando se transita de uma posição atual para outra. Esta métrica é particularmente útil na avaliação de alternativas de investimento de diferentes volumes, oferecendo uma perspectiva mais alinhada com as condições atuais do mercado e as expectativas da empresa. O índice é avaliado para $s = 1, \dots, S$, é calculado considerando variações positivas do $CVaR$ da seguinte maneira:

$$\text{InS}_s(X) = \frac{\Delta \text{CVaR}_s(X)}{\Delta E[VPL]_s(X)}, \quad \Delta \text{CVaR}_s(X) > 0, \quad \Delta E[VPL]_s(X) \neq 0, \quad (4.11)$$

onde ΔCVaR é a variação do CVaR em comparação com a posição atual e $\Delta E[VPL]$ é a variação da receita esperada em comparação com a posição atual.

Portanto o problema está associado a consideração simultânea dessas quatro funções objetivos, e pode ser escrito da seguinte forma:

$$F_p(X) \rightarrow \text{extr}, \quad p = 1, \dots, q,$$

$$\text{onde} \begin{cases} F_1(X) & \rightarrow \max_{X \in L}, \\ F_2(X) & \rightarrow \max_{X \in L}, \\ F_3(X) & \rightarrow \min_{X \in L}, \\ F_4(X) & \rightarrow \max_{X \in L}. \end{cases} \quad (4.12)$$

Para complementar o processo de tomada de decisão, se houver dúvidas sobre a robustez das alternativas, por exemplo, propõem-se os seguintes objetivos adicionais de caráter qualitativo:

- Priorizar alternativas que tenham a maior sinergia com os recursos do portfólio;
- Priorizar alternativas com o menor risco operacional.

A primeira função objetivo adicional foi projetada para encapsular as questões levantadas em (SANTOS et al., 2014), enquanto a segunda função objetivo adicional responde às preocupações operacionais especificadas em (CARRANO et al., 2014). No entanto, ao contrário desses trabalhos, as funções neste artigo foram projetadas com uma abordagem qualitativa. Portanto, a avaliação das alternativas de acordo com esses critérios depende de opiniões de especialistas, que podem ser expressas em qualquer formato de preferência. Uma vez que qualquer formato pode ser traduzido em relações de preferência fuzzy (RAMALHO et al., 2019), essa avaliação ocorre dentro dos modelos de tomada de decisão $\langle X, R \rangle$.

4.1.3 Construção e avaliação das matrizes payoff

O comportamento do portfólio, conforme ilustrado na [Figura 6](#), destaca a relação entre a variação da receita e o CVaR para cada cenário. Além disso, o risco associado à receita é apresentado na [Figura 7](#). A construção da linha de mercado é feita manipulando o volume de contrato no portfólio ao longo de uma faixa de contratação de -100 MWh a 100 MWh, onde PDE_{2029} é transcrito como Y_1 e PDE_{2030} , como Y_2 . Esse cálculo é realizado considerando que a negociação será feita de acordo com o preço OTC ([Figura 2](#)). A linha de mercado não é considerada no processo de tomada de decisão; no entanto, pode indicar uma base de comparação que pode ser usada para invalidar algumas escolhas.

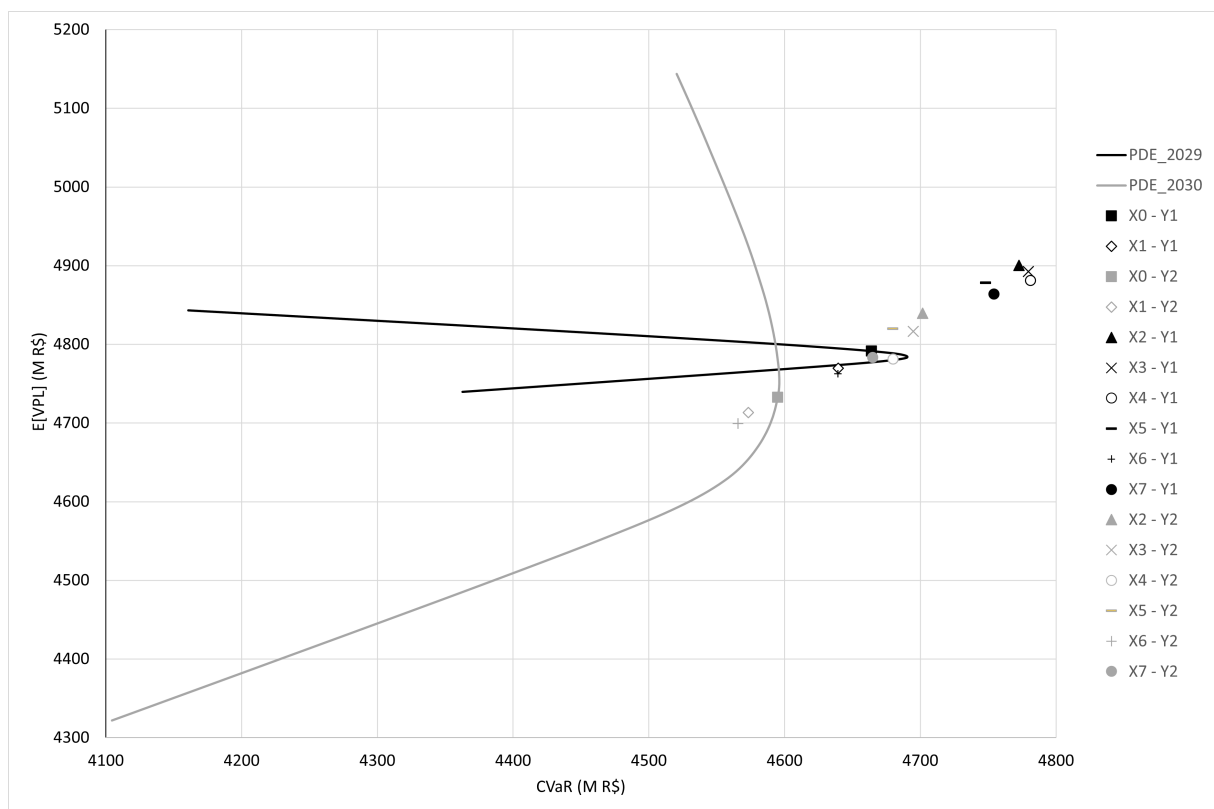


Figura 6 – VPL x CVaR

Avaliando o comportamento do portfólio nos cenários mostrados na [Figura 6](#), observamos que o valor de CVaR do portfólio é mais responsivo no cenário com preços mais elevados. Neste cenário, as opções X_2 , X_3 e X_4 superam todas as outras alternativas. Essas escolhas simbolizam a compra da usina eólica com diferentes volumes de vendas comprometidos em contratos. No entanto, opções que envolvem apenas a compra da usina solar, como X_1 e X_6 , são superadas pela posição atual e, conseqüentemente, devem ser excluídas da consideração. Porém, se a usina solar for comprada junto com a usina eólica, como em X_5 ou X_7 , elas superam a posição atual.

As opções que incluem a compra isolada de usinas solares continuam a ter um desempenho insatisfatório no cenário Y_2 . Elas são superadas pela posição atual e caem dentro da curva de mercado deste cenário. As opções mais destacadas neste cenário são aquelas em que uma

parcela substancial da energia das usinas adquiridas é comprometida, como X_2 , X_3 e X_5 . Dentre estas, a opção X_2 supera todas as outras neste cenário.

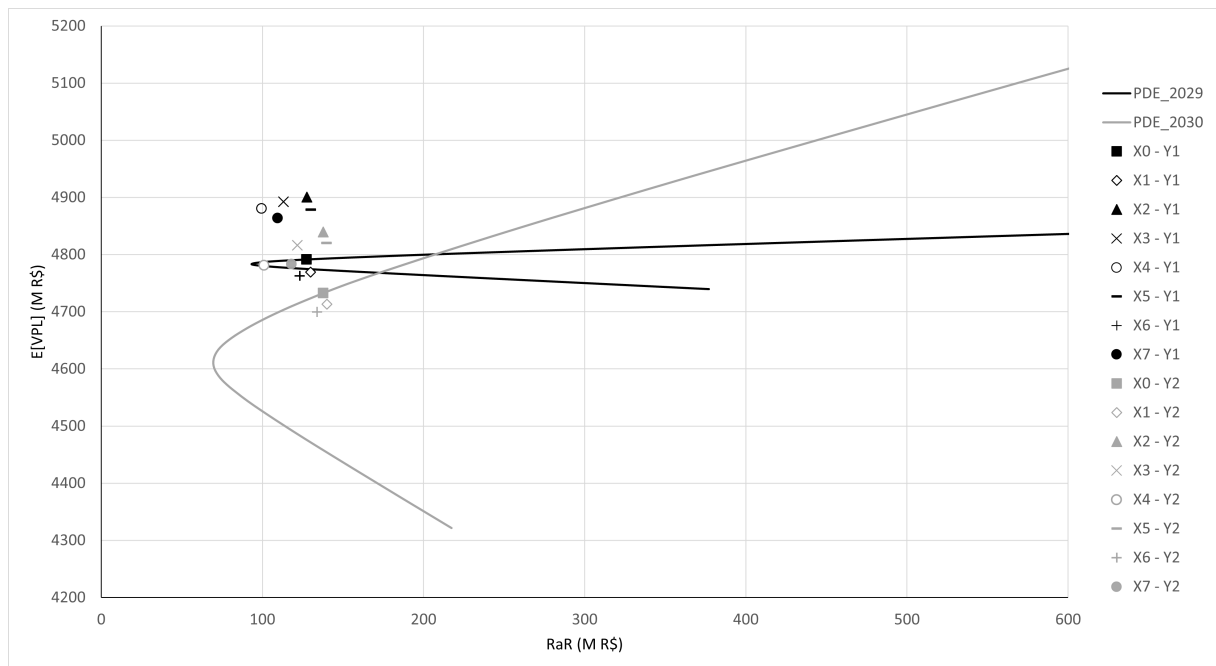


Figura 7 – VPL X RaR

Da mesma forma, em ambos os cenários na Figura 7, as alternativas que mais se destacaram foram aquelas que consistiam na aquisição da usina eólica ou simultaneamente com a usina solar com venda parcial de sua energia. Para esta figura, a venda total da energia da usina solar é dominada pela posição atual em ambos os cenários, e X_5 também é dominada por outras alternativas. Para avaliar a robustez das alternativas nos cenários considerados, matrizes de payoff foram construídas para os objetivos em questão. Essas matrizes podem ser vistas nas Tabela 10 - 13.

Tabela 10 – Matriz de payoff do VPL esperado (MR\$)

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	4791,51	4732,74
X1	4769,46	4713,26
X2	4900,36	4839,31
X3	4892,69	4816,45
X4	4880,84	4781,12
X5	4878,31	4819,83
X6	4762,62	4699,49
X7	4863,80	4783,20

Os resultados apresentados na Tabela 14 podem ser considerados como a resposta final para a análise dos modelos $\langle X, F \rangle$. De acordo com os resultados nesta tabela, as alternativas X_0 , X_1 , X_2 , X_5 e X_6 devem ser descartadas do processo de tomada de decisão. Por outro lado, a

Tabela 11 – Matriz de payoff de CVaR (MR\$)

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	4664,09	4594,92
X1	4639,48	4573,23
X2	4772,78	4701,65
X3	4779,64	4694,74
X4	4781,34	4680,04
X5	4748,16	4679,91
X6	4639,42	4565,59
X7	4754,29	4665,14

Tabela 12 – Matriz de payoff de RaR (MR\$)

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	127,42	137,82
X1	129,98	140,03
X2	127,58	137,66
X3	113,05	121,71
X4	99,50	101,08
X5	130,14	139,92
X6	123,20	133,90
X7	109,50	118,06

Tabela 13 – Matriz de payoff de InS

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	0,00	0,00
X1	143,45	143,45
X2	119,91	119,91
X3	111,46	111,46
X4	94,05	94,05
X5	125,14	125,14
X6	133,94	133,94
X7	116,34	116,34

alternativa X_3 recebeu uma pontuação intermediária em todos os critérios de seleção. Enquanto isso, não é possível definir uma relevância significativa entre as alternativas X_4 e X_7 , o que faz necessário avaliar essas duas alternativas usando critérios adicionais.

4.1.4 Avaliação das alternativas remanescentes nos modelos $\langle X, R \rangle$

Os tomadores de decisão avaliaram as alternativas X_4 e X_7 de acordo com dois critérios adicionais usando estimativas fuzzy apresentadas na [Figura 8](#), onde o eixo vertical representa $\mu(X_k)$ (RAMALHO et al., 2019).

Tabela 14 – Resultado do modelo $\langle X, F \rangle$

Alternativa	Wald	Laplace	Savage	Hurwicz
X0	0,00	0,00	0,00	0,00
X1	0,00	0,00	0,00	0,00
X2	0,06	0,07	0,06	0,06
X3	0,47	0,51	0,47	0,49
X4	0,58	0,66	0,58	0,65
X5	0,00	0,00	0,00	0,00
X6	0,00	0,00	0,00	0,00
X7	0,56	0,61	0,56	0,59

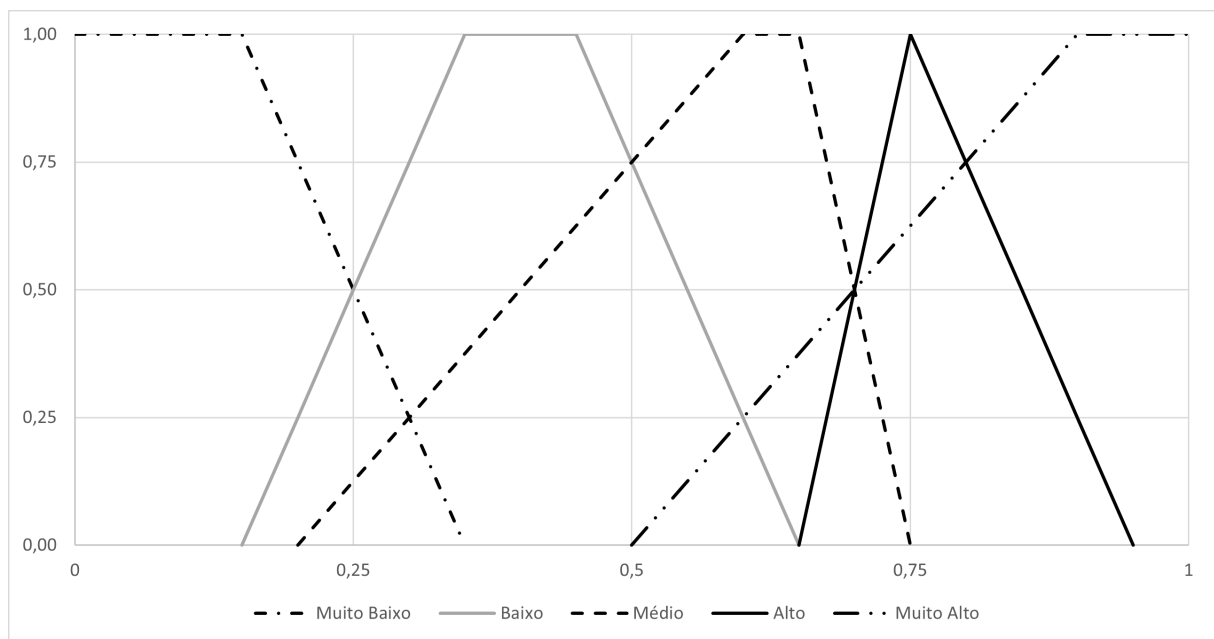


Figura 8 – Escalas qualitativas baseadas em conjuntos fuzzy usadas para objetivos baseados em informações qualitativas¹

Para o critério de priorizar alternativas que tenham maior sinergia com os recursos do portfólio, foram indicados: X_4 – Alto; X_7 – Muito Alto. Quanto ao critério de priorizar alternativas com o menor risco operacional, foram indicadas as seguintes estimativas: X_4 – Médio; X_7 – Alto. Utilizando a Equação 2.24 e a Equação 2.25 para essas estimativas, é possível construir a seguinte relação de preferência fuzzy não-recíproca:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.75 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

onde R_1 é a matriz de relação de preferência referente a priorizar alternativas que tenham a maior sinergia com os recursos do portfólio, e R_2 se relaciona a priorizar alternativas com o menor risco operacional.

¹ Fonte: (RAMALHO et al., 2019)

Considerando que os critérios têm a mesma importância e visto que as avaliações das alternativas resultaram em uma convergência de preferência para X_7 , a matriz de relação de preferência fuzzy não-estrita para o desenvolvimento do modelo $\langle X, R \rangle$ é igual a R_2 . Portanto, pode-se obter a função de pertinência da relação de preferência fuzzy estrita da seguinte forma:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.14)$$

e finalmente, o uso da [Equação 2.32](#) permite obter a seguinte função de pertinência do conjunto fuzzy de alternativas não-dominadas:

$$ND = [0.5 \quad 1], \quad (4.15)$$

justificando assim a escolha de X_7 .

4.1.5 Considerações finais sobre o Estudo de Caso I

Desenvolvido em colaboração com a empresa *Aliança Energia*, este estudo de caso reflete os resultados práticos de pesquisa associados à aplicação das técnicas de tomada de decisão multicritério sob condições de incerteza para o planejamento de investimentos de longo prazo no setor elétrico. Nele, analisou-se o portfólio de uma empresa geradora de energia, quantificando os diferentes objetivos utilizados como métricas para o desempenho do portfólio, como VPL esperado, CVaR e RaR. Durante o desenvolvimento do trabalho, se fez necessário a construção de um objetivo quantitativo, o InS, e a consideração de dois objetivos qualitativos (priorizar alternativas com maior sinergia com os recursos do portfólio, e priorizar alternativas com o menor custo operacional) de forma a capturar todas as necessidades envolvidas na aquisição de ativos de energia dos tomadores de decisão. Embora o InS surja como uma alternativa ao índice Sharpe, fornecendo uma métrica relevante para a tomada de decisão, ele possui a particularidade de penalizar a posição atual da empresa. Esta característica pode ser considerada uma limitação em certos contextos, pois pode desencorajar a manutenção de posições atuais mesmo quando são estrategicamente vantajosas. No entanto, neste estudo de caso específico, a penalização da posição atual pelo InS não representou um problema significativo. Para compor a análise em seis objetivos, utilizou-se dois cenários de longo prazo disponibilizados pelo órgão de planejamento do setor elétrico brasileiro ([Empresa de Pesquisa Energética, 2020](#); [Empresa de Pesquisa Energética, 2021](#)).

Neste estudo de caso são realizadas avaliações de investimentos em ativos de energia que alteram o desempenho do portfólio da geradora ao longo do tempo. A seleção de uma alternativa impacta o equilíbrio energético do agente, modificando a exposição nos cenários de longo prazo sob avaliação. Isso, por sua vez, influencia os valores das funções objetivo. A alternativa em destaque neste estudo envolve a incorporação de usinas solares e eólicas no portfólio existente,

sem comprometer toda a energia dessas usinas com vendas contratadas, mantendo assim uma porcentagem exposta ao preço à vista.

Este estudo de caso exemplifica a aplicabilidade da metodologia proposta. A utilização de múltiplos cenários para a solução desse problema no mercado de energia brasileiro possibilita a consideração simultânea de diferentes situações específicas, constituindo um avanço significativo na abordagem de questões associadas ao uso do NEWAVE como entrada para o modelo de decisão de longo prazo. Uma contribuição secundária desse estudo de caso, foi a construção do InS, e sua utilização, bem como a dos critérios qualitativos, para tomada de decisão em ambientes de incertezas. Os resultados deste estudo de caso foram publicados em (BAMBIRRA et al., 2023).

4.2 Estudo de caso II: Construção de cenários dinâmicos em uma empresa eletrointensiva

Ainda no contexto da construção de portfólios de energia, o estudo de caso em questão é inspirado por uma empresa de mineração que deseja expandir suas atividades e, como mencionado acima, é formulado dentro do quadro do modelo de tomada de decisão multicritério, a partir da metodologia proposta. A construção de carteiras de energia para grandes consumidores lida com o atendimento eficaz das demandas dessas empresas. Isso requer a flexibilidade de adicionar ou remover ativos de energia ao longo do tempo, a fim de gerenciar efetivamente a quantidade de exposição de energia ao preço do mercado *spot* (OLIVEIRA et al., 2021).

A expansão das atividades da empresa modificará seu perfil de carga futuro, fazendo com que a empresa precise de mais energia para realizar suas atividades. Atualmente, a empresa possui autogeração a partir de fontes hidráulicas e solares em seu portfólio, e prevê um aumento no volume hidráulico ao longo do horizonte de análise. O volume de geração planejado das usinas, e suas respectivas fontes, bem como a projeção de carga, podem ser vistos na Tabela 15.

Esta situação ilustra um desafio comum enfrentado por empresas em expansão, especialmente aquelas com demandas energéticas significativas. O aumento na capacidade de geração hidráulica sugere uma estratégia de investimento focada em recursos renováveis, alinhada com tendências globais de sustentabilidade e eficiência energética.

Ao mesmo tempo em que a empresa expandirá suas atividades, alguns contratos de fornecimento de energia terminarão, o que compromete os recursos da empresa. As compras e vendas de energia que a empresa realiza para gerir suas atividades de mineração podem ser vistas na Tabela 16.

Como se trata de uma empresa de mineração, os recursos são principalmente para o fornecimento das cargas da empresa, e a comercialização de energia não é o foco principal. No entanto, quando os operadores observam uma oportunidade, eles têm a liberdade de realizar

Tabela 15 – Projeção atual de carga e geração da empresa

Ano	Carga [MWm]			Geração [MWm]		
	Existente	Expansão	Total	Hidráulica	Solar	Total
2023	219,01	0,00	219,01	59,65	4,00	63,65
2024	219,01	0,00	219,01	59,65	4,00	63,65
2025	219,01	0,00	219,01	59,65	4,00	63,65
2026	219,01	15,00	234,01	59,65	4,00	63,65
2027	219,01	15,00	234,01	59,65	4,00	63,65
2028	219,01	15,00	234,01	59,65	4,00	63,65
2029	219,01	15,00	234,01	64,07	4,00	68,07
2030	219,01	15,00	234,01	64,07	4,00	68,07
2031	219,01	21,00	240,01	64,07	4,00	68,07
2032	219,01	21,00	240,01	102,47	4,00	106,47
2033	219,01	21,00	240,01	102,47	4,00	106,47
2034	219,01	21,00	240,01	102,47	4,00	106,47
2035	219,01	21,00	240,01	102,47	4,00	106,47
2036	219,01	21,00	240,01	124,45	4,00	128,45
2037	219,01	21,00	240,01	124,45	4,00	128,45

Tabela 16 – Projeção dos contratos de energia

Ano	Volume de compra [MWm]	Preço médio de compra [R\$/MWh]	Volume de venda [MWm]	Preço médio de venda [R\$/MWh]
2023	250,20	199,36	104,00	213,39
2024	176,75	196,54	42,00	210,41
2025	156,75	191,49	42,00	210,41
2026	156,75	191,49	0,00	0,00
2027	156,75	191,49	0,00	0,00
2028	156,75	191,49	0,00	0,00
2029	113,89	164,63	0,00	0,00
2030	113,89	164,63	0,00	0,00
2031	113,89	164,63	0,00	0,00
2032	109,35	162,75	0,00	0,00
2033	96,58	160,24	0,00	0,00
2034	96,58	160,24	0,00	0,00
2035	96,58	160,24	0,00	0,00
2036	92,08	155,30	0,00	0,00
2037	92,08	155,30	0,00	0,00

operações que não comprometerão a operacionalidade da empresa. É por isso que o perfil de contrato apresentado na [Tabela 16](#) tem um volume de vendas muito menor do que as compras, com o preço médio de vendas sendo mais alto do que o das compras.

Portanto, os recursos de energia, calculados pela soma das compras e geração, e os requisitos de energia da empresa, calculadas pela soma das vendas e carga, são elementos que compõem o balanço energético da empresa, apresentado na [Figura 9](#). A diferença entre recursos e requisitos, chamada de exposição de energia, é precificada pelo preço spot, a principal incerteza

do problema. Outra incerteza é o volume de energia gerada pelas próprias plantas no futuro.

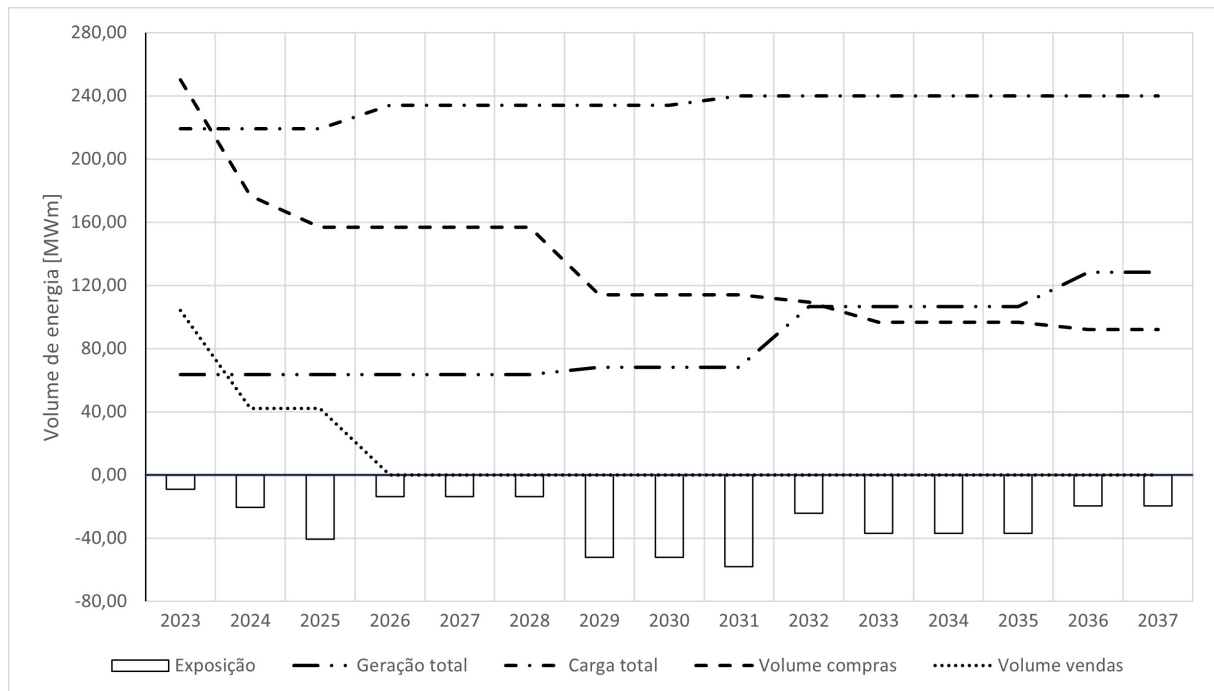


Figura 9 – Balanço de energia

O balanço de energia, apresentado na [Figura 9](#), delinea as necessidades energéticas da empresa em relação aos seus recursos, destacando quaisquer déficits ou excedentes potenciais. Isso, então, informa as ações que a empresa precisa tomar para atender às suas necessidades energéticas. Além disso, ao compreender sua exposição de energia, a empresa pode gerenciar e mitigar eficazmente os riscos associados às flutuações dos preços spot.

4.2.1 Funções objetivo

Para a formação de um modelo de construção de carteira de longo prazo, cada variável representa um volume de recurso de energia da fonte i a ser adicionado ao portfólio no momento atual. Essa alteração será avaliada ao longo do horizonte de planejamento. O horizonte também deve ser considerado na formulação das funções objetivo, assim como as características do problema. Em particular, presente em qualquer análise de carteira de energia, a receita do portfólio é uma das principais preocupações dos tomadores de decisão ([DAHLGREN; LIU; LAWARREE, 2003](#)). Neste trabalho, a realização do primeiro objetivo está associada à maximização do valor presente líquido do portfólio, que considera a receita das operações de energia no mercado. Para alcançar este propósito, os valores dos ativos que não são contratos foram indexados ao longo do horizonte, de forma que os custos de investimento e valores residuais dos ativos estão embutidos no índice de preço dos ativos. Esta abordagem permite uma análise mais genérica das alternativas, e é frequentemente utilizada quando se tem poucas informações sobre os ativos em questão. Ela também permite reescrever respectivamente a [Equação 4.1](#) e a [Equação 4.6](#) da seguinte forma:

$$\varrho_t^E(x_t) = h_t \left(\sum_{c=1}^C \psi_{c,t} v_{c,t} + \sum_{\forall i \in W_c} \psi_{i,t} x_{i,t} \right), \quad (4.16)$$

$$\text{VPL}_s(X) = \sum_{t=1}^T \frac{\varrho_{t,s}(x_t)}{(1+a)^t}, \quad (4.17)$$

onde

$$x_t = x_1, \forall t. \quad (4.18)$$

No entanto, avaliar a carteira baseando-se apenas em seu valor pode comprometer a qualidade dos resultados obtidos, gerando decisões vulneráveis. As funções objetivo de risco usadas em (CANELAS; PINTO-VARELA; SAWIK, 2020; COSTA et al., 2017; GöKGÖZ; ATMACA, 2017; NETO et al., 2017b), independentemente de como são apresentadas, como regra, refletem as incertezas associadas ao preço da energia e seu impacto no valor final da carteira. Neste estudo de caso, a segunda função objetivo visa minimizar o risco dos recursos do portfólio, definida como ϖ , e leva em conta o risco de energia disponível e também os riscos de preço, sendo formulada da seguinte forma:

$$\varpi_s(X) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T h_t \left(\hat{\zeta}_{t,s}(X) + \check{\zeta}_{t,s}(X) \right), \quad (4.19)$$

onde:

$$\hat{\zeta}_{t,s}(X) = \frac{|\sigma_{spot} \rho_{t,s} \xi_t| + \sum_{i=1}^I \sigma_i (\psi_i x_i + \theta_{i,t} g_{i,t})}{|\xi_t| + \sum_{i=1}^I x_i + g_{i,t}}, \quad (4.20)$$

$$\check{\zeta}_{t,s}(X) = |\phi_{spot} \xi_t(x_i)| + \sum_{i=1}^I \phi_i (x_i + g_{i,t}). \quad (4.21)$$

Sendo que $\hat{\zeta}_{t,s}(X)$ representa a componente de risco de preço de energia, e $\check{\zeta}_{t,s}(X)$ a componente de risco de energia disponível. Com a formulação do segundo objetivo dessa maneira, torna-se viável quantificar os riscos associados às incertezas do mercado e às variações inerentes às fontes de energia. Assim, o problema pode ser escrito da seguinte forma:

$$\text{VPL}_s(x) \rightarrow \max_{X \in L}, \quad (4.22)$$

$$\varpi_s(x) \rightarrow \min_{X \in L}, \quad (4.23)$$

sujeito à:

$$0 \leq x_i \leq \Upsilon_i, \quad (4.24)$$

$$h_t T \sum_{i=1}^I \rho_i x_i \leq \Gamma, \quad (4.25)$$

onde a [Equação 4.24](#) limita as variáveis a valores factíveis, e a [Equação 4.25](#) é uma restrição de orçamento.

No caso de ainda ser impossível diferenciar as alternativas, decidiu-se utilizar os seguintes critérios adicionais de natureza quantitativa e qualitativa, respectivamente:

- priorizar alternativas que maximizem a diversidade do portfólio;
- priorizar alternativas que maximizem o efeito positivo no marketing da empresa.

Para calcular a diversidade média do portfólio ao longo do horizonte, foi escolhida a medida de equilíbrio apresentada em ([STIRLING, 2009](#)), descrita por:

$$ID(X) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(- \sum_{i=1}^I \frac{\omega_{i,t}(x_i) \ln \omega_{i,t}(x_i)}{\ln I} \right), \quad (4.26)$$

onde

$$\omega_{i,t}(x_i) = \frac{x_i + g_{i,t}}{\sum_{i=1}^I (x_i + g_{i,t})}, \quad (4.27)$$

e para a avaliação do critério qualitativo de maximizar o efeito positivo no marketing da empresa, recorreu-se às opiniões dos especialistas responsáveis pela tomada de decisão.

4.2.2 Construção dos cenários

Para a construção de cenários através do FCM, foi utilizada a metodologia apresentada em ([KYRIAKARAKOS et al., 2014](#)). Baseando-se nessa metodologia, quatro especialistas identificaram quais variáveis estariam presentes no FCM e, a partir de um consenso, definiram a relação entre elas. Os conceitos presentes no mapa, bem como seus valores para a fuzzificação, encontram-se na [Quadro 4](#). Para variáveis contínuas, o processo de fuzzificação ocorreu através da normalização linear.

O mapa construído é mostrado na [Figura 11](#). Ele apresenta a representação do entendimento dos especialistas sobre o modelo em questão. Os pesos são definidos em [Tabela 17](#), e para a sua definição, cada especialista avaliou a influência usando variáveis linguísticas, e posteriormente os valores foram desfuzzificados no espaço de $[0, 1]$. Utilizando o método de desfuzzificação do centróide, os valores linguísticos são transformados em valores numéricos usando a função de pertinência apresentada na [Figura 10](#), sendo transcritos como: MB – Muito Baixo, B – Baixo, M – Médio, A – Alto e MA – Muito Alto.

Quadro 4 – Conceitos do FCM

Número	Conceito	Faixa de Valores	Valor Inicial	Descrição
1	Preço da energia	50 a 600 R\$/MWh	270 R\$/MWh	Average annual PLD
2	Demanda de energia	60000 a 90000 MWm	67500 MWm	Carga média do SIN
3	Investimentos no Setor Elétrico	-20% a 20%	0%	Taxa anual de variação na construção e importação de maquinário e equipamentos para geração de energia
4	Geração hidráulica	-15% a 10%	0.5%	Variação da energia hidráulica gerada no SIN
5	Geração térmica	-30% a 30%	-1.2%	Variação da energia térmica gerada no SIN
6	Geração eólica	-15% a 15%	9%	Variação da energia eólica gerada no SIN
7	Geração solar	-10% a 10%	6%	Variação da energia solar gerada no SIN
8	Precipitações	Muito baixo, baixo, médio, alto, Muito alto	baixo	Precipitação média anual nas bacias hidrográficas do SIN
9	Energia Armazenada	Muito baixo, baixo, médio, alto, Muito alto	baixo	Energia média anual armazenada no SIN
10	PIB do Brasil	-5% a 5%	1%	Taxa de variação anual do PIB do Brasil
11	Preço do gás natural	2.00 a 19.00 US\$/M BTU	4.60 US\$/M BTU	Preço médio anual do gás natural
12	Produção industrial	-5% a 5%	0%	Taxa de variação anual da produção média das indústrias
13	Preço do óleo combustível	0.50 a 8.00 US\$/Galão	2.75 US\$/Galão	Preço médio anual do óleo combustível
14	PIB do Paraguai	-5% a 5%	2%	Taxa de variação anual do PIB do Paraguai

4.2.3 Definição dos cenários

Os cenários utilizados na avaliação de incertezas foram construídos usando FCM. O mapa mostrado pela [Figura 11](#) apresenta a visão unificada da equipe de especialistas sobre o funcionamento das dinâmicas energéticas, políticas e econômicas na empresa em foco e no ambiente em que está inserida.

A partir dos valores iniciais das variáveis apresentadas na [Quadro 4](#), a simulação de

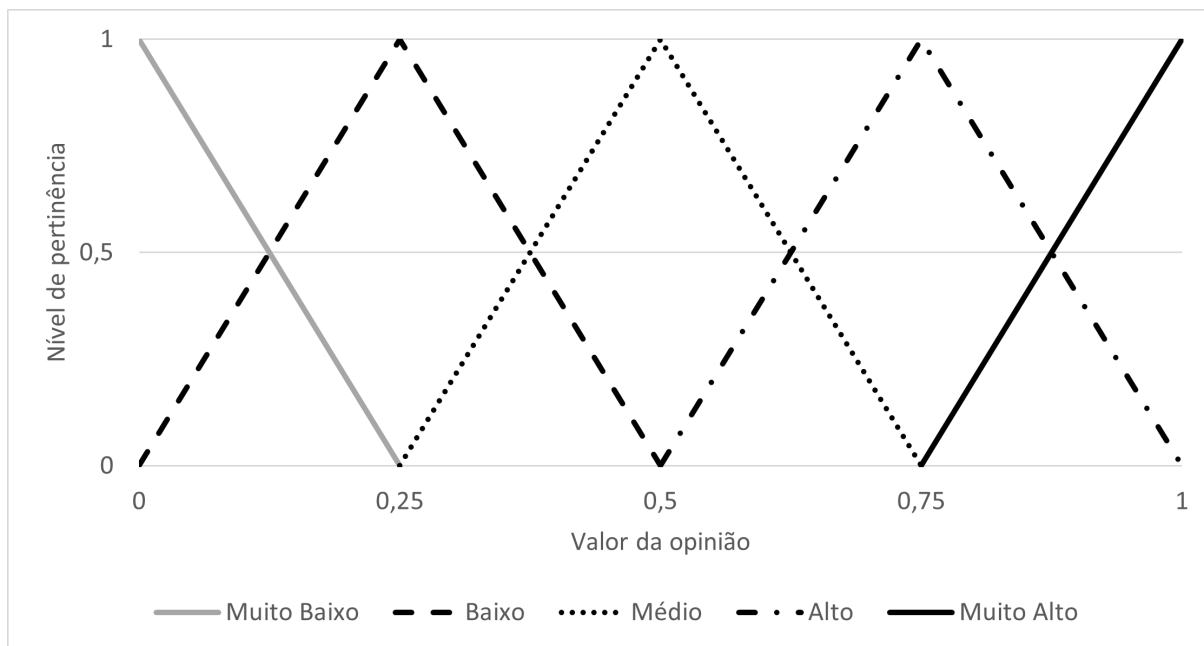


Figura 10 – Função de pertinência para a defuzzificação dos pesos

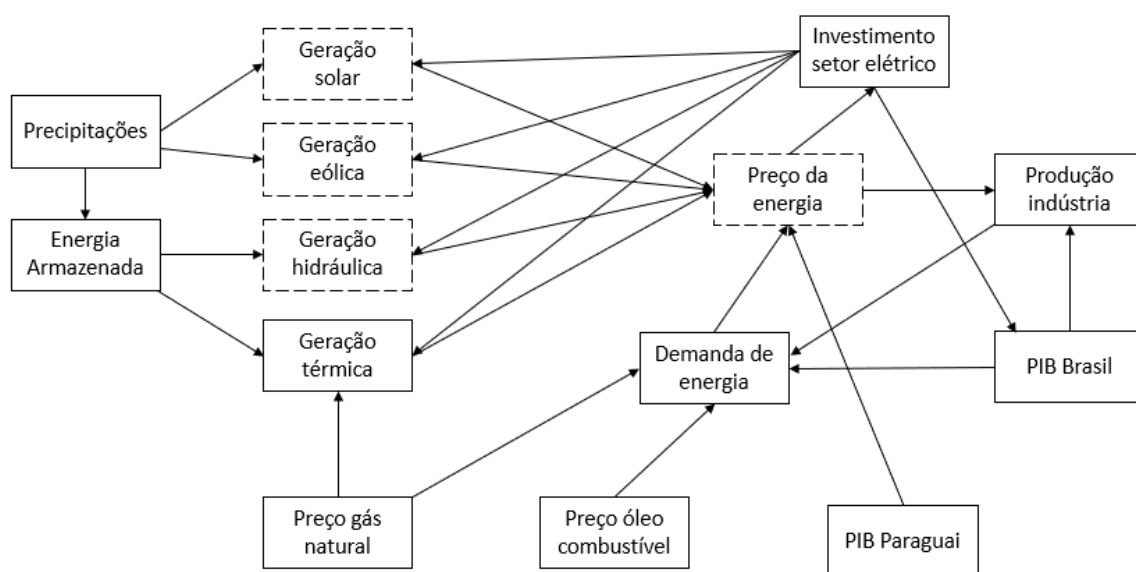


Figura 11 – Mapa construído

cenários foi realizada com o objetivo de cobrir a região de incerteza. A simulação dos cenários ocorreu a partir da fixação de certas variáveis ao longo do tempo, o que representa a natureza da respectiva situação. Trabalhos como (CHERMACK, 2011; RALSTON; WILSON, 2006) limitam o número de cenários construídos a quatro, enquanto trabalhos como (GODET, 2000; BRADFIELD et al., 2005) são mais flexíveis e permitem a construção de até seis cenários. Por outro lado, o trabalho (SAATY, 2016) incentiva análises com um número próximo a sete componentes. Como a importância é varrer a região de incertezas e, uma vez que não há consenso na literatura sobre quantos cenários devem constituir a análise, decidiu-se avaliar os seguintes

Tabela 17 – Pesos do FCM

Relação	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4	Valor defuzzificado
$W_{1,3}$	A	MA	M	MA	0,812
$W_{1,12}$	A	A	MA	MA	-0,875
$W_{2,1}$	MA	A	MA	MA	0,937
$W_{3,4}$	MA	M	B	A	0,625
$W_{3,5}$	MA	A	A	MA	0,875
$W_{3,7}$	A	M	MA	A	0,750
$W_{3,6}$	MB	M	MA	A	0,562
$W_{3,10}$	MB	M	B	A	0,375
$W_{4,1}$	M	MA	MA	MA	-0,875
$W_{5,1}$	A	MA	A	MA	0,875
$W_{7,1}$	MB	B	MB	B	-0,125
$W_{6,1}$	MB	B	M	A	-0,375
$W_{8,9}$	A	MA	MA	MA	0,937
$W_{8,6}$	MB	B	B	B	0,188
$W_{8,7}$	MB	MB	MB	B	-0,063
$W_{9,4}$	A	A	A	MA	0,812
$W_{9,5}$	M	A	A	A	-0,687
$W_{10,2}$	A	M	A	MA	0,750
$W_{10,12}$	A	M	A	MA	0,750
$W_{11,2}$	M	B	B	M	-0,375
$W_{11,5}$	A	M	M	A	-0,625
$W_{12,2}$	M	A	MA	MA	0,812
$W_{13,2}$	B	M	M	A	-0,500
$W_{13,5}$	MB	M	MB	M	-0,250
$W_{13,12}$	M	A	A	A	-0,687
$W_{14,1}$	B	MB	MB	MB	0,063

cenários:

- **Cenário Base:** O objetivo deste cenário é identificar como o sistema se comporta sem interferências (o que acontece se tudo continuar como está). Nenhuma variável é fixada (Tabela 50);
- **Pouca Chuva:** Este cenário apresenta as consequências sistêmicas de um período prolongado de baixa precipitação. A variável **Precipitação** é definida como Muito Baixa durante todo o horizonte de análise (Tabela 51);
- **Desenvolvimento Mundial:** O objetivo deste cenário é avaliar os impactos do crescimento econômico global, refletido no modelo como um aumento nas exportações brasileiras. As variáveis **PIB do Brasil** e **PIB do Paraguai** são definidas em seus valores máximos durante todo o horizonte de análise (Tabela 52);
- **Subsídios para Usinas Renováveis:** Este cenário apresenta o efeito de uma possível política de incentivo às fontes renováveis no sistema. As variáveis **Geração Eólica** e

Geração Solar são definidas em seus valores máximos durante todo o horizonte de análise (Tabela 53).

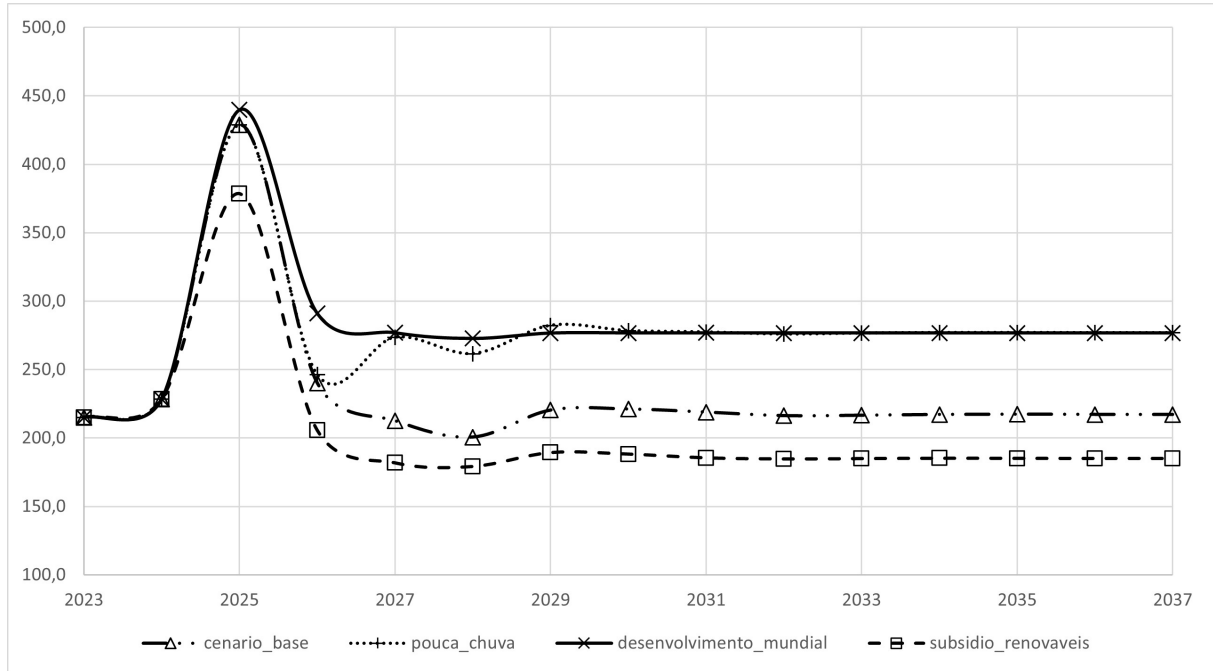


Figura 12 – Evolução do preço da energia nos cenários

4.2.4 Avaliação do portfólio

Uma vez definidos os cenários, pode-se definir os parâmetros das funções objetivo e encontrar as alternativas para avaliação do problema. Cada alternativa é a solução harmoniosa que representa um compromisso entre os objetivos considerados para cada cenário avaliado. Os parâmetros para este cálculo podem ser vistos na Tabela 18 e Tabela 19, e as soluções obtidas para cada cenário na Tabela 20. Como pode ser visto na Figura 12, foi utilizado um horizonte $T = 15$, e para a otimização também foi definido que $D_i = 100 \forall i$ e que $\Gamma = 100$ MR\$.

Tabela 18 – Parametros das variáveis

Variável	Fonte	ψ_i [R\$/MWh]	ϕ_i	σ_i			
				Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
x_1	Contrato	198.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
x_2	Hidráulica	130.00	0.00	0.022	0.020	0.023	0.02
x_3	Eólica	120.00	0.00	0.004	0.003	0.005	0.010
x_4	Solar	143.00	0.00	0.006	0.007	0.006	0.015

Os valores de σ_i na Tabela 18 são calculados pelo desvio padrão dos conceitos ς_4 , ς_6 e ς_7 nos cenários. Assim como os valores de ϕ_{spot} na Tabela 19, que foram calculados pelo desvio padrão do conceito ς_1 dos cenários construídos. Os valores de ρ_t são apresentados na Figura 12. E o preço de venda ao longo do tempo ψ_t^v , assim como os custos operacionais e de manutenção

(preço médio de compra) $\theta_{1,t}$ das compras, podem ser vistos na [Tabela 16](#). Quanto aos custos operacionais e de manutenção das outras fontes, foi definido como constante ao longo do tempo, de modo que $\theta_2 = 0.54$ R\$/MWh, $\theta_3 = 0.12$ R\$/MWh e $\theta_4 = 0.31$ R\$/MWh, de modo que eles assumam o mesmo valor ao longo do horizonte.

Tabela 19 – Parâmetros de exposição

Variável	Fonte	σ_{spot}	ϕ_{spot}			
			Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
$\xi(X_k)$	Exposição	15.49	53.08	45.07	46.67	48.45

Tabela 20 – Soluções (MWm)

Alternativa	x_1	x_2	x_3	x_4
X_1	35.63	9.14	8.03	10.00
X_2	13.50	16.78	16.16	17.29
X_3	15.85	15.87	15.89	15.92
X_4	29.93	9.87	9.86	12.82

A [Tabela 20](#) demonstra a descrição das alternativas. Nesta tabela, cada coluna representa a variação no volume de um determinado ativo no portfólio da empresa, onde as fontes associadas à x_i são mapeadas na [Tabela 18](#), enquanto cada linha apresenta uma alternativa potencial para solucionar o problema. Apesar de todas as alternativas apontarem para uma variação semelhante no volume total do portfólio (variando entre 62 e 64 MWm), elas se distinguem no volume proveniente de diferentes fontes, devido às condições específicas estabelecidas nos cenários. Observa-se que X_1 mostra a maior variação na quantidade de contratos e também o menor investimento em energia eólica. Esta alternativa é um tanto semelhante a X_4 . Enquanto isso, X_3 apresenta um equilíbrio nos investimentos entre todas as fontes de energia, e X_2 apresenta o maior investimento em solar.

Tabela 21 – Matriz Payoff de VPL (MR\$)

Alternativa	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
X_1	2.365,41	2.250,82	2.227,70	2.442,79
X_2	2.215,44	2.097,29	2.073,72	2.295,23
X_3	2.233,70	2.116,31	2.092,85	2.312,98
X_4	2.331,22	2.217,83	2.194,86	2.407,78

Tabela 22 – Matriz Payoff de Risco (MR\$/Ano)

Alternativa	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
X_1	18,48	16,74	17,29	16,77
X_2	18,99	17,20	17,76	17,23
X_3	18,88	17,10	17,66	17,14
X_4	18,30	16,59	17,13	16,61

A Tabela 21 apresenta a Matriz de Payoff do Valor Presente Líquido para as alternativas nos quatro cenários construídos. Nela, a alternativa X_1 apresenta os valores mais altos em todos os cenários. Enquanto isso, as alternativas X_2 e X_3 mostram valores mais baixos em comparação com outras alternativas. A Tabela 22 exibe a Matriz de Payoff de Risco para os mesmos cenários e alternativas. Os valores são muito mais próximos uns dos outros, em comparação com a tabela de Valor Presente Líquido. No entanto, a alternativa X_4 se destaca por apresentar os menores valores em todos os cenários, indicando um risco menor.

Tabela 23 – Matriz com Critérios de Escolha Agregados

Alternativa	Wald	Laplace	Savage	Hurwicz
X_1	0.74	0.75	0.74	0.74
X_2	0.00	0.00	0.00	0.00
X_3	0.12	0.12	0.12	0.12
X_4	0.79	0.78	0.77	0.78

Finalmente, a Tabela 23 apresenta o nível de não-dominância para cada alternativa. Isso indica que X_2 e X_3 devem ser descartadas da decisão. As alternativas X_1 e X_4 apresentaram valores muito próximos, e os tomadores de decisão não se sentiram confortáveis em definir uma relevância significativa entre elas, necessitando da avaliação dessas duas alternativas através de critérios adicionais.

Os tomadores de decisão avaliaram essas duas alternativas de acordo com dois critérios adicionais, usando estimativas quantitativas (no caso da Diversidade do Portfólio) e estimativas fuzzy.

Para o critério de priorizar alternativas que maximizam a diversidade do portfólio, temos: $\max F(X) = 0.985$ e $\min F(X) = 0.445$. Também temos $F(X_1) = 0.655$ e $F(X_4) = 0.688$.

$$\hat{\mu}_{R_p} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.53 \\ 0.47 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

A partir de $\hat{\mu}_{R_p}$, é possível obter a seguinte relação de preferência fuzzy não-recíproca:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.94 \\ 1.00 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

E para o critério de priorizar alternativas com a maior contribuição potencial para o marketing da empresa, as seguintes estimativas foram indicadas: X_1 – Alto e X_4 – Alto.

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Considerando que os critérios têm a mesma importância e visto que as avaliações das alternativas resultaram em uma convergência de preferência pela X_4 , a matriz de relação de

preferência fuzzy não-estrita para o desenvolvimento do modelo $\langle X, F \rangle$ é igual a R_1 . Portanto, pode-se obter a função de pertinência da relação de preferência fuzzy estrita da seguinte forma:

$$P = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 \\ 0.06 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

e, finalmente, o uso da [Equação 2.32](#) permite obter a seguinte função de pertinência do conjunto fuzzy de alternativas não dominadas:

$$ND = \begin{bmatrix} 0.94 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Que justifica a escolha de X_4

4.2.5 Considerações finais sobre o Estudo de caso II

Desenvolvido em conjunto com a empresa *Vale*, este estudo de caso apresenta os resultados práticos dos trabalhos realizados para construção de portfólio de energia para uma empresa de mineração. Após definir as funções-objetivo e analisar o contexto do problema, cenários foram construídos usando FCM, explorando assim a região de incertezas. Subsequentemente, o modelo de decisão proposto em ([RAMALHO et al., 2019](#); [EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020](#)) orientou o processo decisório.

A análise sistêmica, possibilitada pela construção de cenários com FCM, revelou insights detalhados sobre o ambiente operacional da empresa, isso permitiu identificar diversas situações de risco e oportunidade para a moderadora no longo prazo. Um resultado particularmente interessante foi a semelhança no preço da energia (PLD) em dois cenários, "Pouca Chuva" e "Desenvolvimento Mundial". Esta observação evidencia a capacidade do modelo de capturar e reproduzir o comportamento sistêmico do ambiente, mostrando como diferentes fatores podem convergir para resultados semelhantes, apesar de suas origens variadas.

Os cenários construídos apresentam não só a evolução de valores das variáveis de incerteza, mas também todo o contexto em que os fatos ocorrem. Isso se faz importante pois a empresa pode identificar sinais de mudança e se orientar para se proteger de determinada possibilidade. O aprimoramento na compreensão do problema pelos especialistas, apesar de não ter sido formalmente documentado, surgiu como um elemento relevante no decorrer da elaboração dos cenários.

Os resultados práticos desse estudo de caso abriram caminhos para a mitigação de riscos, exploração de oportunidades e tomada de decisões baseadas em cenários realistas e variados. Isso se mostrou especialmente valioso para a mineradora, evitando a dependência exclusiva de previsões probabilísticas de preços de energia. A abordagem adotada neste estudo contribui significativamente para a literatura sobre tomada de decisão em ambientes de incerteza,

preenchendo lacunas identificadas em (STEWART; DURBACH, 2016; AMER; DAIM; JETTER, 2013).

5 Conclusões

Este trabalho propõe uma melhoria para o esquema geral de tomada de decisão em ambientes de incerteza, de forma a adaptá-lo ao uso em decisões no longo prazo. O aperfeiçoamento do esquema geral de tomada de decisão em ambientes de incerteza foi possível a partir do desenvolvimento de uma metodologia que estabelece uma conexão entre as disciplinas de planejamento em cenários e de tomada de decisão. A metodologia desenvolvida para a atividade de planejamento e tomada de decisão no longo prazo se apresenta como um complemento do trabalho de (EKEL; PEDRYCZ; JR, 2020). A utilização da metodologia proposta permitiu superar as limitações que se encontram na aplicação das LP_τ -sequências para a construção de cenários em ambientes dinâmicos no longo prazo, sendo elas: a impossibilidade de criação de duas ou mais situações distintas com respostas semelhantes; e a ausência do caminho de evolução dos valores das variáveis de incertezas contidos nos cenários.

Ao longo dessa tese, são apresentados estudos de caso que refletem os resultados práticos da aplicação dessa metodologia em problemas de tomada de decisão de longo prazo. Os estudos de caso exploram o uso de modelos de alocação de recursos e de deficit de recursos para a construção de portfólios de energia. Entretanto, a metodologia desenvolvida tem caráter genérico e apresenta aplicabilidade em outras áreas de conhecimento.

Com foco no portfólio de uma empresa geradora de energia, o Estudo de caso I quantifica vários objetivos que constituem uma análise clássica de portfólio, como: \overline{VPL} , CVaR, RaR, e também introduz o InS e objetivos qualitativos como: sinergia, e custo operacional. Usando cenários de longo prazo construídos pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2020; Empresa de Pesquisa Energética, 2021), o estudo avalia investimentos em ativos de energia, especialmente usinas solares, eólicas e contratos de energia, e como eles afetam o desempenho do portfólio. Este estudo destaca a aplicabilidade da metodologia proposta em um problema de tomada de decisão de longo prazo em ambiente dinâmico.

O Estudo de Caso II detalha a construção de um portfólio de energia para uma empresa de mineração, utilizando FCM para mapear cenários e incertezas. A construção de cenários por meio de FCM proporcionou uma análise sistêmica acerca do ambiente operacional da empresa, identificando riscos e oportunidades a longo prazo. Isso permitiu uma tomada de decisão mais fundamentada, reduzindo a dependência de previsões probabilísticas de preços de energia.

5.1 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é a construção de uma metodologia de planejamento e tomada de decisão em longo prazo. Essa metodologia estabelece uma conexão entre

as disciplinas de planejamento em cenários e de tomada de decisão, suprindo as críticas às metodologias existentes presentes em (DURBACH; STEWART, 2012; STEWART; DURBACH, 2016; AMER; DAIM; JETTER, 2013).

As aplicações práticas apresentadas nos estudos de caso também se apresentam como contribuições deste trabalho. Em ambos os estudos foi possível a avaliação em longo prazo da aquisição de ativos nos portfólios de energia das empresas em questão. Também se mostra como uma contribuição, a construção e consideração de novos objetivos na atividade de gestão de portfólio de energia, sendo eles no Estudo de caso I: o InS, sinergia e custo operacional; e no Estudo de caso II: a função de risco do portfólio, diversidade do portfólio e contribuição potencial para o marketing da empresa.

5.2 Trabalhos futuros

Ao longo das aplicações da metodologia proposta, foi possível perceber que a qualidade dos cenários construídos e utilizados são sensíveis a experiência e disponibilidade dos tomadores de decisão. Portanto, a inclusão de medidas de diversidade dos cenários e critérios objetivos para manter, excluir ou construir novos cenários ao longo do processo iterativo pode diminuir a dependência de especialistas na metodologia.

Devido às questões temporais inerentes à etapa 4 da metodologia proposta, não se logrou executar esta fase específica da metodologia nos estudos de caso apresentados. Dado o contexto, é desejável retomar a execução desta fase, conforme delineado na metodologia proposta. Além disso, é relevante avaliar a influência dos pesos atribuídos aos diferentes objetivos nas respostas obtidas. Esta avaliação ajudaria a entender como cada objetivo contribui para o resultado final e também faria com que o processo de tomada de decisão reflita adequadamente as prioridades e as necessidades dos envolvidos.

Ainda é possível explorar os efeitos da calibração dos cenários nos resultados obtidos, bem como a aplicação da metodologia de planejamento e tomada de decisão em longo prazo para solução de problemas de planejamento em outras áreas, como por exemplo na gestão de recursos públicos, ou ainda na avaliação de estratégias de negócios. Adicionalmente, propõe-se a realização de uma análise de sensibilidade dos cenários, visando avaliar o impacto potencial dessas variações nas decisões finais. Tal análise permitiria identificar quais cenários são mais críticos e como alterações em seus parâmetros podem influenciar as escolhas feitas. Por fim, a investigação sobre a implementação de novos critérios de escolha ofereceria uma perspectiva mais abrangente sobre a tomada de decisão.

Estas direções futuras de pesquisa poderiam aprimorar a metodologia existente, e também expandir sua aplicabilidade e eficácia em contextos diversificados, contribuindo assim para o avanço do campo de planejamento e tomada de decisão em longo prazo

Referências

- ABBA, Z. Y.; BALTA-OZKAN, N.; HART, P. A holistic risk management framework for renewable energy investments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, v. 160, 5 2022. ISSN 18790690. Citado na página 51.
- AGUILAR, J. A survey about fuzzy cognitive maps papers. *International journal of computational cognition*, v. 3, p. 27–33, 2005. Citado na página 35.
- ALEXANDER, W.; SERFASS, R. Beyond vision: creating and analyzing your organization's quality future. *Quality Progress*, American Society for Quality, v. 31, n. 7, p. 31, 1998. Citado na página 31.
- ALIPOUR, M. et al. A new hybrid fuzzy cognitive map-based scenario planning approach for iran's oil production pathways in the post-sanction period. *Energy*, v. 135, p. 851–864, 9 2017. ISSN 03605442. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544217310629>>. Citado na página 35.
- AMER, M.; DAIM, T. U.; JETTER, A. A review of scenario planning. *Futures*, v. 46, p. 23–40, 2 2013. ISSN 00163287. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016328712001978>>. Citado 10 vezes nas páginas 21, 22, 28, 29, 33, 35, 40, 48, 75 e 77.
- AMER, M.; JETTER, A.; DAIM, T. Development of fuzzy cognitive map (fcm)-based scenarios for wind energy. *International Journal of Energy Sector Management*, 2011. ISSN 17506220. Citado na página 35.
- BAMBIRRA, R. et al. Robust multiobjective decision making in the acquisition of energy assets. *Energies*, v. 16, n. 16, 2023. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/16/6089>>. Citado 5 vezes nas páginas 23, 43, 44, 52 e 63.
- BELLMAN, R. E.; ZADEH, L. A. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*, v. 17, p. B-141–B-164, 1970. ISSN 0025-1909. Citado na página 25.
- BELYAEV, L. S. A practical approach to choosing alternative solutions to complex optimization problems under uncertainty. *International Institute for Applied Systems Analysis*, v. 1, p. 1–60, 1977. Citado na página 36.
- BLOOM, M. J.; MENEFE, M. K. Scenario planning and contingency planning. *Public Productivity Management Review*, Taylor Francis, Ltd., v. 17, n. 3, p. 223–230, 1994. ISSN 10448039. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/3380654>>. Citado na página 30.
- BOŽIĆ, Z. et al. Power exchange prices: comparison of volatility in european markets. *Energies*, MDPI AG, v. 13, 10 2020. ISSN 19961073. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 51.
- BRADFIELD, R. et al. The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures*, 2005. ISSN 00163287. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 69.
- BRADSHAW, A. Regulatory change and innovation in latin america: The case of renewable energy in brazil. *Utilities Policy*, Elsevier Ltd, v. 49, p. 156–164, 12 2017. ISSN 09571787. Citado na página 48.

- BUENO, S.; SALMERON, J. L. Benchmarking main activation functions in fuzzy cognitive maps. *Expert Systems with Applications*, Elsevier Ltd, v. 36, p. 5221–5229, 2009. ISSN 09574174. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2008.06.072>>. Citado na página 34.
- CAMARGO, L. A. S. et al. Optimal portfolio selection of wind power plants using a stochastic risk-averse optimization model, considering the wind complementarity of the sites and a budget constraint. *Energy and Power Engineering*, v. 12, p. 459–476, 2020. ISSN 1949-243X. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 48.
- CANELAS, E.; PINTO-VARELA, T.; SAWIK, B. Electricity portfolio optimization for large consumers: Iberian electricity market case study. *Energies*, MDPI AG, v. 13, 5 2020. ISSN 19961073. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 66.
- CARRANO, E. G. et al. A multiobjective hybrid evolutionary algorithm for robust design of distribution networks. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 63, p. 645–656, 2014. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061514003810>>. Citado na página 57.
- CHARWAND, M.; GITIZADEH, M.; SIANO, P. A new active portfolio risk management for an electricity retailer based on a drawdown risk preference. *Energy*, v. 118, p. 387–398, 1 2017. ISSN 03605442. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544216318643>>. Citado na página 47.
- CHAWDA, S.; BHAKAR, R.; MATHURIA, P. Uncertainty and risk management in electricity market: Challenges and opportunities. In: *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 51.
- CHERMACK, T. J. *Scenario planning in organizations: how to create, use, and assess scenarios*. [S.l.]: Berrett-Koehler Publishers, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 22, 29, 30, 31 e 69.
- COSTA, O. L. et al. Robust portfolio optimization for electricity planning: An application based on the brazilian electricity mix. *Energy Economics*, Elsevier B.V., v. 64, p. 158–169, 5 2017. ISSN 01409883. Citado na página 66.
- DAHLGREN, R.; LIU, C.-C.; LAWARREE, J. Risk assessment in energy trading. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, p. 503–511, 5 2003. ISSN 0885-8950. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1198278/>>. Citado 5 vezes nas páginas 47, 48, 51, 56 e 65.
- de Freitas, R. A. et al. Stochastic model to aid decision making on investments in renewable energy generation: Portfolio diffusion and investor risk aversion. *Renewable Energy*, v. 162, p. 1161–1176, 2020. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014812031243X>>. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 55.
- DENTON, M. et al. Managing market risk in energy. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003. ISSN 08858950. Citado 4 vezes nas páginas 22, 47, 48 e 51.
- DURBACH, I. N.; STEWART, T. J. Modeling uncertainty in multi-criteria decision analysis. *European Journal of Operational Research*, v. 223, n. 1, p. 1–14, 2012. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712003591>>. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 77.

EKEL, P. Fuzzy sets and models of decision making. *Computers Mathematics with Applications*, v. 44, 10 2002. ISSN 08981221. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

EKEL, P. et al. Multiobjective and multiattribute decision making in a fuzzy environment and their power engineering applications. *Information Sciences*, v. 361-362, p. 100–119, 9 2016. ISSN 00200255. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020025516302730>>. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 36 e 42.

EKEL, P.; MARTINI, J.; PALHARES, R. Multicriteria analysis in decision making under information uncertainty. *Applied Mathematics and Computation*, v. 200, p. 501–516, 7 2008. ISSN 00963003. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0096300307011307>>. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 36.

EKEL, P.; PEDRYCZ, W.; JR, J. P. *Multicriteria decision-making under conditions of uncertainty: A fuzzy set perspective*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020. Citado 13 vezes nas páginas 32, 33, 36, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 50, 74 e 76.

EKEL, P. et al. *A general approach to solving a wide class of fuzzy optimization problems*. 1998. 49-66 p. Citado na página 40.

EKEL, P. Y. et al. Fuzzy set based multiobjective allocation of resources and its applications. *Computers and Mathematics with Applications*, v. 52, p. 197–210, 2006. ISSN 08981221. Citado na página 40.

Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 52, 62 e 76.

Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030*. Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 52, 62 e 76.

FAHEY, L.; RANDALL, R. M. *Learning from the future: Competitive foresight scenarios*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1997. Citado na página 31.

FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2005. Citado na página 21.

FIGUEIREDO, L. et al. Group decision-based construction of scenarios for multicriteria analysis in conditions of uncertainty on the basis of quantitative and qualitative information. *Group Decision and Negotiation*, Springer, v. 30, p. 665–696, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 45.

GEUS, A. D. *The living company: Habits for survival in a turbulent business environment*. [S.l.: s.n.], 1997. Citado na página 31.

GLYKAS, M. *Fuzzy cognitive maps: Advances in theory, methodologies, tools and applications*. [S.l.]: Springer, 2010. v. 247. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 35.

- GODET, M. The art of scenarios and strategic planning. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 65, p. 3–22, 9 2000. ISSN 00401625. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162599001201>>. Citado 3 vezes nas páginas 28, 31 e 69.
- GOMES, L. C. S. et al. Avaliação de risco de exposição ao mercado de curto prazo na aquisição de novos ativos de energia. In: *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro: SNPTEE, 2022. Citado na página 23.
- GOMES, L. C. S. et al. Armazenamento de energia: Possíveis investimentos e impactos no portfólio de energia. In: *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro: SNPTEE, 2022. Citado na página 23.
- GRAY, S. A.; ZANRE, E.; GRAY, S. R. Fuzzy cognitive maps as representations of mental models and group beliefs. *Intelligent Systems Reference Library*, 2014. ISSN 18684408. Citado na página 35.
- GROUMPOS, P. P. Fuzzy cognitive maps in modeling supervisory control systems. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol: 8, p. pp: 83–98, 2000. Citado na página 35.
- GöKGöz, F.; ATMACA, M. E. Portfolio optimization under lower partial moments in emerging electricity markets: Evidence from turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 67, p. 437–449, 2017. ISSN 18790690. Citado na página 66.
- HAAG, E. van den. The year 2000: A framework for speculation on the next thirty-three years. herman kahn , anthony j. wiener. *American Journal of Sociology*, Macmillan, v. 74, p. 200–201, 9 1968. ISSN 0002-9602. Disponível em: <<https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/224626>>. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- HEIJDEN, K. Van der. *Scenarios: the art of strategic conversation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 31.
- HWANG, C.-L.; MASUD, A. S. M. Methods for multiple objective decision making. In: *Multiple objective decision making—methods and applications*. [S.l.]: Springer, 1979. p. 21–283. Citado na página 25.
- ILBAHAR, E.; KAHRAMAN, C.; CEBI, S. Risk assessment of renewable energy investments: A modified failure mode and effect analysis based on prospect theory and intuitionistic fuzzy ahp. *Energy*, Elsevier Ltd, v. 239, 1 2022. ISSN 03605442. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 49.
- ILBAHAR, E.; KAHRAMAN, C.; CEBI, S. Evaluation of sustainable energy planning scenarios with a new approach based on fcm, waspas and impact effort matrix. *Environment, Development and Sustainability*, v. 25, n. 10, p. 11931–11955, Oct 2023. ISSN 1573-2975. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02560-8>>. Citado 3 vezes nas páginas 30, 33 e 35.
- JETTER, A.; SCHWEINFORT, W. Building scenarios with fuzzy cognitive maps: An exploratory study of solar energy. *Futures*, Elsevier Ltd, v. 43, p. 52–66, 2011. ISSN 00163287. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2010.05.002>>. Citado na página 35.
- JR, A. L.; OLIVEIRA, L. C. V. de; KILIMNIK, Z. M. Scenario planning as learning/o planejamento de cenários como aprendizado. *Future Studies Research Journal: Trends and Strategy*, Future Studies Research Journal: Trends and Strategies, v. 2, p. 3–33, 2010. Citado na página 29.

- KAHANE, A. *Solving tough problems: An open way of talking, listening, and creating new realities*. [S.l.]: Berrett-Koehler Publishers, 2004. Citado na página 31.
- KEOUGH, S. M.; SHANAHAN, K. J. Scenario planning: Toward a more complete model for practice. *Advances in Developing Human Resources*, v. 10, p. 166–178, 2008. ISSN 15234223. Citado na página 30.
- KLOSS, L. L. The suitability and application of scenario planning for national professional associations. *Nonprofit Management and Leadership*, Wiley Online Library, v. 10, n. 1, p. 71–83, 1999. Citado na página 31.
- KOK, K. The potential of fuzzy cognitive maps for semi-quantitative scenario development, with an example from brazil. *Global Environmental Change*, v. 19, p. 122–133, 2 2009. ISSN 09593780. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378008000794>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 35.
- KOK, K.; DELDEN, H. van. Combining two approaches of integrated scenario development to combat desertification in the guadentín watershed, spain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 36, p. 49–66, 2009. ISSN 0265-8135. Disponível em: <<http://epb.sagepub.com/lookup/doi/10.1068/b32137>>. Citado na página 35.
- KOKKINOS, K. et al. Multi-scenario analysis on hydrogen production development using pestel and fcm models. *Journal of Cleaner Production*, v. 419, p. 138251, 2023. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623024095>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 36.
- KONTI, A.; DAMIGOS, D. Exploring strengths and weaknesses of bioethanol production from bio-waste in greece using fuzzy cognitive maps. *Energy Policy*, v. 112, p. 4–11, 1 2018. ISSN 03014215. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421517306237>>. Citado na página 35.
- KOSKO, B. Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 24, p. 65–75, 1986. ISSN 00207373. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- KYRIAKARAKOS, G. et al. A fuzzy cognitive maps-petri nets energy management system for autonomous polygeneration microgrids. *Applied Soft Computing Journal*, 2012. ISSN 15684946. Citado na página 35.
- KYRIAKARAKOS, G. et al. *A fuzzy cognitive maps decision support system for renewables local planning*. 2014. Citado 5 vezes nas páginas 33, 34, 35, 43 e 67.
- LEE, K. C. et al. Strategic planning simulation based on fuzzy cognitive map knowledge and differential game. *Simulation*, v. 71, p. 316–327, 1998. ISSN 00375497. Citado na página 35.
- LUCE, R.; RAIFFA, H. *Games and Decisions*. [S.l.]: John Wiley Sons, 1957. Citado na página 36.
- MACEIRAL, M. E. et al. Twenty years of application of stochastic dual dynamic programming in official and agent studies in brazil-main features and improvements on the new model. In: . [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. ISBN 9781910963104. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 51.
- MANGRAM, M. E. *A SIMPLIFIED PERSPECTIVE OF THE MARKOWITZ PORTFOLIO THEORY*. 2013. Disponível em: <<http://ssrn.com/abstract=2147880>>. Citado na página 47.

MARKOWITZ, H. M. *Portfolio selection*. [S.l.]: Yale university press, 1968. Citado na página 47.

MARKOWITZ, H. M. *The Early History of Portfolio Theory: 1600-1960*. 1999. Citado na página 47.

MARTINO, J. P. A review of selected recent advances in technological forecasting. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 70, p. 719–733, 10 2003. ISSN 00401625. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004016250200375X>>. Citado na página 28.

MARTÍNEZ, L.; DINÇER, H.; YÜKSEL, S. A hybrid decision making approach for new service development process of renewable energy investment. *Applied Soft Computing*, Elsevier, v. 133, p. 109897, 1 2023. ISSN 1568-4946. Citado na página 49.

MATTHIAS, E. Multicriteria optimization. *Lecture notes in economics and mathematical systems*, v. 491, p. 149–151, 2005. Citado na página 25.

MERISTÖ, T. Not forecasts but multiple scenarios when coping with uncertainties in the competitive environment. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 38, p. 350–357, 1989. Citado na página 29.

NETO, D. P. et al. Portfolio optimization of renewable energy assets: hydro, wind, and photovoltaic energy in the regulated market in brazil. *Energy Economics*, Elsevier, v. 64, p. 238–250, 2017. Citado na página 55.

NETO, D. P. et al. Portfolio optimization of renewable energy assets: Hydro, wind, and photovoltaic energy in the regulated market in brazil. *Energy Economics*, 2017. ISSN 01409883. Citado na página 66.

ODEH, R. P.; WATTS, D.; FLORES, Y. Planning in a changing environment: Applications of portfolio optimisation to deal with risk in the electricity sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, v. 82, p. 3808–3823, 2 2018. ISSN 18790690. Citado na página 47.

OLIVEIRA, B. et al. *Robust Energy Seasonalization Strategy in the Brazilian Electricity Market*. 2021. Disponível em: <www.ijjsrt.com>. Citado na página 63.

PEDRYCZ, W.; EKEL, P.; PARREIRAS, R. *Fuzzy multicriteria decision-making: models, methods and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 7 vezes nas páginas 21, 25, 26, 32, 37, 40 e 50.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. *An introduction to fuzzy sets: analysis and design*. [S.l.]: MIT press, 1998. Citado na página 25.

PEIXOTO, G. M. et al. Análise da participação de pequenas centrais hidrelétricas no mecanismo de realocação de energia. In: . [S.l.]: Galoa Events Proceedings, 2019. Citado na página 23.

PEREIRA, J. G. et al. On multicriteria decision making under conditions of uncertainty. *Information Sciences*, Elsevier Inc., v. 324, p. 44–59, 12 2015. ISSN 00200255. Citado 4 vezes nas páginas 36, 43, 44 e 45.

- PEREIRA, J. J. et al. Risk reducing actions: efficiency evaluation. *WSEAS Transactions on Business and Economics*, v. 13, p. 613–619, 2016. Disponível em: <<http://www.wseas.org/multimedia/journals/economics/2016/b165807-069.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- PEREIRA, R. et al. Agregação de métricas de risco com o operador owa aplicada a comercialização de energia. In: . [S.l.: s.n.], 2018. Citado na página 48.
- PEREIRA, R. B. *Integração De Métodos De Planejamento Em Cenários E Tomada De Decisão E Suas Aplicações*. Dissertação (Dissertação de Mestrado Acadêmico) — PUC Minas, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Feb 2019. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 45.
- PORTER, M. E. *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. New York: Free Press, 1985. ISBN 978-0-02-925090-7. Citado na página 30.
- Pérez Odeh, R.; WATTS, D.; NEGRETE-PINCETIC, M. Portfolio applications in electricity markets review: Private investor and manager perspective trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 192–204, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117311024>>. Citado na página 51.
- RAIFFA, H. *Decision Analysis*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1968. Citado na página 36.
- RALSTON, B.; WILSON, I. *The scenario planning handbook*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado 8 vezes nas páginas 6, 21, 28, 29, 40, 43, 48 e 69.
- RAMALHO, F. D. et al. Multicriteria decision making under conditions of uncertainty in application to multiobjective allocation of resources. *Information Fusion*, Elsevier, v. 49, p. 249–261, 2019. Citado 13 vezes nas páginas 21, 22, 32, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 57, 60, 61 e 74.
- RINGLAND, G. *Scenario Planning: Managing for the Future*. New York: Wiley, 1998. Citado na página 31.
- ROCKAFELLAR, R. T.; URYASEV, S. Optimization of conditional value-at-risk. *The Journal of Risk*, v. 2, p. 21–41, 2000. ISSN 14651211. Disponível em: <<http://www.ise.uu.edu/uryasevhttp://www.risk.net/journal-of-risk/technical-paper/2161159/optimization-conditional-value-risk>>. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.
- SAATY, T. Seven is the magic number in nature. *Proceedings of the American Philosophical Society*, American Philosophical Society, v. 160, p. 335, 2016. Citado na página 69.
- SADEGHI, M.; SHAVVALPOUR, S. Energy risk management and value at risk modeling. *Energy Policy*, v. 34, p. 3367–3373, 12 2006. ISSN 03014215. Revista B1. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421505001850>>. Citado 3 vezes nas páginas 47, 48 e 51.
- SANTOS, F. F. G. D. et al. Seasonal energy trading portfolio based on multiobjective optimisation. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 2014. ISSN 1742-7967. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 57.
- SANTOS, F. F. G. dos et al. A nash equilibrium approach to the brazilian seasonalization of energy certificates. *Energies*, v. 15, n. 6, 2022. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2156>>. Citado na página 51.

- SCHOEMAKER, P. J. H. When and how to use scenario planning: A heuristic approach with illustration. *Journal of Forecasting*, v. 10, p. 549–564, 11 1991. ISSN 02776693. Disponível em: <<http://web.a.ebscohost.com.libproxy.nps.edu/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=c7e879e2-f8b8-40d8-9279-81b18255cfa4%40sessionmgr4010&vid=2&hid=4206http://doi.wiley.com/10.1002/for.3980100602>>. Citado na página 29.
- SCHOEMAKER, P. J. H. Scenario planning: a tool for strategic thinking. *MIT Sloan Management Review*, v. 37, n. 2, p. 25–40, 1995. Citado na página 30.
- SCHWARTZ, P. *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*. New York: Doubleday, 1991. ISBN 978-0-385-26731-0. Citado na página 30.
- SIMPSON, D. G. Key lessons for adopting scenario planning in diversified companies. *Planning Review*, MCB UP Ltd, v. 20, n. 3, p. 11–48, 1992. Citado na página 30.
- SOBOL, I.; STATNIKOV, R. *Choice of Optimal Parameters in Problems with Multiple Criteria*. Moscow: Drofa, 2006. In Russian. Citado na página 32.
- SOBOL, I. M. On the systematic search in a hypercube. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, v. 16, p. 790–793, 1979. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 45.
- STACH, W. et al. Genetic learning of fuzzy cognitive maps. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 153, p. 371–401, 8 2005. ISSN 01650114. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165011405000308>>. Citado na página 33.
- STEWART, T. J.; DURBACH, I. Dealing with uncertainties in mcda. In: *Multiple criteria decision analysis*. [S.l.]: Springer, 2016. p. 467–496. Citado 8 vezes nas páginas 21, 22, 29, 30, 33, 48, 75 e 77.
- STIRLING, A. Multicriteria diversity analysis. *Energy Policy*, Elsevier, v. 38, p. 1622–1634, 2009. ISSN 03014215. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.023>>. Citado na página 67.
- STRAUSS, J. D.; RADNOR, M. Roadmapping for dynamic and uncertain environments. *Research-Technology Management*, v. 47, p. 51–58, 3 2004. ISSN 0895-6308. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08956308.2004.11671620>>. Citado na página 29.
- STYLIOS, C.; GROUMPOS, P. Modeling complex systems using fuzzy cognitive maps. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 2004. ISSN 1083-4427. Citado na página 35.
- THOMAS, C. W. Learning from imagining the years ahead. *Planning Review*, v. 22, n. 3, p. 6–10, 1994. Citado na página 30.
- TSADIRAS, A.; PEMPETZOGLU, M.; VIKTORATOS, I. Making predictions of global warming impacts using a semantic web tool that simulates fuzzy cognitive maps. *Computational Economics*, Springer, v. 58, p. 715–745, 10 2021. ISSN 15729974. Citado na página 35.
- TSADIRAS, A. K. Using fuzzy cognitive maps for e-commerce strategic planning. *Information Sciences*, v. 178, p. 3880–3894, 2008. ISSN 00200255. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002002550800159X>>. Citado na página 35.

TUCKER, K. Scenario planning. *Association Management*, AMERICAN SOCIETY OF ASSOCIATION EXECUTIVES, v. 51, p. 70–76, 1999. Citado na página 31.

VARUM, C. A.; MELO, C. Directions in scenario planning literature - a review of the past decades. *Futures*, Elsevier Ltd, v. 42, p. 355–369, 2010. ISSN 00163287. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2009.11.021>>. Citado na página 29.

WANG, L. et al. Security constrained decentralized peer-to-peer transactive energy trading in distribution systems. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, v. 8, n. 1, p. 188–197, 2022. Citado na página 49.

WERON, R. Energy price risk management. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 285, p. 127–134, 9 2000. ISSN 03784371. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/physa<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437100002764>>. Citado 3 vezes nas páginas 47, 48 e 51.

WILSON, I. From scenario thinking to strategic action. *Technological forecasting and social change*, Elsevier, v. 65, n. 1, p. 23–29, 2000. Citado na página 31.

YAGER, R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, IEEE, v. 18, p. 183–190, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 42.

YANG, L. et al. Indirect multi-energy transactions of energy internet with deep reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 37, n. 5, p. 4067–4077, 2022. Citado na página 49.

ZHANG, Q.; WANG, Y.; YANG, Y. Fuzzy multiple attribute decision making with eight types of preference information on alternatives. In: *2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 288–293. Citado na página 41.

ZIV, G. et al. The potential impact of brexit on the energy, water and food nexus in the uk: A fuzzy cognitive mapping approach. *Applied Energy*, v. 210, p. 487–498, 1 2018. ISSN 03062619. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261917310450>>. Citado na página 35.

ÖZESMI, U.; ÖZESMI, S. L. Ecological models based on people's knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach. *Ecological Modelling*, Elsevier, v. 176, p. 43–64, 8 2004. ISSN 03043800. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438000300543X><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030438000300543X>>. Citado 4 vezes nas páginas 33, 34, 35 e 43.

Apêndices

APÊNDICE A – Memória de cálculo das matrizes do Estudo de Caso I

Tabela 24 – Matriz de payoff de VPL esperado (MR\$)

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	-4.791,51	-4.732,74
X1	-4.769,46	-4.713,26
X2	-4.900,36	-4.839,31
X3	-4.892,69	-4.816,45
X4	-4.880,84	-4.781,12
X5	-4.878,31	-4.819,83
X6	-4.762,62	-4.699,49
X7	-4.863,80	-4.783,20

Nota: Os valores se apresentam em negativo pois o objetivo é maximização.

Tabela 25 – Matriz de Arrependimento de VPL esperado (MR\$)

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	108,85	106,57
X1	130,90	126,05
X2	0,00	0,00
X3	7,67	22,86
X4	19,52	58,19
X5	22,05	19,48
X6	137,74	139,82
X7	36,56	56,11

Tabela 26 – Matriz com os Critérios de Escolha para VPL esperado (MR\$)

Alternativa	F^W	F^L	F^S	F^H
X0	-4.732,74	-4.762,13	108,85	-4.747,43
X1	-4.713,26	-4.741,36	130,90	-4.727,31
X2	-4.839,31	-4.869,84	0,00	-4.854,57
X3	-4.816,45	-4.854,57	22,86	-4.835,51
X4	-4.781,12	-4.830,98	58,19	-4.806,05
X5	-4.819,83	-4.849,07	22,05	-4.834,45
X6	-4.699,49	-4.731,06	139,82	-4.715,27
X7	-4.783,20	-4.823,50	56,11	-4.803,35

Tabela 27 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para VPL esperado

Alternativa	μ^W	μ^L	μ^S	μ^H
X0	0,24	0,22	0,22	0,23
X1	0,10	0,07	0,06	0,09
X2	1,00	1,00	1,00	1,00
X3	0,84	0,89	0,84	0,86
X4	0,58	0,72	0,58	0,65
X5	0,86	0,85	0,84	0,86
X6	0,00	0,00	0,00	0,00
X7	0,60	0,67	0,60	0,63

Tabela 28 – Matriz de payoff de CVaR (MR\$)

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	-4.664,09	-4.594,92
X1	-4.639,48	-4.573,23
X2	-4.772,78	-4.701,65
X3	-4.779,64	-4.694,74
X4	-4.781,34	-4.680,04
X5	-4.748,16	-4.679,91
X6	-4.639,42	-4.565,59
X7	-4.754,29	-4.665,14

Nota: Os valores se apresentam em negativo pois o objetivo é maximização.

Tabela 29 – Matriz de Arrependimento de CVaR (MR\$)

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	117,25	106,73
X1	141,86	128,42
X2	8,56	0,00
X3	1,70	6,91
X4	0,00	21,61
X5	33,18	21,74
X6	141,92	136,06
X7	27,05	36,51

Tabela 30 – Matriz com os Critérios de Escolha para CVaR (MR\$)

Alternativa	F^W	F^L	F^S	F^H
X0	-4.594,92	-4.629,51	117,25	-4.612,21
X1	-4.573,23	-4.606,36	141,86	-4.589,79
X2	-4.701,65	-4.737,22	8,56	-4.719,43
X3	-4.694,74	-4.737,19	6,91	-4.715,97
X4	-4.680,04	-4.730,69	21,61	-4.705,37
X5	-4.679,91	-4.714,04	33,18	-4.696,97
X6	-4.565,59	-4.602,51	141,92	-4.584,05
X7	-4.665,14	-4.709,72	36,51	-4.687,43

Tabela 31 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para CVaR

Alternativa	μ^W	μ^L	μ^S	μ^H
X0	0,22	0,20	0,18	0,21
X1	0,06	0,03	0,00	0,04
X2	1,00	1,00	0,99	1,00
X3	0,95	1,00	1,00	0,97
X4	0,84	0,95	0,89	0,90
X5	0,84	0,83	0,81	0,83
X6	0,00	0,00	0,00	0,00
X7	0,73	0,80	0,78	0,76

Tabela 32 – Matriz de payoff de RaR (MR\$)

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	127,42	137,82
X1	129,98	140,03
X2	127,58	137,66
X3	113,05	121,71
X4	99,50	101,08
X5	130,14	139,92
X6	123,20	133,90
X7	109,50	118,06

Tabela 33 – Matriz de Arrependimento de RaR (MR\$)

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	27,92	36,74
X1	30,48	38,95
X2	28,08	36,58
X3	13,55	20,63
X4	0,00	0,00
X5	30,64	38,84
X6	23,70	32,82
X7	10,00	16,98

Tabela 34 – Matriz com os Critérios de Escolha para RaR (MR\$)

Alternativa	F^W	F^L	F^S	F^H
X0	137,82	132,62	36,74	135,22
X1	140,03	135,01	38,95	137,52
X2	137,66	132,62	36,58	135,14
X3	121,71	117,38	20,63	119,55
X4	101,08	100,29	0,00	100,69
X5	139,92	135,03	38,84	137,48
X6	133,90	128,55	32,82	131,23
X7	118,06	113,78	16,98	115,92

Tabela 35 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para RaR

Alternativa	μ^W	μ^L	μ^S	μ^H
X0	0,06	0,07	0,06	0,06
X1	0,00	0,00	0,00	0,00
X2	0,06	0,07	0,06	0,06
X3	0,47	0,51	0,47	0,49
X4	1,00	1,00	1,00	1,00
X5	0,00	0,00	0,00	0,00
X6	0,16	0,19	0,16	0,17
X7	0,56	0,61	0,56	0,59

Tabela 36 – Matriz de payoff de InS

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	-0,00	-0,00
X1	-143,45	-143,45
X2	-119,91	-119,91
X3	-111,46	-111,46
X4	-94,05	-94,05
X5	-125,14	-125,14
X6	-133,94	-133,94
X7	-116,34	-116,34

Nota: Os valores se apresentam em negativo pois o objetivo é maximização.

Tabela 37 – Matriz de Arrependimento de InS

Alternativa	PDE_2029	PDE_2030
X0	143,45	143,45
X1	0,00	0,00
X2	23,54	23,54
X3	31,99	31,99
X4	49,40	49,40
X5	18,31	18,31
X6	9,51	9,51
X7	27,11	27,11

Tabela 38 – Matriz com os Critérios de Escolha para InS

Alternativa	F^W	F^L	F^S	F^H
X0	0,00	0,00	143,45	0,00
X1	-143,45	-143,45	0,00	-143,45
X2	-119,91	-119,91	23,54	-119,91
X3	-111,46	-111,46	31,99	-111,46
X4	-94,05	-94,05	49,40	-94,05
X5	-125,14	-125,14	18,31	-125,14
X6	-133,94	-133,94	9,51	-133,94
X7	-116,34	-116,34	27,11	-116,34

Tabela 39 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para InS

Alternativa	μ^W	μ^L	μ^S	μ^H
X0	0,00	0,00	0,00	0,00
X1	1,00	1,00	1,00	1,00
X2	0,84	0,84	0,84	0,84
X3	0,78	0,78	0,78	0,78
X4	0,66	0,66	0,66	0,66
X5	0,87	0,87	0,87	0,87
X6	0,93	0,93	0,93	0,93
X7	0,81	0,81	0,81	0,81

Tabela 40 – Matriz Agregada com os Critérios de Escolha Normalizados

Alternativa	μ^W	μ^L	μ^S	μ^H
X0	0,00	0,00	0,00	0,00
X1	0,00	0,00	0,00	0,00
X2	0,06	0,07	0,06	0,06
X3	0,47	0,51	0,47	0,49
X4	0,58	0,66	0,58	0,65
X5	0,00	0,00	0,00	0,00
X6	0,00	0,00	0,00	0,00
X7	0,56	0,61	0,56	0,59

APÊNDICE B – Memória de cálculo das matrizes do Estudo de Caso II

Tabela 41 – Matriz de payoff de VPL (MR\$)

Alternativa	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
X_1	-2.365,41	-2.250,82	-2.227,70	-2.442,79
X_2	-2.215,44	-2.097,29	-2.073,72	-2.295,23
X_3	-2.233,70	-2.116,31	-2.092,85	-2.312,98
X_4	-2.331,22	-2.217,83	-2.194,86	-2.407,78

Nota: Os valores se apresentam em negativo pois o objetivo é maximização.

Tabela 42 – Matriz de Arrependimento de VPL (MR\$)

Alternativa	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
X_1	0,00	0,00	0,00	0,00
X_2	149,97	153,53	153,98	147,565
X_3	131,71	134,51	134,85	129,81
X_4	34,19	32,99	32,84	35,01

Tabela 43 – Matriz com os Critérios de Escolha para VPL (MR\$)

Alternativa	F^W	F^L	F^S	F^H
X_1	-2.227,70	-2.321,68	0,00	-2.281,47
X_2	-2.073,72	-2.170,42	153,98	-2.129,10
X_3	-2.092,85	-2.188,96	134,85	-2.147,88
X_4	-2.194,86	-2.287,92	35,01	-2.248,09

Tabela 44 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para VPL

Alternativa	μ^W	μ^L	μ^S	μ^H
X_1	1,00	1,00	1,00	1,00
X_2	0,00	0,00	0,00	0,00
X_3	0,12	0,12	0,12	0,12
X_4	0,79	0,78	0,77	0,78

Tabela 45 – Matriz de payoff de Risco dos Recursos (MR\$/Ano)

Alternativa	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
X_1	18,48	16,74	17,29	16,77
X_2	18,99	17,20	17,76	17,23
X_3	18,88	17,10	17,66	17,14
X_4	18,30	16,59	17,13	16,61

Tabela 46 – Matriz de Arrependimento de Risco dos Recursos (MR\$/Ano)

Alternativa	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
X_1	0,18	0,15	0,16	0,16
X_2	0,69	0,61	0,63	0,62
X_3	0,58	0,51	0,53	0,53
X_4	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 47 – Matriz com os Critérios de Escolha para Risco dos Recursos (MR\$/Ano)

Alternativa	F^W	F^L	F^S	F^H
X_1	18,48	17,32	0,18	18,04
X_2	18,99	17,80	0,69	18,54
X_3	18,88	17,70	0,58	18,44
X_4	18,30	17,16	0,00	17,87

Tabela 48 – Matriz com os Critérios de Escolha Normalizados para Risco dos Recursos

Alternativa	μ^W	μ^L	μ^S	μ^H
X_1	0,74	0,75	0,74	0,74
X_2	0,00	0,00	0,00	0,00
X_3	0,16	0,16	0,16	0,16
X_4	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 49 – Matriz Agregada com os Critérios de Escolha Normalizados

Alternativa	μ^W	μ^L	μ^S	μ^H
X_1	0.74	0.75	0.74	0.74
X_2	0.00	0.00	0.00	0.00
X_3	0.12	0.12	0.12	0.12
X_4	0.79	0.78	0.77	0.78

APÊNDICE C – Cenários construídos no Estudo de Caso II

C.1 Cenário Base

Tabela 50 – Cenário Base

Ano	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Preço da energia	0,30	0,32	0,69	0,35	0,30	0,27	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Demanda de energia	0,25	0,88	0,79	0,77	0,68	0,79	0,80	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
Investimentos setor elétrico	0,50	0,67	0,69	0,84	0,70	0,67	0,66	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Geracao hidraulica	0,62	0,82	0,95	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Geracao termica	0,48	0,57	0,29	0,24	0,32	0,24	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Geracao eólica	0,80	0,73	0,81	0,81	0,85	0,81	0,80	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Geracao solar	0,80	0,75	0,81	0,81	0,86	0,81	0,81	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Precipitações	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Energia armazenada	0,25	0,67	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
PIB Brasil	0,60	0,64	0,69	0,69	0,73	0,69	0,69	0,68	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
Preço gás natural	0,15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Producao industria	0,50	0,49	0,39	0,21	0,40	0,46	0,45	0,43	0,42	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Preço óleo combustível	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
PIB paraguai	0,70	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

C.2 Cenário Pouca Chuva

Tabela 51 – Cenário Pouca Chuva

Ano	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Preço da energia	0,30	0,32	0,69	0,36	0,41	0,38	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Demanda de energia	0,25	0,88	0,79	0,77	0,68	0,78	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
Investimentos setor elétrico	0,50	0,67	0,69	0,84	0,70	0,73	0,72	0,74	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
Geracao hidraulica	0,62	0,82	0,95	0,92	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
Geracao termica	0,48	0,57	0,29	0,37	0,47	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Geracao eólica	0,80	0,73	0,76	0,76	0,81	0,77	0,77	0,77	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
Geracao solar	0,80	0,75	0,82	0,82	0,87	0,83	0,84	0,83	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Precipitações	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Energia armazenada	0,25	0,67	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
PIB Brasil	0,60	0,64	0,69	0,69	0,73	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Preço gás natural	0,15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Producao industria	0,50	0,49	0,39	0,21	0,40	0,39	0,38	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Preço óleo combustivel	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
PIB paraguai	0,70	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

C.3 Cenário Desenvolvimento mundial

Tabela 52 – Cenário Desenvolvimento Mundial

Ano	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Preço da energia	0,30	0,32	0,71	0,44	0,41	0,40	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Demanda de energia	0,25	0,88	0,89	0,92	0,86	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Investimentos setor elétrico	0,50	0,67	0,69	0,85	0,74	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
Geracao hidraulica	0,62	0,82	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Geracao termica	0,48	0,57	0,29	0,24	0,32	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Geracao eólica	0,80	0,73	0,81	0,81	0,85	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Geracao solar	0,80	0,75	0,81	0,81	0,86	0,83	0,83	0,82	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Precipitações	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Energia armazenada	0,25	0,67	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
PIB Brasil	0,60	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Preço gás natural	0,15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Producao industria	0,50	0,49	0,59	0,35	0,52	0,53	0,54	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
Preço óleo combustivel	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
PIB Paraguai	0,72	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

C.4 Cenário Subsídio para Usinas Renováveis

Tabela 53 – Cenário Subsídio para Usinas Renováveis

Ano	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Preço da energia	0,30	0,32	0,60	0,28	0,24	0,23	0,25	0,25	0,25	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Demanda de energia	0,25	0,88	0,79	0,77	0,70	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
Investimentos setor elétrico	0,50	0,67	0,69	0,81	0,67	0,64	0,64	0,65	0,65	0,65	0,64	0,65	0,65	0,65	0,65
Geracao hidraulica	0,62	0,82	0,95	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Geracao termica	0,48	0,57	0,29	0,24	0,30	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Geracao eólica	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Geracao solar	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Precipitações	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Energia armazenada	0,25	0,67	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
PIB Brasil	0,60	0,64	0,69	0,69	0,72	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Preço gás natural	0,15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Producao industria	0,50	0,49	0,39	0,26	0,44	0,49	0,47	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Preço óleo combustivel	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
PIB paraguai	0,70	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50