

PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS

PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

MYLLENNA RODRIGUES DE ABREU

**OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO
ETANOL 1G E 2G PELA ABORDAGEM NEXUS ÁGUA-ENERGIA-
ALIMENTO-TERRA (WEFL)**

Goiânia - Goiás

Maio/2023

**OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO
ETANOL 1G E 2G PELA ABORDAGEM NEXUS ÁGUA-ENERGIA-
ALIMENTO-TERRA (WEFL)**

MYLLENNA RODRIGUES DE ABREU

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Ricardo Luiz Machado, Dr.

Goiânia - Goiás
Maio/2023

A162o Abreu, Myllenna Rodrigues de
Otimização multi-objetiva da cadeia de suprimentos
do etanol 1G e 2G pela abordagem nexus água-energia-alimento-terra
(WEFL) / Myllenna Rodrigues de Abreu. -- 2023.

xviii, 180 f.: il.

Texto em português, com resumo em inglês

Dissertação (mestrado) -- Pontifícia Universidade
Católica de Goiás, Escola Politécnica, Goiânia, 2023

Inclui referências: f. 139-151.

1. Logística empresarial. 2. Álcool. 3. Agroindústria
canavieira. 4. Sustentabilidade I. Machado, Ricardo
Luiz. II. Pontifícia Universidade Católica de Goiás
- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
e Sistemas - 30/05/2023. III. Título.

CDU: Ed. 2007 -- 658.5(043)

**OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO
ETANOL 1G E 2G PELA ABORDAGEM NEXUS ÁGUA-ENERGIA-
ALIMENTO-TERRA (WEFL)**

MYLLENNA RODRIGUES DE ABREU

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, e aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás em 30 de Maio de 2023.

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS LAJOVIC CARNEIRO**
Data: 07/07/2023 18:10:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Marcos Lajovic Carneiro, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Sistemas

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **RICARDO LUIZ MACHADO**
Data: 06/07/2023 10:20:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ricardo Luiz Machado, Dr.
Orientador
Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC)


Profa. Lira Luz Benites Lázaro, Dra.
Universidade de São Paulo (USP)

Documento assinado digitalmente
 **JOSE ELMO DE MENEZES**
Data: 07/07/2023 11:34:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. José Elmo de Menezes, Dr.
Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC)

Goiânia – Goiás
Maio/2023

Dedicatória

A Deus, autor e consumidor da
minha fé. Aos meus pais,
Edmilson e Arlete Abreu, e ao
meu irmão Leandro Abreu.

“Ora, a fé é a certeza daquilo que esperamos e a prova das coisas que não vemos” (Hebreus 11:1).

Agradecimentos

Agradeço aquele que me trouxe à existência, me permitiu sonhar e tornou possível a realização deste sonho: Deus, meu fiel e bondoso amigo. “Todas as coisas foram feitas por Ele, e sem Ele nada do que foi feito se fez” (João 1:3).

Aos meus pais, Arlete e Edmilson Abreu, por sonharem comigo os meus sonhos, por tantos sacrifícios ao longo desse período, por entenderem e ajudarem nos momentos difíceis, pelo suporte e encorajamento, pelas orações e todo amor sempre servido em generosas porções. Ao meu irmão, Leandro Abreu, meu melhor amigo, por me incentivar e acreditar em meus sonhos.

Ao meu orientador, Prof^o. Dr. Ricardo Luiz Machado, que bondosamente me ajudou desde os primeiros contatos em busca de uma bolsa. Obrigada por me apresentar o mundo científico com tamanha diligência, pelas orientações que em questão técnico/científica são excepcionais, mas que vão muito além, traduzindo-se em conselhos que levarei para a vida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo imprescindível apoio financeiro, que possibilitou a realização deste ensaio.

Ao Programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas (MEPROS) e a Pontifícia Universidade Católica de Goiás, pela oportunidade e suporte para desenvolver esta pesquisa.

A todo colegiado do MEPROS, pela oportunidade de aprender sobre as mais variadas aplicações da Engenharia de Produção em cada disciplina ministrada.

Ao Luiz Francisco, pela disposição em ajudar e pela contribuição com a agregação dos dados que foram analisados nesta pesquisa.

Às minhas caras companheiras com que pude compartilhar essa jornada: Thamine Gomes e Clarice Barreto. Obrigada por tantas boas experiências ao longo desse período.

Aos meus professores da graduação, Prof^a Me. Nubia Silva e Prof^o Dr. Márcio Eckardt, por me incentivarem a trilhar os caminhos da pesquisa científica.

Obrigada a todos que direta ou indiretamente contribuíram com a realização desta pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada ao MEPROS/ PUC Goiás como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas (M.Sc.).

OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO ETANOL 1G E 2G PELA ABORDAGEM NEXUS ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTO-TERRA (WEFL)

Myllenna Rodrigues de Abreu

Maio/2023

Orientador: Prof. Ricardo Luiz Machado, Dr

A cadeia de suprimentos de biocombustíveis (CSB) tem recebido considerável atenção por possibilitar a diversificação da matriz energética e o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). No entanto, pesquisas integrando simultaneamente os recursos hídricos (*water*), energéticos (*energy*), alimentares (*food*) e fundiários (*land*) são recentes. O planejamento integrado desses recursos constitui a abordagem *nexus WEFL* e é considerado um dos mais complexos desafios de sustentabilidade. No Brasil, o setor de etanol de cana-de-açúcar mostra potencial para uma aplicação do *nexus WEFL*. Nesta pesquisa, adotou-se uma abordagem aplicando a Programação Linear Inteira Mista (MILP) e Análise Hierárquica de Processos (AHP) para desenvolver um modelo de cadeia de suprimentos econômico e sustentável. Foram construídos dois cenários: um de minimização de custos, restrito ao etanol de primeira geração e o outro considerando o etanol de segunda geração e os objetivos do *nexus WEFL*. Sem o *nexus WEFL*, foi encontrada uma redução de 32,2% nos custos da cadeia de suprimentos adotada para estudo. Quando inserido o *nexus WEFL*, verificou-se um aumento de 5,06% nos custos. Tal aumento decorreu da produção do etanol de 2ª geração e pelo atendimento das demandas sustentáveis do *nexus WEFL*. A AHP constatou que o melhor cenário foi o ambiental com 63% das preferências finais dos *stakeholders*. A pesquisa evidencia que a aplicação de abordagens da economia circular, como o *nexus WEFL*, não são o fim em si, mas um meio para alcançar as metas de longo prazo da sociedade e do setor produtivo.

Palavras-chave: *Nexus*; Cadeia de Suprimentos; Etanol; MILP; AHP.

Summary of the Dissertation presented to MEPROS/ PUC Goiás as part of the necessary requirements for obtaining the Master's degree in Production and Systems Engineering (M.Sc.).

**MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF THE 1G AND 2G ETHANOL
SUPPLY CHAIN THROUGH THE WATER-ENERGY-FOOD-EARTH
(WEFL) NEXUS APPROACH**

Myllenna Rodrigues de Abreu

May/2023

Advisor: Prof. Ricardo Luiz Machado, D.Sc

The biofuel supply chain (CSB) has received considerable attention for enabling the diversification of the energy matrix and the achievement of the United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs). However, research simultaneously integrating water (water), energy (energy), food (food), and land (land) resources are recent. The integrated planning of these resources constitutes the nexus WEFL approach and is considered one of the most complex sustainability challenges. The sugarcane ethanol sector in Brazil shows potential for applying the WEFL nexus. This research adopted an approach that applied Mixed Integer Linear Programming (MILP) and Hierarchical Process Analysis (AHP) to develop an economical and sustainable supply chain model. Two scenarios were built: one directed to cost minimization, restricted to first-generation ethanol, and the other considering second-generation ethanol and the objectives of the WEFL nexus. Without the WEFL nexus, a 32.2% reduction in the costs of the studied supply chain was found. When the WEFL nexus was inserted, there was a 5.06% cost increase. This increase was due to the production of 2nd generation ethanol production and meeting the WEFL nexus's sustainable demands. The AHP found that the best scenario was environmental, with 63% of the final stakeholder preferences. The research shows that applying circular economy approaches, such as the WEFL nexus, is not an end but a means to achieve the long-term goals of society and the productive sector.

Keywords: Nexus; Supply chain; Ethanol; MILP; AHP.

Lista de figuras

Figura 1 - Brasil x Mundo em fontes renováveis e não renováveis de combustíveis em 2020	iii
Figura 2 - Matriz energética brasileira	iii
Figura 3 - Matriz elétrica brasileira	iii
Figura 4 - Fluxograma dos filtros aplicados	30
Figura 5 - A evolução do etanol anidro e hidratado no Brasil.....	34
Figura 6 - O Programa RenovaBio. Uma visão esquemática e simplificada da Política Nacional de Biocombustíveis do Brasil	38
Figura 7 - Produtos gerados a partir da cana de açúcar	46
Figura 8 - Estágios da cadeia de suprimentos da cana de açúcar	47
Figura 9 - Níveis de decisão na CSB	50
Figura 10 - Interações do Nexus na CSB	51
Figura 11 - Uma rede hierárquica dos temas aplicados no caso do etanol brasileiro	54
Figura 12 - Estrutura metodológica da pesquisa	60
Figura 13 - Delineamento da pesquisa	61
Figura 14 - Cadeia de suprimentos do etanol no Brasil.....	63
Figura 15 - Mapa georreferenciado das indústrias sucroalcooleiras	65
Figura 16 - Microrregião de Anápolis	66
Figura 17 - Árvore hierárquica de Saaty	78
Figura 18 - Fluxograma da árvore de decisão AHP	79
Figura 19 - Número de especialistas por área de atuação.....	86
Figura 20 - Tempo de experiência dos especialistas	87
Figura 21 - Resultado Integral do Cenário Econômico	93
Figura 22 - Capacidade de produção de cana-de-açúcar em hectares/ano	95
Figura 23 - Custos de preparação do solo e plantio.....	96
Figura 24 - Demanda histórica de uso do solo	96
Figura 25 - Resultado: Total de área em hectares a ser utilizada por região.....	96
Figura 26 - Capacidade de Processamento das Usinas.....	98
Figura 27 - Custos de Processamento do Açúcar e Etanol.....	98
Figura 28 - Demanda do Mercado por Açúcar e Etanol.....	98
Figura 29 - Resultado: Quantidade ideal de etanol a ser processado nas usinas.....	99
Figura 30 - Quantidade de produto a ser armazenada	100

Figura 31 - Capacidade de Produção de Cana-de-Açúcar nas Regiões de Cultivo..	101
Figura 32 - Capacidade de Processamento de Cana-de-Açúcar	101
Figura 33 - Demanda de Processamento das Usinas	102
Figura 34 - Custos de transporte entre as áreas de cultivo e as usinas	102
Figura 35 - Quantidade a ser transportada de cada região para cada usina	102
Figura 36 - Capacidade de processamento das Usinas	104
Figura 37 - Demanda nos Centros de Distribuição	104
Figura 38 - Custos de transporte entre as Usinas e os Centros de Distribuição	105
Figura 39 - Custo Anual Total de Transporte (CATT) Usina-CD Minimizado	105
Figura 40 - Resultado Integral do Cenário Ambiental	108
Figura 41 - Total de área em hectares a ser utilizada por região	110
Figura 42 - Quantidade de produto a ser processada na Usina 2.....	110
Figura 43 - Quantidade de produto a ser armazenada	111
Figura 44 – Quantidade ideal a ser transportada das regiões de cultivo para as usinas	112
Figura 45 - Capacidade de processamento das usinas no cenário ambiental	113
Figura 46 - Demanda nos Centros de Distribuição no cenário ambiental	113
Figura 47 - Custos de transporte entre as Usinas e os Centros de Distribuição no cenário ambiental	113
Figura 48 - Quantidade a ser transportada das usinas para os centros de distribuição no cenário ambiental	114
Figura 49 - Quantidade de água a ser utilizada no processamento.....	115
Figura 50 - Quantidade de cana de açúcar processada no período	115
Figura 51 - Quantidade de água a ser utilizada para o processamento com limite...	116
Figura 52 - Quantidade de água a ser utilizada para o processamento sem o limite	116
Figura 53 - Quantidade de água a ser utilizada para o cultivo	116
Figura 54 - População das regiões de Inhumas, Itaberá e Santa Bárbara.....	117
Figura 55 - Quantidade de água disponibilizada por pessoa em cada região	117
Figura 56 - Quantidade ideal de água a ser utilizada pela população.....	118
Figura 57 - Quantidade de etanol a ser produzido para atender a demanda do mercado	118
Figura 58 - Quantidade ideal de terra a ser utilizada em cada região produtora	119

Lista de tabelas

Tabela 1 - Critérios de exclusão	29
Tabela 2 - Resumo das principais publicações relacionadas ao tema desta pesquisa	31
Tabela 3 - Produção mundial de etanol	36
Tabela 4 - Escala fundamental de julgamento de Saaty	82
Tabela 5 - Organização dos dados coletados.....	87
Tabela 6 - Custo Anual Total antes da otimização	94

Lista de quadros

Quadro 1 - Notação dos conjuntos e índices do modelo	67
Quadro 2 - Notação dos conjuntos e índices do modelo	71
Quadro 3 - Critérios de decisão	80
Quadro 4 - Razão de Inconsistência (RI).....	84
Quadro 5 - Matriz de decisão dos critérios primários com a média geométrica dos 5 decisores	122
Quadro 6 - Matriz de decisão dos critérios primários normalizada.....	123
Quadro 7 - Matriz de decisão dos subcritérios ambientais com a média geométrica dos 5 decisores.....	124
Quadro 8 - Matriz de decisão dos subcritérios ambientais normalizada	124
Quadro 9 - Matriz de decisão dos subcritérios políticos com a média geométrica dos 5 decisores	125
Quadro 10 - Matriz de decisão dos subcritérios políticos normalizada.....	125
Quadro 11 - Matriz de decisão dos subcritérios políticos com a média geométrica dos 5 decisores	126
Quadro 12 - Matriz de decisão dos subcritérios políticos normalizada.....	126
Quadro 13 - Matriz de avaliação das alternativas em relação aos critérios normalizada	127
Quadro 14 - Matriz de avaliação das alternativas em relação aos subcritérios normalizada	128
Quadro 15 - Peso dos critérios primários, e das alternativas em relação aos critérios	130
Quadro 16 - Valoração global das alternativas em relação aos critérios primários .	130
Quadro 17 - Valoração global das alternativas em relação aos subcritérios ambientais	130
Quadro 18 - Valoração global das alternativas em relação aos subcritérios políticos	131
Quadro 19 - Valoração global das alternativas em relação aos subcritérios econômicos.....	131
Quadro 20 - Valoração global das alternativas finais.....	131

Lista de Gráficos

Gráfico 1- Custos anuais totais antes e depois da otimização no cenário econômico	94
Gráfico 2 - Comparação dos custos de cultivo antes e depois da otimização no cenário econômico.....	97
Gráfico 3 - Comparação dos custos de processamento antes e depois da otimização no cenário econômico.....	99
Gráfico 4 – Comparação do Custo Anual Total de Transporte – Das Usinas para os CD’s.....	103
Gráfico 5 – Comparação do. Custo Anual Total de Transporte – Das Usinas para os CD’s.....	106
Gráfico 6 - Cenário Base X Ambiental	109
Gráfico 7 - Custo Anual Total de Processamento: Cenário Base X Ambiental	111
Gráfico 8 - Custo Anual Total de Transporte Usina-CD: Cenário Base X Ambiental	114
Gráfico 9 - Comparação de custos entre os cenários Econômico e Ambiental	120
Gráfico 10 - Vetor de prioridades finais das alternativas	132
Gráfico 11 - Análise de desempenho das alternativas	133

Lista de abreviaturas e siglas

ANA	Agência Nacional de Águas
ANP	Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
COPRAS	<i>Complex Proportional Assessment</i>
BECCS	<i>Bioenergy as Carbon Capture and Storage</i>
CSB	Cadeia de Suprimentos de Biocombustíveis
CVB	Cadeia de Valor de Biomassas
CS	Cadeia de Suprimentos
CO ²	Carbono
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimentos
CNA	Confederação Nacional de Agricultura e Pecuária no Brasil
CNPE	Conselho Nacional de Políticas Energéticas
CND's	Contribuições Nacionalmente Determinadas
CBios	Créditos de Descarbonização
CAT	Custo Anual Total
CTA	Custo Total de Armazenamento
CTC	Custo Total de Cultivo
CTP	Custo Total de Processamento
CTT	Custo Total de Transporte
DM's	<i>Decision Makers</i>
EPP	Empresa de Pesquisa Energética
1G2G	Etanol de 1 ^a e 2 ^a Geração
E1G	Etanol de 1 ^a Geração
E2G	Etanol de 2 ^a Geração
FFV's	<i>Flex Fuel Vehicles</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWF	<i>Grey Water Footprint</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
MEE	Ministério Minas e Energia

MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
MCDA	Multi Criteria Decision Analysis
ODS's	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organizações das Nações Unidas
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
RenovaBio	Política Nacional de Biocombustíveis
PIB	Produto Interno Bruto
PRO-ÁLCOOL	Programa Nacional de Álcool
PM	Programação Matemática
RFA	<i>Renewable Fuels Association</i>
SPG	Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SD	<i>System Dynamics</i>
PRISMA	<i>Systematic Review and Meta-Analysis</i>
ÚNICA	União da Indústria de Cana de Açúcar
WEF	<i>Water-Energy-Food</i>
WEFL	<i>Water-Energy-Food-Land</i>

Sumário

1 Introdução	iii
1.1 <i>Motivação</i>	<i>iii</i>
1.2 <i>Problemática de pesquisa.....</i>	<i>iii</i>
1.3 <i>Hipóteses de pesquisa.....</i>	<i>iii</i>
1.3.1 Hipótese geral	iii
1.3.2 Hipóteses específicas	iii
1.4 <i>Objetivos</i>	<i>iii</i>
1.4.1 Objetivo geral	iii
1.4.2 Objetivos específicos	iii
1.5 <i>Justificativa.....</i>	<i>iii</i>
1.6 <i>Método de pesquisa</i>	<i>27</i>
1.7 <i>Estrutura da pesquisa.....</i>	<i>27</i>
2 Revisão de literatura.....	28
2.1 <i>Coleta do material.....</i>	<i>28</i>
2.2 <i>A indústria sucroenergética no Brasil.....</i>	<i>33</i>
2.2.1 Pro-ácool.....	33
2.2.2 Lei do petróleo e outros avanços	35
2.2.3 O programa RenovaBio	37
2.3 <i>A abordagem nexus water-energy-food-land na cadeia de suprimentos de biocombustíveis</i>	<i>39</i>
2.3.1 Problemas conforme o nível de decisão	39
2.3.2 Métodos de otimização considerando as variáveis do nexus.....	41
2.3.3 Métodos de coleta de dados para implementar a abordagem nexus	43
2.3.4 Contribuições da abordagem nexus para a sustentabilidade em cadeias de suprimentos de biocombustíveis (CSB)	44

2.4 A cadeia de suprimentos sucroenergética brasileira e a abordagem nexus (WEFL).....	46
2.5 O potencial do etanol de 2ª geração no Brasil.....	52
2.6 Política e governança na indústria sucroenergética.....	53
2.7 Métodos de otimização	56
2.7.1 Programação Linear Inteira Mista (MILP).....	56
2.7.2 Análise de Decisão Multicritérios (MCDA).....	58
3 Metodologia de Pesquisa	60
3.1 Delineamento da pesquisa.....	61
3.2 Abordagem de pesquisa.....	62
3.3 Objeto de estudo e delimitação da pesquisa.....	63
3.4 Método de Pesquisa.....	66
3.4.1 Modelagem Matemática com Programação Linear Inteira Mista	66
3.4.2 Análise Hierárquica de Processos (AHP) para a Análise de Decisão Multicritérios (MCDA)	76
3.5 Dados.....	87
3.6 Instrumento de coleta de dados	89
3.7 Instrumento de análise de dados	89
4 Resultados da Programação Linear Inteira Mista (MILP)	91
4.1 Análise do cenário econômico de otimização	91
4.1.1 Resultado integral do cenário econômico e comparação com o cenário não otimizado	91
4.1.2 Quantidade de terra a ser utilizada em cada região	95
4.1.3 Quantidade de produto a ser gerado em cada usina.....	97
4.1.4 Quantidade de produto a ser armazenado em cada armazém.....	100
4.1.5 Quantidade de cana de açúcar a ser transportada das áreas de cultivo para as usinas.....	100

4.1.6 Quantidade produto a ser transportada da usina para o centro de distribuição	103
<i>4.2 Análise do cenário de otimização ambiental.....</i>	<i>106</i>
4.2.1 Resultado integral do cenário ambiental e comparação com o cenário não otimizado	107
4.2.2 Quantidade de terra a ser utilizada em cada região	109
4.2.3 Quantidade de produto a ser gerado em cada usina.....	110
4.2.4 Quantidade de produto a ser armazenado em cada armazém	111
4.2.5 Quantidade de cana de açúcar a ser transportada das áreas de cultivo para as usinas.....	112
4.2.6 Quantidade de produto a ser transportada da usina para o centro de distribuição	112
4.2.7 Uso da água.....	114
4.2.8 Uso da energia	118
4.2.9 Uso do alimento	119
4.2.10 Uso do solo	119
<i>4.3 Comparação dos cenários e discussão dos resultados.....</i>	<i>120</i>
5 Resultados da Análise Hierárquica de Processos (AHP)	122
5.1 Cálculo de prioridade dos critérios.....	122
5.2 Cálculo de prioridade das alternativas	127
5.3 Cálculo de prioridade das alternativas globais	129
5.4 Análise de sensibilidade	132
5.5 Discussão sobre a opinião dos stakeholders	134
6 Conclusões	135
Referências	139
Apêndices.....	139

1 Introdução

1.1 Motivação

O acelerado crescimento populacional e o desenvolvimento socioeconômico suscitou um aumento da demanda global por recursos vitais, como água (20 a 30%, até 2040), energia (30%, até 2040), alimento (60%, até 2050) e terra (50%, até 2050), e, proporcionalmente, insegurança quanto à disponibilidade desses recursos (YOU *et al.*, 2021; ZHAI *et al.*, 2021; FAO, 2021; AFKHAMI & ZARRINPOOR, 2022).

Especialmente no setor energético, nota-se o aumento considerável de pesquisas e da atenção pública sobre o desenvolvimento de fontes de energia renováveis, como os biocombustíveis, dado o seu potencial para aliviar a dependência por combustíveis fósseis, que hoje abastecem 80% das nações (SOUSA *et al.*, 2017; LEÓN-OLIVARES *et al.*, 2020; RAHEMI *et al.*, 2020; MANOJKUMAR *et al.*, 2020; VANDENBERGHE *et al.*, 2022). Além disso, os biocombustíveis tem papel preponderante para o alcance das metas de mitigação de mudanças climáticas, propostas no Acordo de Paris, celebrado em 2015 (MUNOZ *et al.*, 2019; ROSSETTO *et al.*, 2022).

O etanol de cana de açúcar é considerado a solução brasileira para os problemas de dependência por combustíveis fósseis e mudanças climáticas (LÁZARO; MELLO-THÉRY; LAHSEN, 2017). No entanto, apesar dos inúmeros benefícios dos biocombustíveis em relação aos fósseis convencionais, as cadeias de produção dos biocombustíveis de primeira geração, podem afetar os sistemas alimentares, fundiários, hídricos e energéticos (NAMANY *et al.*, 2019; MAHJOUB & SAHEBI, 2020; ABDALI *et al.*, 2021).

No Brasil, as culturas de cana de açúcar para biocombustíveis líquidos, como o etanol, podem impactar o solo e a água. Além disso, a demanda por irrigação da produção pode reduzir a disponibilidade de água para irrigar as culturas alimentares, atender ao consumo humano e a demanda industrial e a geração de energia (BELLEZONI *et al.*, 2018; ROSSETTO *et al.*, 2022).

Dada a vitalidade dos recursos supracitados para o abastecimento global, desnuda-se a pujante necessidade de uma gestão integrativa com conexões robustas entre as dimensões água, energia, alimento e terra. Tal demanda tem sido considerada um dos desafios de sustentabilidade mais complexos da atualidade

(MERCURE *et al.*, 2019; SIMPSON *et al.*, 2019). Nesse sentido, a abordagem *nexus Water-Energy-Food* (WEF), que surgiu em 2011, propondo uma interação sinérgica e maior governança, mostra-se uma solução apropriada (BAZILIAN *et al.*, 2011; HOFF, 2011; OZTURK, 2015)

O pensamento *nexus* surgiu em 2008, no Fórum Econômico Mundial de Davos. O termo posteriormente foi consolidado pela Conferência Nexus de Bonn (2011). A partir de então, o *nexus* é o termo que explica a intrínseca relação entre o abastecimento de alimentos, energia e água (WEF), e sua determinante participação para alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (LÁZARO *et al.*, 2021).

Lázaro *et. al* (2020) consideram que setor de bioetanol pode servir como uma demonstração próspera da integração *water-energy-food-land* (WEFL) no Brasil, e sua influência nos processos de otimização do consumo e alocação desses recursos. Nessa abordagem, a dimensão fundiária foi acrescentada à compreensão formal (WEF), pois, apesar da baixa incidência de pesquisas que visam implementar o *nexus*, esse é um fator complexo, e que, com o advento da produção de biocombustíveis em grandes áreas, teve sua importância aumentada na conexão terra-energia (BRAIMOH & VLEK, 2008; RULLI *et al.*, 2016; LAL *et al.*, 2017; KUMAR *et al.*, 2021).

Adicionalmente, no modelo de análise qualitativa proposto na revisão sistemática de Lázaro *et al.* (2021), os autores mencionam que apesar do corpo literário ser robusto em cada componente, as pesquisas sobre o *nexus WEF* como um todo são de desenvolvimento recente. Nesse aspecto, emerge um dos problemas que merecem maior destaque sobre o *nexus*: o baixo teor de soluções práticas e evidências empíricas que viabilizem programas políticos eficazes e, principalmente, implementáveis (MÄRKER *et. al*, 2018; GEVELT, 2020).

Portanto, para melhorar a produtividade das culturas e garantir os benefícios sustentáveis, são necessárias implementações de políticas adequadas, que devem emergir mediante a disseminação do conhecimento científico no que tange ao gerenciamento sustentável das cadeias de suprimentos pela abordagem *nexus* (SOUZA *et al.* 2017; LÁZARO *et al.*, 2021; ROSSETTO *et al.*, 2022).

1.2 Problemática de pesquisa

De acordo com Hoff (2011) o pensamento *nexus* incentiva o desenvolvimento tecnológico para transformar resíduos em recursos e gerenciá-los para diversas utilizações. A abordagem *nexus WEFL*, portanto, é indissociável à produção de biocombustíveis, pois é necessário compreender suas articulações para formular políticas efetivas que possam contribuir para o alcance dos objetivos econômicos, ambientais e sociais de longo prazo (LÓPEZ-DÍAZ *et al.*, 2017; TAPIA *et al.*, 2019; LÁZARO *et al.*, 2021).

Isso é particularmente importante no Brasil, já que o país é o segundo maior produtor mundial de etanol, com a produção de 26,4 bilhões de litros na safra 2021/22 e o maior exportador do produto, com cerca de 1,7 bilhões de litros exportados na mesma safra, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2022). Nesse sentido, Mercure *et al.* (2019) acreditam que as interações insuficientemente compreendidas dentro do *nexus WEFL* na produção do etanol brasileiro contribuem para o desmatamento em larga escala, mudanças no uso da terra, escassez de água e energia e diminuição da resiliência às mudanças climáticas.

O pensamento *nexus* vai ao encontro desse problema, pois sugere a utilização máxima das matérias primas bioenergéticas. Isso implica, principalmente, no uso de biomassa residual dos processos agrícolas e industriais para geração de biocombustíveis de 2ª geração, a fim de aumentar a eficiência do uso do solo e água, e mitigar o conflito energia *versus* alimentos (RASTOGI & SHRIVASTAVA, 2017; GARCIA *et al.*, 2019; HOLMATOV *et al.*, 2021; ABBAS *et al.*, 2021).

No Brasil, os subprodutos com potencial para produção de etanol de 2ª geração são a palhça (biomassa obtida no processo agrícola de produção da cana de açúcar) e o bagaço obtido no processo industrial (KHATIWADA *et al.*, 2016; VANDENBERGHE *et al.*, 2022). No entanto, mesmo com os intensos esforços para viabilizar a produção em escala comercial, a tecnologia nessa área ainda não se consolidou e as pesquisas têm buscado identificar o desenho ideal do processo integrado de fabricação do etanol de segunda geração (1G2G) no Brasil (RAIZEN, 2014; GRANBIO, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2018; RODRÍGUEZ CARPIO *et al.*, 2021). Até o momento em que este texto foi escrito, apenas uma unidade brasileira havia atingido maturidade tecnológica para desenvolver o etanol 1G2G de forma integrada em larga escala (RAIZEN, 2014; UNICA, 2021).

Rodríguez Carpio *et al.* (2021) asseguram que as biorrefinarias integradas são capazes de aumentar a produção de etanol em até 24% em comparação com as de

primeira geração. No entanto, o aumento da produção de etanol em 13% tornaria o processo economicamente inviável, a não ser que os créditos de descarbonização (CBios) – incentivo do governo federal para a produção sustentável, que podem ser disponibilizados na bolsa de valores pelos produtores de etanol, à medida em que atestam a sustentabilidade do processo produtivo – fossem comercializados a US\$ 15,77 (de acordo com o cálculo realizado em fevereiro de 2021). Esse valor equivalia a R\$ 83,10 naquele período, valor 159,68% maior do que era comercializado na época, em média R\$ 32,00.

Tendo em vista que quanto maior a certificação de sustentabilidade do processo, mais CBios o produtor poderá disponibilizar na bolsa de valores, o aumento no valor do incentivo pode emergir mediante o aumento da sustentabilidade na produção com a aplicação da abordagem *nexus WEFL*.

Ao se analisar os trabalhos empíricos que adotaram como objeto de estudo a cadeia de suprimentos do etanol no Brasil verificou-se que foram desenvolvidos projetos de minimização dos custos (JONKER *et al.*, 2016; BRANCO *et al.*, 2019), maximização dos lucros (KOSTIN *et al.*, 2018; MACOWSKI *et al.*, 2020), localização ideal (JONKER *et al.*, 2016; BRANCO *et al.*, 2019), redução dos gases de efeito estufa (JONKER *et al.*, 2016; MACOWSKI *et al.*, 2020), planejamento integrado de plantio e colheita (POLTRONIERE *et al.*, 2021) e utilização dos resíduos agrícolas e industriais para a produção de biocombustíveis de 2ª geração (KHATIWADA *et al.*, 2016; DE LIMA *et al.*, 2017; BRESSANIN *et al.*, 2021; RODRÍGUEZ CARPIO *et al.*, 2021).

No entanto, não houveram avanços significativos em aplicações empíricas da abordagem *nexus* nessa cadeia, além de Bellezoni *et al.* (2018), que estudou os impactos da produção do etanol no *nexus WEF* no cerrado brasileiro e a interdependência entre os setores na economia.

Nesse contexto, esta pesquisa pretende contribuir para o *corpus* de análise sobre os biocombustíveis, sanando uma lacuna na literatura sobre aplicações empíricas do *nexus WEFL* na cadeia de suprimentos (SC) do etanol de cana de açúcar brasileiro, considerando as dimensões agrícola, industrial e mercadológica (MUNOZ *et al.*, 2019; MERCURE *et al.*, 2019; LÁZARO *et al.*, 2020; LÁZARO *et al.*, 2021). Frente a esse contexto, o presente trabalho pretende responder a seguinte questão de pesquisa: Como otimizar a cadeia de suprimentos do etanol 1G e 2G de modo a ser mais econômica, atendendo demandas do *nexus WEFL*?

Como questões específicas emergem:

- a) Como otimizar a cadeia de suprimentos do etanol de primeira geração (1G), com o objetivo de minimizar os seus custos totais?
- b) Como projetar um cenário de minimização dos custos com a produção do integrada do etanol de primeira e segunda gerações (1G2G) considerando as variáveis consumo de água, geração de energia, produção de alimentos e ocupação da terra (*nexus WEFL*)?
- c) Dentre os cenários de otimização criados, qual o cenário de produção ideal, do ponto de vista dos principais *stakeholders* envolvidos na cadeia de produção do etanol?

Nas análises realizadas nesta pesquisa, foram considerados dois cenários: (i) o econômico e (ii) o ambiental. A comparação de cenários é utilizada por Hasan & Avami (2018); Macowski *et al.* (2020); Alherbawi *et al.* (2021) e You *et. al.* (2021), para evidenciar a relevância de abordagens sustentáveis, como o *nexus*, quando comparadas a cenários que possuem o foco voltado apenas à eficiência econômica.

O cenário (i) objetiva apenas minimizar os custos na cadeia de suprimentos do etanol de primeira geração (E1G). O cenário (ii) visa minimizar os custos, atendendo às demandas hídricas, alimentícias, energéticas e fundiárias na cadeia de suprimentos integrada de etanol de primeira e segunda gerações (1G2G).

As análises foram realizadas, através da construção de modelos matemáticos, desenvolvidos com base em dados coletados sobre a indústria sucroenergética em uma empresa localizada no estado de Goiás, na microrregião geográfica de Anápolis. Para a consecução dos objetivos, foi utilizada uma abordagem híbrida de programação linear inteira mista (MILP) e análise de decisão multicritérios (MCDA), considerando as variáveis do *nexus* água-energia-alimento-terra.

1.3 Hipóteses de pesquisa

1.3.1 Hipótese geral

Por hipótese, é possível alcançar um projeto mais econômico para a cadeia de suprimentos do etanol de cana de açúcar de primeira e segunda gerações (1G e 2G) considerando os objetivos sustentáveis do *nexus WEFL*. Tais objetivos são: restrições no consumo da água no cultivo e industrialização e a garantia das

demandas sociais (*water*); restrições de área para o plantio da cana (*land*); e restrições que garantam o atendimento das demandas do mercado por açúcar (*food*) e etanol (*energy*). Nesse sentido, a capacidade do *nexus* pode ser ilustrada comparando-a com um cenário não-*nexus*. Como hipótese geral, através do *nexus* é possível alcançar os objetivos econômicos e sociais, a partir da sustentabilidade.

1.3.2 Hipóteses específicas

- a) O cenário econômico de produção permite uma minimização de custos maior que a do cenário ambiental;
- b) Pressupõe-se que a cadeia de suprimentos do etanol de 1ª e 2ª gerações da cana-de-açúcar, considerando os elementos do *nexus* como abordagem, tende a ser o cenário de otimização mais oneroso, no entanto mais sustentável;
- c) Acredita-se que as *stakeholders* das diferentes áreas do Estado se dividam entre os cenários econômico o ambiental, já que os especialistas são de áreas de atuação distintas, como pesquisa energética, agricultura e economia.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos geral

Examinar um modelo de otimização cadeia de suprimentos para o etanol de primeira e segunda gerações (1G e 2G), considerando as demandas do *nexus* WEFL, envolvendo consumo de água, geração de energia, produção de alimentos e uso da terra.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Examinar um modelo de otimização cadeia de suprimentos do etanol 1G com o objetivo de minimizar os seus custos totais;
- b) Analisar um cenário de minimização dos custos com a produção integrada 1G2G considerando as variáveis da estrutura *nexus* WEFL;
- c) Analisar comparativamente o cenário voltado exclusivamente para a minimização de custos, em relação a um cenário com múltiplos objetivos, considerando as variáveis hídricas, alimentícias, energéticas e fundiárias;

- d) Analisar a resposta e propensão à aplicabilidade dos cenários criados nas análises de otimização, por parte dos principais *stakeholders* da cadeia de suprimentos do etanol.

1.5 Justificativa

Munoz *et al.* (2019) afirmam que o Brasil tende a permanecer como o principal fornecedor de biocombustíveis para os mercados globais, impulsionado pelos compromissos internacionais de mitigação do carbono, por seus recursos hídricos e terrestres abundantes, e por seu potencial em geração de energias renováveis, conforme mostra a Figura 1.

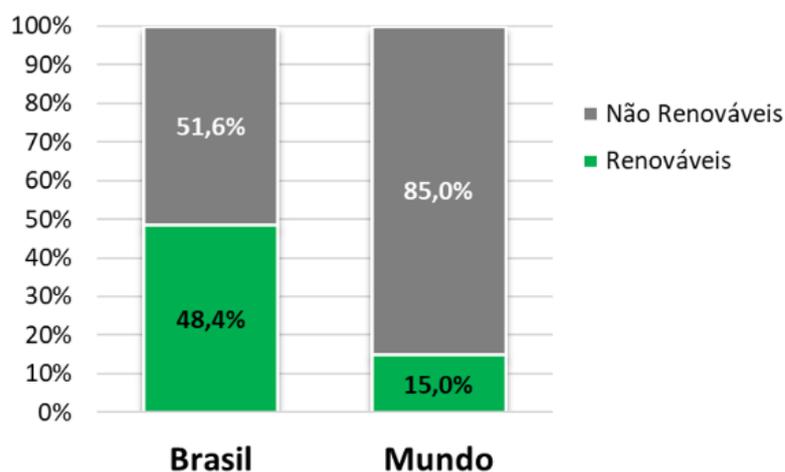


Figura 1 - Brasil x Mundo em fontes renováveis e não renováveis de combustíveis em 2020

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021)

A análise da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) na Figura 1 mostra a importância do Brasil para o abastecimento global de biocombustíveis, já que o país apresenta desempenho superior em energias renováveis. Nesta perspectiva, Munoz *et al.* (2019) afirma que as pesquisas no Brasil devem considerar os impactos indiretos no uso dos recursos emanados em toda a cadeia de suprimentos.

Dados do Ministério de Minas e Energia do Brasil (MME, 2021) mostram que o país deve exportar 2,3 bilhões de litros de etanol em 2031, e chegar a 44 bilhões de litros demandados para a área de transporte nacional, com aumento de 10% no setor, se comparado a 2021.

No entanto, apesar das preocupações com impacto do aumento da demanda na sustentabilidade, se houver uma gestão integrada considerando a produção sustentável, como no exemplo do *nexus*, os biocombustíveis podem desempenhar um papel preponderante no alcance dos ODSs das Nações Unidas (ONU) e na implementação do Acordo de Paris (2015) (VANDENBERGHE et al., 2022).

Uma aplicação bem sucedida do *nexus* pode contribuir para a segurança alimentar (ODS 2), energia sustentável para todos (ODS 7), redução das mudanças climáticas (ODS 13), melhor uso da terra (ODS 15) e gestão sustentável da água (ODS 6) (IRENA, AIE, FAO, 2017).

O Brasil possui metas para o alcance dos ODSs, as Contribuições Nacionalmente Determinadas (CNDs), que objetivam alcançar a redução na emissão de carbono em 37% até 2025 e 43% até 2030, tomando por base o ano 2005 (CNDs, 2021). As medidas versam sobre aumentar a produção de biocombustíveis e diversificar a matriz energética nacional. A Figura 2 mostra o cenário atual da matriz energética brasileira, em que cerca de 55,3% dos combustíveis gerados são fósseis (Petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral, nuclear e outros não renováveis), e 44,7% são renováveis (lenha, carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras renováveis).

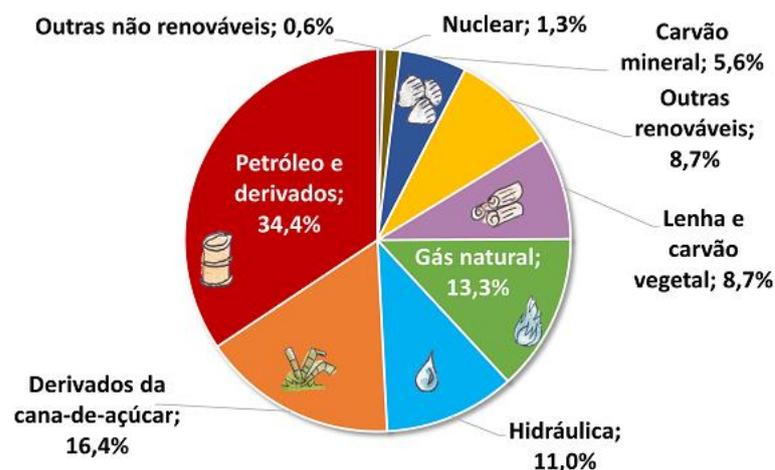


Figura 2 - Matriz energética brasileira

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021)

Além da matriz energética, a matriz elétrica também é crucial para o alcance das metas de desenvolvimento sustentável, visto que a matriz elétrica brasileira é

ainda mais renovável do que a energética, com 78,1 % da oferta interna derivada de fontes renováveis, como mostra a Figura 3.

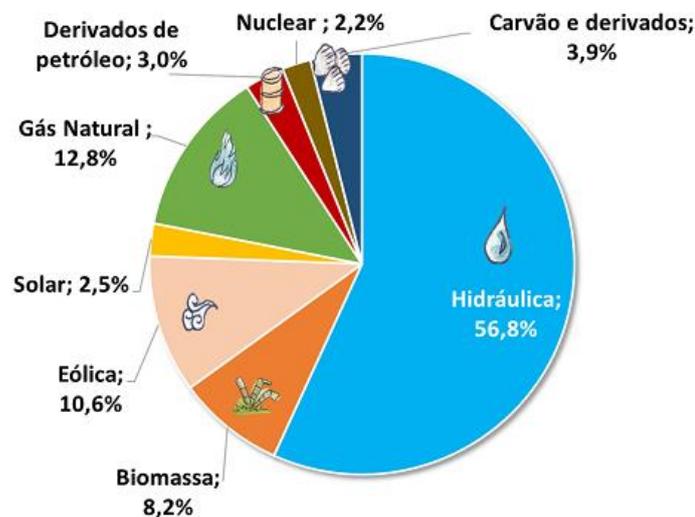


Figura 3 - Matriz elétrica brasileira

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021)

Na matriz elétrica, a energia produzida a partir de biomassa, como o bagaço da cana, representa cerca de 8,2% do total produzido.

Considerando o potencial do país para aumentar sua base energética sustentável, é mister que pesquisas em torno da produção de biocombustíveis como o etanol sejam conduzidas, levando em conta os objetivos dos *stakeholders* que compõem a governança energética, como o Estado, as associações representativas do setor e as empresas (GARCIA & YOU, 2016; MERCURE *et al.*, 2019; GUO *et al.*, 2020; LÁZARO & THOMAZ, 2021; SANT'ANNA *et al.*, 2022).

Alguns desses objetivos são: atingir as metas de redução na emissão de carbono (KARP *et al.*, 2022), o aumento da disponibilização em CBios na bolsa de valores (GRASSI & PEREIRA, 2019), a minimização de custos, maximização de lucros e a otimização da eficiência técnica das cadeias de produção do etanol (KHATIWADA *et al.*, 2016; JONKER *et al.*, 2016; KOSTIN *et al.*, 2018; MACOWSKI *et al.*, 2020; POLTRONIERE *et al.*, 2021).

No entanto, para alcançar tais objetivos é necessário um tipo diferente de modelagem pela abordagem *nexus*, na qual pressupostos mais realistas são adotados, onde é imprescindível justificar quantitativamente os benefícios do sistema centrado no *nexus*, além de realizar comparações com os sistemas não *nexus*, através da

geração de cenários (MERCURE *et al.*, 2019; YOU *et al.*, 2021; LÁZARO *et al.*, 2021).

1.6 Método de pesquisa

Essa pesquisa foi realizada adotando uma abordagem híbrida, baseada no uso da Programação Linear Inteira Mista (MILP) e Análise de Decisão Multicritérios (MCDA), pela técnica Processo Analítico Hierárquico (AHP) (MEYER *et al.*, 2014; YING *et al.*, 2020; SAHABUDDIN & KHAN, 2021). Apesar de serem recorrentemente utilizadas para a otimização da cadeia de suprimentos de biocombustíveis e gestão energética individualmente, essas abordagens foram pouco mencionadas na literatura em aplicações conjuntas (MCKENNA *et al.*, 2018).

Na primeira fase da pesquisa foram realizadas: a escolha do método, a definição das variáveis a serem consideradas no modelo, a definição das funções objetivo da programação matemática, a seleção de variáveis de decisão, a definição de restrições e parâmetros dos dois cenários propostos, a escolha das bases de dados, a coleta dos dados preliminares, a formulação dos modelos MILP para projetar a cadeia de suprimentos e a avaliação dos resultados da otimização nos dois cenários (econômico e ambiental) considerados.

Na segunda fase da pesquisa foram realizadas as seguintes atividades: definição dos critérios e ponderação dos cenários construídos na primeira fase da pesquisa, ponderação das alternativas dentro de cada critério, comparação das alternativas e resultados.

1.7 Estrutura da pesquisa

O trabalho está estruturado em seis capítulos. No presente capítulo apresenta-se a motivação, problemática, hipóteses, objetivos, justificativa, metodologia e estrutura da pesquisa. No capítulo 2 é apresentada a revisão sistemática da literatura e a meta-síntese utilizadas para a sustentação teórica. No capítulo 3 é apresentada a metodologia de pesquisa. Nos capítulos 4 e 5 são apresentadas e discutidas a análise dos resultados. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais da pesquisa.

2 Revisão de literatura

Neste capítulo são apresentados os critérios de busca do material, a sustentação teórica e uma meta-síntese sobre a pesquisa. Os temas pesquisados foram a indústria sucroenergética no Brasil, aplicação da abordagem *nexus WEFL* nas cadeias de suprimentos de biocombustíveis global e brasileira, desenvolvimento do etanol de 2ª geração, a relação da indústria sucroenergética com os órgãos regulamentadores e métodos a serem utilizados para a implementação da abordagem *nexus WEFL*.

2.1 Coleta do material

Para reunir o material foram utilizadas duas bases de dados: *Web of Science* e *Scopus*. Essas bases foram escolhidas por serem as mais populares bases de periódicos científicos, dispor de ferramentas inteligentes para rastrear, analisar e visualizar pesquisas básicas e avançadas e possuir interface com os principais *softwares* de gestão de referências (ERMEL, p. 152, 2021).

Foi adotado como critério para as buscas primárias, considerar apenas artigos publicados em revistas internacionais revisadas por pares, com trabalhos analisados publicados em periódicos de alto impacto, em língua inglesa.

Para a meta-síntese foram analisados 207 artigos, e após uma criteriosa seleção, como mostra a Tabela 1, foram incluídos os 40 artigos que abordavam diretamente os temas “*nexus*”, “*biofuels*” e “*supply chain*” na síntese interpretativa.

Tabela 1 - Critérios de exclusão

Critérios de Exclusão	Nº de exclusões	(%)
Estudos duplicados	92	55%
Menciona otimização da SC ou <i>nexus</i> , mas não menciona biocombustíveis	18	11%
Periódicos que não atendem ao critério de qualidade (fator de impacto)	14	8%
Revisão da literatura fora de contexto, não menciona métodos de otimização para a cadeia de suprimentos de biocombustível ou <i>nexus</i>	9	5%
Mencione a otimização da cadeia de suprimentos ou biocombustíveis, mas não mencione o <i>nexus</i>	11	7%
Falta de métodos ou técnicas que abordem a otimização da cadeia de suprimentos de biocombustíveis através do <i>nexus</i>	8	5%
Publicados em congressos	4	2%
Fora do contexto	7	4%
Livros	2	1%
Aplicação muito específica	2	1%
Total	167	100%

A exclusão de artigos duplicados representa 55% da amostra inicial dos artigos. Posteriormente, 75 artigos foram excluídos considerando os outros nove critérios de exclusão, representando os 45% restantes dos estudos desconsiderados na análise.

Além dessa análise, a Figura 4 mostra o fluxograma dos filtros aplicados na seleção dos trabalhos, desde a seleção das palavras chaves até a leitura analítica dos textos.

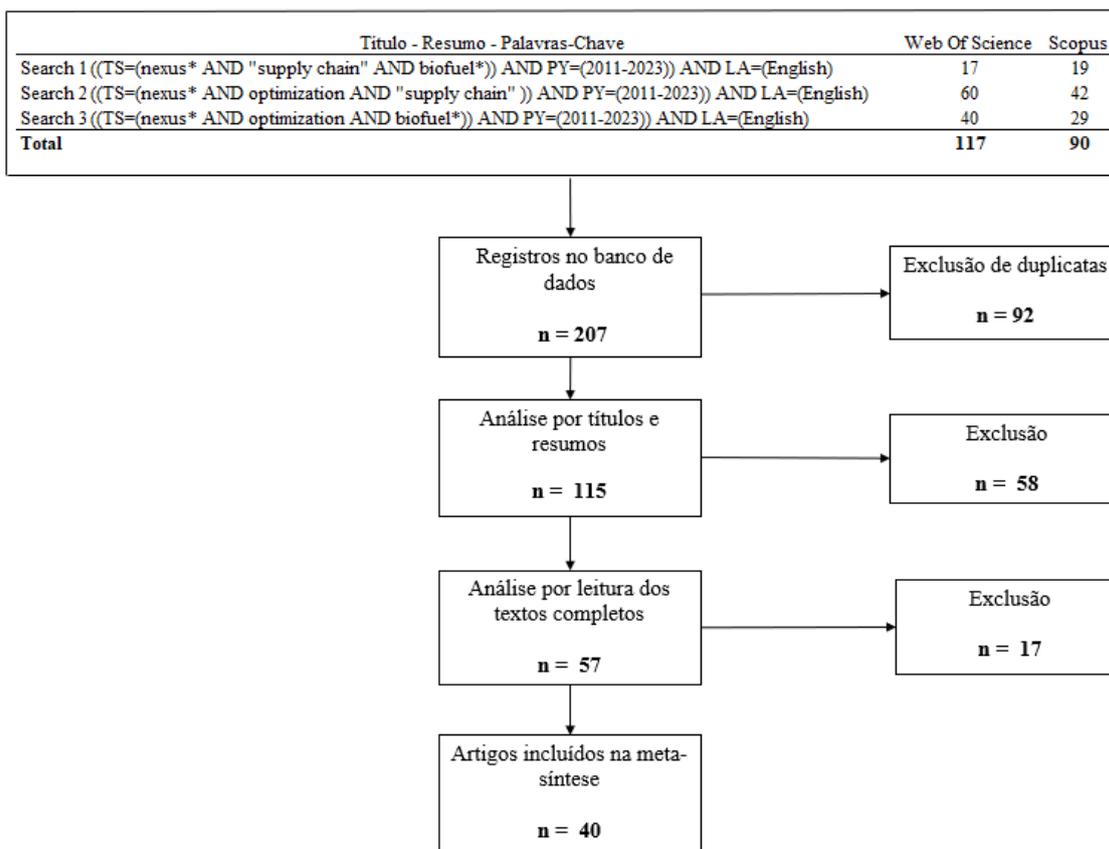


Figura 4 - Fluxograma dos filtros aplicados

Fonte: Autora

Na Figura 4, observa-se a sequência de busca e os critérios de exclusão. Após a exclusão dos estudos duplicados, os títulos e resumos dos 115 artigos restantes foram lidos. A pesquisa considerou apenas artigos publicados em periódicos revisados por pares. Portanto, 58 artigos foram retirados da análise por não corresponderem ao contexto da pesquisa ou por terem sido publicados em congressos e livros.

A partir dessa decisão, 57 artigos permaneceram na análise. O procedimento de seleção aplicado a seguir removeu artigos que não mencionavam a gestão da cadeia produtiva de biocombustíveis, o *nexus* ou aplicações particulares, gerando uma amostra de 40 artigos elegíveis para análise posterior.

A Tabela 2 apresenta os artigos incluídos na análise e a lacuna que esta pesquisa está preenchendo.

Tabela 2 - Resumo das principais publicações relacionadas ao tema desta pesquisa (continua)

Autores (ano)	Fator de impacto	Principais temas abordados na pesquisa										Componentes do Nexus			
		Cadeia de Suprimentos	MILP	MCDA	Créditos de Descarbo-nização	Cana de açúcar	Brasil	Biocombustíveis	1ª Geração	2ª Geração	Water	Energy	Food	Land	
Abbas <i>et al.</i> (2021)	7,14										✓	✓			
You <i>et al.</i> (2021)	7,14	✓	✓					✓		✓	✓	✓		✓	
Mohammadi <i>et al.</i> (2021)	4,15	✓	✓					✓		✓	✓				
Guo <i>et al.</i> (2020)	7,14	✓	✓			✓		✓		✓	✓				
Tapia <i>et al.</i> (2019)	4,4	✓	✓					✓		✓	✓	✓			
Hasan & Avami (2018)	15	✓	✓					✓	✓	✓	✓				
López-Díaz <i>et al.</i> (2017)	3,6	✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓			
Zhong <i>et al.</i> (2018)	9,7	✓	✓					✓	✓	✓	✓	✓			
Garcia & You (2015)	2,8	✓	✓					✓	✓	✓	✓				
Meneses-Jácome <i>et al.</i> (2015)	1,92	✓								✓	✓	✓			
Doliente & Samsatli (2021)	9,2	✓	✓					✓	✓	✓	✓	✓			
Abdali <i>et al.</i> (2021)	3,84	✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	
Mahjoub & Sahebi (2020)	4,98	✓	✓					✓	✓	✓	✓	✓			
Saif <i>et al.</i> (2020)	2	✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Rubinsin <i>et al.</i> (2020)	4,4	✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Fajardy <i>et al.</i> (2018)	38,5	✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Garcia & You (2017)	5,16	✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Saif & Almansoori (2016)	9,7	✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Garcia & You (2016)	3,82	✓						✓	✓	✓	✓	✓			
Ghani <i>et al.</i> (2019)	4,48	✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓		

Observa-se na Tabela 2 que a lacuna que esta pesquisa busca preencher na literatura, é a aplicação da abordagem *nexus* WEFL na cadeia de suprimentos do etanol de cana de açúcar brasileiro de 1ª e 2ª geração, pela abordagem metodológica híbrida entre MILP e MCDA, considerando os créditos de descarbonização na decisão dos *stakeholders*.

A síntese interpretativa dos trabalhos apresentados na Tabela 2 é comentada em detalhes no tópico 2.3 deste capítulo, que discute a abordagem *nexus* WEFL na cadeia de suprimentos de biocombustíveis.

Além dos 40 artigos incluídos na meta-síntese, foram analisados ainda 79 artigos para discuti-la, bem como para abordar as demais temáticas incluídas nessa revisão, totalizando 119 artigos analisados.

2.2 A indústria sucroenergética no Brasil

A produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil sofreu diversas mudanças em sua estrutura ao longo dos anos, seja por incentivo do estado ou iniciativa privada, dependendo do período histórico (NOVA CANA, 2021).

Em 1931 houve o primeiro incentivo para impulsionar a produção do biocombustível no Brasil, o Decreto nº 19.717, que exigia a mistura de 5% do etanol anidro com a gasolina (PUPPIM DE OLIVEIRA, 2002). O teor de etanol na gasolina variou até a década de 1970, na faixa de 0 a 5%. No entanto, durante a Segunda Guerra com a falta da gasolina importada, há relatos do uso de teores de etanol superiores a 50%. Mesmo com o petróleo voltando a dominar ainda durante a guerra, a bioenergia sucroalcooleira mantinha sua importância, sobretudo a partir de 1975. Entre 1930 e 1975 o uso médio do álcool na gasolina foi de 5 a 7% (CORTEZ, 2015).

2.2.1 Pro-álcool

A partir de 1975 o biocombustível brasileiro galgou novos patamares no mercado nacional e internacional. Naquele ano, com a crise do petróleo, o Brasil estabeleceu o Programa Nacional do Álcool (PRO-ÁLCOOL), que instituiu e consolidou o uso da mistura de álcool à gasolina no setor de transportes e forneceu subsídios para a expansão das destilarias, veículos movidos a álcool e pesquisas para

o desenvolvimento do combustível (PUPPIM DE OLIVEIRA, 2002; LÁZARO et al., 2017).

A Figura 5 mostra uma visão esquemática do Brasil pós início do Pro-álcool.

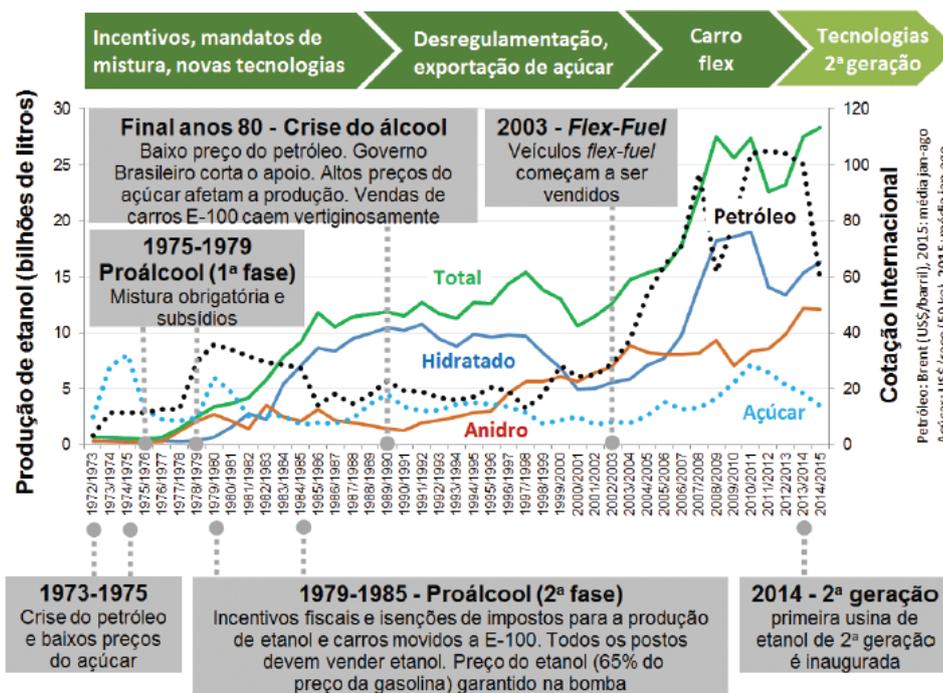


Figura 5 - A evolução do etanol anidro e hidratado no Brasil.

Fonte: (CORTEZ, 2015)

O resultado do programa foi o aumento significativo no desenvolvimento dos setores do açúcar e etanol. A produção de etanol aumentou mais de 28 vezes em 20 anos. Além disso, no auge da produção do etanol, em 1985, 90% dos carros vendidos no Brasil eram movidos a álcool. Em 1992, 10% da matriz energética brasileira era composta por produtos fabricados a partir da cana de açúcar (PUPPIM DE OLIVEIRA, 2002; GRASSI & PEREIRA, 2019).

No entanto, 1985 é também considerado o ano em que o Pro-álcool deixou de ser um programa de subsídios do governo federal tal como a ideia inicial, que fornecia empréstimos a juros baixos ou negativos, para incentivar a formação de canaviais e implantação de usinas (CORTEZ, 2015).

As crises econômicas e políticas, as variações no preço do petróleo e do açúcar na década de 1980 levaram a liberalização no setor. A partir de então, o

programa já não era mais entendido como um programa de incentivos (CORTEZ, 2015; SILVEIRA & JOHNSON, 2016; LÁZARO *et al.*, 2017).

Ainda que o programa de subsídios tenha tido sua data de término em 1985, o termo “*Pro-álcool*” continuou a ser utilizado pela indústria, academia e governo para o desenvolvimento tecnológico e disseminação do uso do etanol no Brasil (CORTEZ, 2015; SILVEIRA & JOHNSON, 2016; LÁZARO *et al.*, 2017).

2.2.2 Lei do petróleo e outros avanços

Em 1997, ocorreu a implantação da Lei do Petróleo nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, que criou a atual Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) (NOVA CANA, 2022).

A ANP foi instituída como o órgão regulador das atividades que integram as indústrias de petróleo e gás natural e de biocombustíveis no Brasil, de modo que essa passou a ser a autarquia federal que regulamenta o setor, com o objetivo de garantir o atendimento às demandas por combustíveis e a defesa dos interesses do consumidor. Regular, contratar e fiscalizar estão entre as principais atuações da ANP (TN Petróleo, 2017).

Quanto ao CNPE, esse foi desenvolvido para ser um órgão de assessoramento do governo federal, sendo a sua função propor políticas nacionais e medidas específicas no setor energético (NOVA CANA, 2022).

Já em 2003, com a introdução dos veículos de combustível flexível (FFV's) o aumento da demanda por etanol anidro e hidratado cresceu, como mostra a Figura 4, a produção de veículos somente a álcool foi encerrada em 2007. Em 2017 os FFV's representavam 86% dos veículos vendidos (DOS SANTOS E SILVA; BOMTEMPO; ALVES, 2019).

Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo e maior exportador, com produção de mais de 29 bilhões de litros na safra 2020/21 (CONAB, 2021), atrás apenas dos Estados Unidos com o etanol de milho, como mostra a Tabela 3.

Tabela 4 - Produção mundial de etanol

Produção Mundial de Etanol Combustível (Mil. Gal.)							Percentual da Produção
País	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Estados Unidos	15,413	15,936	16,091	15,778	13,941	15,015	55
Brasil	6,840	6,730	8,060	8,86	8,100	7,430	27
União Europeia	1,190	1,250	1,300	1,350	1,280	1,350	5
China	730	850	810	1,010	930	860	3
Índia	260	230	430	460	540	860	3
Canadá	460	460	460	497	429	434	2
Tailândia	330	380	390	430	390	350	1
Argentina	240	290	290	290	210	260	1
Resto do mundo	587	644	709	655	650	711	3
Total	26,050	26,770	26,540	29,330	26,470	27,270	

Fonte: *Renewable Fuels Association* – (2022).

A matéria prima cana-de-açúcar, usada no Brasil para a fabricação de etanol, é a mais competitiva em nível global, pois além de apresentar menor custo de produção e maior produtividade em relação às matérias primas usadas em outros países, como o milho e beterraba, é a que mais contribui para a redução de gases poluentes (60% a 90%), uma redução mais significativa em relação ao milho, por exemplo, que reduz entre 40 a 60% (AXELSSON *et al.*, 2012; MANOCHIO *et al.*, 2017).

Por essa análise, a bioenergia brasileira é considerada a pedra fundamental para o alcance das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC). Essas contribuições foram desenvolvidas pelo Brasil, sob as condições de alcançar as metas de redução de descarbonização dispostas no Acordo de Paris (2015) durante a COP21, das quais o país é signatário. O principal compromisso energético firmado foi a ampliação do uso de biocombustíveis (LÁZARO *et al.*, 2020).

As medidas versam sobre: aumentar a produção de biocombustíveis para aproximadamente 18%; alcançar o desmatamento ilegal zero na Amazônia; alcançar 45% das energias renováveis no mix energético do país - entre as quais a energia não hidrelétrica renovável entre 28% e 33%, e as fontes de energia de combustível não fóssil, pelo menos 23% - além de restaurar pastagens degradadas e melhorar sistemas integrados de cultivo-pecuária-silvicultura (MERCURE *et al.*, 2019).

2.2.3 O programa RenovaBio

Considerando o alcance das metas propostas e o aumento da segurança energética que sofreu baixa com a estagnação do setor de biocombustíveis entre as safras 2008/2009 e 2015/2016, o governo brasileiro lançou, em dezembro de 2017, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio – Lei 13.576) (NOVA CANA, 2017).

De acordo com a Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (SPG), o programa RenovaBio objetiva: “fornecer uma importante contribuição para o alcance dos NDC’s; promover a adequada expansão dos biocombustíveis na matriz energética garantindo segurança do abastecimento; e assegurar a previsibilidade de mercado” (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021). Para tanto, são considerados três eixos estratégicos: metas de descarbonização; certificação da produção de biocombustíveis; e crédito de descarbonização (CBIO). O primeiro eixo corresponde à parte obrigatória da política. Nela, o governo estabelece metas nacionais para dez anos aos distribuidores de biocombustíveis, no sentido de forçá-los a investir em descarbonização. No segundo eixo, os produtores que têm interesse em disponibilizar CBios no mercado devem certificar que sua produção possui eficiência energética-ambiental e recebem notas de 1 a 10 por ela. Essas notas serão multiplicadas pelo volume de biocombustível comercializado e determinam quanto CBios ele poderá emitir e disponibilizar na Bolsa de Valores brasileira (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA DO BRASIL, 2021). A Figura 6 exemplifica o funcionamento do mercado de CBios.

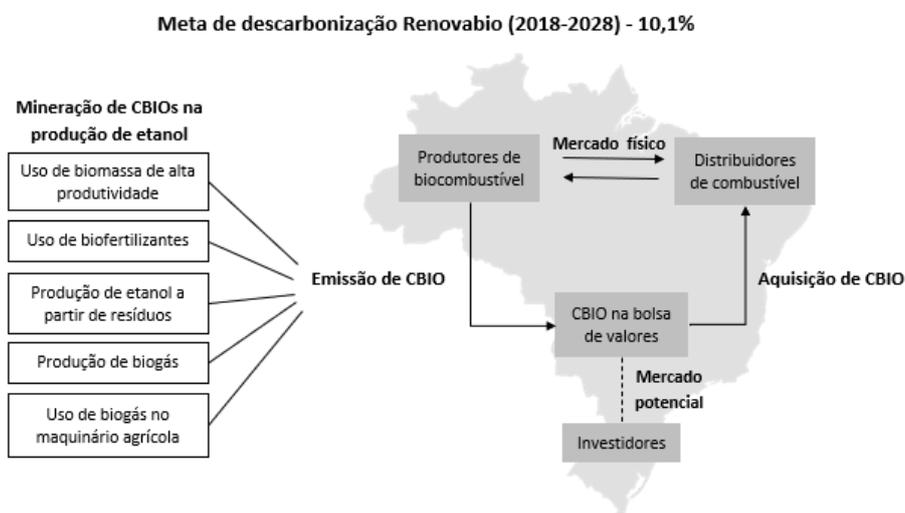


Figura 6 - O Programa RenovaBio. Uma visão da Política Nacional de Biocombustíveis do Brasil

Fonte: (GRASSI & PEREIRA, 2019, adaptado)

Cada CBIO que o produtor disponibiliza no mercado corresponde a uma tonelada de CO₂ que não é mais emitido. Considerando que 1 L de etanol tem 21,35 MJ, cada litro de etanol mitiga aproximadamente 1,2 kg de CO₂. Portanto, considerando esses parâmetros, 1 tonelada de CO₂ é mitigado quando 833 litros de etanol são produzidos (GRASSI & PEREIRA, 2019; PALAZZI *et al.*, 2022).

No exemplo citado por Grassi & Pereira (2019), o produtor teria direito a 1 CBIO com a produção de 833 litros de etanol. No entanto, se houver outro produtor com a produção mais sustentável, utilizando por exemplo, biogás ao invés de diesel em seu maquinário no processo produtivo, o segundo produtor terá direito a um maior número de CBIOs por quantidade produzida.

Considerando a produção de etanol de segunda geração, um CBIO seria obtido com a comercialização de apenas 484 litros de etanol, o que aumenta a atratividade e a viabilidade da produção desse combustível.

A sinergia entre as principais partes envolvidas e diversidade de produtos bioenergéticos incluídos no programa, tornam-no o maior programa de descarbonização do mundo (MME, 2021).

No entanto, a meta em aumentar a produção em mais de 20 bilhões de litros até 2030 e reduzir 10% de carbono até 2028 tem causado preocupações em relação às ligações entre as questões de água, terra, alimentos e energia que estão envolvidas na produção agrícola e industrial do biocombustível (LÁZARO *et. al.*, 2020; MME, 2021)

Lázaro *et. al.* (2021b) sugerem que as pesquisas devem proporcionar estudos aprofundados com foco nas oportunidades para a abordagem *nexus*, abordando a comercialização dos créditos de descarbonização e a previsibilidade do mercado de energia.

Embora o mercado de biocombustíveis tenha sido afetado pelos efeitos da pandemia do Covid-19 e a meta em disponibilização de Cbios tenha sido revisada pelo governo federal, a meta revisada ainda representa 90% da meta original (BOSSLE, 2020). Dessa forma, é necessário trazer a discussão à luz da abordagem *nexus WEF*, e assim melhorar a governança integrativa da cadeia de suprimentos de biocombustíveis.

2.3 A abordagem *nexus water-energy-food-land* na cadeia de suprimentos de biocombustíveis

Esse tópico apresenta os resultados da meta-síntese realizada a partir de 40 artigos sobre os princípios e aplicações da abordagem *nexus* na cadeia de suprimentos de biocombustíveis. A análise é categorizada em problemas conforme o nível de decisão, métodos para solução, principais métodos de coleta de dados e contribuições do *nexus* para a sustentabilidade.

2.3.1 Problemas conforme o nível de decisão

A despeito dos benefícios da utilização de biomassa para a produção de biocombustíveis, ainda existem limitações econômicas, espaciais e ambientais na otimização da cadeia de suprimentos de energias renováveis como essa (AKHTARI *et al.*, 2018; ABBAS *et al.*, 2021).

Custos de processamento, transporte e armazenamento, além do potencial energético da biomassa selecionada e sua disponibilidade são algumas das barreiras. Diante de tal complexidade, alguns conceitos da economia circular, como a abordagem *nexus*, passaram a integrar o gerenciamento das cadeias (ALKHUZAIM *et al.*, 2021).

De Meyer *et al.* (2014) e Ying *et al.* (2020) apresentam alguns desses problemas conforme os níveis de decisão. De acordo com os autores no nível estratégico da gestão da cadeia de suprimentos de biocombustíveis, podem surgir problemas como localização, capacidade, tipo de armazenamento, forma do pré-processamento, conversão, modo de transporte e seleção de culturas.

No nível tático surgem o planejamento da colheita, o roteamento de transporte e a capacidade de expedição. No nível operacional aparecem problemas como o planejamento de estoque e a distribuição.

Para compreender como a abordagem *nexus* contribui para a solução desses problemas, a meta-síntese nesta pesquisa propôs uma análise desses problemas nos 40 artigos selecionados relacionando-os à abordagem *nexus*.

Identificou-se que os quarenta artigos apresentam problemas associados ao nível estratégico de decisão, ou seja, em algum momento tangenciam a fase de planejamento. Dentre estes, 21 são problemas envolvendo a seleção de culturas para a produção de biocombustíveis. Como esses estudos consideram a sustentabilidade em torno do *nexus*, a exemplo da redução do conflito energia-alimento, as culturas investigadas são superiores, ou seja biomassas residuais ou não alimentares.

Alguns exemplos dessas culturas são os resíduos agrícolas, industriais e orgânicos (GARCIA & YOU, 2016; GARCIA & YOU, 2017; MARTINEZ-HERNANDEZ & SAMSATLI, 2017; RUBINSIN *et al.*, 2020; GUO *et al.*, 2020; ABBAS *et al.*, 2021), resíduos da estação de tratamento de esgoto municipal, como o lodo (MENESES-JÁCOME *et al.*, 2015; MOHAREB *et al.*, 2017; MOHAMMADI, 2021), microalgas marinhas, jatropha e estrume animal (HASAN & AVAMI, 2018; MAHJOUR & SAHEBI, 2020), milho, sorgo, trigo, cana-de-açúcar e óleo de palma (López-Díaz *et al.*, 2018); switchgrass, miscanthus e salgueiro (FAJARDY *et al.* 2018; ZHONG *et al.*, 2018).

O caráter inovador das culturas investigadas é característico do *nexus*, pois a abordagem sugere o uso máximo de matérias-primas bioenergéticas, além do uso de culturas não alimentares, para aumentar a segurança alimentar.

Continuando a análise dos problemas no nível estratégico, os problemas envolvendo o processamento e conversão industrial são 11, e seus objetivos são assim resumidos: i) instalação ideal das usinas de cogeração; ii) instalação ótima de usinas renováveis e alternativas; e iii) operação otimizada da cadeia integrada de abastecimento de água e energia em grandes áreas geográficas (GARCIA & YOU 2015; SAIF & ALMANSOORI, 2016; MARTÍN & GROSSMANN, 2015; KHAN *et al.*, 2018; GARCIA *et al.*, 2019; SAIF *et al.*, 2020; BENJAMIN *et al.*, 2020; MEDINA-SANTANA *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2021; ALHERBAWI *et al.*, 2021; YOU *et al.*, 2021).

Por fim, no nível estratégico, 9 problemas envolvem a localização ideal em torno do *nexus*, tanto para plantio quanto para instalação de biorrefinarias (GHANI *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2020; DOLIENTE & SAMSATLI, 2021; ABDALI *et al.*, 2021; DHANRAJ *et al.*, 2021; KUMAR *et al.*, 2021; GHIAT *et al.*, 2021; GILANI *et al.*, 2022; AFKHAMI & ZARRINPOOR, 2022).

Dos 40 problemas no nível estratégico, 19 estão associados simultaneamente ao nível tático, dos quais dois envolvem planejamento de estoque, quatro envolvem

capacidade de transporte, e 13 tratam de roteamento e capacidade de transporte e expedição.

Ainda há 12 problemas associados ao nível operacional, estratégico e tático simultaneamente, que abordam a distribuição.

Depreende-se da análise que há menos soluções e mais oportunidades de pesquisa em torno de problemas táticos e operacionais, como transporte, armazenamento e distribuição. Considerando os estudos analisados, isso ocorre porque o desenvolvimento em torno da cadeia produtiva de biocombustíveis ainda é recente, principalmente considerando as variáveis de *nexus*.

Além disso, a maioria dos estudos é realizada em nações com escassez de biomassa energética, portanto, são desenvolvidos na fase de planejamento estratégico, como, por exemplo, a seleção de culturas, localização ideal e seleção de tecnologias de processamento e conversão.

Por essa razão, em um estudo realizado no Brasil, China, União Europeia e Estados Unidos sobre bioenergia como captura e armazenamento de carbono (BECCS), Fajardy *et al.* (2018) consideram a multipolaridade na produção de biocombustíveis um fator crucial para o alcance das metas globais de descarbonização.

Outra complexidade em incluir os três níveis de decisão nas pesquisas, é que as CSB's envolvem múltiplas partes interessadas em vários níveis, incluindo metas estaduais, tornando o planejamento mais complexo.

2.3.2 Métodos de otimização considerando as variáveis do *nexus*

Para analisar os métodos utilizados nos 40 artigos selecionados, foram considerados três grupos de metodologias em que os métodos podem ser categorizados: Programação matemática (PM), abordagens heurísticas e análise de decisão multicritério (MCDA) (MEYER *et al.*, 2014; YING *et. al* 2020).

Dentre os artigos analisados, a Programação Matemática aparece com 35 ocorrências, heurística com 7 ocorrências e Análise de Decisão Multicritério (MCDA) com 3. As co-ocorrências são 4, sendo que a maior frequência também está no grupo Programação Matemática.

Entre os 22 problemas que são categorizados apenas no nível estratégico sem relação com o tático, operacional ou ambos, 18 são resolvidos com PM, um com

MCDA e uma aplicação híbrida entre PM e MCDA. Outros dois com heurísticas. Dos 11 artigos que abordam simultaneamente os níveis estratégico e tático, 10 abordaram PM e apenas um abordou heurística.

Entre os 12 artigos abordando os três níveis de decisão, 10 abordaram apenas a PM, e heurística foi 1. Há 1 aplicação híbrida entre PM e heurística, e 1 abordou as três categorias. Em todos os níveis de decisão, a programação matemática é mais recorrente, isso se deve a sua adequação a problemas complexos e de grande escala, além de ser uma forma de validar a otimalidade dos resultados obtidos (Moretti et al., 2021).

A ênfase na programação matemática é evidente, no entanto, de acordo com Garcia e You (2016), a tomada de decisão em torno do *nexus* introduz novos desafios de modelagem, pois há desafios dinâmicos de modelagem multissetorial em várias escalas, desde fazendas individuais até a rede regional de distribuição de água, alimentos e energia.

O método de Análise de Decisão Multicritério pode ser mais explorado, visto que apenas 3 dos 40 artigos analisados utilizaram a abordagem para modelar decisões em torno do *nexus* (LI et al., 2020; KUMAR et al., 2021). Para gestão energética e cadeias de suprimentos verdes, como biocombustíveis, a técnica Processo de Hierárquico Analítico tem sido repetidamente recomendada. Métodos de ponderação objetivos e combinados melhoram o processo de tomada de decisão, e são de fácil compreensão teórica com aplicações simples (WANG et al., 2009; GOVINDAN et al., 2015; MARDANI et al., 2017; SAHABUDDIN & KHAN, 2021).

Os métodos heurísticos apresentam mais robustez, pois são construídos em torno dos problemas. Entre os quatro artigos analisados nesta pesquisa com abordagem heurística, Fajardy et al. (2018) estudaram a estrutura de Modelagem e Otimização de Tecnologias de Emissões Negativas (MONET). Wu et al. (2021) estudaram um modelo de nexo incorporando tanto a produção (oferta) quanto as demandas secundárias de sistemas WEF, em um único modelo de sistema usando a abordagem de dinâmica do sistema (SD).

Benjamim et al. (2020) aplicaram uma estrutura integrada para abordar a criticidade de unidades de processamento e plantas em parques bioenergéticos, considerando incertezas de demanda.

Por fim, Rubinsin et al. (2020) apresentaram um modelo matemático

considerando os custos da biomassa, produção e tratamento das emissões das atividades de transporte e produção.

2.3.3 Métodos de coleta de dados para implementar a abordagem *nexus*

Os métodos de coleta de dados são importantes para a implementação da abordagem *nexus*. Neste trabalho, os métodos utilizados para coletar dados em torno do *nexus* foram analisados nos 40 artigos da meta-síntese.

Dentre estes, 28 utilizaram a abordagem de pesquisa de estudo de caso, dos quais 6 utilizaram apenas o método de coleta de dados de Análise Documental, com base em relatórios nacionais e internacionais (LÓPEZ-DÍAZ *et al.*, 2017; KHAN *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2020; MAHJOUB & SAHEBI, 2020; WU *et al.* 2021; ABBAS *et al.*, 2021).

Foram 5 os estudos de caso que utilizaram múltiplas abordagens de coleta de dados, estes utilizaram Análise Documental, por meio de relatórios nacionais e internacionais, Análise de Registros pelo Sistema de Informações Geográficas e Análise de Literatura (MEDINA-SANTANA *et al.*, 2020; RUBINSIN *et al.*, 2020; DHANRAJ *et al.*, 2021; KUMAR *et al.*, 2021; AFKHAMI & ZARRINPOOR, 2022).

Os que utilizaram abordagens híbridas entre Análise Documental e Análise de Literatura foram 14, que se concentraram em relatórios nacionais e internacionais, centros de pesquisa, indústrias e literatura (MENESES-JÁCOME *et al.*, 2015; SAIF & AL-MANSOORI, 2016; ZHONG *et al.*, 2018; FAJARDY *et al.*, 2018; GARCIA *et al.*, 2019; GUO *et al.*, 2020; SAIF *et al.* 2020; YOU *et al.*, 2021; MOHAMMADI *et al.*, 2021; DOLIENTE & SAMSATLI, 2021; GHIAT *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2022; THOMAS *et al.*, 2022).

Aqueles que utilizaram apenas Análise de Literatura foram 2 (GARCIA & YOU, 2015; BENJAMIM *et al.*, 2020). E, para completar os 28 estudos de caso, apenas 1 utilizou a abordagem híbrida entre Análise Documental e Entrevistas Estruturadas (ABDALI *et al.*, 2021).

Dos outros 12 trabalhos que compõem o corpus de análise, 5 foram abordagens de modelagem conceitual e utilizaram Análise de Literatura e Análise Documental para compor seus modelos (HASAN & AVAMI, 2018; ALHEBAWI *et al.*, 2021; JABARI *et al.*, 2021; YANG *et al.*, 2021; COIMBRA *et al.*, 2022).

Os outros 7 trabalhos foram revisões sistemáticas que não se aprofundaram no tema da coleta de dados (MARTIN & GROSSMANN, 2015; GARCIA & YOU, 2016; GARCIA & YOU, 2017; MARTINEZ-HERNANDEZ & SAMSATLI, 2017; MOHAREBI *et al.*, 2017; TAPIA *et al.*, 2019; GHANI *et al.*, 2019).

Tapia *et al.* (2019) e Ghani *et al.* (2019), no entanto, comentam que houve um aumento de abordagens espaciais como o Sistema de Informações Geográficas (SIG) para otimizar Cadeias de Valor de Biomassa, isso se deve ao aumento da disponibilidade de dados espaciais e bancos de dados governamentais/não governamentais ao longo dos anos.

Torres *et al.* (2019) também acreditam que o uso de ferramentas de SIG (Sistema de Informações Geográficas) para modelar o *nexus* é essencial, pois o uso de bancos de dados espaciais é importante para o estudo de pequenas áreas, como bacias hidrográficas menores. Para os autores, o desenvolvimento de bases de dados compartilhadas confiáveis também é importante.

O método de coleta de dados mais recorrente em torno do *nexo* é a Análise Documental, que representa 60% (24 de 40) dos métodos utilizados nesta amostra. O grande foco na análise de relatórios nacionais e internacionais ocorre porque a maioria das indústrias estudadas ainda não são signatárias da abordagem *nexus* e estão em fase de planejamento.

Por fim, uma boa solução para o desenho de cadeias de fornecimento de energia que ainda carecem de dados de entrada, como a abordagem *nexus*, seria a proposta por Gilani *et al.* (2022) que realizaram uma otimização robusta baseada em dados, para o projeto de uma rede solar fotovoltaica. Esse tipo de abordagem permite que o modelo seja construído em torno da disponibilidade de dados reais.

2.3.4 Contribuições da abordagem *nexus* para a sustentabilidade em cadeias de suprimentos de biocombustíveis (CSB)

Originalmente, a estrutura *nexus WEF*, nos termos do que foi proposto pela primeira vez por Hoff (2011), tinha o claro objetivo de promover a segurança de recursos para todos, o crescimento equitativo e sustentável e um ambiente resiliente e produtivo, por meio de ações na sociedade, economia e meio ambiente (DALLA *et al.*, 2020).

Este objetivo está diretamente ligado aos objetivos de desenvolvimento

sustentável da ONU (Nações Unidas, 2020).

Em relação às contribuições em cada dimensão da abordagem *nexus*, água e energia apresentaram a maior ocorrência (38), seguidos de alimentos (29) e terra (6). A estrutura formal do nexo, água-energia-alimento, é a mais recorrente, com 17 ocorrências.

Esses trabalhos tratam de como os recursos alimentares, energéticos e hídricos estão interligados em várias etapas da cadeia de valor de biomassas, além de localização ideal, seleção de culturas para diversificação da matriz energética, resíduos agrícolas e industriais e agricultura urbana. Mesmo que não o mencionem diretamente, todos os trabalhos contribuem para o alcance das metas de desenvolvimento sustentável.

A segunda interação mais frequente é água-energia, com 11 ocorrências. Esses trabalhos abordam o uso do lodo do centro municipal de tratamento de águas residuais como biomassa energética, a minimização da pegada hídrica global, e do consumo de água em todas as etapas da cadeia de abastecimento, projetos ideais para a cadeia integrada de abastecimento de água e energia em grandes áreas geográficas, e as tecnologias de conversão mais eficientes em termos de consumo de água-energia.

A interação que representa o foco deste trabalho, água-energia-alimento-terra, é mencionada apenas em 3 trabalhos. Li *et al.* (2020) estudaram como gerenciar de forma sustentável a produção de bioenergia em sistemas agrícolas. O uso de resíduos para a produção de etanol, a redução do uso da água e do solo e a distribuição de água para a população da região produtora foram investigados por You *et al.* (2021). Abdali *et al.* (2021) estudaram como minimizar o consumo de água no cultivo e processamento da cana-de-açúcar com restrições de uso da terra.

Esses trabalhos esclarecem que existe um potencial na abordagem do nexo para fornecer soluções sociais e econômicas para a gestão de CSBs com base na sustentabilidade. No entanto, para atingir esse objetivo, são necessárias pesquisas que incluam a estrutura formal do *nexus*, ou um aperfeiçoamento dele, sem suprimir as dimensões essenciais WEF.

2.4 A cadeia de suprimentos sucroenergética brasileira e a abordagem nexus (WEFL)

A cana de açúcar é uma das culturas agrícolas mais bem sucedidas em nível global, junto ao milho, algodão, soja, trigo e arroz, dado o potencial para gerar três importantes produtos comercializáveis: açúcar, etanol e energia (VANDENBERGHE et al., 2022), como mostra a Figura 7:

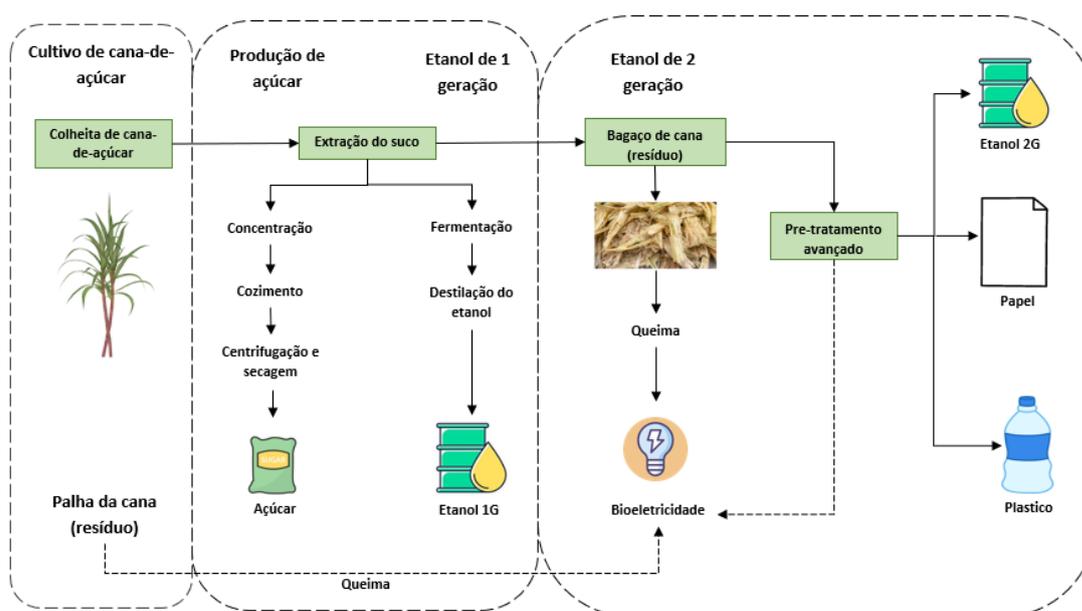


Figura 7 - Produtos gerados a partir da cana de açúcar

Fonte: (VANDENBERGHE et al., 2022, adaptado)

A Figura 7 evidencia que a biomassa sucroenergética ainda tem potencial para gerar outros subprodutos a partir da sacarose, melação e resíduos (agrícolas e industriais), como o etanol 2G, bioenergia, biogás, ácidos orgânicos, bioplástico, fertilizantes e outros produtos biotecnológicos que contribuem para a sustentabilidade e economia das usinas tradicionais (TEIXEIRA et al., 2021; VANDENBERGHE et al., 2022).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com 38% da produção mundial em 2021, seguido pela Índia (22%), China Continental, Paquistão e Tailândia (4–6% respectivamente) (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2022). Atualmente, são 422 usinas sucroenergéticas atuando no país, sendo 53% delas na região Centro-Sul (NOVA CANA, 2022).

Os problemas envolvendo cadeias de suprimentos de biocombustíveis frequentemente tangenciam os três níveis de decisão (estratégico, tático e operacional), para articular as prioridades de múltiplos tomadores de decisão (GUO *et al.*, 2020).

Carvajal *et al.* (2019), Florentino *et al.* (2020) e Teixeira *et al.* (2021) concordam que as cadeias de produção de culturas agrícolas devem incluir os três níveis de decisão, a fim de melhorar o rendimento no cultivo, aumentar a eficiência no processo produtivo, integrar as diferentes etapas da cadeia, e, com isso, alcançar maior competitividade no mercado.

Para além da eficiência técnica e econômica, Tapia *et al.* (2019) e You *et al.* (2021) apontam para a necessidade de modelar a sustentabilidade em todos os estágios das CSB, já que muitas atividades podem prejudicar a segurança hídrica, energética, alimentar e fundiária.

You *et al.* (2021) ilustraram a capacidade do *nexus* em relação ao cenário não *nexus* em uma cadeia de suprimentos de bioetanol, indicando que a abordagem proposta mostrou potencial para atendimento das demandas sociais a um custo 3% menor que a abordagem unicamente econômica. Nesse sentido, o grande desafio é desenvolver um modelo que considere todos os estágios e tomadores de decisão simultaneamente.

No caso da cana de açúcar, Higgins *et al.* (2004) descreveram a cadeia de suprimentos em 5 estágios: plantio, colheita, transporte, processamento industrial e distribuição do produto acabado ao mercado. Esse modelo também é usado por Carvajal *et al.* (2019). Na Figura 8 é apresentada a ordem das etapas da cadeia de suprimentos.

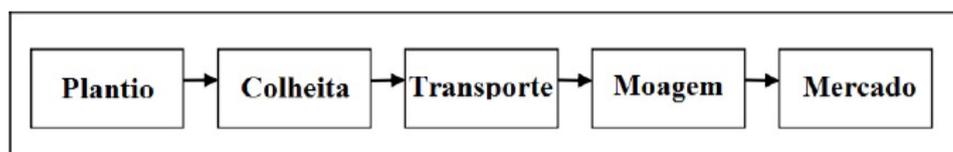


Figura 8 - Estágios da cadeia de suprimentos da cana de açúcar

Fonte: (TEIXEIRA *et al.*, 2021)

Para alcançar o projeto ideal de toda a cadeia de suprimentos, é importante identificar quais são as principais decisões a serem tomadas em cada uma das etapas que aparecem na Figura 8. Em sua revisão sobre os métodos de otimização utilizados

em cada etapa, Teixeira *et al.* (2021) apresentam uma análise sobre o que é feito, e quais as principais decisões tomadas de decisão em cada estágio, como discutido a seguir:

a) Plantio: O processo se inicia pelo preparo do solo, com a remoção da lavoura plantada anteriormente, e a remoção das raízes e pedras, a fim de facilitar a colheita, e não danificar as máquinas no processamento industrial na usina. Dependendo dos fatores climáticos, pode ser necessário irrigar ou drenar o solo, além de usar fertilizantes para controlar a qualidade do solo e aumentar a fertilidade. Outro fator importante é a organização do solo. As fazendas devem ser divididas em áreas menores, denominadas talhões, nas quais as diferenças de solo e relevo não sejam relevantes.

b) Colheita: A cana-de-açúcar demora de 12 a 18 meses para ser colhida. Após a primeira colheita, volta a crescer anualmente, a partir das socas, isto é, novas germinações das raízes que ficaram no solo. Existem variedades de cana-de-açúcar que permitem colher até 8 vezes antes de ser necessário plantar novamente. No entanto, é mais comum que planta se desenvolva com produtividade entre 3 a 5 colheitas, devido às quedas nos níveis de Açúcar Total Recuperável (ATR) a cada ano (POLTRONIERE et al., 2021).

As áreas de colheita da cana são divididas em frentes de colheita, isto é, áreas geograficamente próximas selecionadas de acordo com o tempo de colheita da cana plantada. O processo de colheita tem passado do manual com queimada para a colheita mecanizada, especialmente nas regiões mais desenvolvidas. O objetivo é que a cana seja sempre colhida no ápice da curva de maturação.

c) Transporte: Após o corte da cana, é necessária uma atenção especial para evitar atraso no transporte da matéria prima do campo para usina, já que imediatamente após o corte, a planta começa a perder sua quantidade de matéria-prima que pode ser processada. Geralmente, a usina fica próxima à colheita, para minimizar os atrasos, e os tipos de transporte são rodoviários e ferroviários, sendo o rodoviário o mais ágil.

d) Processamento industrial: O primeiro passo na usina é pesar e analisar a matéria prima, para fins de determinação de indicadores de qualidade como: (a) Açúcar total recuperável (ATR), parâmetro que representa o total de açúcares recuperáveis após o processo de produção; (b) Brix, porcentagem em massa de

açúcares contidos em uma solução de sacarose; (c) Pol, porcentagem em massa de sacarose contida no caldo da cana.

Após a análise, a cana é limpa e picada antes de ser moída. Durante a moagem são separados o caldo da cana, concentrado em açúcares, e o bagaço, material fibroso constituído dos nós da cana. O caldo é utilizado para a fabricação do açúcar e etanol, enquanto os resíduos agrícolas e o bagaço para fabricação do etanol de segunda geração (E2G), eletricidade, papel, briquetes entre outros.

e) Mercado: O açúcar e etanol fabricado nas usinas e refinarias são transportados para armazéns, de onde são distribuídos para o mercado nacional e internacional. O fluxo logístico envolvido é multimodal com caminhões e petroleiros com capacidades variadas. O produto é transportado para os armazéns dos portos, para então ser enviado para o mercado internacional. Quanto mais distantes as usinas estão dos portos, mais complexo o processo decisório.

Nota-se a complexidade em modelar a cadeia de suprimentos da cana de açúcar, pois é um problema multi-escalar, multi-temporal e multi-*stakeholders*, com incertezas em todos os diferentes níveis de tomada de decisão e algumas partes interessadas com múltiplos objetivos (GARCIA & YOU, 2016; TEIXEIRA *et al.*, 2021).

De Meyer *et al.* (2014) e Ying *et al.* (2020) demonstram essa complexidade nos estudos sobre cadeias de suprimentos de biocombustíveis, conforme análise na seção 2.3.1. Os autores mostram as decisões a serem tomadas desde a seleção da cultura até o produto final em cada nível de decisão da cadeia. A Figura 9 evidencia essa análise.

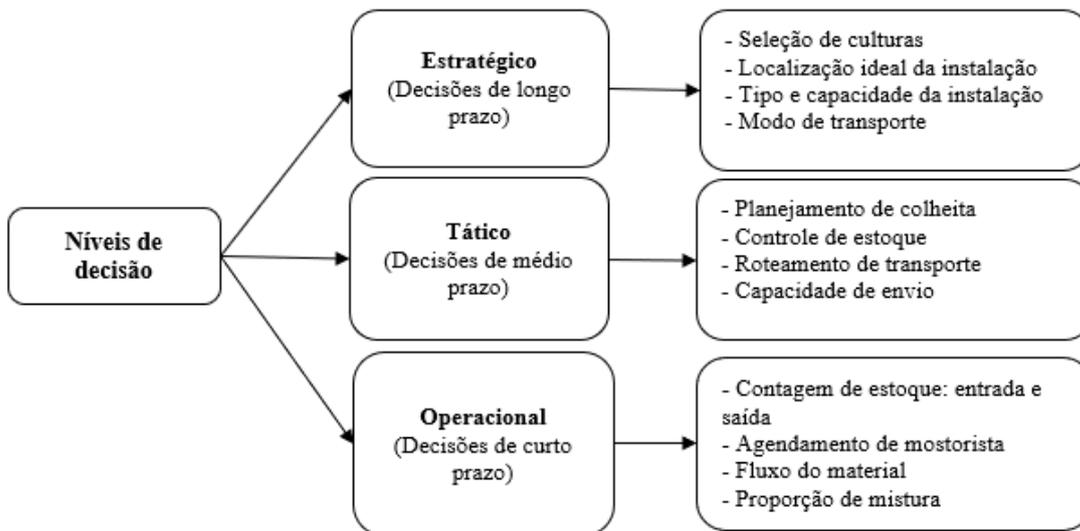


Figura 9 - Níveis de decisão na CSB

Fonte: (YING *et al.*, 2020, adaptado)

Todas as decisões analisadas em cada nível de decisão impactam diretamente a sustentabilidade das CSBs. Por isso, o *nexus*, que busca promover a segurança de recursos para todos (DALLA FONTANA *et al.*, 2020) tem se mostrado a abordagem adequada para gerir as CSBs com foco nos ODSs (NAÇÕES UNIDAS, 2020).

No Brasil, mesmo com alguns esforços qualitativos para denotar a relevância de tal abordagem para o cenário brasileiro e a importância da aplicação empírica no caso do etanol (MERCURE *et al.*, 2019; MUNOZ *et al.*, 2019; GIATTI *et al.*, 2020; DALLA FONTANA *et al.*, 2020; LÁZARO *et al.*, 2021), boa parte dos trabalhos desenvolvidos até agora preocupam-se em conceituar a abordagem do *nexus* e reunir conhecimento sobre sua importância para a gestão sustentável dos recursos.

Faltam análises quantitativas que reúnam contribuições práticas do *nexus*, como a otimização da cadeia de suprimentos de etanol.

Até o momento em que esta pesquisa foi escrita, foi encontrado apenas um trabalho que estudou empiricamente a abordagem *nexus* na cadeia de produção do etanol brasileiro (BELLEZONI *et al.*, 2018).

Bellezoni *et al.* (2018) observam que água, energia, alimento e terra são recursos básicos para qualquer processo produtivo, mas a intensidade pela qual estão sendo exploradas no Brasil levou a crescentes impactos ambientais. Em sua pesquisa, os autores estudaram os impactos da produção sucoenergética no cerrado brasileiro, especialmente na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, considerando os elementos básicos do *nexus* WEF e a economia.

Por essa análise, fica claro que os elementos do *nexus* precisam estar integrados à gestão e ao planejamento das CSB. A Figura 10 mostra a complexidade dessa integração.

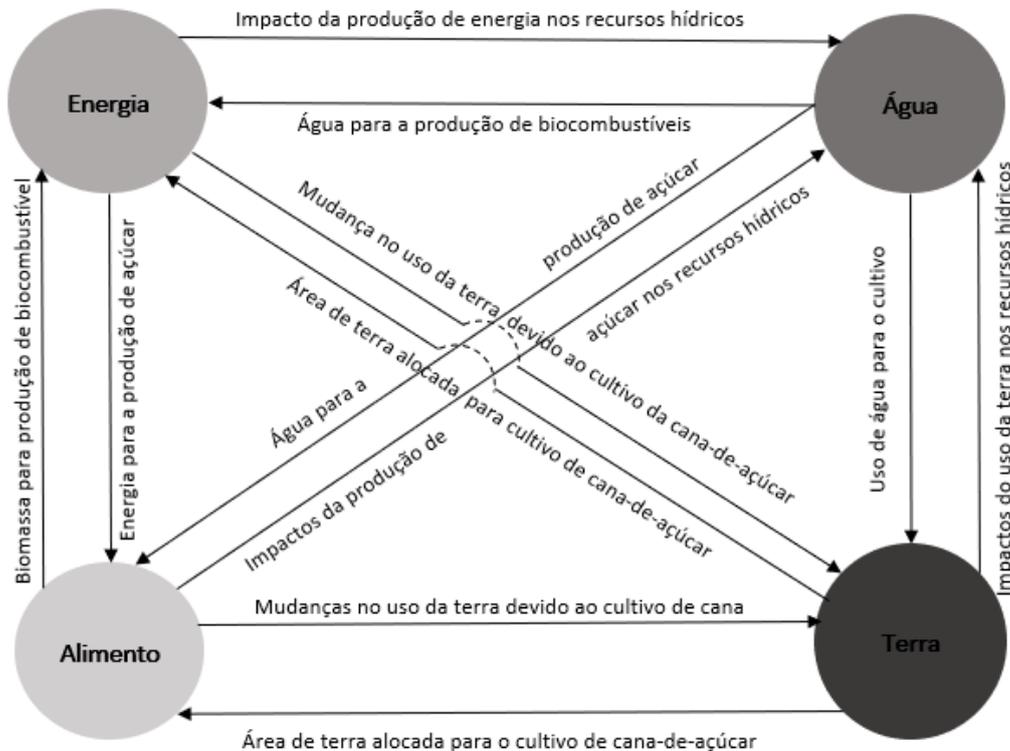


Figura 10 – Interações do Nexus na CSB

Fonte: (ABDALI *et al.*, 2021, adaptado)

Para mitigar os impactos apresentados na Figura 10 o *nexus* apresenta algumas contribuições para otimização da CSB em cada uma das dimensões:

- Água (*water*):** minimiza o consumo de água em toda a CSB (LÓPEZ-DÍAZ *et al.*, 2017; HASAN & AVAMI, 2018; GARCIA *et al.*, 2019; MAHJOUR & SAHEBI, 2020; MEDINA-SANTANA *et al.*, 2020; Dhanraj *et al.*, 2021); Maximiza a descontaminação da água (MOHAMMADI *et al.*, 2021); Minimiza o descarte de águas residuais (LÓPEZ-DÍAZ *et al.*, 2017); Maximiza os lucros por litro de água utilizado (GARCIA & YOU, 2015); Incentiva o uso de água dessalinizada para irrigação e industrialização (SAIF & ALMANSOORI, 2016); e Incentiva o atendimento às demandas sociais por água na região de estudo (YOU *et al.*, 2021);
- Energia (*energy*):** Gera autossuficiência energética de usinas, biorrefinarias e armazéns (ABBAS *et al.*, 2021); Incentiva o uso de biomassa subutilizada e não alimentar (GUO *et al.*, 2020); Busca a máxima eficiência energética na mesma área

plantada (MARTIN & GROSSMANN, 2015; YOU *et al.*, 2021); Proporciona diversificação da matriz energética (SAIF *et al.*, 2020); Reduz as mudanças climáticas, devido ao aumento do uso de biocombustíveis (LÓPEZ-DÍAZ *et al.*, 2017); e Incentiva o atendimento às demandas sociais por energia na região de estudo (ABDALI *et al.*, 2021; YOU *et al.*, 2021; MOHAMMADI *et al.*, 2021; DOLIENTE & SAMSATLI, 2021);

c) Alimento (*food*): Incentiva o uso de culturas não alimentares e subutilizadas para produção de biocombustíveis (RUBINSIN *et al.* 2020; GUO *et al.*, 2020; DOLIENTE & SAMSATLI, 2021); e atende às demandas sociais por alimentos na região de estudo (MOHAREBI *et al.*, 2017; MARTINEZ-HERNANDEZ & SAMSATLI, 2017; YOU *et al.*, 2021; ABDALI *et al.*, 2021);

d) Terra (*land*): Busca reduzir a expansão indiscriminada de áreas plantadas (LI *et al.*, 2020; YOU *et al.*, 2021); prioriza a escolha dos locais ideais para produção (YOU *et al.*, 2021); e reduz os impactos ambientais do uso da terra (ABDALI *et al.*, 2021).

2.5 O potencial do etanol de 2ª geração no Brasil

Parte do sucesso da aplicação empírica da abordagem *nexus* na cadeia de produção do etanol no Brasil está no aproveitamento dos resíduos agrícolas e industriais para a produção de bioprodutos, especialmente do etanol de 2ª geração (DOS SANTOS E SILVA *et al.*, 2019; GRASSI & PEREIRA, 2019; HAASE *et al.*, 2020; MAHJOUB & SAHEBI, 2020; RODRÍGUEZ CARPIO *et al.*, 2021; VANDENBERGHE *et al.*, 2022), já que uma das premissas do *nexus* é o melhor aproveitamento das biomassas bioenergéticas (Hoff, 2011).

Grassi & Pereira (2019) afirmam que o E2G contribui para sustentabilidade e economia das organizações, visto que a produção do biocombustível possibilita a disponibilização em CBios na bolsa de valores a cada 484 litros produzidos, metade do que é gerado pelo etanol de primeira geração (E1G), o que tem aumentado a atratividade em torno dessa tecnologia.

Rodríguez Carpio *et al.* (2021) defendem que uma produção integrada 1G2G poderia aumentar a produção do etanol na usina em até 24%, o que também contribui

efetivamente para a redução dos Gases de Efeito Estufa (GEE), já que quanto maior a produção de etanol sustentável, menor a pegada de carbono.

Em termos técnicos, a usina integrada 1G2G deve ser projetada para máxima sobra de bagaço (fibra), a matéria-prima do etanol 2G (CORTEZ, 2015; POLTRONIERE *et al.*, 2021).

Poltroniere *et al.* (2021) desenvolveram um modelo de otimização que considera a escolha de variedades de cana para a máxima eficiência em sacarose e fibra energética, com o objetivo de maximizar a produção de sacarose. Para tanto, as variedades de cana-de-açúcar devem ser colhidas o mais próximo possível do pico de maturação. Da mesma forma, deve-se maximizar a produção de fibra de cana-de-energia, considerando que sua produtividade aumenta ao longo do tempo, ou seja, é possível colher após 12 meses e, em seguida, obter um teor de fibra ainda maior.

Os subprodutos sólidos e líquidos da cana de açúcar, como a palha e o bolo de filtro, a vinhaça e o melaço, ricos em material lignocelulósico, tem sido exaustivamente estudados para reutilização na produção de etanol 2G e bioquímicos 3G (VANDENBERGHE *et al.*, 2022).

No contexto brasileiro, as biorrefinarias 2G estão passando por um processo de implementação com alto potencial de crescimento na indústria, devido às vantagens econômicas e ambientais, e ao aumento da produção de bioetanol, sem a necessidade de aumentar as áreas de cultivo de cana-de-açúcar (DIAS *et al.*, 2012; VANDENBERGHE *et al.*, 2022).

A empresa Raízen, maior produtora nacional de derivados da cana, construiu uma planta de produção 2G em 2015, a primeira do Brasil e também pioneira mundialmente. O uso de resíduos lignocelulósicos na empresa possibilitou um aumento de até 50% da produção de bioetanol sem o aumento da área plantada, apresentando um índice de 30 e 97% menos emissões, se comparado ao 1G e à gasolina, respectivamente (RENEWABLES RAÍZEN, 2023).

2.6 Política e governança na indústria sucroenergética

Lázaro & Thomaz *et al.* (2021) consideram crítica a necessidade de pesquisas sobre o envolvimento e influência dos *stakeholders* nas decisões de política e governança energética. Pela análise dos autores, a governança energética pode ser

sistematizada pelo triângulo de governança que considera três principais vértices: Estado, empresas e associações.

Em sua pesquisa sobre a influência política para o *nexus* no cenário do etanol brasileiro, Lázaro *et al.* (2021) afirmam que política e governança são fatores cruciais para o setor de bioenergia brasileiro e para uma aplicação bem sucedida do *nexus*.

Na Figura 11 os temas são colocados em camadas hierarquicamente dispostas, a hierarquia do fluxo demonstra o nível dos temas dentro da estrutura gráfica.

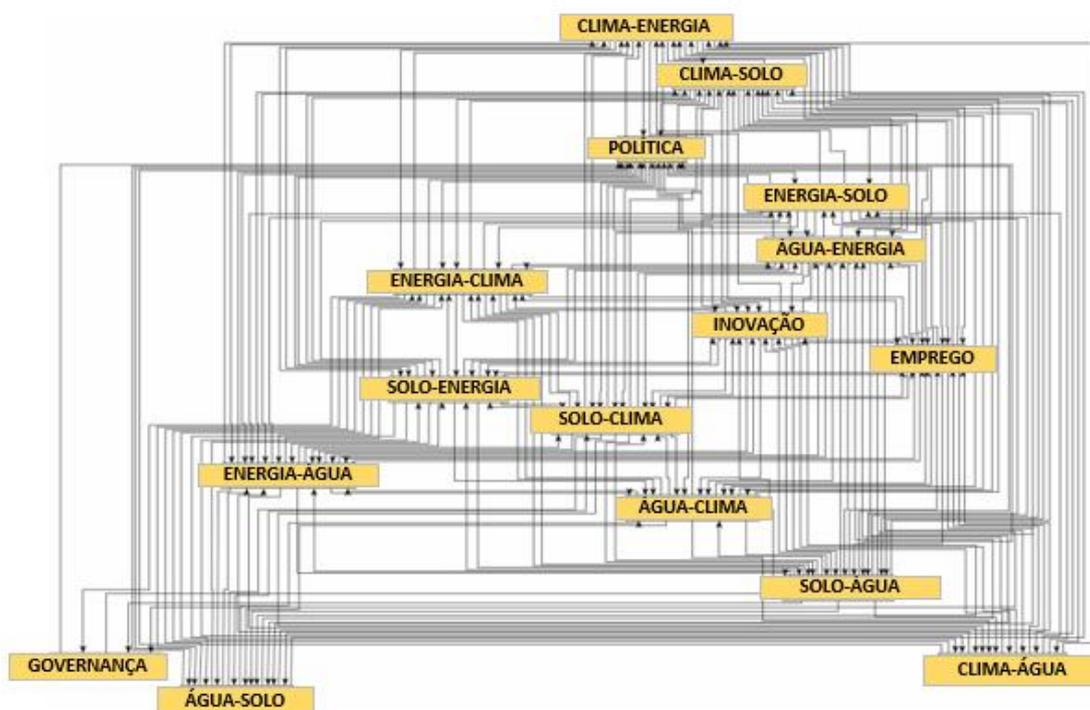


Figura 11 – Uma rede hierárquica dos temas aplicados no caso do etanol brasileiro

Fonte: (LÁZARO *et al.*, 2021, adaptado)

Por exemplo, o nó clima-energia alcança o maior número de nós (temas) dentro da rede, sem a necessidade de se mover na hierarquia, isso mostra que ele se conecta de modo relevante com todos os temas da hierarquia.

Diferentemente, os temas governança e água-energia estão em baixo nível hierárquico, e isso ocorre porque os temas ainda estão distantes das preocupações e medidas que os associam a produção de biocombustíveis.

Observa-se que o termo política aparece como um fator que influencia diretamente todos os outros temas dentro do *nexus*, no quadro de análise hierárquica de temas na Figura 11.

Segundo os autores, isso ocorre pelo fato de os biocombustíveis, em especial o etanol da cana de açúcar, desempenharem um importante papel na agroindústria brasileira, além de as políticas terem o papel de regulamentar a produção, consumo e investimentos na capacidade de processamento.

A partir de uma avaliação crítica dos problemas, níveis de decisão e métodos aplicados a essa cadeia, por meio da meta-síntese, ficam claras as contribuições do *nexus* para a governança nos seguintes aspectos:

- a) Econômico: Maximização de lucros; geração de biocombustíveis para combustão e energia elétrica; potencial para tornar as usinas e biorrefinarias autossuficientes em energia;
- b) Ambiental: Maximização da descontaminação da água, minimização do uso da água na CSB (ODS6); maior eficiência energética na mesma área plantada, redução da dependência de combustíveis fósseis, redução de conflitos energia x alimentação, maior diversificação da matriz energética (ODS 7), redução da emissão de CO₂ devido ao aumento do uso de biocombustíveis (ODS 13), redução da expansão indiscriminada de áreas plantadas, redução dos impactos ambientais do uso da terra (ODS 15);
- c) Social: Segurança alimentar (ODS 2); Segurança energética (ODS 7); e Segurança hídrica (ODS6).

Outro fator crítico para a política energética brasileira aparece em um estudo realizado no Brasil, China, União Europeia e Estados Unidos sobre a bioenergia como captura e armazenamento de carbono (BECCS), apontando que a multipolaridade nos quadros de redução de carbono é crucial para alcançar as metas relacionadas à descarbonização global (FAJARDY *et al.*, 2018).

Nesse sentido, há prevalência de biomassa importada nos modelos em que os países atingem as metas, de modo que os países que possuem pouco potencial bioenergético importariam biomassa dos mais ricos em bioenergia para atingir seus objetivos, nos cenários simulados no estudo (FAJARDY *et al.*, 2018).

Além da sustentabilidade envolvida nesta proposta, a demanda global por biocombustíveis deve continuar crescendo (MUNOZ *et al.*, 2019). Nessa perspectiva,

países como o Brasil, que possuem abundância de biomassa sustentável, são vistos como importantes para o alcance das metas globais (FAJARDY *et al.*, 2018).

2.7 Métodos de otimização

A meta-síntese mostrou a importância das abordagens metodológicas híbridas para melhorar a gestão das cadeias de suprimentos de biocombustíveis, especialmente abordagens que incluam os *stakeholders* no processo decisório. Nesse sentido, essa pesquisa contará com uma abordagem híbrida entre MILP e MCDA (MEYER *et al.*, 2014; YING *et al.*, 2020).

2.7.1 Programação Linear Inteira Mista (MILP)

O método de programação linear inteira mista (MILP) apresenta variáveis de decisão inteiras, a função objetivo e todas as restrições lineares. Os valores das variáveis de decisão são determinados de forma que a função objetivo seja otimizada, enquanto os valores satisfazem as restrições apresentadas (MEYER *et al.*, 2014).

Um problema com variáveis inteira e reais é denominado programação linear inteira mista quando tem a seguinte forma:

$$z = \max cx+dy \quad (1)$$

$$Ax+Dy \leq b \quad (2)$$

$$x \in R_+^n, y \in Z_+^p \quad (3)$$

Neste problema, A é uma matriz ($m \times n$), D é uma matriz ($m \times p$), c é um vetor ($1 \times n$), d é um vetor ($1 \times p$), e b é um vetor ($m \times 1$), representando os parâmetros do problema. Os vetores variáveis são \mathbf{x} e \mathbf{y} com dimensões ($n \times 1$) e ($p \times 1$). R_+^n representa o espaço de vetores com n componentes reais, e Z_+^p representa o espaço de vetores com p componentes inteiras não negativas (ARENALES *et al.*, 2007, pág.162).

Na cadeia de suprimentos dos biocombustíveis, a Programação Linear Inteira Mista (MILP) é identificada como a abordagem de otimização mais amplamente adotada, em virtude de sua adequação a problemas complexos de grande escala, e

além disso é uma forma de validar a otimalidade dos resultados obtidos (MORETTI *et al.*, 2021)

Moretti *et al.* (2021) abordam MILP para otimizar a cadeia de suprimentos de biocombustíveis avançados, por meio de plano de gestão semanal otimizado, considerando o armazenamento, conversão e transportes do bioetanol. Rahemi *et al.* (2020) propuseram o uso da MILP para modelar um projeto ideal para a cadeia de suprimentos do bioetanol, considerando os aspectos da segurança alimentar e locais de cultivo.

O método também foi utilizado por Macowski *et al.* (2020) para otimizar a cadeia de suprimentos do açúcar e do bioetanol brasileiro produzido a partir da cana-de-açúcar, a fim de equilibrar os lucros econômicos e os danos ambientais. Foram avaliados três cenários distintos indicando que, para aproximar a cadeia atual a uma solução equilibrada, é necessário que as usinas de açúcar se tornem híbridas (ou seja, açúcar e bioetanol), além complementar a produção de bioetanol com usinas autônomas.

Outra aplicação do método é a determinação do número instalações de armazenamento e processamento, e as localizações ideais. León-Olivares *et al.* (2020), utilizou com essa finalidade, além de analisar fluxo ideal de biomassa e bioetanol entre as instalações, o modelo minimiza o custo total necessário para a construção e operação da CS do bioetanol e identifica as principais variáveis de decisão.

O planejamento de demanda é outra aplicação do método. No caso de Gumte & Mitra (2019) a demanda internacional de bioetanol foi planejada, a fim de suprir as demandas e melhorar a qualidade do bioetanol. Os resultados apontam que o modelo proposto não só ajuda a conter a crescente demanda convencional de combustíveis fósseis não renováveis e reduzir os custos país, mas também contribui com a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no longo prazo.(GUMTE; MITRA, 2019)

Em trabalhos que mencioam o *nexus*, a modelagem matemática é mencionada como muito útil para abordar questões críticas de sustentabilidade. Tapia *et.al.* (2019) investigaram como os recursos alimentares, energéticos e hídricos (WEF) estão quantitativamente interligados em várias etapas da Cadeia de Valor de Biomassa (CSB), os resultados apontam que, embora a maioria dos estudos atuais esteja focada nos impactos econômicos das CSBs, os aspectos ambientais podem ser

quantificados através dos modelos matemáticos.

Exemplo disso é o trabalho de You *et.al.* (2021), que teve como objetivo identificar a configuração do processo de uma planta de produção de bioetanol e a rede de fornecimento ideal, a abordagem mostrou potencial para atendimento das demandas ambientais do *nexus* e das demandas sociais a um custo 3% menor que o original.

Mohammadi *et.al.* (2021) também utilizaram MILP considerando a abordagem *nexus* para projetar uma cadeia de fornecimento de lodo de esgoto (um resíduo do centro municipal do tratamento de águas residuais), a fim de produzir biogás e distribuir energia, ao passo em que a água é descontaminada.

Os resultados mostram que estabelecer uma usina de tratamento na região estudada não só é viável como também, ajudaria significativamente as autoridades quanto ao melhor uso dos resíduos, e gestão das crises hídricas.

Outro trabalho que utiliza o MILP considerando o *nexus*, é o de Zhong *et.al.* (2018), cujo objetivo foi projetar um modelo de otimização multi-objetivo misto para a fronteira de eficiência da cadeia de fornecimento de matérias-primas e determinar uma cadeia de suprimentos de *switchgrass* (*Panicum virgatum*, da família das gramíneas) que atinja a maior redução do *grey water footprint* GWF ao menor custo, os resultados sugerem que o investimento na redução do resíduos gera uma compensação econômica com outras biomassas.

Nota-se que a abordagem é recorrentemente recomendada para a modelagem de cenários de otimização multiobjetivos em cadeias de produção de biocombustíveis, como pretende fazer este trabalho.

2.7.2 Análise de Decisão Multicritérios (MCDA)

Mardani *et al.* (2017) consideram que não importa o quanto as pessoas compreendam bem um problema energético, ou o quão grande seja a solução, tal decisão somente entrará em vigor se for acordada pelas várias partes envolvidas no processo decisório.

Os autores realizaram uma revisão sistemática e meta análise (PRISMA) sobre a análise de decisão multicritérios (MCDA) para a solução de problemas energéticos, apontando que, pelo modelo convencional de otimização, são considerados critérios únicos a maximização de benefícios e a minimização de

custos, como utilizado em um modelo MILP. No entanto, a abordagem de decisão multicritérios considera todos os fatores inerentes ao problema.

Os autores afirmam que através da análise de decisão multicritérios é possível elucidar características inerentes aos problemas, sustentar o papel dos agentes diretos na tomada de decisão, além de facilitar o alcance de compromissos e decisões coletivas e torná-las mais racionais, explícitas e inteligentes (MARDANI *et al.* 2017)

Exemplo disso é o uso da ferramenta para o planejamento e exploração de fontes de energia renovável. A partir de uma série de critérios qualitativos e quantitativos, Mourmouris & Potolias (2013) buscaram fornecer a quantidade ideal de cada fonte de energia renovável que pode ser produzido na região e sua contribuição para o mix energético.

Nesse sentido, Beeravalli *et al.* (2021) usaram o MCDA para classificar matérias primas para produção de biocombustíveis de segunda geração, em que foram analisadas 106 matérias primas por meio de 20 parâmetros selecionados. A análise se deu por meio de especialistas e métodos estatísticos.

Sahabuddin & Khan (2021) realizaram um estudo de caso com aplicação de sete técnicas de MCDA, empregadas para avaliar a sustentabilidade das tecnologias de geração de eletricidade. Nessa pesquisa, o objetivo era realizar uma comparação entre os métodos e descobrir qual o nível de robustez das técnicas para a gestão energética. Dentre as técnicas mencionadas, a Análise Hierárquica de Processo (AHP) figura em terceiro como técnica mais robusta, atrás apenas do Método de Produto Ponderado (WPM) e Avaliação Proporcional Complexa (COPRAS).

Para a gestão energética em cadeias de suprimentos verdes, a exemplo do etanol, a técnica AHP tem sido recorrentemente recomendada. Isso ocorre porque métodos de ponderação objetiva e combinada melhoram o processo de tomada de decisão, além de terem fácil compreensão teórica e aplicação simples (WANG *et al.*, 2009; GOVINDAN *et al.*, 2015; MARDANI *et al.*, 2017).

3 Metodologia de Pesquisa

Neste capítulo são apresentados a abordagem de pesquisa, o objeto do estudo e delimitação da investigação, o método de pesquisa, os dados considerados na investigação e os instrumentos de coleta de dados e análise de dados.

No que tange a estrutura metodológica, a pesquisa pode ser descrita conforme a Figura 12:

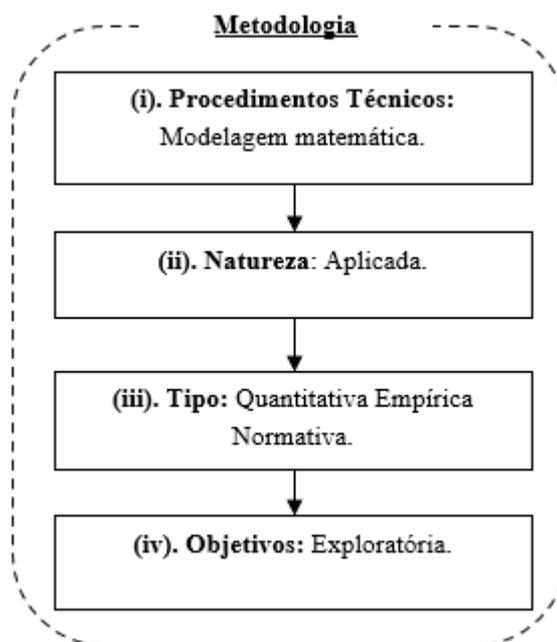


Figura 12 - Estrutura metodológica da pesquisa

Fonte: Miguel et al. (2012)

De acordo com Miguel *et al.* (2012) a modelagem matemática, procedimento técnico que constitui a parte prática dessa pesquisa, envolve dois processos de abstração: a criação do modelo conceitual, com uma descrição verbal das variáveis que explicam o fenômeno e o desenvolvimento do modelo matemático analítico, com uma descrição do sistema em funções matemáticas. Tais passos foram conduzidos nesta pesquisa.

A natureza desta pesquisa é aplicada pois é dirigida à solução de problemas específicos. A pesquisa é do tipo quantitativa empírica normativa, pois baseia-se em modelos matemáticos que prescrevem uma decisão para o problema. Quanto aos objetivos, a pesquisa é exploratória, pois o principal foco é conhecer com profundidade o assunto estudado e gerar soluções (MIGUEL *et al.* 2012).

3.1 Delineamento da pesquisa

A pesquisa foi realizada em duas fases, conforme apresentado na Figura 13. Abdali *et al.* (2021) utilizaram uma estrutura parecida para desenhar a metodologia de seu trabalho, que também utilizou uma abordagem híbrida entre MILP e MCDA para otimizar a cadeia de suprimentos da bioenergia de cana de açúcar no Irã, pela abordagem *nexus WEFL*.

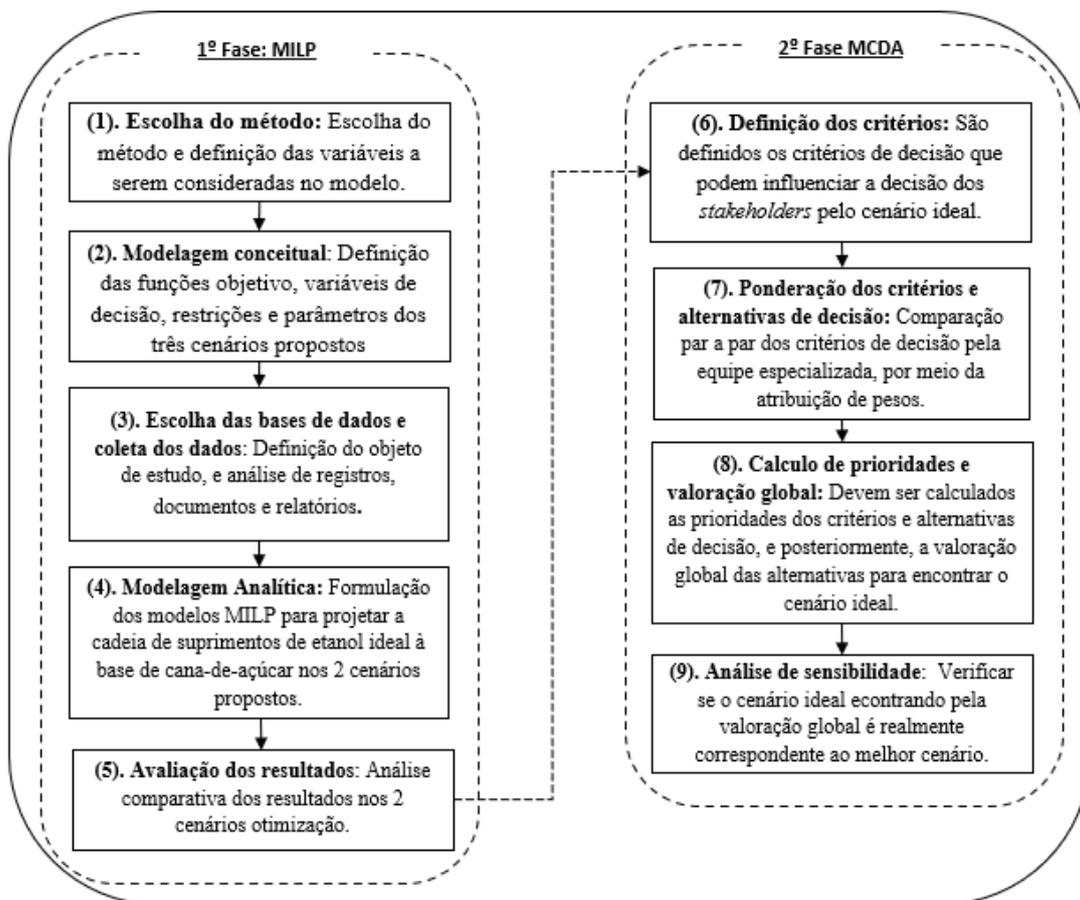


Figura 13 - Delineamento da pesquisa

Fonte: (ABDALI *et al.*, 2021, adaptado)

O delineamento é importante para descrever a ideia da pesquisa, em termos práticos. No caso desta pesquisa, os nove passos para execução plena da pesquisa foram agrupados em duas fases. Na primeira fase, foram construídos os modelos matemáticos para os dois cenários propostos: econômico e ambiental. Os resultados de otimização dos dois modelos foram comparados entre si, para, a partir da comparação entre cenários *nexus* e não *nexus*, evidenciar a relevância da abordagem

considerando aspectos econômicos e ambientais. Na segunda fase, os dois modelos serviram como *inputs* para a construção do modelo de decisão multicritérios, por meio do Análise Hierárquica de Processo (AHP).

Os dois cenários foram comparados e avaliados entre si por meio da ponderação dos critérios e comparação das alternativas, a fim de compreender para qual dos cenários o grupo de decisores era mais propenso. Dessa forma, foi possível analisar a resposta e propensão de cada perfil dos *stakeholders* às abordagens sustentáveis como o *nexus*, e a inclusão do E2G na produção.

3.2 Abordagem de pesquisa

A abordagem híbrida constituída pela Programação Linear Inteira Mista e Análise de Decisão Multicritérios (MCDA) foi adotada nessa pesquisa para atender a necessidade de otimizar e de incluir os *stakeholders* na avaliação da cadeia de suprimentos do etanol brasileiro (LÁZARO *et al.*, 2020; LÁZARO *et al.*, 2021). Além disso, a abordagem híbrida mostrou-se apropriada para otimizar a cadeia de suprimentos de cana de açúcar em uma investigação conduzida no Irã, resultando em aumento dos lucros e minimização da emissão de gás carbônico (ABDALI *et al.*, 2021).

A utilização dessa abordagem também foi bem-sucedida com o objetivo de otimizar padrão de cultivo e pecuária, e a utilização da água e energia, para a produção de bioenergia de milho e soja, de forma econômica e sustentável na China (LI *et al.*, 2020). Neste caso, a abordagem mostrou-se capaz de fornecer aos tomadores de decisão a possibilidade de determinar as melhores opções políticas para a água, terra, energia e pecuária na produção de bioenergia; ajudar os decisores a identificar o nível de sustentabilidade dos sistemas agrícolas; e lidar com as incertezas do processo decisório (LI *et al.*, 2020).

Nesta pesquisa, os cenários de otimização foram comparados entre si para evidenciar a relevância da aplicação da abordagem *nexus* na cadeia, buscando alcançar um cenário mais econômico, mesmo levando em consideração as dimensões sustentáveis do *nexus*. Desse modo, enquanto através da modelagem matemática (MILP) foram gerados dois cenários de otimização para a cadeia de suprimentos (econômico e ambiental), com base nas investigações conduzidas por Hasan & Avami (2018), Kostin *et al.* (2018), Macowski *et al.* (2020) e Alherbawi *et al.*

(2021), através do método multicritério de apoio à decisão (MCDA) os cenários foram ponderados pelos decisores, a fim de identificar o cenário a que são mais propensos, conforme propostas desenvolvida por Li *et al.* (2020), Abdali *et al.* (2021) e Kumar *et al.* (2021).

3.3 Objeto de estudo e delimitação da pesquisa

O objeto de estudo deste trabalho é a cadeia de suprimentos do etanol oriundo da cana de açúcar no estado de Goiás. O estado fica na região Centro-Oeste brasileira e atualmente é o segundo maior produtor de cana de açúcar no país, atrás apenas de São Paulo, de acordo o Boletim de Safra 2022/2023 da Companhia Nacional de Abastecimento do Brasil (CONAB, 2022).

A estrutura da cadeia de suprimentos tomada como referência para este estudo é a mencionada por Higgins *et al.*, (2004) e Teixeira *et al.* (2021) envolvendo os estágios de cultivo, processamento, armazenamento, transporte e distribuição. Tal configuração aproxima-se dos objetivos do trabalho pois descreve a cadeia de cana de açúcar brasileira. A Figura 14 descreve essa estrutura.

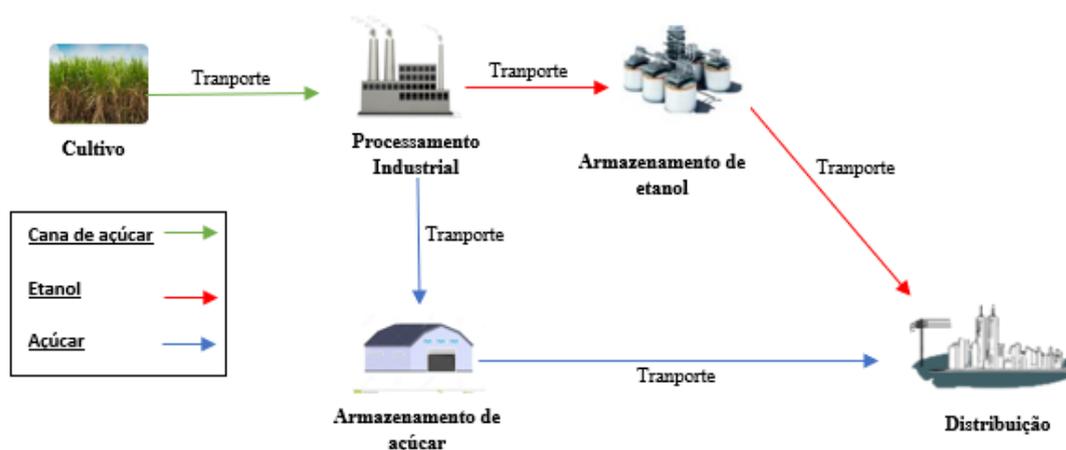


Figura 14 - Cadeia de suprimentos do etanol no Brasil.

Fonte: (ABDALI *et al.*, 2021, adaptado)

O processo descrito na Figura 14 refere-se à análise de Teixeira *et al.* (2021), que foi descrita no tópico 2.4 da revisão de literatura. A fase de cultivo inclui a preparação do solo, a irrigação (dependendo dos fatores climáticos), a divisão da área de cultivo em talhões (áreas menores), o plantio e a colheita. No processamento

industrial a matéria prima é pesada e analisada, para fins de determinação de indicadores de qualidade. Após a análise, a cana é limpa e picada antes de ser moída. Durante a moagem são separados o caldo da cana, concentrado em açúcares, e o bagaço, material fibroso constituído dos nós da cana, para a geração dos subprodutos da cana-de-açúcar. Na fase de armazenamento, o açúcar e o etanol fabricados nas usinas e refinarias são transportados para os armazéns, de onde são distribuídos para o mercado nacional e internacional.

O transporte é uma etapa que liga todos os elos da cadeia, pois após o corte da cana, ela é transportada o mais brevemente do campo para as usinas. Logo após a fabricação do açúcar e do etanol ocorre a etapa de transporte desses produtos para os armazéns ou distribuidores finais. Geralmente, a usina fica próxima à colheita, para minimizar os atrasos, e os tipos de transporte são rodoviários e ferroviários, sendo o rodoviário o mais ágil. A última fase ocorre quando o produto é distribuído. Nessa fase, o fluxo logístico é multimodal com caminhões e petroleiros com capacidades variadas. Para distribuir ao mercado internacional, o produto é transportado para os armazéns dos portos, para então ser enviado.

Além da proposta apresentada na pesquisa de Teixeira *et al.* (2021), outros dois trabalhos que mencionam essa estrutura, e que incluem a abordagem *nexus* foram considerados como referência para a definição dos parâmetros técnicos, econômicos e ambientais a serem analisados na cadeia de suprimentos. O primeiro objetivou a otimização da cadeia de suprimentos da cana de açúcar para bioenergia por meio de locais ideais para produção sustentável, maximização dos lucros e redução do CO₂ pela abordagem *nexus WEFL*. Os resultados apontaram que a cana de açúcar poderia ser plantada em 98% da área disponível, e a venda dos produtos finais conferiu maior lucratividade (ABDALI *et al.*, 2021).

O segundo trabalho realizou uma otimização multiobjetiva pela abordagem *nexus WEFL* na cadeia de suprimentos de etanol de 2^a geração, obtido a partir dos resíduos das culturas agrícolas de arroz, feijão e cevada (YOU *et al.*, 2021). A abordagem mostrou potencial para atendimento das demandas ambientais e sociais a um custo 3% menor que o original. Foram consideradas para aplicação prática e validação do modelo o caso de uma província dividida em 6 regiões na Coreia.

Considerando esta estrutura, para a consecução dos objetivos práticos desta pesquisa, uma empresa do ramo sucroenergético localizada na microrregião de Anápolis, no estado de Goiás, foi selecionada como objeto de estudo.

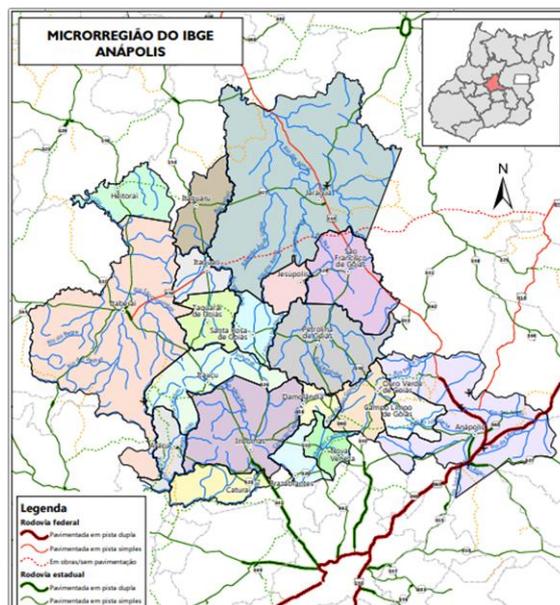


Figura 16 - Microrregião de Anápolis

Fonte: Instituto Mauro Borges – IMB (2021).

A organização sucroalcooleira adotada como objeto desse estudo foi escolhida dentro desta microrregião. Durante a investigação, essa organização exigiu sigilo quanto às suas características e informações geográficas específicas e, por essa razão, foi intitulada Usina B. Tal empresa recebe cana-de-açúcar de três regiões de cultivo vizinhas, nos municípios de Inhumas, Itaberaí e Santa Bárbara, e envia os produtos gerados para o centro de distribuição em Senador Canedo.

3.4 Método de Pesquisa

3.4.1 Modelagem Matemática com Programação Linear Inteira Mista

Comparar cenários de otimização em que haja a aplicação do *nexus* a cenários não *nexus* é uma das formas de justificar quantitativamente os benefícios do sistema centrado no *nexus* (HASAN & AVAMI 2018; KOSTIN *et. al.* 2018; MACOWSKI *et al.* 2020; ALHERBAWI *et al.*; 2021; YOU *et. al.*, 2021). Portanto, para este trabalho, foram gerados dois cenários de otimização para analisar comparativamente os efeitos da implementação da estrutura *nexus* WEFL na cadeia de suprimentos do etanol à base de cana de açúcar: os cenários econômico e ambiental.

3.4.1.1 Cenário Econômico

O Cenário Econômico objetiva o mínimo custo na cadeia de suprimentos do etanol de 1ª geração, considerando as etapas mencionadas anteriormente na caracterização do objeto de estudo, apresentada na Figura 14 (cultivo, processamento, armazenamento e transporte).

O custo a ser minimizado neste caso, é o Custo Anual Total (CAT) da cadeia produtiva. Tal custo é composto pelo Custo Total de Cultivo (CTC) + Custo Total de Processamento (CTP) + Custo Total de Armazenamento (CTA) + Custo Total de Transporte (CTT) (YOU *et al*, 2021; ABDALI *et al*, 2021).

Dessa forma, a *Função Objetivo (FO)* definida para a otimização envolveu minimizar o Custo Anual Total (CAT), conforme apresentado na Equação 4:

$$\text{Minimizar } CAT = CTC + CTP + CTA + CTT \quad (4)$$

O Quadro 1 mostra a notação dos conjuntos e índices que foram utilizados nas equações que compõem o Custo Anual Total (CAT) neste cenário.

Quadro 1 - Notação dos conjuntos e índices do modelo

Conjuntos	Descrição
R	Conjunto de regiões de cultivo $r \in R = \{1,2,3\}$ (Inhumas, Itaberáí e Santa Bárbara)
A	Conjunto de instalações de armazenamento $a \in A = \{1,2\}$ (Armazém de Açúcar, Armazém de Etanol)
P	Conjunto de produtos finais $p \in P = \{1,2\}$ (Açúcar, Etanol 1G)
U	Conjunto de usinas de processamento $u \in U = \{1,2\}$ (Usina de Açúcar, Usina de Etanol)
D	Conjunto de centros de distribuição $d \in D = \{1,2\}$
Índices	
$(r \in R)$	Representa as regiões de cultivo r que pertencem ao conjunto $R = \{1,2,3\}$
$(a \in A)$	Representa as instalações de armazenamento a que pertencem ao conjunto $A = \{1,2,3\}$
$(p \in P)$	Representa os produtos finais p que pertencem ao conjunto $P = \{1,2\}$
$(u \in U)$	Representa as usinas de processamento u que pertencem ao conjunto $U = \{1,2\}$
$(d \in D)$	Representam os centros de distribuição d que pertencem aos conjuntos $D = \{1,2\}$

Fonte: Autora

Para compor o **Custo Total de Cultivo (CTC)** multiplica-se a quantidade de terra utilizada, em hectares, pelo custo operacional unitário de obtenção da cana-de-

açúcar, em reais. O custo operacional unitário é dado pelo custo de preparação do solo + custo de plantio (YOU *et al.*, 2021; ABDALI *et al.*, 2021).

$$CT = \sum_{r=1}^l K_r (L_r + B_r) \quad (5)$$

onde:

K_r Área total de terra (hectare) utilizada na região $r \in R = \{1,2,3\}$ para produzir cana de açúcar;

L_r Custo operacional unitário médio (R\$/hectare) de preparação da terra na área $r \in R$;

B_r Custo operacional unitário médio (R\$/hectare) de plantio na área $r \in R$;

O **Custo Total de Processamento (CTP)** ou industrialização, é dado pelo custo operacional unitário para processar o produto $p \in P$ {Açúcar ou Etanol 1 G} multiplicado pela quantidade de produto $p \in P$ gerada (YOU *et al.*, 2021; ABDALI *et al.*, 2021).

$$CTP = \sum_{p=1}^k Q_p (\lambda_p) \quad (6)$$

onde:

Q_p Quantidade do produto $p \in P$ gerado a partir do processamento na usina (ton ou litros);

λ_p custo unitário de processamento do produto $p \in P$ (R\$/ton ou litros);

O **Custo Total de Armazenamento (CTA)** é dado pelo custo operacional unitário de armazenagem multiplicado pela quantidade de produto armazenado (YOU *et al.*, 2021; ABDALI *et al.*, 2021).

$$CTA = \sum_{i=a}^m E_a (\pi_a) \quad (7)$$

E_a Nível de estoque dos produtos (açúcar, etanol) no armazém $a \in A$;

π_a Custo operacional unitário no armazém $a \in A$ (R\$/Ton e R\$/L);

O **Custo Total de Transporte (CTT)** varia de acordo com a distância e o tipo do produto. Tal custo é composto pelo custo de transporte da cana-de-açúcar da área de cultivo para a usina + o custo de transporte de açúcar e etanol das usinas para os centros de distribuição (YOU *et al*, 2021; ABDALI *et al*, 2021).

$$CTT = \sum_{r=1}^l \sum_{u=1}^g (Q_{ru} * \Omega_{ru} * C_{ru}) + \sum_{u=1}^k \sum_{d=1}^s (Q_{ud} * \alpha_{ud} * C_{ud}) \quad (8)$$

Q_{ru} quantidade de cana de açúcar a ser transportada da área de cultivo região $r \in R$ para a usina $u \in U$;

Ω_{ru} distância entre a área de cultivo $r \in R$ e a usina;

C_{ru} custo do transporte da cana de açúcar entre a área de cultivo $r \in R$ e a usina $u \in U$; (R\$/ton.km);

Q_{ud} quantidade dos produtos (açúcar e etanol 1G) a ser transportada da usina $u \in U$ para o centro de distribuição $d \in D$ (mercado);

α_{ud} distância entre a usina e o centro de distribuição (mercado) (km);

C_{ud} custo do transporte dos produtos (açúcar e etanol 1G) entre a usina e o centro de distribuição $d \in D$ (mercado) (R\$/ton.km);

Restrições às quais o modelo está sujeito: No Cenário Econômico as restrições limitam-se à capacidade de produção e armazenamento.

Restrições de capacidade: A quantidade de biomassa processada deve ser menor ou igual a capacidade de processamento da usina. Além disso, a quantidade de produto final a ser armazenada deve ser menor ou igual a capacidade de armazenamento do armazém (YOU *et al*, 2021; ABDALI *et al*, 2021).

$$\sum_{p=1}^k Q_p \leq C_u \quad (9)$$

$$\sum_{a=1}^m Q_a \leq C_a \quad (10)$$

Q_p quantidade do produto $p \in P$ ser processada na usina;

C_u capacidade de processamento da usina $u \in U$;

Q_a quantidade do produto a ser armazenado no armazém $a \in A$ (ton/safra);

C_a capacidade de armazenamento no armazém $a \in A$ (ton).

Restrições de demanda: A quantidade de açúcar e etanol 1G produzida na usina deve ser maior ou igual a quantidade demandada pelo mercado/sociedade (YOU *et al*, 2021; ABDALI *et al*, 2021).

$$\sum_{p=1}^k Q_p \geq A_p \quad (11)$$

Q_p quantidade de produto $p \in P$ (açúcar e etanol) produzido na usina;

A_p quantidade de produto $p \in P$ (açúcar e etanol) demandando pelo centro de distribuição.

3.4.1.2 Cenário Ambiental

O Cenário Ambiental objetivou o mínimo custo na cadeia de suprimentos do etanol de 1ª e 2ª gerações (1G2G - produção integrada), considerando para a geração do E2G os resíduos de processamento (bagaço) da produção do E1G.

Além disso, buscou-se atender as restrições sustentáveis do *nexus*: limite de uso da água na fase agrícola e industrial, atendimento das demandas energéticas, atendimento das demandas alimentícias (açúcar) e restrição do uso do solo. Foram consideradas as mesmas etapas do cenário econômico: cultivo, processamento, armazenamento e transporte.

Ademais, por se tratar de um cenário que prioriza as questões ambientais, supõe-se que o produtor consiga mais certificações de sustentabilidade em seu

processo produtivo, e desse modo consiga disponibilizar mais Créditos de Descarbonização na Bolsa de Valores, assim, a receita com Cbios foi incluída no cálculo de minimização dos custos.

O custo a ser minimizado, neste caso, é o Custo Anual Total (CAT) da cadeia produtiva, tal custo é composto pelo Custo Total de Cultivo (CTC) + Custo Total de Processamento (CTP1G2G) + Custo Total de Armazenamento (CTA) + Custo Total de Transporte (CTT) – Receita com Cbios. Este modelo de composição de custo foi proposto com base nos trabalhos de You *et al* (2021) e Abdali *et al.* (2021).

A *Função Objetivo (FO)* foi direcionada para minimizar o Custo Anual Total (CAT), conforme indicado pela Equação 12:

$$\text{Minimizar CAT} = (\text{CTC} + \text{CTP1G2G} + \text{CTA} + \text{CTT} - \text{RCbios}) \quad (12)$$

O Quadro 2 mostra a notação dos conjuntos e índices que foram utilizados nas equações que compõem o Custo Anual Total neste cenário, com o acréscimo do Etanol 2G nos produtos $p \in P$.

Quadro 2 - Notação dos conjuntos e índices do modelo

Conjuntos	Descrição
R	Conjunto de regiões de cultivo $r \in R = \{1,2,3\}$ (Inhumas, Itaberá e Santa Bárbara)
A	Conjunto de instalações de armazenamento $a \in A = \{1,2\}$ (Armazém de Açúcar, Armazém de Etanol)
P	Conjunto de produtos finais $p \in P = \{1,2,3\}$ (Açúcar, Etanol 1G, Etanol 2G)
U	Conjunto de usinas de processamento $u \in U = \{1,2\}$ (Usina de Açúcar, Usina de Etanol)
D	Conjunto de centros de distribuição $d \in D = \{1,2\}$
Índices	
$(r \in R)$	Representa as regiões de cultivo r que pertencem ao conjunto $R = \{1,2,3\}$
$(a \in A)$	Representa as instalações de armazenamento a que pertencem ao conjunto $A = \{1,2,3\}$
$(p \in P)$	Representa os produtos finais p que pertencem ao conjunto $P = \{1,2,3\}$
$(u \in U)$	Representa as usinas de processamento u que pertencem ao conjunto $U = \{1,2\}$
$(d \in D)$	Representam os centros de distribuição d que pertencem aos conjuntos $D = \{1,2\}$

Fonte: Autora

Neste cenário, o **Custo Total de Cultivo (CTC)** segue aos mesmos critérios do Cenário Econômico, como mostra a Equação 13 (YOU *et al.*, 2021; ABDALI *et al.*, 2021).

$$CTC = \sum_{r=1}^l K_r (L_r + B_r) \quad (13)$$

onde:

K_r Área total de terra (hectare) utilizada na região $r \in R = \{1,2,3\}$ para produzir cana de açúcar;

L_r Custo operacional unitário médio (R\$/hectare) de preparação da terra na área $r \in R$;

B_r Custo operacional unitário médio (R\$/hectare) de plantio na área $r \in R$;

O **Custo Total de Processamento (CTP)** ou industrialização, é dado pelo custo operacional unitário para processar o produto $p \in P$ {Açúcar, Etanol 1G e Etanol 2G} multiplicado pela quantidade de produto $p \in P$ gerada (You *et al.*, 2021; Abdali *et al.*, 2021). O custo do etanol 2G é composto pelos preços das enzimas + todos os outros custos, que são considerados equivalentes aos do 1G, devido à falta de informações industriais sobre o assunto (FURLAN, 2013; RODRIGUEZ-CARPIO *et al.*, 2021).

$$CTP = \sum_{p=1}^k Q_p (\lambda_p) \quad (14)$$

onde:

Q_p Quantidade do produto $p \in P$ gerado a partir do processamento na usina (ton ou litros);

λ_p custo unitário de processamento do produto $p \in P$ (R\$/ton ou litros);

O **Custo Total de Armazenamento (CTA)** é dado pelo custo operacional unitário de armazenagem multiplicado pela quantidade de produto armazenado, assim como no Cenário Econômico (YOU *et al.*, 2021; ABDALI *et al.*, 2021).

$$CTA = \sum_{i=a}^m E_a (\pi_a) \quad (15)$$

E_a Nível de estoque dos produtos (açúcar, etanol) no armazém $a \in A$;

π_a Custo operacional unitário no armazém $a \in A$ (R\$/Ton e R\$/L);

O **Custo Total de Transporte (CTT)** varia de acordo com a distância e o tipo do produto. Tal custo é composto pelo custo de transporte da cana-de-açúcar da área de cultivo para a usina + o custo de transporte de açúcar e etanol das usinas para os centros de distribuição (YOU *et al*, 2021; ABDALI *et al*, 2021).

$$CTT = \sum_{r=1}^l \sum_{u=1}^g (Q_{ru} * \Omega_{ru} * C_{ru}) + \sum_{u=1}^k \sum_{d=1}^s (Q_{ud} * \alpha_{ud} * C_{ud}) \quad (16)$$

Q_{ru} quantidade de cana de açúcar a ser transportada da área de cultivo região $r \in R$ para a usina $u \in U$;

Ω_{ru} distância entre a área de cultivo $r \in R$ e a usina;

C_{ru} custo do transporte da cana de açúcar entre a área de cultivo $r \in R$ e a usina $u \in U$; (R\$/ton.km);

Q_{ud} quantidade dos produtos (açúcar e etanol 1G2G) a ser transportada da usina $u \in U$ para o centro de distribuição $d \in D$ (mercado);

α_{ud} distância entre a usina e o centro de distribuição (mercado) (km);

C_{ud} custo do transporte dos produtos (açúcar e etanol 1G2G) entre a usina e o centro de distribuição $d \in D$ (mercado) (R\$/ton.km);

A **Receita em Créditos de Descarbonização (RCbios)** no cenário ambiental, obtida pela certificação de eficiência energética-ambiental possibilitada pela aplicação da abordagem *nexus*, pode ser calculada multiplicando a quantidade de etanol 1G e 2G produzido de modo sustentável, pelo valor do crédito na bolsa de valores, como evidencia a seção 2.2.3, que aborda o programa RenovaBio, na revisão de literatura (YOU *et al*, 2021).

$$RCbios = \sum_{p=1}^k (Q_p * Cbio_p) \quad (17)$$

Q_p Quantidade de produto $p \in P$ (etanol 1G e 2G) produzido pela usina (litros);

$Cbio_p$ Preço de venda de 1 Cbio na bolsa de valores;

Restrições às quais o modelo está sujeito: No Cenário Ambiental as restrições envolvem capacidade, demanda do açúcar e etanol (elementos energéticos e alimentícios do *nexus*), uso da água (elemento hídrico do *nexus*), uso do solo (elemento fundiário do *nexus*) e uso dos resíduos industriais (energia) para a produção de E2G.

Restrições de capacidade: A quantidade de biomassa processada deve ser menor ou igual a capacidade de processamento da usina. A quantidade de produto a ser armazenada deve ser menor ou igual a capacidade de armazenamento do armazém. Por fim, a quantidade de terra utilizada deve ser menor ou igual a disponibilidade de terra (YOU *et al*, 2021; ABDALI *et al*, 2021).

$$\sum_{p=1}^k Q_p \leq C_u \quad (18)$$

$$\sum_{a=1}^m Q_a \leq C_a \quad (19)$$

Q_p quantidade do produto $p \in P$ ser processada na usina;

C_u capacidade de processamento da usina $u \in U$;

Q_a quantidade do produto a ser armazenado no armazém $a \in A$ (ton/ano);

C_a capacidade de armazenamento no armazém $a \in A$ (ton);

Restrições de demanda (*energy-food*): A quantidade de açúcar e etanol 1G e 2G produzida na usina deve ser maior ou igual a quantidade demandada pelo mercado/sociedade (YOU *et al*, 2021; ABDALI *et al*, 2021).

$$\sum_{p=1}^k Q_p \geq A_p \quad (20)$$

Q_p quantidade de produto $p \in P$ (açúcar e etanol) produzido na usina;

A_p quantidade de produto $p \in P$ (açúcar e etanol) demandando pelo centro de distribuição;

Restrições de uso da água (water): A soma da quantidade de água disponibilizada na região r deve ser igual à soma da quantidade de água consumida para três finalidades diferentes na mesma região: cultivar a cana-de-açúcar, operar uma usina e atender a demanda da sociedade na região. A quantidade de água utilizada para essas três finalidades deve ser menor ou igual aos limites máximos de utilização (que são baseados em parâmetros médios de uso) (YOU *et al*, 2021).

Água para o cultivo:

$$\sum_{r=1}^l W_r = \beta_r * Q_r \quad (21)$$

W_r Quantidade de água fornecida para cultivar culturas na região $r \in R$;

β_r Quantidade de água para cultivar 1 tonelada de cana de açúcar na região $r \in R$ (l/ton);

Q_r Quantidade total de cana de açúcar cultivada na região $r \in R$ (ton);

Água para o processamento:

$$W_u = \phi_u * X_u \quad (22)$$

W_u Quantidade de água fornecida para operar uma usina;

ϕ_u Quantidade de água necessária para converter 1 tonelada de cana de açúcar na usina (l/ton);

X_u Quantidade total de cana de açúcar processada na usina $u \in U$ (ton);

Água para atender a demanda da sociedade:

$$\sum_{r=1}^l W_{r2} = \lambda_r \quad (23)$$

W_{r2} Quantidade de água consumida pela população da região $r \in R$ (L);

λ_r Disponibilidade de água encanada na região $r \in R$ (L);

Restrições de uso do solo (*land*): A área utilizada para cultivar a cana de açúcar não pode exceder o total de área disponível para o cultivo na região, ou seja, o modelo restringe a compra ou arrendamento e mais terras para atender a demanda do mercado (YOU *et al*, 2021; ABDALI *et al*, 2021).

$$\sum_{r=1}^l K_r \leq \beta_r \quad (24)$$

β_r , disponibilidade de terra na região $r \in R$ (hectares);

K_r quantidade de cana de açúcar cultivada a partir da área $r \in R$;

Com a modelagem conceitual do problema de otimização, concluiu-se a etapa 2 da primeira fase da pesquisa, descrita na seção 3.1.

3.4.2 Análise Hierárquica de Processos (AHP) para a Análise de Decisão Multicritérios (MCDA)

Considerando a importância dos *stakeholders* nas decisões de gestão energética, este trabalho pretende analisar tal influência, considerando a relevância dos decisores que compõem a governança energética na cadeia produtiva do etanol, conforme sugerem Lázaro e Thomaz (2021).

A técnica de Análise Hierárquica de Processos (AHP) foi escolhida para aplicação neste trabalho, por se tratar de uma técnica robusta de análise de decisão, e por satisfazer a alguns dos critérios que o modelo de análise de decisão precisa ter, conforme sustentam Sahabuddin & Khan (2021), como a simplicidade de entendimento pelos *stakeholders*.

Para os autores, o ideal é que as técnicas de MCDA sejam utilizadas em conjunto com outras abordagens, para possibilitar o alcance de todos os critérios. Por exemplo, é recomendado que a técnica AHP seja utilizada junto à Avaliação

Proporcional Complexa (COPRAS), já que esta é uma ferramenta que otimiza a decisão. Neste trabalho, por já trabalhar com uma ferramenta de otimização (MILP), apenas a AHP será utilizada (KUMAR *et al.*, 2021).

A Análise Hierárquica de Processos (AHP) consiste em decompor a decisão nas etapas seguintes: definir o problema ou objetivo de decisão; estruturar a hierarquia da decisão com objetivo, critérios de decisão e alternativas; construir um conjunto de matrizes de comparação par a par dos critérios; ponderar os critérios e usar as prioridades obtidas nas comparações para ponderar as prioridades no nível imediatamente abaixo, até chegar à valoração global das alternativas (SAATY, 2008).

Neste trabalho, buscou-se, por meio análise AHP, analisar a propensão dos *stakeholders* sobre o cenário ideal de produção do etanol (econômico ou ambiental), a fim de atender a uma demanda por pesquisas que incluam os principais decisores da governança energética. Para tanto, foram escolhidos cinco tomadores de decisão de cada uma das áreas escolhidas, totalizando 5 decisores no processo.

Por fim, após encontrar o cenário ideal obtido por meio da valoração global das alternativas, foi realizada uma análise de sensibilidade para saber se o cenário dado como ideal correspondia de fato ao melhor cenário, conforme os critérios do decisor (GARFÌ *et al.*, 2011).

3.4.2.1 Construção da hierarquia de decisão

Na construção de hierarquias, deve-se incluir detalhes relevantes suficientes para representar o problema da forma mais completa possível. É importante ainda considerar o ambiente que envolve o problema, identificar as questões ou atributos que devem contribuir para a solução e quem são os participantes associados ao problema (SAATY E VARGAS, 2012).

Na AHP a tarefa de estabelecer prioridades exige que os critérios, os subcritérios, as propriedades ou características das alternativas sejam comparados entre si em relação aos elementos do nível superior. Desse modo, para solucionar um problema com a AHP, deve-se construir uma hierarquia de elementos de decisão inter-relacionados, em uma estrutura hierárquica semelhante a uma árvore genealógica, como apresentado na Figura 17.

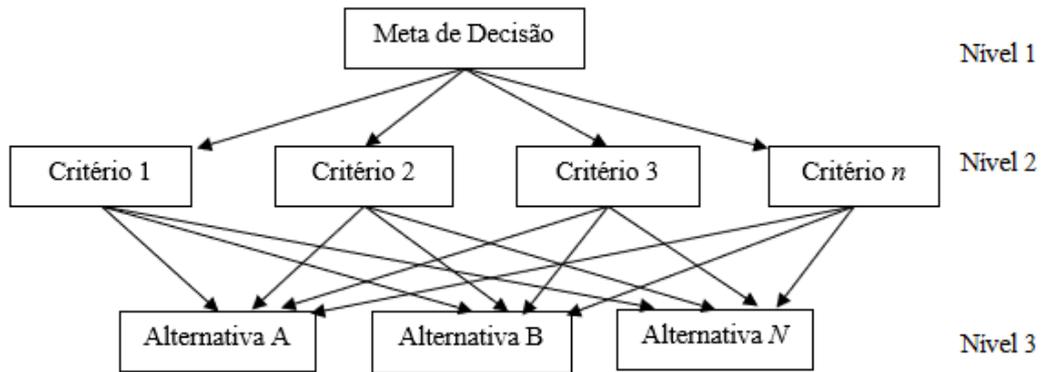


Figura 17 - Árvore hierárquica de Saaty

Fonte: (SAATY & VARGAS, 2012, adaptado)

A decisão deve, portanto, ser estruturada em três níveis: No topo o objetivo de decisão, no segundo nível os critérios e subcritérios, e no terceiro nível as alternativas a serem avaliadas.

Na Figura 18 é apresentado como a árvore de decisão desta pesquisa foi construída.

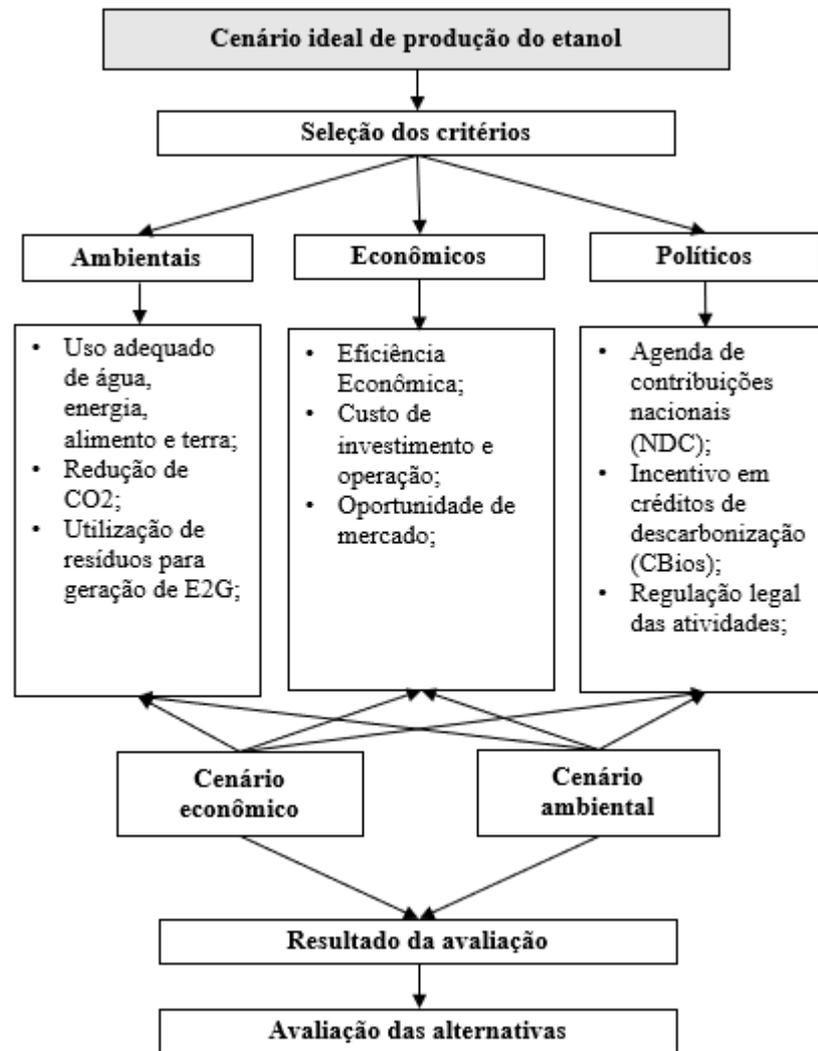


Figura 18 - Fluxograma da árvore de decisão AHP

Fonte: (ŠTREIMIKIENE *et al.*, 2016, adaptado)

Na figura 18 é possível observar as três principais etapas no processo de decisão: definição dos critérios e ponderação, ponderação das alternativas dentro de cada critério e comparação das alternativas e resultado.

Nesta árvore, o nível 2 da hierarquia é composto por critérios e subcritérios. Os critérios primários são os ambientais, econômicos e políticos, e dentro de cada um deles existem três critérios secundários. A seção 3.4.2.2 esclarece como foram definidos tais critérios.

3.4.2.2 Definição dos critérios

Os critérios foram definidos com base na literatura, em que Buyiukozkan *et al.* (2018) desenvolveram um modelo de análise de decisão multicritério, utilizando

entre as técnicas o AHP, cujo objetivo era realizar uma escolha assertiva sobre qual tipo de energia renovável gerar para atender aos critérios propostos no ODS nº7. Esta ODS busca garantir energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos. Dessa forma, os autores desenvolveram critérios ambientais, econômicos, tecnológicos e sociopolíticos, com subcritérios que visam atender a esse objetivo.

No Quadro 3 encontram-se as descrições conforme as referências que foram utilizadas para definir os critérios de avaliação.

Quadro 3 - Critérios de decisão (continua)

Critérios	
Aspectos ambientais(C1)	Priorizam alcançar a meta de geração energia limpa e a segurança energética, reduzir a emissão de CO ₂ , reduzir o consumo de recursos hídricos, aumentar a segurança alimentar e reduzir os impactos no uso da terra (BÜYÜKÖZKAN <i>et al.</i> , 2018; NAÇÕES UNIDAS, 2020).
Aspectos econômicos(C2)	Priorizam a redução de investimentos e custos de produção e manutenção das unidades produtoras, de modo que os projetos de geração de etanol sejam rentáveis, além de buscar um mercado competitivo para a venda dos produtos (BÜYÜKÖZKAN <i>et al.</i> , 2018).
Aspectos políticos(C3)	Priorizam a diversificação da matriz energética nacional a partir da atuação das unidades produtoras do Estado de Goiás, tornando-a mais aderente com as prioridades nacionais (BÜYÜKÖZKAN <i>et al.</i> , 2018).
Subcritérios	
Ambientais (C1)	Descrição
Uso adequado de água, energia, alimento e terra	Água: Compreende o consumo mínimo de água em toda a cadeia de produção do etanol e o mínimo descarte de águas residuais (ODS6). Energia: Representa o aumento da autossuficiência energética de usinas, biorrefinarias e armazéns, a eficiência energética na mesma área plantada e a diversificação da matriz energética nacional (ODS 7). Alimento: Compreende o alcance da segurança alimentar e promoção da sustentabilidade por meio do incentivo ao uso de culturas não alimentares e subutilizadas, como a palha e o bagaço, para produção de etanol de 2ª geração e energia (ODS 2). Terra: Compreende a redução dos impactos ambientais no uso da terra, e da expansão indiscriminada de áreas plantadas, além da busca por locais ideais para produção (ODS 15) (NAÇÕES UNIDAS, 2021).
Utilização de resíduos para geração de E2G	Compreende a utilização de resíduos para a produção do etanol de segunda geração, aumentando a produtividade por área plantada (NAÇÕES UNIDAS, 2021).
Redução de CO ₂	Compreende a redução da emissão de CO ₂ com o aumento do uso de biocombustíveis (ODS 13) (BÜYÜKÖZKAN <i>et al.</i> , 2018; NAÇÕES UNIDAS, 2021).
Econômicos (C2)	
Eficiência econômica	Representa o retorno sobre o investimento, a lucratividade que o produtor pode alcançar no processo produtivo do etanol (ŠTREIMIKIENE <i>et al.</i> , 2016).

Quadro 4 - Critérios de decisão (conclusão)

Econômicos (C2)	
Custos de investimento e operação	Compreende todos os custos relacionados com a compra de equipamentos, instalações tecnológicas, tecnologias de conversão, além dos custos com mão de obra, insumos e produção para a operação e distribuição na cadeia de suprimentos do etanol (WANG <i>et al.</i> , 2009).
Oportunidade de mercado	Representa a valorização do produto no mercado, isto é, o etanol produzido deverá ser vendido quando o retorno for satisfatório, e não necessariamente conforme a demanda, de modo que pode ficar armazenado até que chegue ao preço adequado (BÜYÜKÖZKAN <i>et al.</i> , 2018).
Políticos (C3)	
Agenda de contribuições nacionais (NDC)	Representa os acordos voluntários em consonância com as prioridades nacionais, a exemplo da agenda de contribuições nacionais. Tais medidas versam sobre aumentar a produção sustentável de biocombustíveis e diversificar a matriz energética nacional, a fim de reduzir a emissão de carbono em 37% até 2025 e 43% até 2030, tomando por base o ano 2005 (BÜYÜKÖZKAN <i>et al.</i> , 2018).
Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)	Compreende o suporte e incentivo de instituições governamentais para a produção sustentável, como os créditos de descarbonização (CBios), que podem ser disponibilizados na bolsa de valores pelos produtores de etanol, à medida em que atestam a sustentabilidade do processo produtivo (ŠTREIMIKIENE <i>et al.</i> , 2016).
Regulação legal das atividades	Designa que as atividades do processo produtivo devem estar em acordo com as regulamentações legais estipuladas pelo Estado, a exemplo do limite de água por região, modo de colheita e tipo de fertilizante (ŠTREIMIKIENE <i>et al.</i> , 2016).

Fonte: Autora

Outro trabalho que forneceu base para a formulação do Quadro 3 foi o de (ŠTREIMIKIENE; ŠLIOGERIENE; TURSKIS, 2016), que também considerou os aspectos ambientais, econômicos, tecnológicos e sociopolíticos para a definição dos critérios que ajudariam na escolha dos tipos de tecnologias de geração de eletricidade ideais para a Lituânia, como nuclear, biomassa, hídrica entre outras.

3.4.2.3 Cálculo dos pesos dos critérios

Após a hierarquização do problema inicia-se a fase de avaliação, com a comparação par a par entre os critérios, e entre os subcritérios. Por meio dessa avaliação serão determinadas as importâncias relativas de cada critério, também conhecidas como pesos (SAATY E VARGAS, 2012).

Para fazer as comparações, é necessária uma escala de números que indique quantas vezes mais importante ou dominante um elemento é sobre outro elemento,

em relação ao critério ou propriedade a que estão sendo comparados (SAATY, 2008).

A Tabela 4 apresenta a escala fundamental de julgamento de Saaty & Vargas (2012) para ponderação dos pesos de cada critério, utilizada para atribuir pesos aos critérios de decisão adotados neste trabalho.

Tabela 5 - Escala fundamental de julgamento de Saaty & Vargas (2012)

Intensidade	Definição	Explicação
1	Importância igual	As atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância fraca de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida em relação à outra e sua dominância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorecendo uma atividade em relação à outra é do mais alto grau de certeza
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Quando é necessária uma condição de compromisso

Fonte: (SAATY & VARGAS, 2012)

Para cada comparação em pares entre dois critérios é dado um valor de 1 (igual importância) a 9 (extrema importância).

Cada critério deve ser comparado aos outros pela equipe especializada. Os dados para a comparação são exibidos em uma matriz. A construção da matriz de comparação é o primeiro passo para o cálculo dos pesos.

Os resultados das comparações devem ser apresentados na seguinte forma matricial:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{21}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{a_{n1}} & \frac{1}{a_{n2}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

atendendo às condições:

$$\text{a) } a_{ij} = \alpha \quad \text{b) } a_{ji} = \frac{1}{\alpha} \quad \text{c) } a_{ij} = 1$$

onde:

a_{ij} = comparação paritária entre os critérios i e j ;

α = valor de intensidade da importância (GRANEMANN E GARTNER, 1998).

Por se tratar de uma decisão em grupo a matriz será preenchida pela média geométrica das avaliações para a par de todos os decisores, de acordo com a fórmula:

$$a_{ij} = \sqrt[n]{a_{ij1} \times a_{ij2} \times \dots \times a_{ijn}} \quad (26)$$

Utiliza-se a média geométrica porque a média aritmética não possui as propriedades recíprocas inerentes ao AHP. Após preencher a matriz de comparação com as opiniões dos especialistas, o segundo passo para calcular os pesos é normalizar os valores, dividindo cada elemento da matriz pela soma total das respectivas colunas (SAATY & VARGAS, 2012).

O terceiro passo é o cálculo do autovetor W , que busca considerar a média aritmética dos valores dos critérios da matriz dada e determinar a participação de cada critério no valor total do objetivo de decisão, expondo os pesos relativos para os critério e subcritério analisados. É importante considerar também, o cálculo de consistência do autovetor, onde o W_i é um autovetor da matriz dada e λ_{max} é o maior valor próprio da matriz de comparação por pares. Portanto, o λ_{max} é o somatório do produto de cada elemento do W pelo total da respectiva coluna da matriz original, como mostram as equações:

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \quad (27)$$

$$\lambda_{max} = \frac{W_{,1}}{w_1} + \frac{W_{,2}}{w_2} + \dots + \frac{W_{,n}}{w_n} \quad (28)$$

A resolução da matriz A resulta no autovetor de prioridades, que expressa as importâncias relativas de cada critério, ou pesos (GRANEMANN E GARTNER, 1998).

Após calcular as importâncias relativas dos critérios o quarto passo é analisar a consistências dos julgamentos. Tal análise é feita através de dois cálculos: Índice de Consistência (IC) e Razão de Consistência (RC), como mostram as equações 29 e 30.

$$\text{Índice de Consistência (IC)} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (29)$$

$$\text{Razão de Consistência (RC)} = \frac{IC}{RI} \quad (30)$$

Para uma comparação confiável, o grau de inconsistência tolerável da matriz é de 10% , portanto o resultado da taxa CR deve ser inferior a este valor.

A Razão de Inconsistência (RI) dada por Saaty e Vargas (2012) é apresentada no Quadro .

Quadro 5 - Razão de Inconsistência (RI)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: (SAATY E VARGAS, 2012)

Nesse quadro, n representa a ordem da matriz analisada, enquanto R é a razão de inconsistência aleatória. Como a(s) coluna(s) de quaisquer matrizes de comparação 1×1 ou 2×2 são dependentes, RI é assumido como sendo 0, dessa forma, a divisão por zero na Equação 30 provoca que RC tenda em direção ao infinito, de modo que as matrizes de ordem 1 e 2 são sempre consistentes.

Para esta pesquisa foram desenvolvidas 16 matrizes de comparação par a par, para ponderar todos os critérios e subcritérios e as alternativas dentro de cada critério. Para calcular a quantidade de comparações par a par a ser realizada por cada decisor, a fórmula utilizada é:

$$\frac{n^2 - n}{2} \quad (31)$$

Em que n é a ordem da matriz de comparação. Considerando que a comparação foi feita em quatro matrizes de ordem 3x3 e 12 matrizes de ordem 2x2, foram realizadas 24 comparações por cada decisor, totalizando 120 comparações para a decisão com o grupo de 5 decisores.

3.4.2.4 Instrumento de coleta de dados para a AHP

Para obter as comparações pareadas dos especialistas, foi elaborado um questionário como instrumento de coleta de dados. O instrumento foi testado em um pré-teste, que possibilitou a identificação de melhorias antes da aplicação do

instrumento final. O instrumento piloto aplicado está apresentado no Apêndice 1 e o instrumento final aplicado está apresentado no Apêndice 2.

A aplicação do instrumento piloto foi realizada com um pesquisador da área de economia, que estuda a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar em um estágio pós-doutoral há 2 anos. O pesquisador recebeu o questionário por *e-mail*, com um detalhamento de como deveria ser respondido e foi convidado a: (i) responder e cronometrar o tempo de resposta e (ii) apresentar críticas quanto a consistência do instrumento.

O tempo de resposta foi de 19 minutos. De acordo com o pesquisador, a figura que apresentava a configuração da árvore de decisão mostrou-se pouco intuitiva, e por isso sugeriu uma breve descrição das relações entre os níveis hierárquicos. Além disso, o pesquisador sugeriu uma diferenciação mais clara entre os critérios de decisão e as alternativas, com essa finalidade, uma das soluções foi retirar da análise, a alternativa Cenário Balanceado, que estava gerando confusão no momento da análise.

Após as melhorias, o instrumento final foi aplicado com os especialistas selecionados. Os critérios de seleção e a caracterização dos especialistas são apresentados na seção 3.4.2.5.

Para aplicar o instrumento, os especialistas foram contatados inicialmente via *e-mail*. A comunicação tinha a seguinte estrutura: apresentação dos pesquisadores envolvidos; explanação geral sobre projeto; e encaminhamento, em anexo, de uma carta de apresentação do projeto assinada pelos pesquisadores, com mais detalhes sobre a pesquisa e declaração de que os dados e a identidade dos respondentes seriam mantidos em sigilo. Foi informado ainda que, ao final da pesquisa, um relatório dos resultados seria apresentado.

Além disso, a comunicação solicitava aos respondentes que indicassem o melhor momento em sua agenda para marcar uma reunião, em que o projeto de pesquisa e o instrumento seriam apresentados. Nessa reunião, o respondente poderia escolher entre responder o questionário no momento da reunião, acompanhado pela pesquisadora, ou posteriormente, para que enviasse depois, de acordo com a sua disponibilidade.

Após a aplicação do primeiro questionário no próprio *Microsoft Word*, como mostra o Apêndice 2 com as respostas do primeiro decisor, a equipe de pesquisadores optou por fazer uma versão do questionário no *Google Forms*,

ferramenta da *Google* para a criação de formulários *online*. A decisão foi tomada a fim de otimizar o tempo do decisor entrevistado e facilitar o momento de respostas. Os outros 4 questionários foram aplicados por meio dessa ferramenta. A tela inicial do questionário e a primeira avaliação par a par são apresentadas no Apêndice 3.

3.4.2.5 Seleção e caracterização dos especialistas (*stakeholders*)

Foram selecionados *stakeholders* do governo federal com impacto no âmbito nacional para uma análise transversal e completa dos aspectos econômicos, políticos e ambientais da cadeia de suprimentos do etanol de cana de açúcar.

Foram aplicados questionários com especialistas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), órgão que tem por finalidade prestar serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME), na área de pesquisas e estudos sobre o setor energético. Além disso, a ferramenta foi aplicada junto a especialistas da Coordenação de Etanol e Cana de Açúcar do Ministério da Agricultura (MAPA) e da Gerência do Complexo Agroalimentar e de Biocombustíveis do Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES). Ao todo foram 11 pessoas contatadas e 5 responderam ao questionário como mostra a Figura 19.

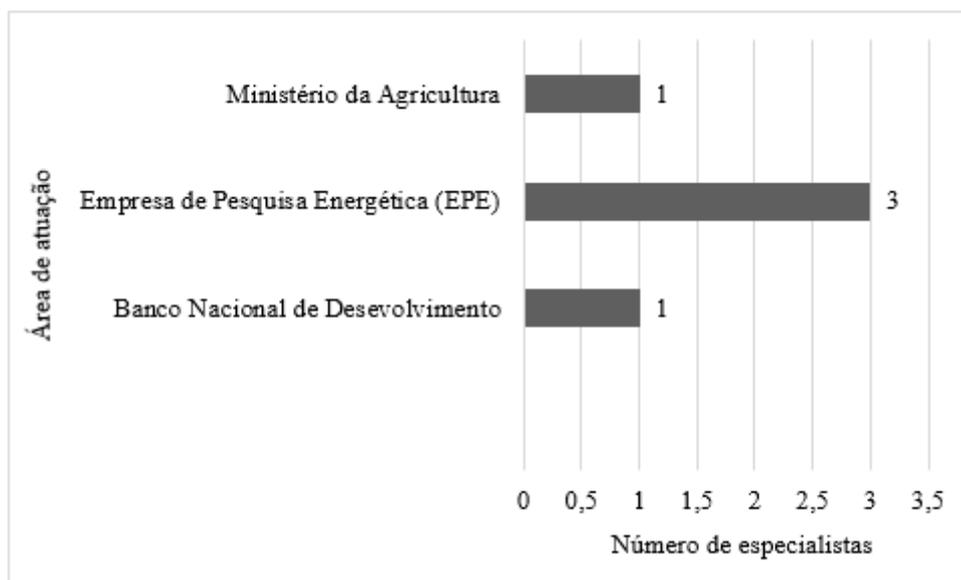


Figura 19 - Número de especialistas por área de atuação

Fonte: Autora

A Figura 20 mostra o tempo de experiência dos especialistas, evidenciando o impacto de suas carreiras na cadeia de produção do etanol.

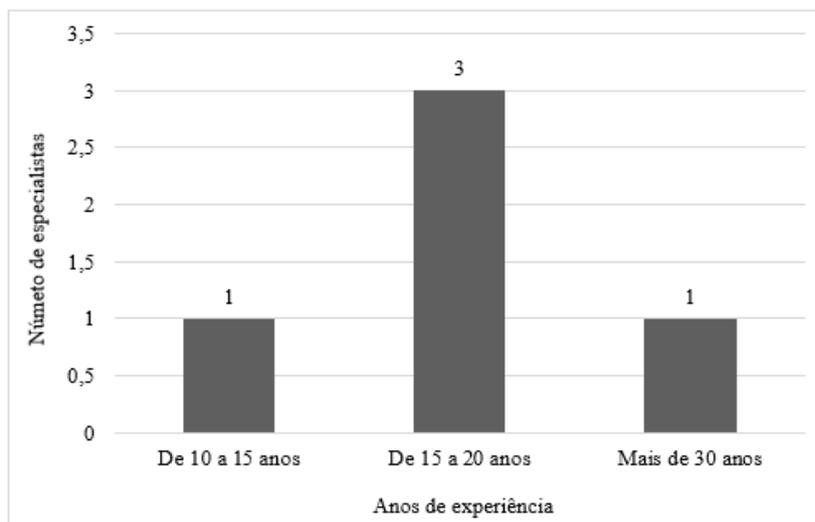


Figura 20 - Tempo de experiência dos especialistas

Fonte: Autora

Além de responder ao questionário, os especialistas foram convidados a expor suas opiniões com base em sua experiência, sobre os cenários de otimização propostos. Tais opiniões são analisadas no tópico de resultados desta pesquisa.

3.5 Dados

A maior parte dos dados foram extraídos de: relatórios e documentos da usina estudada, relatórios nacionais e estaduais, oriundos do Observatório da Cana e Bioenergia (ÚNICA), Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas (CNA-PECEGE), *Site Water Footprint*, Instituto de Água e Saneamento de Goiás e análise da literatura científica na área da pesquisa. Na Tabela 5 são apresentados os dados disponíveis, o período e a fonte.

Tabela 6 - Organização dos dados coletados (continua)

Dados Disponíveis			
Parâmetros (Unidade de medida)		Período	Fonte
Quantidade de etanol 1G produzido(L)	90.379.975,59 litros/ano	2008-2021	Boletins Safras - Usina B
Capacidade processamento de etanol (L)	105.171.840 litros/ano	2021	Boletins Safras - Usina B
Total de bagaço produzido (ton)	312.236,91 tons/ano	2008-2021	Boletins Safras - Usina B
Rendimento de etanol 2G por tonelada de bagaço (L/ton)	120 litros	2013	Furlan et al. (2013)

Tabela 7 -Organização dos dados coletados (conclusão)

Dados Disponíveis			
Parâmetros (Unidade de medida)		Período	Fonte
Capacidade de produção de cana de açúcar em Inhumas (ton)	505.920 ton/ano	2008-2021	Boletins Safras - Usina B
Capacidade de produção de cana de açúcar em Santa Bárbara (ton)	267840 ton/ano	2008/2021	Boletins Safras - Usina B
Capacidade de processamento de cana de açúcar	1.215.200	2021	Boletins Safras - Usina B
Produção total de cana-de-açúcar (Ton)	1.141.915,96 tons/ano	2008-2021	Boletins Safras - Usina B
Demanda histórica de etanol	61.231.125 litros/ano	2008-2021	Boletins Safras - Usina B
Área total utilizada (Ha)	14.881,93 hectares/ano	2008-2021	Boletins Safras - Usina B
Demanda de área nas regiões de cultivo (Há)	10.5333 hectares/ano	2008-2021	Boletins Safras - Usina B
Distância entre a área <i>r</i> e usina (Km)	18 km, 24 km, 37 km	2021	Boletins Safras - Usina B
Distância entre a usina e o centro de distribuição – Senador Canedo (Km)	74km	2021	Boletins Safras - Usina B
Custo de Processamento do Açúcar R\$/ton	R\$ 80,00/ton	2021	Abdali et al., (2021)
Custo de Processamento do Etanol R\$/1G	R\$ 3,07/litros	2021	Boletins Safras - Usina B
Custo de Processamento do Etanol R\$/2G	R\$ 4,81	2021	Furlan et al, (2013); Carpio et al., (2021)
Custo de corte, carregamento e transporte (R\$/ton)	R\$ 41,55/ton	2021	Boletins Safras - Usina B
Custo do transporte do açúcar entre a usina e o centro de distribuição (R\$/ton.km)	R\$ 1,41/R\$/ton/km	2021	Abdali et al., (2021)
Custo do transporte do etanol entre a usina e o centro de distribuição (R\$/1.km)	R\$ 0,01 / R\$/ton/km	2021	Abdali et al., (2021)
Custo para manter 1 tonelada de açúcar armazenada (R\$/ton)	R\$ 36,35/ton	2021	Abdali et al., (2021)
Custo para manter 1000 litros de etanol armazenado (R\$/l)	R\$ 0,036/litro	2021	Abdali et al., (2021)
Preço de venda de 1 CBio na Bolsa de Valores	R\$ 107,62	2023	Observatório da Cana e Bioenergia - UNICA
Quantidade de água para conversão (M ³ /Ton)	21.000 litros/ton	2005	Macedo (2005)
Quantidade de água para cultivar 1 tonelada de cana de açúcar	210.000 litros/ton	2023	<i>Site Water Footprint</i>
Custo unitário de preparação de terra (R\$/ha)	R\$ 2.715,03/ R\$/ha	2021/2022	CNA/PECEGE
Custo unitário de plantio (R\$/Ton)	R\$ 5.112,19 / R\$/ha	2021/2022	CNA/PECEGE
Demanda de água da população na região de Inhumas (L/ano)	48694.51 litros/pessoa/ano	2023	Instituto de Água e Saneamento de Goiás
Demanda de água da população na região de Santa Bárbara (L/ano)	40271.77 litros/ pessoa/ano	2023	Instituto de Água e Saneamento de Goiás
Demanda de água da população na região de Itaberaí (L/ano)	44384 litros/ pessoa/ano	2023	Instituto de Água e Saneamento de Goiás

Fonte: Autora

Tais parâmetros foram considerados suficientes para descrever o sistema produtivo e explicar o fenômeno. Em posse dos dados, a etapa 3 da primeira fase da pesquisa foi concluída.

3.6 Instrumento de coleta de dados

Conforme apresentado na revisão da literatura, 60% dos 40 trabalhos que integraram a meta-síntese utilizaram a Análise Documental como método de coleta de dados, especialmente na análise em relatórios nacionais e internacionais. Isso ocorre porque a maioria das indústrias estudadas ainda não são signatárias da abordagem *nexus* e estão em fase de planejamento.

Nesta pesquisa, os principais instrumentos de coleta de dados utilizados foram a análise em registros, a análise em documentos e a análise em relatórios nacionais. Os dados encontrados por meio desses instrumentos foram utilizados para a modelagem matemática com programação linear inteira mista.

Para a fase 2 da pesquisa, os instrumentos de coleta dos dados foram a entrevista e o questionário, considerando a importância de incluir a opinião dos *stakeholders* por meio da Análise Hierárquica de Processos. Foram entrevistados 5 decisores. Eles ponderaram os critérios de decisão selecionados previamente e assim foram avaliados os cenários ideais na ótica de cada um deles.

3.7 Instrumento de análise de dados

Considerando o caráter quantitativo desta pesquisa, que se baseia em modelos de programação matemática para prescrever uma decisão para o problema, foi utilizada a versão acadêmica do *software* de otimização IBM® ILOG® CPLEX® Optimization Studio – Version 22.1 (IBM, 2022).

O *software* mostrou-se adequado às necessidades da pesquisa, pois usa uma tecnologia de otimização da decisão, a fim de desenvolver e implementar rapidamente modelos de otimização nos negócios, por meio da programação matemática (IBM, 2022). Além disso, tem sido utilizado por pesquisadores brasileiros para a otimização da cadeia de suprimentos da cana de açúcar (FLORENTINO *et al.*, 2020; POLTRONIERE *et al.*, 2021).

Para a Análise de Decisão Multicritérios, o *software Microsoft Excel* mostrou-se adequado para o desenvolvimento da técnica Análise Hierárquica de Processos (AHP), pois fornece os elementos básicos AHP para tomada de decisão, além de incluir formulações de matriz, análise de pares, cálculo de autovetores e determinação da melhor decisão final com base em critérios.

4 Resultados da Programação Linear Inteira Mista (MILP)

Neste capítulo serão apresentadas as análises a partir dos dados coletados, cumprindo os objetivos propostos na dissertação. Foram gerados dois cenários de otimização: Econômico e Ambiental. Tais cenários foram analisados individualmente e posteriormente comparados.

4.1 Análise do cenário econômico de otimização

Otimizar a cadeia de suprimentos do etanol de 1ª geração com o objetivo de minimizar seus custos totais foi o primeiro objetivo da pesquisa. Desse modo, para alcançá-lo, foi iniciada a análise com a modelagem conceitual do problema, conforme o tópico 3.4.1.1.

Após modelar conceitualmente o problema, o modelo foi imputado no *software* IBM® ILOG® CPLEX® Optimization Studio – Version 22.1, na linguagem *Optimization Programming Language (OPL)*. Posteriormente foram criadas as configurações de execução e o modelo foi executado. Como resultado, foram retornados pelo *software* a organização dos dados de entrada e o resultado otimizado para os custos de Cultivo, Processamento, Armazenamento e Transporte.

É importante ressaltar que apesar da modelagem conceitual incluir as variáveis de processamento, armazenamento, e transporte do produto Açúcar, as entradas foram todas zeradas no modelo analítico, já que a Usina B, objeto de estudo desta pesquisa, produz apenas etanol. Além disso, todos os dados imputados no modelo estão de acordo com os dados apresentados na seção 3.5.

Foi realizada uma análise completa do modelo e comparação com os custos antes da otimização, para evidenciar a minimização dos custos. Posteriormente, foi realizada uma análise individual de cada decisão dentro do modelo. Tanto a análise integral como as análises detalhadas de cada etapa da cadeia, são apresentadas a seguir.

4.1.1 Resultado integral do cenário econômico e comparação com o cenário não otimizado

No *software*, iniciou-se a modelagem declarando os parâmetros e variáveis, e os tipos das variáveis, se inteiras (*int*), não inteiras (*float*), ou binárias (*boolean*). O algoritmo completo está no Apêndice 4.

Primeiro, declarou-se como variáveis inteiras (*int*) todos os conjuntos que seriam utilizados no modelo.

Foram consideradas 3 regiões de cultivo: Inhumas, Itaberaí e Santa Bárbara. Portanto, Regiões entrou como um vetor de tamanho 3. A cana de açúcar colhida nestas 3 regiões poderia ser transportada para 2 Usinas de processamento: Usina de açúcar e Usina de etanol. Portanto, Usinas entrou como um vetor de tamanho 2.

Os produtos gerados poderiam ser 2: Açúcar e Etanol. Portanto, Produtos entrou com um vetor de tamanho 2. Os produtos gerados poderiam ser armazenados em 2 armazéns: Armazém de açúcar e Armazém de etanol. Portanto, Armazéns entrou como um vetor de tamanho 2. Por fim, os produtos poderiam ser transportados para dois centros de distribuição: Centro de Distribuição de Açúcar e de Etanol. Portanto, Distribuição entrou como um vetor de tamanho 2.

Posteriormente, foram declarados os parâmetros: Custos, Capacidades e Demandas, para todas as etapas da cadeia. Tais parâmetros foram declarados como *float*, ou seja, números não inteiros.

O próximo passo foi declarar as variáveis de decisão, para as quais buscava-se resposta, como variáveis que deveriam retornar valores inteiros (*dvar int+*). Foram consideradas as seguintes variáveis de decisão: \mathbf{K}_r Quantidade de terra a ser utilizada por cada região $r \in R$; \mathbf{Q}_p Quantidade do produto $p \in P$ gerado a partir do processamento na usina (ton ou litros); \mathbf{E}_a Nível de estoque dos produtos (açúcar, etanol) no armazém $a \in A$; \mathbf{Q}_{ru} quantidade de cana de açúcar a ser transportada da área de cultivo região $r \in R$ para a usina $u \in U$; \mathbf{Q}_{ud} quantidade dos produtos (açúcar e etanol 1G) a ser transportada da usina $u \in U$ para o centro de distribuição $d \in D$ (mercado).

Após declarar as variáveis, a função objetivo foi declarada com o objetivo de minimizar o Custo Anual Total, composto pelos custos de cultivo, processamento, armazenamento e transporte.

O último passo antes de criar a configuração de execução do modelo foi declarar as restrições do modelo. Foram declaradas restrições de capacidade e demanda para todas as etapas do modelo.

A solução para o objetivo do modelo integral, de minimizar os custos anuais totais da cadeia de suprimentos do etanol 1G, foi de um custo de mínimo de R\$ 344.486.962,11, como apresentado na Figura 21, com o resultado completo do modelo.

Solução com objetivo 344.486.962,11		
	Nome	Valor
10	nProdutos	2
10	nRegioes	3
10	nUsinas	2
↔ ¹⁰	Produtos	1..2
↔ ¹⁰	Regioes	1..3
↔ ¹⁰	Usinas	1..2
✓💡	Variáveis de decisão (5)	
📄 ¹⁰	Armazenar	[0 0]
📄 ¹⁰	Plantar	[5491 2706 2336]
📄 ¹⁰	Produzir	[0 61231125]
📄 ¹⁰	TransportarR	[[0 49032] [0 375120] [0 267840]]
📄 ¹⁰	TransportarU	[[0 0] [43940715 61231125]]

Figura 21 - Resultado Integral do Cenário Econômico

Fonte: CPLEX

Para chegar a este custo mínimo, considerou-se os valores apresentados na Figura 20 para as cinco variáveis de decisão.

A solução ótima aponta que o armazenamento deve ser zerado. A quantidade plantada deve ser 5491 hectares em Inhumas, 2706 hectares em Itaberaí e 2336 hectares em Santa Bárbara. A Usina 2 (etanol) deve produzir o suficiente para atender a demanda do mercado ao longo de 1 ano (61.231.125 litros).

A quantidade a ser transportada das áreas de cultivo devem ser:

- De Inhumas para a Usina 2: 49.032 toneladas de cana-de-açúcar;
- De Itaberaí para Usina 2: 375120 toneladas; e
- De Santa Bárbara para a Usina 2: 276.840 toneladas de cana de açúcar, ao longo de 1 ano.

Por fim, toda a produção da Usina 2 deve ser transportada para o Centro de Distribuição de Etanol em Senador Canedo, para atender a demanda do mercado.

Com a finalidade de comparar os resultados da otimização foi realizado o cálculo do Custo Anual Total antes da otimização. A Tabela 6, mostra os custos para o período de 1 ano (1 Safra), conforme os dados coletados, para as etapas de Cultivo, Processamento, Armazenamento e Transporte. Estes custos representam a Usina B estudada, trabalhando em Capacidade Máxima.

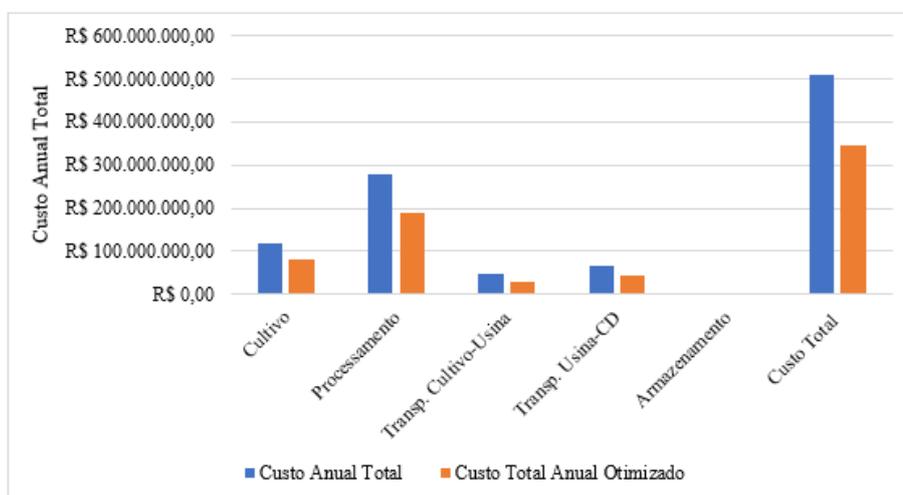
Tabela 8 - Custo Anual Total antes da otimização

Níveis da Cadeia de Suprimentos	Quantidade /Ano	Custo Unitário	Custo Total Anual
Custo Total de Cultivo	14.881,93 hectares	R\$7.827,22/ha	R\$ 116.484.140,13
Custo Total de Processamento	90.379.975,59 litros de etanol 1G	R\$ 3,07/litro	R\$ 277.466.525,06
Custo Total de Armazenamento	35.000.000 litros de etanol 1G	R\$ 0,036/ litro	-
Custo Total de Transporte da área de cultivo para a usina	1.141.915,96 toneladas de cana-de-açúcar	R\$ 41,55/ton	R\$ 47.446.608,13
Custo Total de Transporte da usina para o centro de distribuição	90.379.975,59 litros de etanol 1G	R\$ 0,74/litro	R\$ 66.881.181,93
Total			R\$ 508.278.455,25

Fonte: Autora

Os Custos Anuais Totais trabalhando em máxima capacidade são de R\$ 508.278.455,25. Comparando com o resultado cenário otimizado há tendência de minimização de 32,22% nos custos totais. O Gráfico 1 evidencia a minimização dos custos em todas as etapas da cadeia e no custo anual total.

Gráfico 1- Custos anuais totais antes e depois da otimização no cenário econômico



Fonte: Autora

O gráfico mostra a tendência a minimização dos custos em todas as etapas da cadeia, exceto no armazenamento que foi zerado no modelo.

A seguir apresenta-se uma análise detalhada das decisões em cada etapa da cadeia de suprimentos do etanol, evidenciando as funções objetivo e restrições para cada decisão.

4.1.2 Quantidade de terra a ser utilizada em cada região

Para minimizar os Custos Anuais Totais de Cultivo, buscou-se saber a quantidade ideal a ser plantada em cada região de cultivo.

Na análise foram considerados os parâmetros: Custos totais de preparação da terra + custos totais plantio, por hectare; Disponibilidade de terra em cada região analisada em hectares/ano; e Demanda de área utilizada para o cultivo em hectares/ano.

Diante dos parâmetros, esta etapa do modelo apresentou a seguinte estrutura:

- *Variável de Decisão*: Área total de terra a ser utilizada em cada região;
- *Função Objetivo*: Minimizar o Custo Anual Total de Cultivo;
- *Sujeito às restrições*: A área total plantada deve ser menor ou igual (\leq) a disponibilidade de terra em cada região; A área total plantada deve ser maior ou igual (\geq) que a demanda histórica de utilização da terra.

Foram consideradas 3 Regiões de Cultivo de cana-de-açúcar: (1) Inhumas, (2) Itaberá e (3) Santa Bárbara. A Figura 22 mostra o vetor Regiões de tamanho (*range*) 3, e na coluna valor a capacidade de produção de cana-de-açúcar em hectares por ano.

↓ Regiões (tamanho 3)	↓ Valor
1	7922.7
2	3554.2
3	3405

Figura 22 - Capacidade de produção de cana-de-açúcar em hectares/ano

Fonte: CPLEX

O custo de preparação do solo + plantio por hectare é apresentado na Figura 23, em que o vetor Regiões tem (*range*) 3, e na coluna valor há o custo.

↓ Regioes (tamanho 3)	↓ Valor
1	7827.22
2	7827.22
3	7827.22

Figura 23 - Custos de preparação do solo e plantio

Fonte: CPLEX

Outro parâmetro importante para a quantidade ideal de terra a ser utilizada em cada região é a demanda histórica de uso do solo. A Figura 24 mostra o vetor Regiões de tamanho (*range*) 3, e na coluna valor a demanda histórica de uso do solo, com base em uma análise dos últimos 14 anos de produção.

↓ Regioes (tamanho 3)	↓ Valor
1	5491
2	2706
3	2336

Figura 24 - Demanda histórica de uso do solo

Fonte: CPLEX

Como resultado, o modelo considera que a solução ótima, é aquela em que demanda histórica de uso do solo é plenamente atendida, ou seja, a quantidade média utilizada ao longo dos últimos 14 anos de plantio.

A Figura 25 evidencia a quantidade ideal de hectares a ser plantado nas regiões de (1) Inhumas, (2) Itaberaí e (3) Santa Bárbara.

Variáveis de decisão (1)	
AreaTotal	[5491 2706 2336]

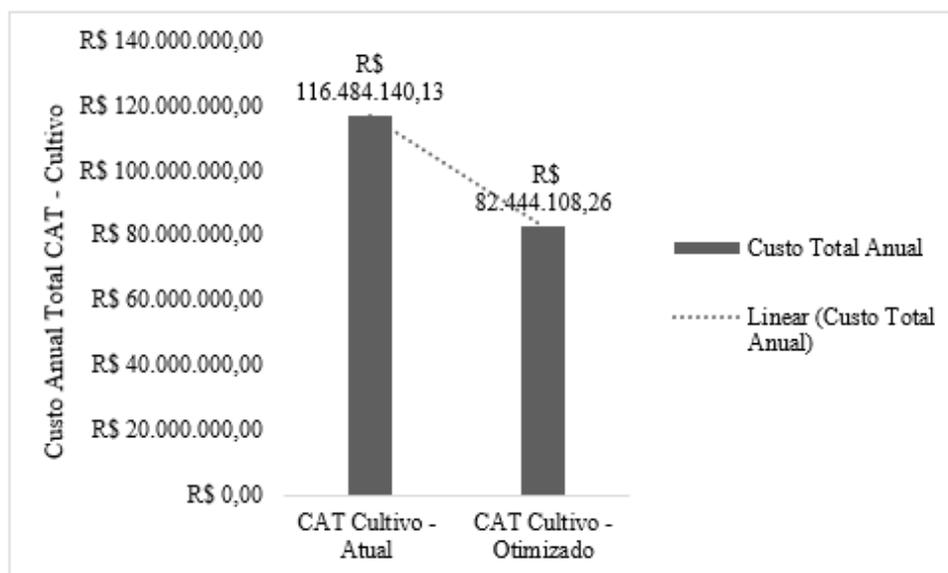
Figura 25 - Resultado: Total de área em hectares a ser utilizada por região

Fonte: CPLEX

Desse modo, considerando o parâmetro custo de preparação + plantio por hectare (R\$ 7.827,22), tem-se que o Custo Anual Total de Cultivo otimizado é de R\$ 82.444.408,26.

Para fins de comparação, foi considerado o Custo Anual Total de Cultivo, com as regiões estudadas trabalhando em máxima capacidade. Nestas condições, há uma tendência a minimização de 29,22% dos custos, como apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Comparação dos custos de cultivo antes e depois da otimização no cenário econômico



Fonte: Autora

Tal minimização ocorre, pois, a média de demanda histórica do mercado é menor do que o pico de área plantada máxima das regiões estudadas. Desse modo, para minimizar o custo, o modelo somente atende a demanda do mercado.

4.1.3 Quantidade de produto a ser gerado em cada usina

O Custo Anual Total de Processamento é dado pela quantidade produto (açúcar ou etanol 1G) processado multiplicado pelo custo unitário de processamento do produto. Para minimizar o Custo Anual Total de Processamento (CATP), buscou-se analisar a quantidade ideal de produto a ser processada em cada usina.

Para tanto, foram considerados os parâmetros: Capacidade de processamento das usinas para os produtos etanol 1G e açúcar (litros ou toneladas/ano); Quantidade de produto demandado pelo mercado (litros ou toneladas/ano); e Custo de processamento dos produtos (R\$/ton ou R\$/litros).

Diante dos parâmetros, esta etapa do modelo apresenta a seguinte estrutura:

- *Variável de Decisão*: Quantidade de produto a ser processado em cada usina;
- *Função Objetivo*: Minimizar o Custo Anual Total de Processamento (CATP) dos produtos;

- *Sujeito às restrições*: A quantidade produzida tem que ser menor ou igual (\leq) a Capacidade de Processamento das Usinas e Maior ou igual (\geq) a Demanda do Mercado.

A seguir apresenta-se a organização dos dados imputados, e em seguida, o resultado desta etapa.

A Figura 26 mostra o vetor Produtos com tamanho (*range*) 2, onde 1 representa o açúcar e o valor 0 a capacidade de processamento do açúcar, e 2 representa o etanol com capacidade de processamento de 105.171.840.

Produtos ...amanho 2)	Valor
1	0
2	105171840

Figura 26 - Capacidade de Processamento das Usinas

Fonte: CPLEX

A Figura 27 apresenta o vetor custos de processamento dos produtos com tamanho (*range*) 2, onde 1 é o custo de processamento de açúcar, e 2 é o custo de processamento do etanol.

Produtos ...amanho 2)	Valor
1	80
2	3.07

Figura 27 - Custos de Processamento do Açúcar e Etanol

Fonte: CPLEX

A Figura 28 apresenta o vetor Demanda do mercado pelos produtos processados com tamanho (*range*) 2, onde 1 é a demanda por açúcar e 2 é demanda por etanol, conforme os dados históricos da Usina B.

Produtos ...amanho 2)	Valor
1	0
2	61231124.28

Figura 28 - Demanda do Mercado por Açúcar e Etanol

Fonte: CPLEX

Para atingir o objetivo de mínimo custo no processamento, o modelo considera que a demanda histórica do mercado deve ser plenamente atendida, desse modo, como mostra a Figura 29, a produção de etanol pela Usina 2 deve ser igual a demanda do mercado.

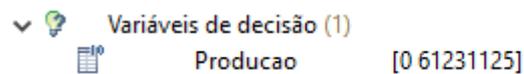


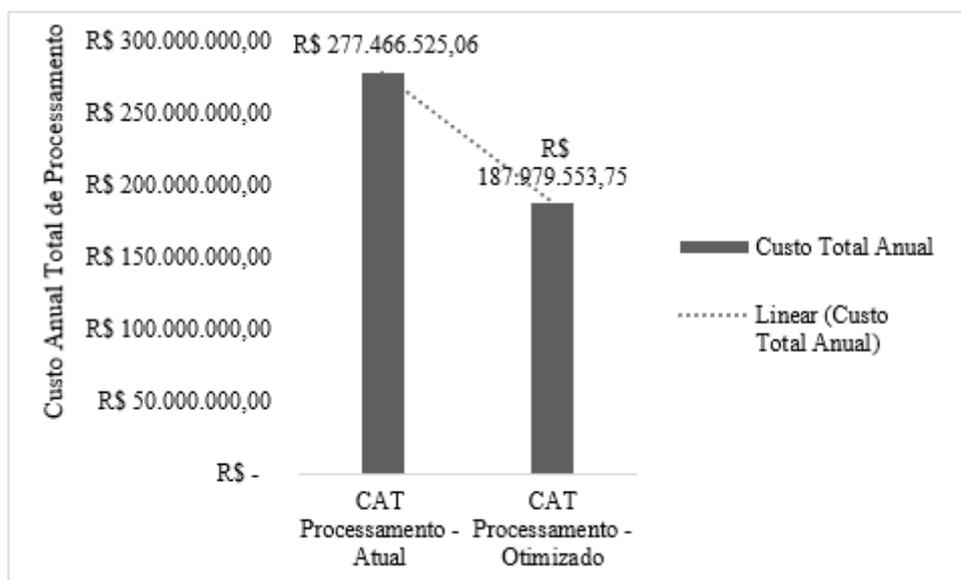
Figura 29 - Resultado: Quantidade ideal de etanol a ser processado nas usinas

Fonte: CPLEX

Desse modo, o mínimo custo no modelo otimizado é de R\$ 187.979.553,75. Esse valor foi comparado com o Custo Anual Total de Processamento na Usina 2, atuando em produção máxima, com base no histórico da Usina B.

O Gráfico 3 mostra a tendência a minimização de custos dentro destas condições, há uma minimização de 32,25% no custo total.

Gráfico 3 - Comparação dos custos de processamento antes e depois da otimização no cenário econômico



Fonte: Autora

Essa minimização expressiva ocorre porque o modelo prioriza o atendimento pleno da demanda do mercado.

4.1.4 Quantidade de produto a ser armazenado em cada armazém

O Custo Total de Armazenamento é dado pela quantidade de produto armazenado multiplicado pelo custo de armazenamento. O objeto de estudo desta pesquisa não trabalha com armazenamento. Portanto, para fins de minimização do custo, o modelo zerou essa variável, como apresentado na Figura 30.

↓ Armazens (tamanho 2)	↓ Valor
1	0
2	0

Figura 30 - Quantidade de produto a ser armazenada

Fonte: CPLEX

4.1.5 Quantidade de cana de açúcar a ser transportada das áreas de cultivo para as usinas

O Custo Anual Total de Transporte nesse modelo é composto por duas partes: Custo de transporte das áreas de cultivo para as usinas, e o custo de transporte das usinas para os centros de distribuição.

Para minimizar o custo de transporte das áreas de cultivo para as usinas, buscou-se analisar a quantidade ideal a ser transportada das regiões de cultivo para as usinas.

Dessa forma, os parâmetros considerados nesta etapa foram os seguintes: Capacidade de produção de cana-de-açúcar em toneladas/ano, de cada região de cultivo analisada; Demanda de processamento das usinas (açúcar e etanol) em toneladas/ano, com base na demanda histórica; Capacidade de processamento (moagem) das usinas em toneladas (ano).

Diante dos parâmetros, esta etapa do modelo apresenta a seguinte estrutura:

- *Variável de Decisão*: Quantidade a ser transportada das Regiões de Cultivo para as Usinas.
- *Função Objetivo*: Minimizar o Custo Anual Total de Transporte (CTT) entre Regiões de Cultivo e Usinas.
- *Sujeito às restrições*: A quantidade transportada tem que ser menor ou igual (\leq) a Capacidade de Produção das Regiões de Cultivo; Maior ou igual (\geq) a

Demanda de Processamento das Usinas; Menor ou igual (\leq) a Capacidade de Processamento das Usinas.

A seguir, apresenta-se a organização dos dados imputados, e, em seguida o resultado.

Foram consideradas as 3 Regiões de Cultivo de cana-de-açúcar: (1) Inhumas, (2) Itaberaí e (3) Santa Bárbara. As usinas recebem biomassa destas 3 regiões. A Figura 31 mostra o vetor Regiões de tamanho (*range*) 3, e na coluna valor a capacidade de produção de cana-de-açúcar em toneladas/ano.

↓ Regiões (tamanho 3)	↓ Valor
1	505920
2	375120
3	267840

Figura 31 - Capacidade de Produção de Cana-de-Açúcar nas Regiões de Cultivo

Fonte: CPLEX

Outra entrada importante no modelo é a capacidade de processamento da Usina em toneladas/ano. A Figura 32, mostra o vetor Usinas de tamanho (*range*) 2, em que a capacidade de processamento da Usina 1 é zerada, por se tratar de uma usina de açúcar. Já na Usina 2 a capacidade de processamento de cana-de-açúcar para o período de 1 ano é 1.215.200 toneladas. Foram consideradas 2 Usinas, sendo a Usina 1 de fabricação do açúcar, e a Usina 2 de fabricação do etanol.

↓ Usinas (tamanho 2)	↓ Valor
1	0
2	1215200

Figura 32 - Capacidade de Processamento de Cana-de-Açúcar

Fonte: CPLEX

Além da capacidade da usina, para esse modelo considerou-se a Demanda de processamento de cana de cana-de-açúcar em toneladas/ano, para chegar a esse valor foi realizada uma média com base no histórico de processamento ao longo de 14 anos.

A Figura 33 mostra o vetor Usinas de tamanho (*range*) 2, em que a demanda de processamento da Usina 1 é zerada, e a demanda de processamento da Usina 2 (etanol) é de 661.991,81 toneladas/ano.

↓ Usinas (tamanho 2)	↓ Valor
1	0
2	691991.84

Figura 33 - Demanda de Processamento das Usinas

Fonte: CPLEX

Por fim, o último parâmetro importante para este modelo trata dos custos de transporte entre as Áreas de Cultivo (3) e as Usinas (2). A Figura 34 mostra os custos de transporte entre as três áreas de cultivo e Usina 2 (etanol).

Regioes (tamanho 3)	Usinas (tamanho 2)	
	1	2
1	0	41.55
2	0	41.55
3	0	41.55

Figura 34 - Custos de transporte entre as áreas de cultivo e as usinas

Fonte: CPLEX

Para atingir essa minimização dos custos, o modelo considera que a demanda histórica da Usina 2 deve ser plenamente atendida. Desse modo, devem ser transportados de (1) Inhumas para a Usina 2: 49.032 toneladas, de (2) Itaberaí para a Usina 2: 375.120 toneladas, e de (3) Santa Bárbara para a Usina 2: 267.840 toneladas ao longo de 1 ano, conforme mostra a Figura 35.

Regioes (tamanho 3)	Usinas (tamanho 2)	
	1	2
1	0	49032
2	0	375120
3	0	267840

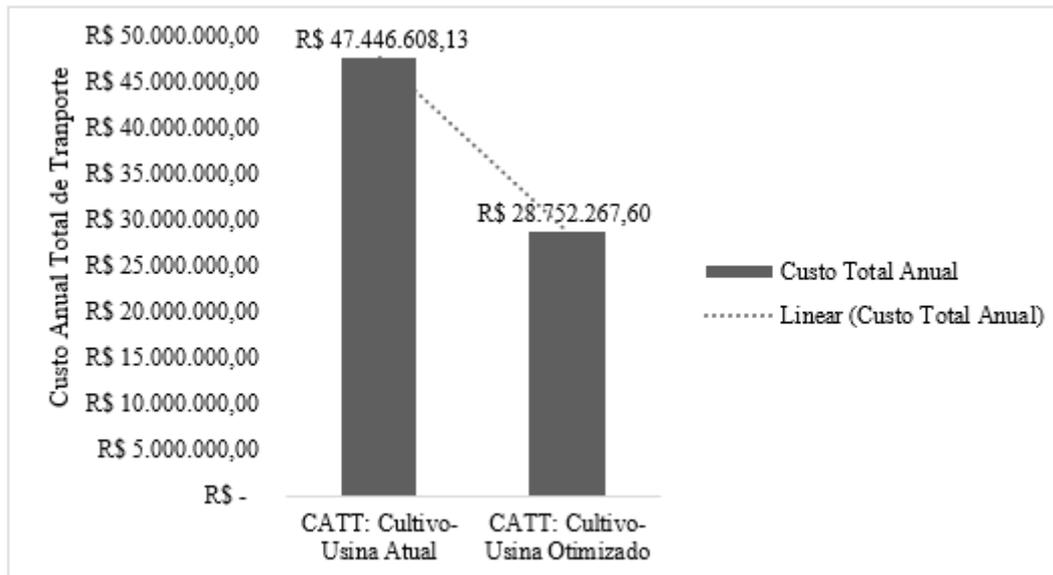
Figura 35 - Quantidade a ser transportada de cada região para cada usina

Fonte: CPLEX

A solução para o objetivo de minimização dos custos totais dentro dessas condições é de R\$ 28.752.267,60. Este resultado foi comparado com o Custo Anual Total de Transporte entre as regiões de cultivo e as usinas, trabalhando em produção máxima, com base no histórico da Usina B.

O Gráfico 4 mostra a tendência para a minimização de custos, nestas condições há uma queda de 39,40 % nos custos.

Gráfico 4 – Comparação do Custo Anual Total de Transporte – Das Usinas para os CD's



Fonte: Autora

O modelo priorizou o atendimento da demanda histórica para alcançar a minimização de custos.

4.1.6 Quantidade produto a ser transportada da usina para o centro de distribuição

Na etapa de transporte, além de analisar a quantidade ideal a ser transportada das regiões de cultivo para as usinas, buscou-se descobrir a quantidade ideal a ser transportada das Usinas para os Centros de distribuição, a fim de atingir o mínimo custo.

Para fazer essa análise foram considerados os parâmetros: Capacidade de Processamento das Usinas (açúcar e etanol), Demanda nos Centros de Distribuição (açúcar e etanol), Custo de Transporte entre as Usinas e os Centros de Distribuição (açúcar e etanol) e a Distância entre as Usinas e os Centros de Distribuição.

Desse modo, considera-se que o produto p (açúcar e etanol1G) pode ser transportado das Usinas, para o Centros de Distribuição, de modo que a quantidade transportada deve ser menor ou igual à capacidade das Usinas, e maior ou igual à demanda do mercado.

Para a entrada no modelo foram consideradas duas Usinas, sendo a Usina 1 de fabricação do açúcar e a Usina 2 de fabricação do etanol. Como há falta de dados sobre a fabricação de açúcar no objeto de estudo, essa entrada ficou zerada.

A Figura 36, mostra o vetor Usinas de tamanho (range) 2, em que a capacidade de produção do açúcar é zerada, e a capacidade de produção do etanol para o período de 1 ano é 105.171.840 litros, conforme os dados apresentados na seção 3.4.1.1.

↓ Usinas (tamanho 2)	↓ Valor
1	0
2	105171840

Figura 36 - Capacidade de processamento das Usinas

Fonte: CPLEX

A Figura 37 mostra o vetor Centro de Distribuição (CD) de tamanho (range) 2, sendo o CD1 de açúcar e o CD2 de etanol. A demanda pelo açúcar é zerada no CD1, e a demanda pelo etanol é de 61.231.124,28 litros no CD2, considerando o histórico de demanda da usina estudada, conforme os dados apresentados na seção 3.5.

↓ Distribuicao (tamanho 2)	↓ Valor
1	0
2	61231124.28

Figura 37 - Demanda nos Centros de Distribuição

Fonte: CPLEX

Para calcular o custo de transporte foram considerados os dados apresentados no trabalho de Abdali *et al* (2021). Neste trabalho, o custo de transporte é apresentado em reais (convertido de *Million Iraqi Dinar-MDQI*)/quilômetros/litros e reais (convertido de *Million Iraqi Dinar-MDQI*)/quilômetros/toneladas. O custo indicado pelos autores foi multiplicado pela distância entre as Usinas e os Centros de Distribuição (Senador Canedo): 74 km. Assim, como mostra a Figura 38, tem-se os seguintes custos de transporte.

Usinas (tamanho 2)	Distribuicao (tamanho 2)	
	1	2
1	104,34	0
2	0	0,74

Figura 38 - Custos de transporte entre as Usinas e os Centros de Distribuição

Fonte: CPLEX

Diante dos parâmetros, esta etapa do modelo apresenta a seguinte estrutura:

- *Variável de Decisão*: Quantidade a ser transportada das Usinas para os Centros de Distribuição.
- *Função Objetivo*: Minimizar o Custo Anual Total de Transporte (CTT) entre Usinas e Centros de Distribuição.
- *Sujeito às restrições*: A quantidade transportada tem que ser menor ou igual (\leq) a Capacidade de Processamento das Usinas, e maior ou igual (\geq) a Demanda dos Centros de Distribuição.

O Custo Anual Total de Transporte (CTT) mínimo a ser atingido dentro dessas condições é de R\$ 45.311.032,5. Para alcançar esse valor, considera-se que quantidade transportada da Usina 2 deve atender plenamente a demanda do Centro de Distribuição de Etanol: 61.231.125 litros/ano, como mostra a Figura 39

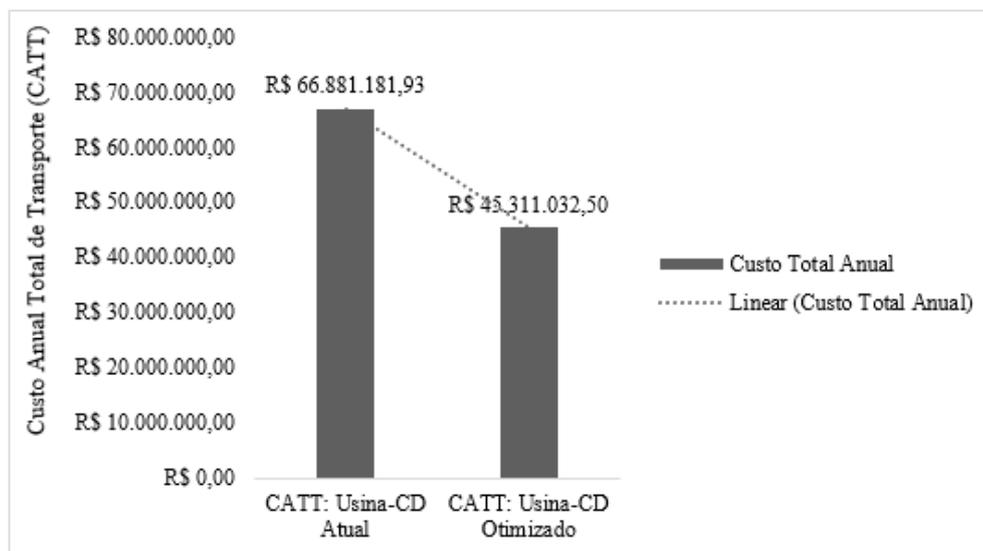
Variáveis de decisão (1)	
Transportado	[[0 0] [0 61231125]]

Figura 39 – Quantidade a ser transportada Usina-CD

Fonte: CPLEX

Para fins de comparação com o custo atual, foi considerado o custo com a Usina 2 (de etanol) trabalhando em sua produção máxima com base na histórico de produção. Desse modo, houve uma minimização nos custos de 32,19%, conforme mostra o Gráfico 5.

Gráfico 5 – Comparação do. Custo Anual Total de Transporte – Das Usinas para os CD's



Fonte: Autora

Para minimizar o custo, o modelo decidiu transportar apenas o suficiente para atender a demanda histórica do centro de distribuição. Desse modo, há uma minimização nos custos de R\$ 21.570.149,43.

Nesse sentido, a primeira hipótese levantada pôde ser confirmada, pois no cenário econômico houve uma minimização dos custos em toda a cadeia de suprimentos.

4.2 Análise do cenário de otimização ambiental

O segundo objetivo da pesquisa foi analisar um cenário de minimização dos custos com a produção integrada 1G2G considerando as variáveis da estrutura *nexus WEFL*.

Para este cenário foram consideradas as mesmas variáveis de decisão do cenário econômico, no entanto, com as restrições de uso dos recursos hídricos e fundiários, além das restrições de atendimento das demandas alimentícias e energéticas.

Outra diferença deste cenário, é a inclusão da produção do etanol de 2ª geração. Por se tratar de uma tecnologia ainda não consolidada na Usina B, objeto de estudo desta pesquisa, considerou-se os dados dos trabalhos de Furlan *et al.* (2013) e

Rodriguez Carpio *et al.* (2021), que estudaram cenários ideais de produção integradas 1G2G no Brasil, para simular o processo integrado de produção.

Nesta análise, foi simulada a utilização de todo o resíduo do processamento do etanol de 1G da Usina B para a produção do etanol 2G. De acordo com Furlan *et al.* (2013), o rendimento de E2G é de 120 litros por tonelada de bagaço. Dessa forma, considerando o bagaço produzido na Usina B e atuando em produção máxima, que foram 312.236,91 toneladas, a capacidade de produção de E2G seria de 37.468.429,56 de litros.

Para calcular o custo de produção do E2G considerou-se a produção integrada com o E1G, como sugerem Furlan *et al.* (2013) e Rodriguez Carpio *et al.* (2021), sendo o E1G responsável pelo baixo custo de investimento do E2G. Desse modo, considerou-se apenas os custos extras de fabricação do E2G, mais o custo da enzima utilizada na conversão. De acordo com esses autores, o custo da enzima é de 0,05 U\$/litro, e os custos extras são de 290,10 U\$/m³. Convertendo para o real brasileiro (BRL – cotação de 30/03/2023), tem-se R\$ 0,26/litros para a enzima, e R\$ 1.487,95/m³ para os custos extras. Ao converter a unidade de medida do custo extra de m³ para litros, tem-se o custo de R\$ 1,49/litro.

Na Usina B, o custo de processamento do E1G é de R\$ 3,07/litro. Somando o custo da enzima mais o custo extra por litros, tem-se o custo do E2G em R\$ 4,81/litro. Estes foram os parâmetros incluídos para a análise da produção de E2G.

A seguir apresenta-se uma análise integral do resultado da otimização no cenário ambiental em comparação com o cenário base. Em seguida, uma análise de todas as etapas conforme o nível de decisão e, posteriormente, uma análise das restrições de uso dos elementos água, energia, alimento e terra no modelo.

4.2.1 Resultado integral do cenário ambiental e comparação com o cenário não otimizado

A solução para o objetivo de minimização dos custos no cenário ambiental apontou para um custo mínimo de R\$ 552.436.743,06 reais na cadeia de suprimentos do etanol 1G2G, considerando os elementos sustentáveis do *nexus*. O algoritmo completo é apresentado no Apêndice 5.

A Figura 40 mostra o resultado integral da otimização no cenário ambiental.

Solução com objetivo 552.436.743,06		
	Nome	Valor
	Populacao	[53259 43622 6057]
	Produtos	1..3
	Regioes	1..3
	Usinas	1..2
	Variáveis de decisão (7)	
	AreaTotal	[5491 2706 2336]
	Armazenar	[0 0]
	Producao	[0 61231125 37468429]
	TransportadoR	[[0 49032] [0 375120] [0 267840]]
	TransportadoU	[[0 0] [0 61231125] [0 37468429]]
	Wp	[0 3.2412e+7]
	Ws	[2.5934e+9 1.7567e+9 2.6883e+8]

Figura 40 - Resultado Integral do Cenário Ambiental

Fonte: CPLEX

Para chegar a este custo mínimo, considerou-se os valores apresentados na Figura 40 para as 5 variáveis de decisão relativas ao custo. As variáveis de decisão Wp e Ws referem-se à utilização de água no processamento nas usinas e pela população nas regiões de cultivo. Esses dados são detalhados na seção 4.2.7.

A solução ótima aponta que o armazenamento deve ser zerado. A quantidade plantada deve ser 5491 hectares em Inhumas, 2706 hectares em Itaberaí e 2336 hectares em Santa Bárbara, assim como no cenário econômico. A Usina 2 (etanol) deve produzir o suficiente para atender a demanda do mercado ao longo de 1 ano (61.231.125 litros de etanol 1G) mais toda a capacidade de produção do etanol 2G (37.468.429 litros de etanol 2G).

A quantidade a ser transportada das áreas de cultivo devem ser:

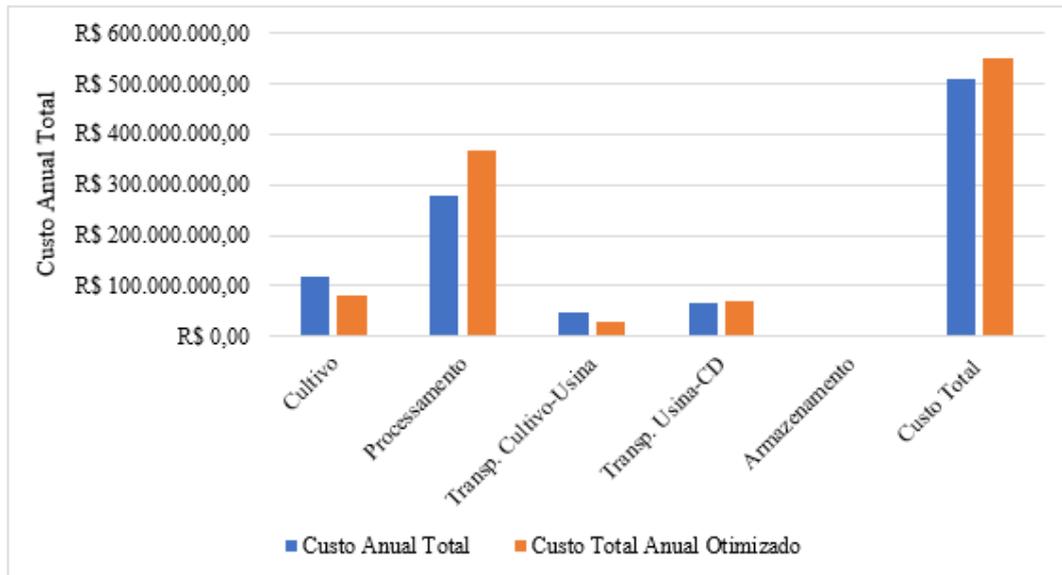
- De Inhumas para a Usina 2: 49.032 toneladas de cana-de-açúcar;
- De Itaberaí para Usina 2: 375120 toneladas; e
- De Santa Bárbara para a Usina 2: 276.840 toneladas de cana de açúcar, ao longo de 1 ano.

Por fim, toda a produção da Usina 2, tanto de etanol 1G, como de etanol 2G deve ser transportada para o Centro de Distribuição de Etanol em Senador Canedo, para atender a demanda do mercado.

Com a finalidade de comparar os resultados da otimização foi realizada a comparação com o Custo Anual Total antes da otimização, assim como foi feito no cenário econômico. Considerando os mesmos custos dispostos na Tabela 6 para o

cenário base, o Gráfico 6 apresenta a comparação entre o cenário base (não otimizado), com o cenário ambiental otimizado.

Gráfico 6 - Cenário Base X Ambiental



Fonte: Autora

Observa-se que o custo de processamento puxa o custo total para cima, dado a inclusão dos custos de processamento do E2G. Manteve-se o custo no cultivo, e no transporte das áreas de cultivo para as usinas. Há um aumento também no transporte da usina para o centro de distribuição, dado o aumento no volume de etanol produzido a ser transportado.

A seguir apresenta-se uma análise detalhada das decisões em cada etapa da cadeia de suprimentos do etanol, evidenciando as funções objetivo e restrições para cada decisão.

4.2.2 Quantidade de terra a ser utilizada em cada região

Como mencionado anteriormente, na fase de cultivo não houve alteração no valor da variável de decisão, para o alcance do custo mínimo no cenário ambiental.

A Figura 41 evidencia a quantidade ideal de hectares a ser plantado nas regiões de (1) Inhumas, (2) Itaberaí e (3) Santa Bárbara.

↓ Regioes (tamanho 3)	↓ Valor
1	5491
2	2706
3	2336

Figura 41 - Total de área em hectares a ser utilizada por região

Fonte: CPLEX

Com base nos resultados apresentados na Figura 40, considerando o parâmetro custo de preparação + plantio por hectare (R\$ 7.827,22), tem-se que o Custo Anual Total de Cultivo otimizado mantém-se em R\$ 82.444.408,26, como no cenário econômico.

4.2.3 Quantidade de produto a ser gerado em cada usina

No caso do Custo Total de Processamento, dado pela quantidade de produto gerado multiplicado pelo custo de processamento do produto, houve o acréscimo do produto etanol de 2ª geração entre os produtos gerados na Usina 2, como apresentado na Figura 42

↓ Produtos ...amanho 3)	↓ Valor
1	0
2	61231125
3	37468429

Figura 42 - Quantidade de produto a ser processada na Usina 2

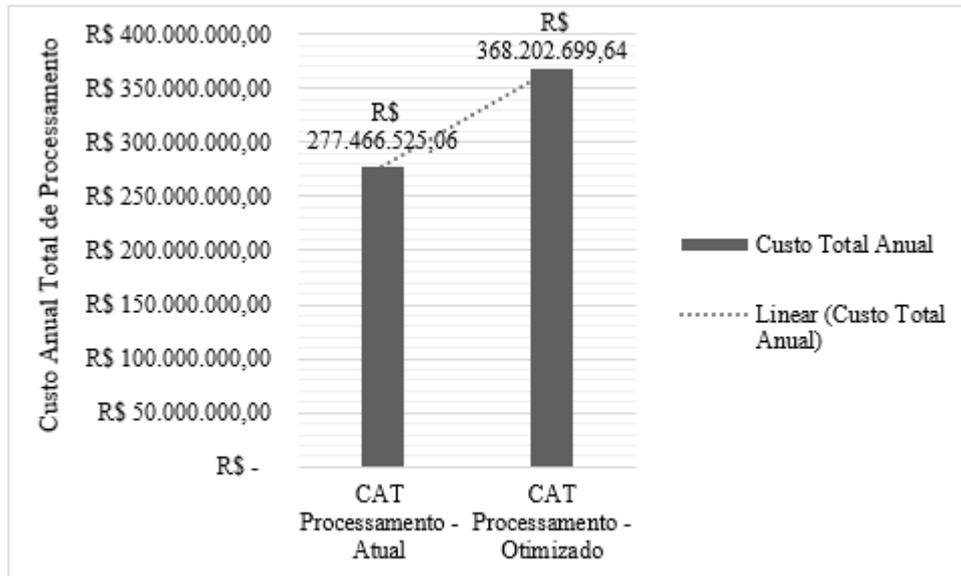
Fonte: CPLEX

O modelo aqui considera a quantidade ideal a ser processada, suficiente para o atendimento pleno da demanda do mercado, produzindo 61.231.125 de litros de etanol e a utilização de todo o bagaço gerado na Usina para a produção do etanol de 2ª geração.

Considerando a utilização de todo bagaço produzido na Usina B, 312.236,91 toneladas, foram gerados 37.468.429 de litros de etanol de 2ª geração, na simulação deste cenário de otimização. A um custo de R\$ 4,81 o litro, houve acréscimo de R\$ 90.736.174,58 nos custos de processamento, se comparado ao cenário base, atuando em máxima capacidade.

O Gráfico 7 mostra essa tendência de aumento nos custos em relação ao cenário base.

Gráfico 7 - Custo Anual Total de Processamento: Cenário Base X Ambiental



Fonte: Autora

Em relação ao cenário base, há um aumento de 32,7% nos custos de produção. Tal aumento era esperado pelo custo extra com a produção do etanol de 2ª geração.

4.2.4 Quantidade de produto a ser armazenado em cada armazém

O Custo Total de Armazenamento é dado pela quantidade de produto armazenado multiplicado pelo custo de armazenamento. O objeto de estudo desta pesquisa não trabalha com armazenamento, transferindo ao mercado toda a quantidade produzida assim que é concluída na usina. Portanto, para fins de minimização do custo, o modelo zerou essa variável, como mostra a Figura 43

Armazens (tamanho 2)	Valor
1	0
2	0

Figura 43- Quantidade de produto a ser armazenada

Fonte: CPLEX

4.2.5 Quantidade de cana de açúcar a ser transportada das áreas de cultivo para as usinas

A quantidade ideal a ser transportada das regiões de cultivo para as usinas manteve-se, já que não há acréscimo de biomassa a ser transportada entre as áreas de cultivo e as usinas. A Figura 44 mostra a quantidade ideal a ser transportada das regiões de Inhumas, Itaberá e Santa Bárbara, para as Usinas.

Regioes (tamanho 3)	Usinas (tamanho 2)	
	1	2
1	0	49032
2	0	375120
3	0	267840

Figura 44 – Quantidade ideal a ser transportada das regiões de cultivo para as usinas

Fonte: CPLEX

Assim, o custo de transporte otimizado em R\$ 28.752.267,60 permaneceu também para o cenário ambiental.

4.2.6 Quantidade de produto a ser transportada da usina para o centro de distribuição

A quantidade ideal a ser transportada das Usinas para os Centros de distribuição, a fim de atingir o mínimo custo, foi outra variável de decisão que sofreu alteração no modelo de otimização ambiental.

Considera-se que o produto p (açúcar, etanol1G e etanol 2G) pode ser transportado das Usinas, para o Centros de Distribuição, de modo que a quantidade transportada deve ser menor ou igual a capacidade das Usinas, e maior ou igual à demanda do mercado.

Para a entrada no modelo foram consideradas duas Usinas, sendo a Usina 1 de fabricação do açúcar, e a Usina 2 de fabricação do etanol de 1ª e 2ª gerações.

Na Figura 45 é apresentado o vetor Produtos de tamanho (*range*) 3, em que a capacidade de produção do açúcar é zerada, a capacidade de produção do etanol 1G para o período de 1 ano é 105.171.840 litros, e a capacidade de produção de etanol de 2ª geração é 37.468.429 litros para o período anual.

↓ Produtos (tamanho 3)	↓ Valor
1	0
2	105171840
3	37468429.5

Figura 45 - Capacidade de processamento das usinas no cenário ambiental

Fonte: CPLEX

Na Figura 46 é apresentado o vetor Produtos de tamanho (*range*) 3 na coluna 1, em que 1 representa o açúcar, o 2 representa o etanol de 1ª geração, e 3 e o etanol de 2ª geração. A demanda pelo açúcar é zerada no 1, a demanda pelo etanol de 1ª geração é de 61.231.124,28 litros, e pelo etanol de 2ª geração de 37.468.429 litros, considerando o uso de toda o bagaço gerado na produção do E1G.

↓ Produtos (tamanho 3)	↓ Valor
1	0
2	61231125
3	37468429

Figura 46 - Demanda nos Centros de Distribuição no cenário ambiental

Fonte: CPLEX

Nestas condições, foram considerados os seguintes custos de transporte entre as Usinas e os Centros de Distribuição, como apresentado na Figura 47.

Distribuicao (tamanho 3)	Usinas (tamanho 2)	
	1	2
1	104.34	0
2	0	0.74
3	0	0.74

Figura 47 - Custos de transporte entre as Usinas e os Centros de Distribuição no cenário ambiental

Fonte: CPLEX

O Custo Anual Total de Transporte (CTT) mínimo a ser atingido dentro dessas condições é de R\$ 73.037.669,96. Para alcançar esse valor, considera-se que quantidade transportada da Usina 2 deve atender plenamente a demanda do Centro de Distribuição de Etanol de 1ª geração, de 61.231.125 litros/ano, mais a demanda pelo etanol de 2ª geração, de 37.468.429 litros/ano, como mostra o resultado da variável de decisão na Figura 48

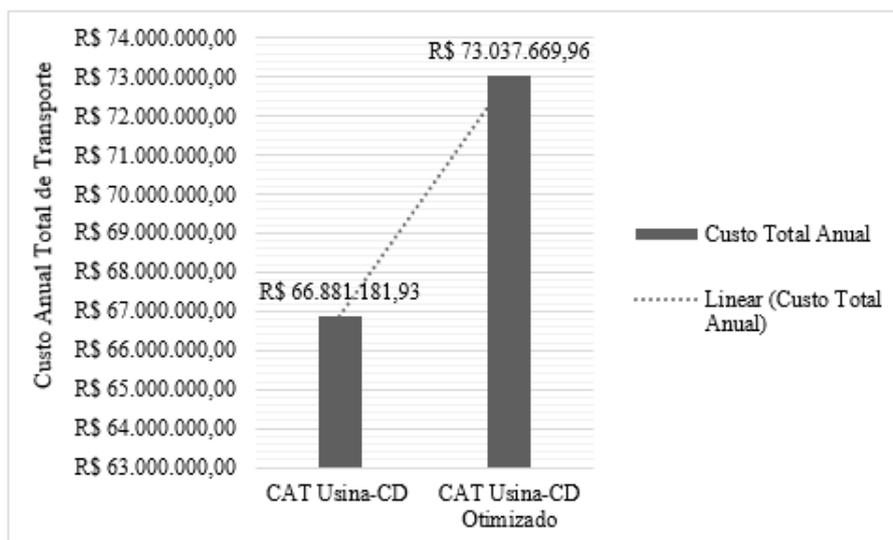
Distribuicao (tamanho 3)	Usinas (tamanho 2)	
	1	2
1	0	0
2	0	61231125
3	0	37468429

Figura 48 - Quantidade a ser transportada das usinas para os centros de distribuição no cenário ambiental

Fonte: CPLEX

O Gráfico 8 mostra essa tendência de aumento nos custos em relação ao cenário base.

Gráfico 8 - Custo Anual Total de Transporte Usina-CD: Cenário Base X Ambiental



Fonte: Autora

Dado o aumento no volume de etanol transportado da usina para o centro de distribuição há um aumento nos custos de transporte nesta etapa da cadeia na ordem de

4.2.7 Uso da água

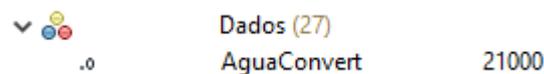
Os elementos do *nexus* foram traduzidos em restrições no modelo matemático. Foram consideradas restrições de consumo da água no cultivo, industrialização e para garantir as demandas sociais na região estudada (*water*),

restrições de área para o plantio da cana (*land*) e restrições para atendimento das demandas do mercado por açúcar (*food*) e etanol (*energy*).

Para o consumo de água, buscou-se restrições para descobrir o valor para as variáveis de decisão: Quantidade ideal de água a ser utilizada para operar uma usina, Quantidade ideal de água para cultivar a cana-de-açúcar e Quantidade ideal de água para atender a demanda da sociedade na região estudada. A quantidade de água utilizada para essas três finalidades deve ser menor ou igual aos limites máximos de utilização, que são baseados em parâmetros médios de uso.

Na restrição de uso da água no processamento, a quantidade ideal de água para operar uma usina no período de 1 ano deve ser menor ou igual a quantidade de cana-de-açúcar processada em toneladas, multiplicado pela quantidade de água necessária para converter 1 tonelada de cana-de-açúcar na usina.

De acordo com Macedo (2005), são 21 m³ ou 21.000 litros para converter 1 tonelada, conforme foi declarado no modelo, e evidenciado na Figura 49.



Dados (27)	
AguaConvert	21000

Figura 49 - Quantidade de água a ser utilizada no processamento

Fonte: CPLEX

A média de demanda de cana-de-açúcar a ser processada na Usina 2 de etanol no período analisado foi 691.991,84 toneladas, como mostra a entrada de dados do modelo na Figura 50.

Usinas (tamanho 2)	Valor
1	0
2	691991.84

Figura 50 - Quantidade de cana de açúcar processada no período

Fonte: CPLEX

Além disso, a quantidade ideal para o processamento deve ser menor ou igual a quantidade de água disponibilizada pela Bacia do Rio Meia Ponte para a Usina B no período de 1 ano. De acordo com dados da Usina B, o limite de água estabelecido para o período de 1 ano é 32.412.000 litros de água. Diante de tais restrições, o modelo retornou que a quantidade ideal de água para processar a cana-de-açúcar na Usina B deveria ser 32.412.000 litros por ano, conforme apresentado na Figura 51.

↓ Usinas (tamanho 2)	↓ Valor
1	0
2	32412000

Figura 51 - Quantidade de água a ser utilizada para o processamento com limite

Fonte: CPLEX

A segunda restrição só permitiu ser utilizado para o processamento, o limite de água imposto para a Usina no período de 1 ano, mesmo que a primeira restrição apontasse para uma necessidade hídrica muito superior, considerando a média de demanda. A Figura 52 mostra que o valor seria muito superior se não houvesse a restrição de disponibilização diária de 88.800 litros para o processamento.

↓ Usinas (tamanho 2)	↓ Valor
1	0
2	14531828640

Figura 52 - Quantidade de água a ser utilizada para o processamento sem o limite

Fonte: CPLEX

Quanto à restrição de uso da água para o cultivo, se houvesse irrigação, a quantidade ideal de água a ser utilizada se daria pela quantidade de cana-de-açúcar produzida em cada região de cultivo, em toneladas no período de 1 ano, multiplicado pela quantidade de água para cultivar 1 tonelada de cana, que de acordo com o *Site Water Footprint* é de 210.000 litros/ toneladas.

No entanto, a Usina B não trabalha com sistema de irrigação, apenas por meio da precipitação. E nos períodos de suspensão, quando as chuvas atrasam, é utilizado a vinhaça, subproduto do processamento do etanol, para fazer a irrigação.

Dessa forma, como mostra Figura 53, a entrada neste modelo foi zerada para a quantidade de água a ser utilizada em cada região de cultivo.

↓ Regioes (tamanho 3)	↓ Valor
1	0
2	0
3	0

Figura 53 - Quantidade de água a ser utilizada para o cultivo

Fonte: CPLEX

A última restrição de uso da água, é a de atendimento das demandas sociais. Busca-se por meio dela definir a quantidade ideal de água a ser disponibilizada para atender a demanda da sociedade na região estudada. O fator social é importante quando se trata de atendimento de demandas do *nexus*.

A quantidade ideal de água disponibilizada para as regiões deve ser menor ou igual a quantidade de água disponibilizada para cada pessoa da região por ano, multiplicado pela população de cada região. Foram consideradas as regiões de Inhumas, Itaberaí e Santa Bárbara na análise. A população de cada região está apresentada na Figura 54.

↓ Regioes (tamanho 3)	↓ Valor
1	53259
2	43622
3	6057

Figura 54 - População das regiões de Inhumas, Itaberaí e Santa Bárbara

Fonte: CPLEX

A quantidade de água disponibilizada por pessoa ao longo do ano em cada região é evidenciada na Figura 55.

↓ Regioes (tamanho 3)	↓ Valor
1	48694.51
2	40271.77
3	44384

Figura 55 - Quantidade de água disponibilizada por pessoa em cada região

Fonte: CPLEX

O modelo retornou que a quantidade ideal a ser garantida para a população de cada região é a apresentada na Figura 56, a seguir.

↓ Regioes (tamanho 3)	↓ Valor
1	2593420908.09
2	1756735150.94
3	268833888

Figura 56 - Quantidade ideal de água a ser utilizada pela população

Fonte: CPLEX

Dessa forma, a demanda hídrica do *nexus* foi atendida no cenário ambiental, a partir dos limites utilização do recurso impostos pelas restrições supracitadas. Não houve análise quanto aos custos de utilização da água.

4.2.8 Uso da energia

O elemento energia foi considerado no cenário ambiental, a partir do aumento da eficiência energética por área plantada com a utilização do bagaço para a produção de etanol de 2ª geração, além da restrição de atendimento da demanda do mercado.

A utilização do bagaço para a produção de etanol de 2ª geração aumentaria a produção em 37.468.429 litros/ano na Usina B, como evidenciado na seção 4.2.6.

Para a restrição de atendimento da demanda, a quantidade etanol produzido pela Usina B foi considerada menor ou igual à capacidade da usina e maior ou igual a demanda do mercado. Tal restrição foi plenamente atendida no cenário sustentável, proporcionando ainda o excedente de produção do etanol de 2ª geração como apresentado na Figura 57.

↓ Produtos (tamanho 3)	↓ Valor
1	0
2	61231125
3	37468429

Figura 57 - Quantidade de etanol a ser produzido para atender a demanda do mercado

Fonte: CPLEX

O formato de produção considerando a geração do etanol de 2ª geração mostrou-se mais oneroso em relação ao cenário base, como evidenciado na seção 4.2.1. Contudo, é mais sustentável.

4.2.9 Uso do alimento

O recurso alimento foi abordado por meio do aumento da segurança alimentar, com a maior eficiência energética por área plantada, possibilitada pelo uso do etanol de 2ª geração. Dessa forma, quanto maior a eficiência energética por área plantada, menor a expansão territorial para biomassa energética, aumentando a segurança da expansão territorial para alimentos.

Além dessa contribuição, analisou-se também a restrição de atendimento da demanda do mercado pelo alimento açúcar. Apesar de todo o modelo teórico e analítico incluir o açúcar, a empresa tomada como objeto de estudo não é produtora do item. Por essa razão, a entrada é zerada no modelo.

Para fins de análise, a restrição considerada para empresas que trabalhem com o produto seria que a quantidade de açúcar produzido na usina teria que ser menor ou igual à capacidade de produção e maior ou igual à demanda do mercado.

4.2.10 Uso do solo

O uso do solo foi abordado por meio do aumento da segurança fundiária, também proporcionado pela maior eficiência energética por área plantada, de modo que, quanto mais etanol produzido por área plantada, menor a expansão territorial para plantio de cana-de-açúcar.

Outra contribuição se deu por meio da restrição de uso do solo, que delimitou que a quantidade de solo utilizada deveria ser menor ou igual a capacidade de cultivo das regiões estudadas e maior ou igual à demanda para utilização no período de 1 ano.

A Figura 58 mostra a demanda de utilização do solo nas regiões estudadas: Inhumas (1), Itaberáí (2) e Santa Bárbara (3).

Regioes (tamanho 3)	Valor
1	5490.03
2	2705.17
3	2335.61

Figura 58 - Quantidade ideal de terra a ser utilizada em cada região produtora

Fonte: CPLEX

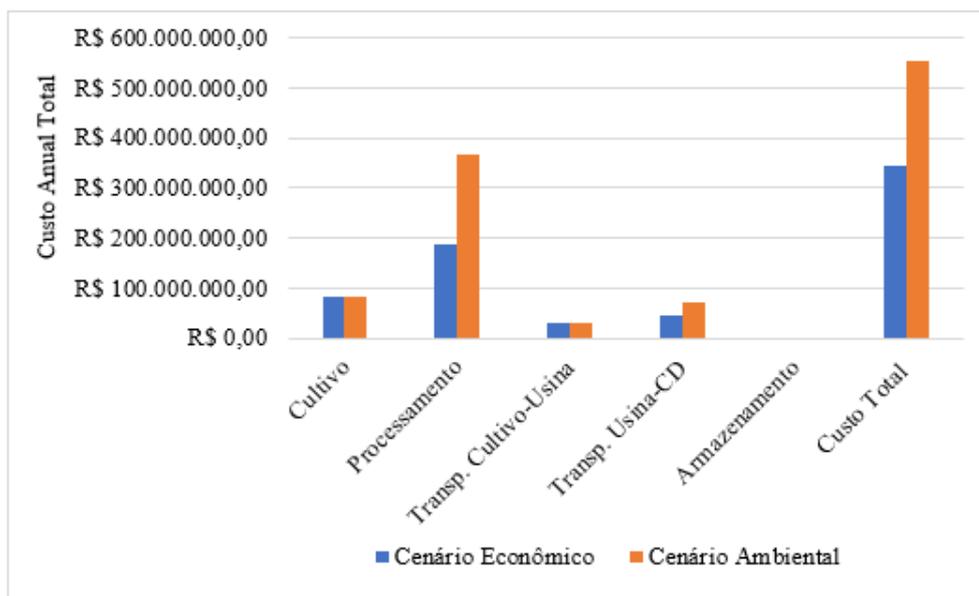
Verificou-se que a demanda foi plenamente atendida no modelo, conforme a restrição, sem exceder a capacidade.

4.3 Comparação dos cenários e discussão dos resultados

O terceiro objetivo da pesquisa foi realizar uma comparação entre os cenários econômico e ambiental.

O Gráfico 9 ilustra a diferença de custos anuais totais entre os cenários, em cada uma das etapas de produção.

Gráfico 9 - Comparação de custos entre os cenários Econômico e Ambiental



Fonte: Autora

A segunda hipótese levantada na pesquisa foi confirmada. O cenário ambiental de fato é mais oneroso, especialmente na etapa de processamento, visto que são incluídos os custos de produção do etanol de 2ª geração, de modo que o custo de toda a cadeia é puxado para cima nesta etapa.

Outra etapa que, como mostrado anteriormente, teve seus custos elevados foi a etapa de transporte entre a Usina e o Centro de Distribuição. Isso se dá porque a quantidade de etanol a ser transportada aumenta com a produção do E2G. Porém, considerando que no cenário que atende as demandas ambientais, o produtor teria mais condições de obter certificações de sustentabilidade no programa RenovaBio,

haveria a possibilidade de disponibilizar mais Cbios na bolsa de valores, conforme o esquema esclarecido na seção 2.2.3.

Dessa forma, no cálculo da receita com Cbios há uma redução nos custos neste cenário. Considerando que o produtor consegue disponibilizar 1 Cbio na bolsa de valores a cada 833 litros de E1G produzido de forma sustentável, e a cada 484 litros de E2G produzido, o produtor da Usina B conseguiria disponibilizar ao mercado 73.507 Cbios a partir da produção do E1G, e 77.414 Cbios a partir da produção do E2G.

Assim, a receita com Cbios no cenário ambiental, considerando o preço do Cbio na bolsa de valores a R\$ 107,62 (cotação abril/2023), seria de R\$ 16.242.129,80 para a Usina B, sendo R\$ 7.910.823,34 com E1G, e R\$ 8.331.306,46 com E2G.

Portanto, considerando apenas a receita com os CBios, sem incluir a análise sobre a receita com venda do etanol de segunda geração, haveria uma redução nos custos anuais totais do cenário ambiental em 2,94%.

Este percentual aproxima-se dos resultados da proposta de You et al (2021), que é um dos trabalhos utilizados como base para esta pesquisa. Com a aplicação da abordagem *nexus* na cadeia de suprimentos do bioetanol na Coreia por meio do MILP, os autores chegaram a uma redução de custos anuais totais no cenário ambiental de 3% em relação ao cenário base.

Por essa análise, o custo anual total no cenário ambiental ficaria bem próximo do cenário base, com um aumento de apenas 5,06%, e ainda assim, traria todos os benefícios sustentáveis da abordagem *nexus* inclusos.

O cenário econômico apesar de ter o custo mínimo muito inferior ao cenário ambiental e ao cenário base, é um cenário que busca atender a demanda histórica do mercado, ou seja, não necessariamente estaria atuando em capacidade máxima. Além disso, o cenário não busca atender as demandas sustentáveis do *nexus*.

Dessa forma, considerando o planejamento de longo prazo, o cenário ambiental traria mais benefícios econômicos e ambientais, se comparado ao cenário econômico.

5 Resultados da Análise Hierárquica de Processos (AHP)

Os cenários de otimização foram avaliados por meio critérios de decisão definidos com base na literatura, pelos *stakeholders* que compõem a governança energética na cadeia de produção do etanol, para cumprir o quarto e último objetivo da pesquisa.

5.1 Cálculo de prioridade dos critérios

Com a Análise Hierárquica de Processos (AHP), buscou-se chegar à conclusão sobre o cenário ideal de produção do etanol com base na opinião de *stakeholders* relevantes para a cadeia produtiva analisada. Os cenários avaliados foram o econômico e o ambiental.

Como mencionado no Capítulo 3, a análise com AHP inicia-se pela ponderação da prioridade dos critérios selecionados, onde os decisores atribuem pesos aos critérios a partir uma avaliação em pares.

Por se tratar de uma decisão em grupo, onde a ponderação dos critérios foi feita por 5 especialistas, as respostas para os pesos dos critérios correspondem à média geométrica das decisões para cada critério. No Quadro 5 ilustra-se a matriz de decisão dos critérios primários (do segundo nível da hierarquia, conforme a árvore de decisão na metodologia), com as médias geométricas das ponderações dos decisores.

Quadro 6 - Matriz de decisão dos critérios primários com a média geométrica dos 5 decisores

Cenário Ideal de Produção do Etanol	Aspectos Ambientais	Aspectos Econômicos	Aspectos Políticos
Aspectos Ambientais	1,00	0,44	0,85
Aspectos Econômicos	2,29	1,00	1,73
Aspectos Políticos	1,18	0,58	1,00
Total	4,47	2,01	3,57

Fonte: Autora

Após calcular a média geométrica das decisões, o próximo passo foi normalizar os valores da matriz, dividindo cada elemento da matriz pela soma total das respectivas colunas. Em seguida, foi realizado o cálculo da média de cada linha normalizada para chegar ao vetor de prioridade de cada critério, também chamado de peso. No Quadro 6 são apresentados os valores normalizados, bem como os pesos.

Quadro 7 - Matriz de decisão dos critérios primários normalizada

Cenário Ideal de Produção do Etanol	Aspectos Ambientais	Aspectos Econômicos	Aspectos Políticos	Vetor de Prioridade	(%)
Aspectos Ambientais	0,22	0,22	0,24	0,23	22,6
Aspectos Econômicos	0,51	0,50	0,48	0,50	49,7
Aspectos Políticos	0,26	0,29	0,28	0,28	27,7
Total					100

Fonte: Autora

Na coluna Vetor de Prioridade, é possível observar o peso dos critérios de acordo com a ponderação dos decisores, em relação ao cenário ideal de produção do etanol.

Observa-se que os “Aspectos Econômicos” são mais importantes, na ordem de 49,7% da importância total, seguido do critério “Aspectos Políticos” com 27,7% da importância, e por último o critério considerado menos importante foi “Aspectos Ambientais” com 22,6% da importância atribuída pelos decisores.

O próximo passo após encontrar os pesos, foi verificar a Razão de Consistência (RC) das decisões.

O cálculo para a RC é dado pelas equações 29 e 30 no tópico 3.4.2.3. A Razão de Inconsistência (RI) para a matriz de ordem $n=3$ é de 0,58, conforme o Quadro 4 na metodologia. Dessa forma:

$$\text{Índice de Consistência (IC)} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{3,004 - 3}{3 - 1} = 0,0019$$

$$\text{Razão de Consistência (RC)} = \frac{IC}{RI} = \frac{0,0019}{0,58} = 0,0033$$

A Razão de Consistência (RC) ficou em 0,0033, ou seja, dentro do limite de 0,10 (ou 10%) estabelecido por Saaty e Vargas (2012) para uma decisão consistente.

Após analisar o peso dos critérios primários e a RC das ponderações, realizou-se o mesmo cálculo para as ponderações par a par dos subcritérios ambientais, políticos e econômicos.

O Quadro 7 ilustra a média geométrica das decisões para os subcritérios ambientais.

Quadro 8 - Matriz de decisão dos subcritérios ambientais com a média geométrica dos 5 decisores

Aspectos Ambientais	Redução de CO ₂	Uso de resíduos p/ E2G	Água-Energia-Alimento-Solo
Redução de CO ₂	1,00	3,98	0,93
Uso de resíduos p/ E2G	0,25	1,00	0,43
Água-Energia-Alimento-Solo	1,07	2,33	1,00
Total	2,32	7,31	2,36

Fonte: Autora

O Quadro 8 apresenta as ponderações normalizadas e com o percentual de prioridade dos subcritérios ambientais.

Quadro 9 - Matriz de decisão dos subcritérios ambientais normalizada

Aspectos Ambientais	Redução de CO ₂	Uso de resíduos p/ E2G	Água-Energia-Alimento-Solo	Vetor de Prioridade	(%)
Redução de CO ₂	0,43	0,54	0,40	0,46	46
Uso de resíduos p/ E2G	0,11	0,14	0,18	0,14	14
Água-Energia-Alimento-Solo	0,46	0,32	0,42	0,40	40
Total					100

Fonte: Autora

De acordo com o Vetor de Prioridade, dentro do critério “Aspectos Ambientais”, o subcritério “Redução de CO₂” foi considerado o mais relevante pelos decisores, assumindo 46% da importância total, seguido do subcritério “Água-Energia-Alimento-Solo” com 40% e, com menor peso na análise, ficou o critério “Uso de resíduos para E2G” com 14% da importância total.

Com os subcritérios ambientais priorizados, realizou-se o cálculo da Razão de Consistência, com RI para matriz de ordem n=3 sendo 0,58. Dessa forma:

$$\text{Índice de Consistência (IC)} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{3,04 - 3}{3 - 1} = 0,020$$

$$\text{Razão de Consistência (RC)} = \frac{IC}{RI} = \frac{0,020}{0,58} = 0,035$$

Neste caso, a RC foi 0,035 e está dentro do limite de inconsistência de 0,10 (ou 10%) estabelecido por Saaty e Vargas (2012).

Os próximos subcritérios analisados foram os políticos, o Quadro 9 apresenta a média geométrica das ponderações par a par para estes critérios.

Quadro 10 - Matriz de decisão dos subcritérios políticos com a média geométrica dos 5 decisores

Aspectos Políticos	Agenda de contribuições nacionais (NDC)	Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)	Regulação legal das atividades
Agenda de contribuições nacionais (NDC)	1,00	0,69	0,47
Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)	1,45	1,00	1,12
Regulação legal das atividades	2,14	0,89	1,00
Total	4,59	2,58	2,59

Fonte: Autora

O Quadro 10 apresenta as ponderações normalizadas e com o percentual de prioridade dos subcritérios políticos.

Quadro 11 - Matriz de decisão dos subcritérios políticos normalizada

Aspectos Políticos	Agenda de contribuições nacionais (NDC)	Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)	Regulação legal das atividades	Vetor de Prioridade	(%)
Agenda de contribuições nacionais (NDC)	0,22	0,27	0,18	0,22	22
Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)	0,32	0,39	0,43	0,38	38
Regulação legal das atividades	0,47	0,35	0,39	0,40	40
Total					100

Fonte: Autora

Para o conjunto de subcritérios políticos, observa-se que o mais relevante na análise dos decisores foi o “Regulação legal das atividades” com 40% da importância total, o subcritério “Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)” ficou em segundo lugar no ranking de importância com 38% do peso, e em último a “Agenda de Contribuições Nacionais (NCD)” com 22% da importância total.

Com os subcritérios políticos ponderados, realizou-se o cálculo da Razão de Consistência, com RI para matriz de ordem $n=3$ sendo 0,58. Dessa forma:

$$\text{Índice de Consistência (IC)} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = \frac{3,03-3}{3-1} = 0,014$$

$$\text{Razão de Consistência (RC)} = \frac{IC}{RI} = \frac{0,014}{0,58} = 0,0081$$

A RC ficou em 0,0081, dentro do limite de 0,10 (ou 10%) estabelecido por Saaty e Vargas (2012), uma análise bastante consistente considerando uma matriz de ordem 3.

Por fim, realizou-se o cálculo de prioridade dos critérios econômicos, o Quadro 11 apresenta a média geométrica das ponderações par a par.

Quadro 12 - Matriz de decisão dos subcritérios políticos com a média geométrica dos 5 decisores

Aspecto Econômicos	Eficiência Econômica	Custo de investimento e operação	Oportunidade de mercado
Eficiência Econômica	1,00	1,75	2,41
Custo de investimento e operação	0,57	1,00	2,41
Oportunidade de mercado	0,41	0,41	1,00
Total	1,986	3,165	5,820

Fonte: Autora

No Quadro 12 são apresentadas as ponderações normalizadas e com o percentual de prioridade dos subcritérios econômicos.

Quadro 13 - Matriz de decisão dos subcritérios políticos normalizada

Aspectos Econômicos	Eficiência Econômica	Custo de investimento e operação	Oportunidade de mercado	Vetor Prioridades	(%)
Eficiência Econômica	0,50	0,55	0,41	0,490	49
Custo de investimento e operação	0,29	0,32	0,41	0,339	34
Oportunidade de mercado	0,21	0,13	0,17	0,171	17
Total					100

Fonte: Autora

Dentro dos subcritérios econômicos, o subcritério “Eficiência Econômica” foi considerado o mais relevante pelos decisores com 49% da importância, seguido por “Custo de investimento e operação” com 34%, e em último lugar no ranking de importância “Oportunidade de mercado” com 17% da importância total.

Dado o vetor de prioridade dos subcritérios econômicos, realizou-se o cálculo da Razão de Consistência, com RI para matriz de ordem $n=3$ sendo 0,58. Dessa forma:

$$\text{Índice de Consistência (IC)} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{3,03 - 3}{3 - 1} = 0,017$$

$$\text{Razão de Consistência (RC)} = \frac{IC}{RI} = \frac{0,017}{0,58} = 0,010$$

A RC ficou em 0,010, dentro do limite de 0,10 (ou 10%) estabelecido por Saaty e Vargas (2012).

Com isso atingiu-se o objetivo de calcular o peso dos critérios e subcritérios na decisão dos *stakeholders*.

5.2 Cálculo de prioridade das alternativas

Após ponderar os critérios, o próximo passo foi fazer uma comparação par a par das alternativas dentro de cada critério, a fim de obter o vetor de prioridade das alternativas para cada critério.

Nesta etapa, não foram realizados cálculos para a Razão de Consistência dos julgamentos, pois foram avaliadas apenas 2 alternativas de decisão, e nesse caso, matrizes de ordem 2 tem a razão de inconsistência aleatória (RI) zerada, portanto, são sempre consistentes.

Os decisores avaliaram as alternativas de decisão Cenário Ambiental e Cenário Econômico em relação a cada um dos 3 critérios principais, e cada um dos 9 subcritérios.

No Quadro 13 evidencia-se a matriz de avaliação da relevância das alternativas em relação aos critérios primários já normalizada, seguiu-se os mesmos passos da etapa anterior, com a média geométrica das decisões e posterior normalização e cálculo da média para obter o vetor de prioridade das alternativas.

Quadro 14 - Matriz de avaliação das alternativas em relação aos critérios normalizada

Aspectos Políticos	Ambiental	Econômico	Vetor Prioridade	%
Ambiental	0,80	0,80	0,80	80
Econômico	0,20	0,20	0,20	20
Aspectos Econômicos				
Ambiental	0,49	0,49	0,49	49
Econômico	0,51	0,51	0,51	51
Aspectos Ambientais				
Ambiental	0,66	0,66	0,66	66
Econômico	0,34	0,34	0,34	34

Fonte: Autora

O vetor de prioridade das alternativas evidencia que em relação ao critério “Aspectos Políticos” a alternativa Cenário Ambiental é preferida na ordem de 80% pelos decisores, ou seja, na opinião dos decisores os aspectos políticos são mais relevantes para um cenário ambiental de produção.

Em relação aos “Aspectos Econômicos”, o Cenário Econômico é o mais importante, com 51% da importância total. E por fim, em relação aos “Aspectos

Ambientais”, o Cenário Ambiental assume 66% da preferência dos decisores.

Posterior a análise dos critérios primários, foram analisados também pelos decisores, as alternativas de decisão em relação aos subcritérios de decisão. O Quadro 14 evidencia a ponderação já normalizada, bem como os vetores de prioridade das alternativas para os 9 subcritérios analisados.

Quadro 15 - Matriz de avaliação das alternativas em relação aos subcritérios normalizada

Redução de CO2	Ambiental	Econômico	Vetor Prioridade	%
Ambiental	0,89	0,89	0,89	89
Econômico	0,11	0,11	0,11	11
Uso de resíduos p/ E2G				
Ambiental	0,67	0,67	0,67	67
Econômico	0,33	0,33	0,33	33
Água-Energia-Alimento-Solo				
Ambiental	0,87	0,87	0,87	87
Econômico	0,13	0,13	0,13	13
Eficiência Econômica				
Ambiental	0,35	0,35	0,35	35
Econômico	0,65	0,65	0,65	65
Custo de investimento e operação				
Ambiental	0,33	0,33	0,33	33
Econômico	0,67	0,67	0,67	67
Oportunidade de mercado				
Ambiental	0,40	0,40	0,40	40
Econômico	0,60	0,60	0,60	60
Agenda de contribuições nacionais (NDC)				
Ambiental	0,86	0,86	0,86	86
Econômico	0,14	0,14	0,14	14
Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)				
Ambiental	0,73	0,73	0,73	73
Econômico	0,27	0,27	0,27	27
Regulação legal das atividades				
Ambiental	0,65	0,65	0,65	65
Econômico	0,35	0,35	0,35	35

Fonte: Autora

De acordo com a análise dos decisores, em relação ao subcritério “Redução de CO₂”, a alternativa Cenário Ambiental é preferível na ordem de 89%. Considerando o critério “Uso de resíduos para a geração de E2G”, o Cenário Ambiental representa 67% da preferência dos decisores. Para o subcritério “Água-

Energia-Alimento-Solo” o Cenário Ambiental recebeu 87% de prioridade. Para o decisores os subcritérios ambientais se adequam melhor ao Cenário Ambiental.

Quanto aos subcritérios econômicos, em relação à “Eficiência Econômica”, os decisores optam pela alternativa Cenário Econômico, com 65% da importância total. Em relação ao subcritério “Custo de investimento e operação” o Cenário Econômico é considerado mais relevante na ordem de 67% da preferência. E para o subcritério “Oportunidade de mercado” a alternativa Cenário Ambiental também é considerada mais relevante na ordem de 60%.

Por fim, em relação aos subcritérios políticos, a alternativa Cenário Ambiental é mais relevante na ordem de 86% para o subcritério “Agenda de contribuições nacionais” e 73% para o subcritério “Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)”. Quanto ao subcritério “Regulação legal das atividades” a alternativa Cenário Econômico é preferível pelos decisores na ordem de 65%.

5.3 Cálculo de prioridade das alternativas globais

A última parte da análise com AHP foi a valoração global das alternativas, por meio da qual foi possível chegar à conclusão sobre o cenário ideal de produção do etanol no estado de Goiás, com base na opinião dos *stakeholders*.

Para realizar o cálculo da valoração global das alternativas realiza-se a soma ponderada dos critérios e das alternativas. Para tanto, multiplica-se o peso de cada um dos critérios, pelo peso da alternativa em relação ao critério, que foram os cálculos realizados nas etapas anteriores, cada multiplicação deve ser somada à próxima até o último critério naquela alternativa, depois realiza-se o mesmo processo com as outras alternativas.

A valoração global foi feita com os critérios primários, e com os três grupos de subcritérios separadamente, depois calculou-se a média dos resultados das prioridades alternativas nas quatro análises, para chegar ao cenário ideal considerando a análise total.

O Quadro 15 apresenta o peso dos critérios primários na primeira linha, e nas duas últimas o peso das alternativas em relação aos critérios.

Quadro 16 - Peso dos critérios primários, e das alternativas em relação aos critérios

	Aspectos Políticos	Aspectos Econômicos	Aspectos Ambientais
Pesos dos Critérios	0,277	0,497	0,226
Ambiental	0,803	0,488	0,655
Econômico	0,197	0,512	0,345

Fonte: Autora

Em seguida, o Quadro 16 evidencia como foi calculada a valoração global das alternativas, e o resultado em relação aos critérios primários.

Quadro 17 - Valoração global das alternativas em relação aos critérios primários

Valoração Global das Alternativas – Critérios Primários		Resultado (%)
Ambiental	$(0,277*0,803 + 0,497*0,488 + 0,226*0,655)$	61
Econômico	$(0,277*0,197 + 0,497*0,512 + 0,226*0,345)$	39

Fonte: Autora

A análise evidencia que em relação aos Aspectos Políticos, Econômicos e Ambientais, o Cenário Ambiental é preferido na ordem de 61% pelos decisores.

Após a análise dos critérios primários analisou-se cada um dos três grupos de subcritérios.

Nos subcritérios ambientais, compostos por “Redução de CO₂”, “Uso de resíduos para E2G” e “Água-Energia-Alimento-Solo”, o cálculo de prioridade das alternativas apontou para o Cenário Ambiental como predominantemente preferido na opinião dos decisores, com 85% das preferências totais, como evidenciado no Quadro 17.

Quadro 18 - Valoração global das alternativas em relação aos subcritérios ambientais

Valoração Global das Alternativas – Subcritérios Ambientais		Resultado (%)
Ambiental	$(0,457* 0,887+ 0,142* 0,667+ 0,401* 0,867)$	85
Econômico	$(0,457*0,113+ 0,142*0,333+0,401*0,133)$	15

Fonte: Autora

Em relação aos subcritérios políticos, composto por “Agenda de Contribuições Nacionais (NDC)”, “Incentivo em Créditos de Descarbonização (CBios)” e “Regulação Legal das Atividades”, o Cenário Ambiental também foi a opção priorizada pelos decisores, em menor predominância em relação aos subcritérios ambientais, com 72% da importância total, como apresentado no Quadro

18.

Quadro 19 - Valoração global das alternativas em relação aos subcritérios políticos

Valoração Global das Alternativas – Subcritérios Políticos		Resultado (%)
Ambiental	$(0,222*0,855+0,379*0,727+0,399*0,647)$	72
Econômico	$(0,222*0,145+0,379*0,273+0,399*0,353)$	28

Fonte: Autora

Por fim, no que tange os subcritérios econômicos, composto por “Custo de investimento e operação”, “Eficiência econômica” e “Oportunidade de mercado”, o Cenário Econômico foi considerado o mais importante na opinião dos decisores, com 63% da importância total, conforme apresentado no Quadro 19.

Quadro 20 - Valoração global das alternativas em relação aos subcritérios econômicos

Valoração Global das Alternativas – Subcritérios Econômicos		Resultado (%)
Ambiental	$(0,490*0,351+0,339*0,329+0,171*0,403)$	63
Econômico	$(0,490*0,649+0,339*0,671+0,171*0,597)$	37

Fonte: Autora

Após realizar o cálculo de prioridade das alternativas, ou valoração global, dentro de cada grupo de critérios, realizou-se a média de tais prioridades, para verificar para que decisão foram conduzidos os decisores conforme suas ponderações.

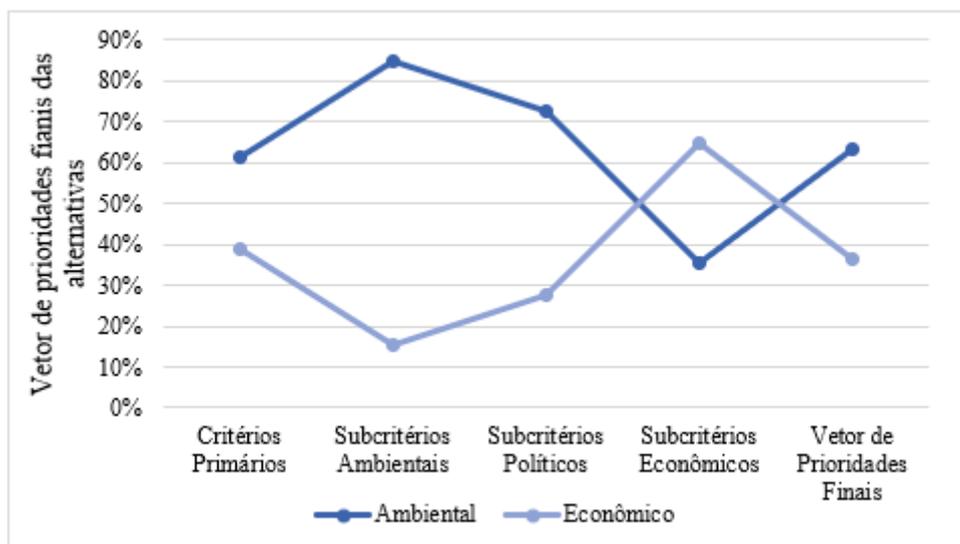
Quadro 21 - Valoração global das alternativas finais

Cenário ideal de produção do etanol	Critérios Primários	Subcritérios Ambientais	Subcritérios Políticos	Subcritérios Econômicos	Vetor de Prioridades Finais (%)
Ambiental	61%	85%	72%	35%	63
Econômicos	39%	15%	28%	65%	37

Fonte: Autora

De acordo com o vetor de prioridades finais, a alternativa que melhor atende à ponderação dos decisores é o Cenário Ambiental com 63 % das preferências finais, o Gráfico 10 ilustra tal prioridade, em relação à prioridade de cada um dos grupos de critérios.

Gráfico 10 - Vetor de prioridades finais das alternativas



Fonte: Autora

Evidencia-se na análise gráfica que em relação aos critérios principais, os decisores dividem-se entre as alternativas de decisão Cenário Econômico e Cenário Ambiental.

Quanto aos subcritérios ambientais, os decisores acreditam que eles são predominantemente mais importantes para o Cenário Ambiental, beirando a linha dos 90%. Os critérios econômicos foram considerados mais relevantes para um Cenário Econômico de produção, com uma predominância acima de 70%.

Os subcritérios que puxaram as prioridades finais dos decisores para o Cenário Ambiental, foram os políticos, eles foram considerados mais relevantes para o Cenário Ambiental com uma predominância de 61%, e de acordo com a ponderação, os aspectos políticos estão entre os critérios e subcritérios com maior peso nas decisões.

Desse modo, o fato de haver uma preferência para o Cenário Ambiental em relação aos critérios políticos, faz com que a decisão pese para este cenário, ainda que em uma proporção pouco maior do que o Cenário Econômico, como mostra o vetor de prioridades finais.

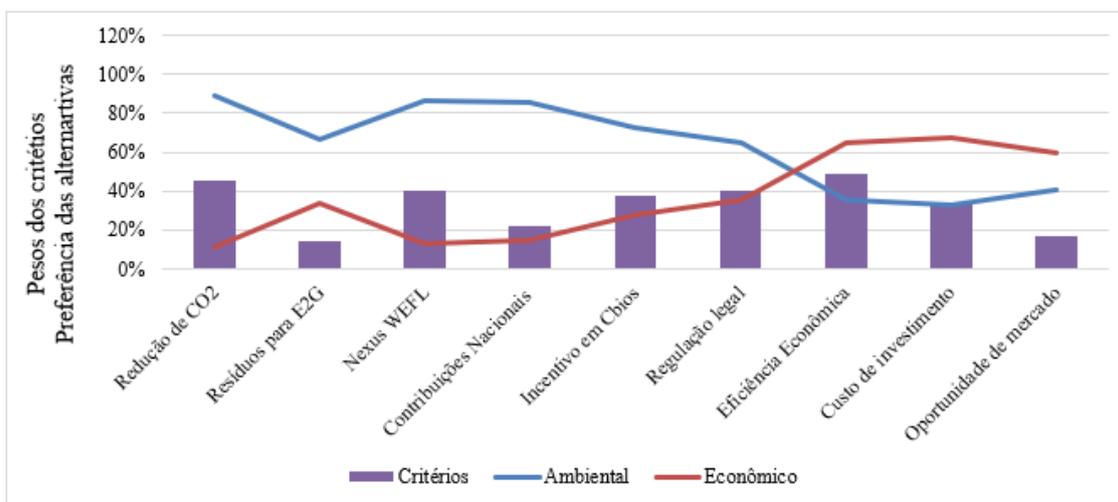
5.4 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade na AHP é importante para verificar a robustez dos resultados. Uma das formas de realizá-la é verificando o desempenho das alternativas

avaliadas para cada um dos critérios ponderados.

Por meio desta análise, busca-se verificar se há predominância da alternativa escolhida sobre a outra, ou seja, se ela dominou as preferências em todos os critérios, ou se houve um efeito compensatório, em que a alternativa campeã foi superior apenas nos critérios com maior peso. O Gráfico 11 evidencia tal análise.

Gráfico 11 - Análise de desempenho das alternativas



Fonte: Autora

A análise gráfica mostra que o Cenário Ambiental não atingiu a máxima valoração por unanimidade, ou seja, em todos os subcritérios. A alternativa mostrou superioridade em 4 dos 5 subcritérios com maior peso nas decisões: Redução de CO₂, Água-Energia-Alimento-Terra, Incentivo em CBios e Regulação legal das atividades. Além disso, o cenário foi predominante em 6 dos 9 critérios analisados, independente do peso.

Tal análise evidencia que os pesos dos critérios em que o Cenário Ambiental é preferido influenciou no resultado. Ou seja, o fato de os subcritérios Redução de CO₂, Água-Energia-Alimento-Terra, Incentivo em CBios e Regulação legal terem um peso alto na decisão dos *stakeholders*.

Além disso, os critérios políticos também puxaram o peso das escolhas para o Cenário Ambiental. Ou seja, em relação aos critérios ambientais os decisores preferem o Cenário Ambiental, nos critérios econômicos, os decisores preferem o Cenário Econômico, mas quando analisam os critérios políticos, o Cenário Ambiental é preferido, e isso faz com que o cenário seja a decisão final.

5.5 Discussão sobre a opinião dos stakeholders

De acordo com o respondente do Complexo Agroalimentar e de Biocombustíveis do BNDES, “o etanol é um bem remunerado pelo Estado, por essa razão os Aspectos Políticos e Econômicos têm pesos similares e são superiores aos Ambientais, de modo que o Econômico é movido pelas políticas públicas, e o Ambiental apesar de exercer um importante papel, não motiva o setor o produtivo”.

O decisor do Ministério da Agricultura (MAPA) apresenta uma análise similar ao afirmar que “os aspectos ambientais subsistem nos econômicos, e os econômicos são motivados pela política”.

De outra parte, os três decisores da Empresa de Pesquisa Energética consideram os aspectos Ambientais e Econômicos com pesos iguais, sendo ambos superiores aos Políticos.

Tais análises justificam a tendência da valoração global para o Cenário Ambiental, pois, na avaliação dos subcritérios, os que apresentaram maior importância na opinião do grupo de decisores dentre os 9 avaliados foram: Eficiência Econômica (49%), Redução de CO₂ (46%), Uso de Água-Energia-Alimento-Terra (40%) e Regulação legal (40%) e Incentivo em CBios (38%).

Apesar de Eficiência Econômica ser o subcritério com maior peso na opinião dos decisores entre os 9, os demais critérios com mais impacto na decisão são dois ambientais e dois político, e em relação a estes, o Cenário Ambiental foi escolhido como ideal pelos *stakeholders*.

Outro fator importante sobre a decisão, é que os critérios com maior peso foram aqueles que já fazem parte das metas e regras do Estado, como a eficiência econômica, redução de CO₂, regulação legal das atividades e incentivo em CBios, tais fatores fazem parte do discurso comum dos decisores. Exceto a aplicação da abordagem *nexus*, que foi um critério que recebeu alta prioridade nas decisões, mas que não é diretamente uma meta do Estado.

6 Conclusões

O setor de energias renováveis, como os biocombustíveis, é uma das aplicações mais necessárias da abordagem *nexus*, pois sua expansão tende a gerar conflitos entre as demandas por alimentos e energia, degradação do solo, aumento de áreas ocupadas por plantações e maior demanda de água para irrigação. Esta pesquisa destaca a importância de incluir as dimensões do Nexus água-energia-alimento-terra na gestão na cadeia de suprimentos do etanol, para alcançar um ambiente resiliente e produtivo, por meio de ações na sociedade, economia e meio ambiente.

A etapa da pesquisa em que foi realizada a meta-síntese mostrou que, em nível global, a seleção de culturas é o problema mais comum no nível de decisão estratégica da cadeia de suprimentos de biocombustíveis. No nível tático, a análise indicou que os problemas de transporte e fluxo de materiais são os mais abordados nas pesquisas e, no nível operacional, a distribuição é o aspecto mais abordado nas investigações. Esses dois últimos níveis de decisão revelaram oportunidades valiosas de pesquisa.

Nesse sentido, foi verificado, por exemplo, que o desenvolvimento de pesquisas em relação às cadeias de suprimentos de biocombustíveis ainda é recente, principalmente considerando o planejamento de recursos proposto pela abordagem *nexus*. A complexidade das decisões que devem passar por múltiplos *stakeholders* e níveis, é um dos motivos.

Outra descoberta obtida na meta-síntese foi que a programação matemática constitui o método mais recorrente usado para resolver problemas em todos os níveis de decisão, dada a sua adequação para problemas de grande escala, como é o caso de estudos de cadeias de suprimentos de biocombustíveis. No entanto, é interessante destacar que, ao considerar os desafios de modelar diferentes objetivos de múltiplos *stakeholders* na cadeia de suprimentos, a análise multicritério de apoio à tomada de decisão mostrou-se um método adequado para formular um modelo completo de decisão.

As evidências levantadas na análise teórica foram base para a aplicação prática desta pesquisa. Com base nas análises supracitadas, propôs-se uma abordagem híbrida utilizando a programação linear inteira mista (MILP) e a análise de decisão multicritérios (MCDA). Dois cenários de otimização foram construídos utilizando a programação linear inteira mista: o cenário econômico, com vistas à

minimização dos custos anuais totais, e o cenário ambiental, que além de buscar o mínimo custo da cadeia de suprimentos, considerou as demandas sustentáveis do *nexus* e a produção integração entre etanol de primeira e segunda gerações.

A pesquisa evidenciou que no cenário econômico de produção há possibilidade de redução nos custos anuais totais da cadeia de suprimentos do etanol na ordem de 32,2%, em comparação com o desempenho atingido pela usina adotada no estudo atuando em máxima capacidade produtiva, com base no histórico dos Boletins de Safras de 2008 a 2021. Para este resultado, o modelo minimizou 29,22% nos custos anuais totais de cultivo, 32,25% nos custos de processamento, 39,40% nos custos de transporte das áreas de cultivo para as usinas e 32,19% no transporte das usinas para os centros de distribuição.

No cenário ambiental, houve um aumento dos custos anuais totais de produção de 8%, com a inclusão dos custos de processamento e transporte do etanol de 2ª geração. O modelo manteve a minimização de custos do cultivo e de transporte das áreas de cultivo para as usinas consideradas na análise. Entretanto, houve um aumento de 32,7% nos custos de processamento, com a inclusão dos custos de fabricação do etanol de segunda geração. Além disso, houve aumento de 8,42% nos custos de transporte das usinas para os centros de distribuição, com o aumento do volume de etanol transportado.

Apesar de tal aumento, a partir da receita gerada com créditos de descarbonização (CBios), proporcionada pela comprovação da produção sustentável, há possibilidade de uma redução nos custos anuais totais do cenário ambiental em 2,94%, de modo que o aumento no custo anual total ficaria em 5,06%. Por essa análise, o custo anual total no cenário ambiental fica próximo do cenário base (antes da otimização) e ainda traz todos os benefícios sustentáveis da abordagem *nexus* inclusos na solução. Dessa forma, considerando o planejamento de longo prazo, conclui-se que o cenário ambiental traz mais benefícios econômicos e ambientais, se comparado ao cenário econômico.

No aprofundamento da análise, com o objetivo de fornecer um modelo de decisão mais completo, foi utilizada a Análise Hierárquica de Processos (AHP), para avaliar os cenários de otimização, com base na opinião dos principais *stakeholders* envolvidos na governança energética. Foram aplicados questionários com cinco decisores de áreas do Governo Federal, que influenciam diretamente o desenvolvimento energético no Brasil. Tais especialistas ponderaram sobre os

critérios de decisão selecionados com base na literatura. Os resultados apontaram que, na opinião agregada dos decisores, o cenário ideal de produção do etanol em Goiás é o ambiental, com 63 % das preferências finais.

O cenário ambiental de análise não atingiu a máxima valoração na AHP, por unanimidade. Em todos os subcritérios considerados, a alternativa mostrou superioridade em 4 dos 5 subcritérios com maior peso nas decisões. O fator decisivo para a decisão final, foram os critérios políticos, que na opinião dos decisores são mais importantes para o um cenário ambiental de produção.

De maneira geral, as principais contribuições desta pesquisa foram: fornecer um modelo analítico para aplicar o *nexus* especificamente na cadeia de suprimentos do etanol; evidenciar os benefícios da abordagem sustentável pela comparação em cenários de otimização; e incluir a opinião dos principais *stakeholders* na decisão pelo cenário ideal de produção do etanol.

Os resultados evidenciam que a abordagem *nexus* pressupõe soluções sociais e econômicas a partir da sustentabilidade. A dimensão econômica é beneficiada pela maximização dos lucros, com a maior eficiência energética por área plantada e maior potencial de geração de biocombustíveis para combustão a partir da geração de E2G, além da receita com Créditos de Descarbonização a partir da certificação da eficiência energética e ambiental. A dimensão ambiental é aprimorada através da minimização do uso de água no BSC (ODS6), maior eficiência energética na mesma área plantada, redução da dependência de combustíveis fósseis, redução dos conflitos entre consumo de energia e demandas alimentares, maior diversificação da matriz energética (ODS 7), redução das emissões de CO₂ devido ao aumento do uso de biocombustíveis (ODS 13), redução da expansão indiscriminada de áreas plantadas e redução dos impactos ambientais do uso da terra (ODS 15). Finalmente, a dimensão social é reforçada com segurança alimentar (ODS 2), segurança energética (ODS 7) e segurança hídrica (ODS6), como o incentivo ao atendimento das demandas sociais na região de estudo.

Abordagens circulares como o *nexus* não são o objetivo em si mesmas, mas um caminho para alcançar as metas de longo prazo da sociedade e do setor produtivo.

Uma das principais limitações desta pesquisa foi a dificuldade para alcançar uma base de dados mais abrangente. Isso ocorreu, em parte, porque a Lei Geral da Proteção de Dados (Lei nº 13709/2018), que regulamenta a proteção dos dados

organizacionais, tornou mais criteriosa e morosa a liberação de dados para este estudo. Essa dificuldade fez com que a base de dados fosse construída a partir de fontes diversas, além da organização escolhida como objeto de estudo, como artigos e relatórios nacionais. Outra limitação da pesquisa, foi o fato de o objeto de estudo não trabalhar com a fabricação do produto açúcar, que seria importante, especialmente, para análise da dimensão alimento (*food*) do *nexus*.

Com base nos resultados apresentados sugere-se para pesquisas futuras:

- Desenvolver um modelo de previsão de demanda do etanol de 1ª e 2ª gerações no Estado de Goiás;
- Calcular as despesas de capital (CAPEX), despesas operacionais (OPEX) e o retorno sobre investimento (ROI) para um projeto de produção integrada de fabricação de etanol de primeira e segunda gerações no Estado de Goiás;
- Calcular o valor de investimento que o Estado deve fazer em créditos de descarbonização (CBios) para viabilizar a produção do etanol de segunda geração em escala comercial;
- Desenvolver um modelo de decisão multicritérios que integre os três vértices da governança energética (Estado, Associações e Empresas), com o objetivo de selecionar um novo conjunto de critérios considerados relevantes para o processo decisório na cadeia de suprimentos de biocombustíveis do etanol.

Referências

ABBAS, Shahbaz; HSIEH, Lin-Han Chiang; TECHATO, Kuaanan. Supply chain integrated decision model in order to synergize the energy system of textile industry from its resource waste. **Energy**, v. 229, p. 120754, 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120754. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120754>.

ABDALI, Husam; SAHEBI, Hadi; PISHVAEE, Mirsaman. The water-energy-food-land nexus at the sugarcane-to-bioenergy supply chain: A sustainable network design. **Computers and Chemical Engineering**, [S. l.], v. 145, p. 107199, 2021. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2020.107199. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107199>.

AFKHAMI, Payam; ZARRINPOOR, Naeme. The energy-water-food-waste-land nexus in a GIS-based biofuel supply chain design: A case study in Fars province, Iran. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 340, n. November 2021, p. 130690, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130690. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130690>.

AKHTARI, Shaghaygh; SOWLATI, Taraneh; GRIESS, Verena C. Integrated strategic and tactical optimization of forest-based biomass supply chains to consider medium-term supply and demand variations. **Applied Energy**, v. 213, p. 626-638, 2018.

ALKHUZAIM, Lojain; ZHU, Qingyun; SARKIS, Joseph. Evaluating emergy analysis at the nexus of circular economy and sustainable supply chain management. **Sustainable Production and Consumption**, v. 25, p. 413-424, 2021.

AL GARNI, Hassan et al. A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. **Sustainable energy technologies and assessments**, 16, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.05.006>.

AXELSSON, Lisa et al. Jatropha cultivation in southern India: assessing farmers' experiences. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 6, n. 3, p. 246-256, 2012.

ALHERBAWI, Mohammad et al. Optimum sustainable utilisation of the whole fruit of Jatropha curcas: An energy, water and food nexus approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, p. 110605, 2021.

BAZILIAN, Morgan et al. Considering the energy , water and food nexus : Towards an integrated modelling approach. **Energy Policy**, [S. l.], v. 39, n. 12, p. 7896–7906, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.039.

BEERAVALLI, Vijayalaxmi; ASHWATH, Nanjappa; CAPAREDA, Sergio; RASUL, Mohammad; KHAN, Masud; PATIL, Basavaraj. Ranking the Feedstocks Using Neural Network-Based System for Biofuel Production. **2021 6th International Conference for Convergence in Technology, I2CT 2021**, [S. l.], p. 4–8, 2021. DOI: 10.1109/I2CT51068.2021.9418218.

BELLEZONI, Rodrigo A.; SHARMA, Deepak; VILLELA, Alberto Arruda; PEREIRA JUNIOR, Amaro Olimpio. Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol

production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 115, n. July 2017, p. 108–119, 2018. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.04.017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.017>.

BENJAMIN, Michael Francis D. et al. Increasing the reliability of bioenergy parks utilizing agricultural waste feedstock under demand uncertainty. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, p. 122385, 2020.

BOSSLE R. CNPE confirma redução de meta do RenovaBio em 2020 para 14,53 milhões de CBios 2020.

BRAIMOH, Ademola K.; VLEK, Paul L. G. Impact of Land Use on Soil Resources. [S. l.], p. 1–2, 2008.

BRANCO, José Eduardo Holler; BRANCO, Daniela Holler; AGUIAR, Edson Martins De; CAIXETA FILHO, José Vicente; RODRIGUES, Luciano. Study of optimal locations for new sugarcane mills in Brazil: Application of a MINLP network equilibrium model. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 127, n. May, p. 105249, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.05.018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.018>.

BRESSANIN, Jéssica Marcon; GUIMARÃES, Henrique Real; CHAGAS, Mateus Ferreira; SAMPAIO, Isabelle Lobo de Mesquita; KLEIN, Bruno Colling; WATANABE, Marcos Djun Barbosa; BONOMI, Antonio; MORAIS, Edvaldo Rodrigo De; CAVALETT, Otávio. Advanced technologies for electricity production in the sugarcane value chain are a strategic option in a carbon reward policy context. **Energy Policy**, [S. l.], v. 159, n. October, 2021. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112637.

BÜYÜKÖZKAN, Gülçin; KARABULUT, Yağmur; MUKUL, Esin. A novel renewable energy selection model for United Nations' sustainable development goals. **Energy**, [S. l.], v. 165, p. 290–302, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.215.

CARVAJAL, Jimmy; SARACHE, William; COSTA, Yasel. Addressing a robust decision in the sugarcane supply chain: Introduction of a new agricultural investment project in Colombia. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S. l.], v. 157, n. April 2018, p. 77–89, 2019. DOI: 10.1016/j.compag.2018.12.030. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.030>.

CODEVASF. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Caderno de Caracterização Estado de Goiás/ Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. - Brasília: Codevasf, 2021.

COIMBRA, Ricardo N. et al. Halimione portulacoides biomass-a sustainable feedstock for bioenergy production from an integrated water-energy-food system. **Energy Conversion and Management**, v. 268, p. 116065, 2022.

CORTEZ, Augusto Barbosa. **Proálcool 40**. Universidades e empresas : 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro. São Paulo: Blucher, 2016.

CONAB, Companhia Nacional De Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, v. 9 – Safra 2022-23, n.2 - Segundo levantamento, p. 1-58, Agosto 2022.

CONAB - Companhia Nacional De Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 9, n. 3 dezembro 2022.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil /Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília, 2019- v. <http://www.conab.gov.br>

CNA - Confederação Nacional de Agricultura Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas (PECEGE). Custos com preparo do solo, plantio e tratos de cana planta definem o potencial produtivo do canavial. São Paulo, 2022. https://cnabrasil.org.br/storage/arquivos/files/Ativo-Campo-Futuro_cana-outubro22.pdf.

DALLA FONTANA, Michele; MOREIRA, Fabiano de Araújo; DI GIULIO, Gabriela Marques; MALHEIROS, Tadeu Fabrício. The water-energy-food nexus research in the Brazilian context: What are we missing? **Environmental Science and Policy**, [S. l.], v. 112, n. June 2019, p. 172–180, 2020. DOI: 10.1016/j.envsci.2020.06.021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.021>.

DHANRAJ, Rashi; PUNNATHANAM, Varun; SHASTRI, Yogendra. Multi objective optimization of ethanol production based on regional resource availability. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 1124-1137, 2021.

DE LIMA, Camila; BALBO, Antonio Roberto; HOMEM, Thiago Pedro Donadon;

SILVA, Helenice De Oliveira Florentino. A hybrid approach combining interior-point and branch-and-bound methods applied to the problem of sugar cane waste. **Journal of the Operational Research Society**, [S. l.], v. 68, n. 2, p. 147–164, 2017. DOI: 10.1057/s41274-016-0027-0.

DE MEYER, Annelies et al. Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 31, p. 657-670, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.036>

DECENAL, Plano. Conteúdo. [S. l.], 2021.

DIAS, Marina O. S.; JUNQUEIRA, Tassia L.; CAVALETT, Otávio; CUNHA, Marcelo P.; JESUS, Charles D. F.; ROSSELL, Carlos E. V.; MACIEL FILHO, Rubens; BONOMI, Antonio. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 103, n. 1, p. 152–161, 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.09.120. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.120>.

DOLIENSTE, Stephen S.; SAMSATLI, Sheila. Integrated production of food, energy, fuels and chemicals from rice crops: multi-objective optimisation for efficient and sustainable value chains. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, p. 124900, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124900>.

DOS SANTOS E SILVA, Daniella Fartes; BOMTEMPO, José Vitor; ALVES, Flávia Chaves. Innovation opportunities in the Brazilian sugar-energy sector. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 218, p. 871–879, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.062.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. (2021). Matriz Energética e Elétrica.

<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>.

FAJARDY, Mathilde; CHIQUIER, Solene; MAC DOWELL, Niall. Investigating the BECCS resource nexus: delivering sustainable negative emissions. **Energy & Environmental Science**, v. 11, n. 12, p. 3408-3430, 2018. <https://doi.org/10.1039/c8ee01676c>.

FAO. 2021. The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point. *Synthesis report 2021*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>

FAO. 2022. *Agricultural production statistics. 2000–2021*. FAOSTAT Analytical Brief Series No. 60. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc3751en>

FLORENTINO, Helenice de O.; JONES, Dylan F.; IRAWAN, Chandra Ade; OUELHADJ, Djamila; KHOSRAVI, Banafesh; CANTANE, Daniela R. An optimization model for combined selecting, planting and harvesting sugarcane varieties. **Annals of Operations Research**, [S. l.], v. 314, n. 2, p. 451–469, 2020. DOI: 10.1007/s10479-020-03610-y. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03610-y>.

GARCIA, Daniel J.; LOVETT, Brittainy M.; YOU, Fengqi. Considering agricultural wastes and ecosystem services in Food-Energy-Water-Waste Nexus system design. **Journal of cleaner production**, v. 228, p. 941-955, 2019.

GARCIA, Daniel J.; YOU, Fengqi. Life cycle network modeling framework and solution algorithms for systems analysis and optimization of the water-energy nexus. **Processes**, v. 3, n. 3, p. 514-539, 2015.

GARCIA, Daniel; YOU, Fengqi. Systems engineering opportunities for agricultural and organic waste management in the food–water–energy nexus. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 18, p. 23-31, 2017.

GARCIA, Daniel J.; YOU, Fengqi. The water-energy-food nexus and process systems engineering: A new focus. **Computers and Chemical Engineering**, [S. l.], v. 91, p. 49–67, 2016. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.03.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.03.003>.

GARFÌ, Marianna; FERRER-MARTÍ, Laia; BONOLI, Alessandra; TONDELLI, Simona. Multi-criteria analysis for improving strategic environmental assessment of water programmes. A case study in semi-arid region of Brazil. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 92, n. 3, p. 665–675, 2011. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.10.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.007>.

GEVELT, Terry Van. ScienceDirect The water – energy – food nexus : bridging the science – policy divide. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, [S. l.], v. 13, p. 6–10, [s.d.]. DOI: 10.1016/j.coesh.2019.09.008.

GILANI, Hani; SAHEBI, Hadi; PISHVAEE, Mir Saman. A data-driven robust optimization model for integrated network design solar photovoltaic to micro grid. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 31, p. 100714, 2022.

GILANI, Hani et al. A sustainable redesign model for the water/wastewater supply network: a water–energy nexus approach. **Kybernetes**, n. ahead-of-print, 2022.

GHANI, WA Wan Ab Karim et al. Sustainable bio-economy that delivers the environment–food–energy–water nexus objectives: The current status in Malaysia. **Food and Bioproducts Processing**, v. 118, p. 167-186, 2019.

GHIAT, Ikhlas et al. CO₂ utilisation in agricultural greenhouses: A novel ‘plant to plant’ approach driven by bioenergy with carbon capture systems within the energy, water and food Nexus. **Energy Conversion and Management**, v. 228, p. 113668, 2021.

GOVINDAN, Kannan; RAJENDRAN, Sivakumar; SARKIS, Joseph; MURUGESAN, P. Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 98, p. 66–83, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.06.046. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.046>.

GRANBIO begins cellulosic production in Brazil. **Focus on Catalysts**, [S. l.], v. 2014, n. 12, p. 6, 2014. DOI: 10.1016/s1351-4180(14)70469-6.

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 129, n. July 2018, p. 201–205, 2019. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.12.006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.006>.

GRANEMANN, Sergio Ronaldo; GARTNER, Ivan Ricardo. Seleção de financiamento para aquisição de aeronaves: Uma aplicação do método de análise hierárquica (AHP). **TRANSPORTES**, v. 6, n. 1, 1998.

GUMTE, Kapil M.; MITRA, Kishalay. Bio-Supply Chain Network Design to tackle ethanol deficiency in India: A mathematical framework. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 234, p. 208–224, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.160. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.160>.

GUO, Miao; VAN DAM, Koen H.; TOUHAMI, Noura Ouazzani; NGUYEN, Remy; DELVAL, Florent; JAMIESON, Craig; SHAH, Nilay. Multi-level system modelling of the resource-food-bioenergy nexus in the global south. **Energy**, [S. l.], v. 197, p. 117196, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117196. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117196>.

HAASE, Martina; BABENHAUSERHEIDE, Nils; RÖSCH, Christine. Multi criteria decision analysis for sustainability assessment of 2nd generation biofuels. **Procedia CIRP**, [S. l.], v. 90, p. 226–231, 2020. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.124.

HASAN, Atiye Haj; AVAMI, Akram. Water and emissions nexus for biodiesel in Iran. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 93, p. 354-363, 2018.

HIGGINS, Andrew; ANTONY, George; SANDELL, Gary; DAVIES, Ian; PRESTWIDGE, Di; ANDREW, Bill. A framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. **Agricultural Systems**, [S. l.], v. 82, n. 2, p. 99–115, 2004. DOI: 10.1016/j.agsy.2003.12.004.

HILLIER, Frederick S.; PRICE, Camille C.; AUSTIN, Stephen F. **76-Models , Methods , Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process Second Edition**. [s.l: s.n.]. v. 175

HOLMATOV, B.; SCHYNS, J. F.; KROL, M. S.; GERBENS-LEENES, P. W.;

HOEKSTRA, A. Y. Can crop residues provide fuel for future transport? Limited global residue bioethanol potentials and large associated land, water and carbon footprints. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 149, p. 111417, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111417. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111417>.

HOFF, Holger. (2011). Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. *Stockholm Environment Institute*, Stockholm, p.1-52. <https://www.water-energy-food.org/resources/bonn2011-nexus-conference-background-paper-understanding-the-nexus-by-sei>.

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (2022). <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>

IMB, Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos (2021). https://www.imb.go.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&layout=edit&id=95

IMB, Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos: Goiás em Dados 2017 (2018). https://www.imb.go.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=85:goi%C3%AAs-em-dados-2017&catid=19&Itemid=151.

NDC, Contribuição Nacionalmente Determinada (2021). https://www.gov.br/mre/pt-br/canais_atendimento/imprensa/notas-a-imprensa/2020/apresentacao-da-contribuicao-nacionalmente-determinada-do-brasil-perante-o-acordo-de-paris.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Divisão do Brasil em Mesorregiões e Microrregiões Geográficas (1990).

IRENA, International Renewable Energy Agency; IEA Bioenergy – IEA Technology Col-laboration Programme on Bioenergy; FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2017. *Bioenergy for Sustainable Developed*. [http://www.ieabioenergy.com › uploads › 2017/01](http://www.ieabioenergy.com/uploads/2017/01).

Instituto de Água e Saneamento-Goiás. <https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/go/goias>

JABARI, Farkhondeh et al. A biogas-steam combined cycle for sustainable development of industrial-scale water-power hybrid microgrids: design and optimal scheduling. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 16, n. 1, p. 172-192, 2022.

JAVANBARG, Mohammad Bagher et al. Fuzzy AHP-based multicriteria decision making systems using particle swarm optimization. **Expert systems with applications**, v. 39, n. 1, p. 960-966, 2012.

JONKER, J. G. G.; JUNGINGER, H. M.; VERSTEGEN, J. A.; LIN, T.; RODRÍGUEZ, L. F.; TING, K. C.; FAAIJ, A. P. C.; VAN DER HILST, F. Supply chain optimization of sugarcane first generation and eucalyptus second generation ethanol production in Brazil. **Applied Energy**, [S. l.], v. 173, p. 494–510, 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.04.069. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.069>.

KARP, Susan G. et al. Sugarcane: A Promising Source of Green Carbon in the

Circular Bioeconomy. **Sugar Tech**, [S. l.], 2022. DOI: 10.1007/s12355-022-01161-z.

KHAN, Zarrar et al. Spatial and temporal synchronization of water and energy systems: Towards a single integrated optimization model for long-term resource planning. **Applied Energy**, v. 210, p. 499-517, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.003>.

KHATIWADA, Dilip; LEDUC, Sylvain; SILVEIRA, Semida; MCCALLUM, Ian. Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 85, p. 371–386, 2016. DOI: 10.1016/j.renene.2015.06.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.009>.

KOSTIN, Andrei; MACOWSKI, Diogo H.; PIETROBELLI, Juliana M. T. A.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo; JIMÉNEZ, Laureano; RAVAGNANI, Mauro A. S. S. Optimization-based approach for maximizing profitability of bioethanol supply chain in Brazil. **Computers and Chemical Engineering**, [S. l.], v. 115, p. 121–132, 2018. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2018.04.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.04.001>.

KUMAR, Ashish et al. A decision support system for the identification of critical zones in a watershed to implement land management practices. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 35, p. 1649-1664, 2021.

LAL, Rattan; MOHTAR, Rabi H.; ASSI, Amjad T.; RAY, Ram; BAYBIL, Haimanote; JAHN, Molly. Soil as a Basic Nexus Tool : Soils at the Center of the Food – Energy – Water Nexus. [S. l.], p. 117–129, 2017. DOI: 10.1007/s40518-017-0082-4.

LEÓN-OLIVARES, Edgar; MINOR-POPOCATL, Hertwin; AGUILAR-MEJÍA, Omar; SÁNCHEZ-PARTIDA, Diana. Optimization of the Supply Chain in the Production of Ethanol from Agricultural Biomass Using Mixed-Integer Linear Programming (MILP): A Case Study. **Mathematical Problems in Engineering**, [S. l.], v. 2020, 2020. DOI: 10.1155/2020/6029507.

LI, Mo et al. Optimization of sustainable bioenergy production considering energy-food-water-land nexus and livestock manure under uncertainty. **Agricultural Systems**, v. 184, p. 102900, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102900>

LI, Haiyan et al. Optimization of biochar systems in the water-food-energy-carbon nexus for sustainable circular agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v. 355, p. 131791, 2022.

LÓPEZ-DÍAZ, Dulce Celeste et al. Optimization of biofuels production via a water–energy–food nexus framework. **Clean technologies and environmental policy**, v. 20, p. 1443-1466, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1395-0>

LÁZARO, Lira Luz Benites; FORTI, Lais; II, Thomaz. A Participação de stakeholders na formulação da política brasileira de biocombustíveis (RenovaBio). [S. l.], v. 24, 2021. a.

LÁZARO, Lira Luz Benites; LUIZ, Leandro; BERMANN, Celio; GIAROLLA, Angelica; OMETTO, Jean. Policy and governance dynamics in the water-energy-food-land nexus of biofuels : Proposing a qualitative analysis model. **Renewable and**

Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 149, n. May, p. 111384, 2021. b. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111384.

LÁZARO, Lira Luz Benites; PUPPIM, Antonio; OLIVEIRA, De; LUZ, LUIZ, Leandro. Water-energy-food nexus approach at the core of businesses e How businesses in the bioenergy sector in Brazil are responding to integrated challenges? [S. l.], v. 303, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127102.

LÁZARO, Lira Luz Benites.; JUNIOR, W. C. Sousa; GIAROLLA, A. Land-water-food nexus of biofuels: Discourse and policy debates in. **Environmental Development**, [S. l.], v. 33, n. November 2019, p. 100491, 2020. DOI: 10.1016/j.envdev.2019.100491.

LÁZARO, Lira Luz Benites.; MELLO-THÉRY, N. A.; LAHSEN, M. Business storytelling about energy and climate change: The case of Brazil's ethanol industry. **Energy Research and Social Science**, [S. l.], v. 31, n. June, p. 77–85, 2017. DOI: 10.1016/j.erss.2017.06.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2017.06.008>.

MACOWSKI, Diogo H.; BONFIM-ROCHA, Lucas; ORGEDA, Rodrigo; CAMILO, Rodrigo; RAVAGNANI, Mauro A. S. S. Multi-objective optimization of the Brazilian industrial sugarcane scenario: a profitable and ecological approach. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [S. l.], v. 22, n. 3, p. 591–611, 2020. DOI: 10.1007/s10098-019-01802-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01802-0>.

MAHJOUR, Niloufar; SAHEBI, Hadi. The water-energy nexus at the hybrid bioenergy supply chain: A sustainable network design model. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 119, n. June, p. 106799, 2020. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106799. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106799>.

MANOCHIO, C.; ANDRADE, B. R.; RODRIGUEZ, R. P.; MORAES, B. S. Ethanol from biomass: A comparative overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 80, n. February, p. 743–755, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.063.

MANOJKUMAR, Narasimhan; MUTHUKUMARAN, Chandrasekaran; SHARMILA, Govindasamy. A comprehensive review on the application of response surface methodology for optimization of biodiesel production using different oil sources. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, [S. l.], n. xxxx, 2020. DOI: 10.1016/j.jksues.2020.09.012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.09.012>.

MARDANI, Abbas; JUSOH, Ahmad; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; CAVALLARO, Fausto; KHALIFAH, Zainab. Sustainable and renewable Energy: An overview of the application of multiple criteria decision making techniques and approaches. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 7, n. 10, p. 13947–13984, 2015. DOI: 10.3390/su71013947.

MARDANI, Abbas; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; KHALIFAH, Zainab; ZAKUAN, Norhayati; JUSOH, Ahmad; NOR, Khalil Md; KHOSHNOUDI, Masoumeh. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 71, n. July 2015, p. 216–256, 2017. DOI:

10.1016/j.rser.2016.12.053. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.053>.

MARTÍN, Mariano; GROSSMANN, Ignacio E. Water–energy nexus in biofuels production and renewable based power. **Sustainable Production and Consumption**, v. 2, p. 96-108, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2015.06.005>

MARTINEZ-HERNANDEZ, Elias; SAMSATLI, Sheila. Biorefineries and the food, energy, water nexus—towards a whole systems approach to design and planning. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 18, p. 16-22, 2017.

MÄRKER, Carolin; VENGHAUS, Sandra; HAKE, Jürgen-friedrich. Integrated governance for the food – energy – water nexus – The scope of action for institutional change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 97, n. April, p. 290–300, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.08.020.

Marcos Arenales [et al.]. Pesquisa operacional. [et al.]. - Rio de Janeiro. Elsevier: ABEPRO, 2011

MCKENNA, R.; BERTSCH, V.; MAINZER, K.; FICHTNER, W. Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear optimization to develop feasible energy concepts in small communities. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v. 268, n. 3, p. 1092–1110, 2018. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.01.036. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.036>.

MEDINA-SANTANA, Alfonso Angel et al. Optimal design of the water-energy-food nexus for rural communities. **Computers & Chemical Engineering**, v. 143, p. 107120, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107120>

MENESES-JÁCOME, A. et al. LCA applied to elucidate opportunities for biogas from wastewaters in Colombia. **Water Science and Technology**, v. 71, n. 2, p. 211-219, 2015.

MERCURE, J. et al. System complexity and policy integration challenges : The Brazilian Energy- Water-Food Nexus. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 105, n. March 2018, p. 230–243, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.045.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2015). *PROJEÇÕES DO AGRONEGÓCIO*. Projeções de Longo Prazo Brasil 2015/16 a 2025/26

MME. Ministérios Minas e Energia. (2021). Secretaria de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis - SPG: Renovabio. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1>.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick et al. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

MOHAMMADI, Fahime; SAHEBI, Hadi; ABDALI, Husam. Biofuel production from sewage sludge network under disruption condition: studying energy-water nexus. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 4, p. 2921-2931, 2023.

MOHAREB, Eugene et al. Considerations for reducing food system energy demand while scaling up urban agriculture. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 12, p. 125004, 2017.

MORETTI, Luca; MILANI, Mario; LOZZA, Giovanni Gustavo; MANZOLINI, Giampaolo. A detailed MILP formulation for the optimal design of advanced biofuel supply chains. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 171, p. 159–175, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.02.043. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.043>.

MOURMOURIS, J. C.; POTOLIAS, C. A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece. **Energy Policy**, [S. l.], v. 52, p. 522–530, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.09.074. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.074>.

MUNOZ, Raul; FENG, Kuishuang; SUN, Laixiang; GUILHOTO, Joaquim. The land-water nexus of biofuel production in Brazil: Analysis of synergies and trade-offs using a multiregional input-output model. [S. l.], v. 214, p. 52–61, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.264.

NAMANY, Sarah; AL-ANSARI, Tareq; GOVINDAN, Rajesh. Sustainable energy, water and food nexus systems: A focused review of decision-making tools for efficient resource management and governance. **Journal of Cleaner Production**, v. 225, p. 610–626, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.304>

NOVA CANA (2017). <https://www.novacana.com/n/etanol/politica/industria-biocombustivel-brasil-impulso-aprovacao-renovabio-131217>

OLIVEIRA, Cássia M.; PAVÃO, Leandro V.; RAVAGNANI, Mauro A. S. S.; CRUZ, Antonio J. G.; COSTA, Caliane B. B. Process integration of a multiperiod sugarcane biorefinery. **Applied Energy**, [S. l.], v. 213, n. October 2017, p. 520–539, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.11.020.

OZTURK, Ilhan. Sustainability in the food-energy-water nexus: Evidence from BRICS (Brazil, the Russian Federation, India, China, and South Africa) countries. **Energy**, [S. l.], v. 93, p. 999–1010, 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2015.09.104. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.104>.

PALAZZI, Rafael Baptista; MEIRA, Erick; KLOTZLE, Marcelo Cabus. The sugar-ethanol-oil nexus in Brazil: Exploring the pass-through of international commodity prices to national fuel prices. **Journal of Commodity Markets**, [S. l.], n. January, p. 100257, 2022. DOI: 10.1016/j.jcomm.2022.100257. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2022.100257>.

PAULA, Ana; ERMEL, Cardoso; MORANDI, Maria Isabel W. M. **Literature Reviews**. [s.l: s.n.].

PEÑA-TORRES, Daniel; BOIX, Marianne; MONTASTRUC, Ludovic. Optimization approaches to design water-energy-food nexus: A literature review. **Computers & Chemical Engineering**, p. 108025, 2022.

POLTRONIERE, Sônia Cristina; ALIANO FILHO, Angelo; CAVERSAN, Amanda Suellen; BALBO, Antonio Roberto; FLORENTINO, Helenice de Oliveira. Integrated planning for planting and harvesting sugarcane and energy-cane for the production of sucrose and energy. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S. l.], v. 184, n. September 2020, 2021. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105956.

PUPPIM DE OLIVEIRA, J. A. The policymaking process for creating competitive

assets for the use of biomass energy: The Brazilian alcohol programme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 6, n. 1–2, p. 129–140, 2002. DOI: 10.1016/S1364-0321(01)00014-4.

RABBANI, Masoud et al. Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering the bioethanol production strategies: A case study. **Computers & Chemical Engineering**, v. 134, p. 106720, 2020.

RAHEMI, Hasti; TORABI, S. Ali; AVAMI, Akram; JOLAI, Fariborz. Bioethanol supply chain network design considering land characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 119, n. November 2019, p. 109517, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109517. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109517>.

Raizen constructs new ethanol plant in Brazil. **Focus on Catalysts**, [S. l.], v. 2014, n. 6, p. 5, 2014. DOI: 10.1016/s1351-4180(14)70193-x.

Raizen: Renewables (2022) <https://www.raizen.com.br/en/our-business/renewables>.

Renewable Fuels Association - RFA (2022). <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>

RASTOGI, Meenal; SHRIVASTAVA, Smriti. Recent advances in second generation bioethanol production: An insight to pretreatment, saccharification and fermentation processes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 330-340, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.225>.

RODRÍGUEZ-CARPIO, Roymel; DE CARVALHO MIYOSHI, Simone; ELIAS, Andrew Milli; FURLAN, Felipe Fernando; DE CAMPOS GIORDANO, Roberto; Multi-objective optimization of a 1G-2G biorefinery: A tool towards economic and environmental viability. **Journal of Cleaner Production**, 284, 2021, 125431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125431>

ROSSETTO, Raffaella; RAMOS, Nilza Patricia; DE MATOS PIRES, Regina Celia; XAVIER, Mauro Alexandre; CANTARELLA, Heitor; GUIMARÃES DE ANDRADE LANDELL, Marcos. Sustainability in Sugarcane Supply Chain in Brazil: Issues and Way Forward. **Sugar Tech**, [S. l.], v. 24, n. June, p. 941–966, 2022. DOI: 10.1007/s12355-022-01170-y.

RULLI, Maria Cristina; BELLOMI, Davide; CAZZOLI, Andrea; CAROLIS, Giulia De; ODORICO, Paolo D. The water-land-food nexus of first- generation biofuels. **Nature Publishing Group**, [S. l.], n. February, p. 1–10, 2016. DOI: 10.1038/srep22521.

SAATY, T. L., & Vargas, L. G. (2012). The seven pillars of the analytic hierarchy process. In *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy proces* (pp. 23-40). Springer, Boston, MA.

SAATY, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.

SAHABUDDIN, Md; KHAN, Imran. Multi-criteria decision analysis methods for energy sector's sustainability assessment: Robustness analysis through criteria weight change. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S. l.], v. 47, n. December 2020, p. 101380, 2021. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101380. Disponível

em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101380>.

SAIF, Y.; ALMANSOORI, A. A capacity expansion planning model for integrated water desalination and power supply chain problem. **Energy conversion and management**, v. 122, p. 462-476, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.011>

SAIF, Yousef et al. Sustainable management and design of the energy-water-food nexus using a mathematical programming approach. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 98, n. 10, p. 2056-2078, 2020. <https://doi.org/10.1002/cjce.23825>.

SANT'ANNA, Ana Claudia; BERGTOLD, Jason S.; SHANOYAN, Aleksan; CALDAS, Marcellus M.; GRANCO, Gabriel. Biofuel feedstock contract attributes, substitutability and tradeoffs in sugarcane production for ethanol in the Brazilian Cerrado: A stated choice approach. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 185, n. 3420, p. 665–679, 2022. DOI: 10.1016/j.renene.2021.12.021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.021>.

SECCHI, Argimiro Resende. Multi-objective optimization of a 1G-2G biorefinery: A tool towards economic and environmental viability. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 284, p. 125431, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125431. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.1254>

SILVEIRA, Semida; JOHNSON, Francis X. Navigating the transition to sustainable bioenergy in Sweden and Brazil: Lessons learned in a European and International context. **Energy Research and Social Science**, [S. l.], v. 13, p. 180–193, 2016. DOI: 10.1016/j.erss.2015.12.021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.021>.

SIMPSON, Gareth B.; JEWITT, Graham PW. The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: a review. **Frontiers in Environmental Science**, p. 8, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00008>.

SITE WATER FOOTPRINT. *Bio-ethanol (from sugar cane)*. <https://tools.waterfootprint.org/product-gallery/>.

SOUZA, Glauca Mendes et al. The role of bioenergy in a climate-changing world. **Environmental development**, v. 23, p. 57-64, 2017. DOI: 10.1016/j.envdev.2017.02.008.

ŠTREIMIKIENE, Dalia; ŠLIOGERIENE, Jurate; TURSKIS, Zenonas. Multi-criteria analysis of electricity generation technologies in Lithuania. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 85, p. 148–156, 2016. DOI: 10.1016/j.renene.2015.06.032.

SUSTAINABLE, U. N.; GOALS, Development; REPORT, Assessment. Bioenergy for Sustainable Development. [S. l.], p. 1–4, [s.d.].

TAPIA, John Frederick D.; SAMSATLI, Sheila; DOLIENTE, Stephen S.; MARTINEZ-HERNANDEZ, Elias; GHANI, Wan Azlina Binti Wan Ab Karim; LIM, Kean Long; SHAFRI, Helmi Zuhaidi Mohd; SHAHARUM, Nur Shafira Nisa Binti. Design of biomass value chains that are synergistic with the food–energy–water nexus: Strategies and opportunities. **Food and Bioproducts Processing**, [S. l.], v. 116, p. 170–185, 2019. DOI: 10.1016/j.fbp.2019.05.006. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.05.006>.

TEIXEIRA, Eduardo dos Santos; RANGEL, Socorro; FLORENTINO, Helenice de O.; DE ARAUJO, Silvio Alexandre. A review of mathematical optimization models applied to the sugarcane supply chain. **International Transactions in Operational Research**, [S. l.], v. 0, p. 1–34, 2021. DOI: 10.1111/itor.13056.

THOMAS, Sanju et al. Socio-economic and environmental analysis on solar thermal energy-based polygeneration system for rural livelihoods applications on an Island through interventions in the energy-water-food nexus. **Energy Conversion and Management**, v. 270, p. 116235, 2022.

TN Petróleo. Benício Biz Editores. 2017. <https://tnpetroleo.com.br/revistas/2022/142>

TORRES, Cássia Juliana Fernandes et al. A literature review to propose a systematic procedure to develop “nexus thinking” considering the water–energy–food nexus. **Sustainability**, v. 11, n. 24, p. 7205, 2019.

ÚNICA. União da Agroindústria Canavieira. Observatório da Cana, 2022. <https://observatoriodacana.com.br/sub.php?menu=producao>

UNITED NATIONS. Take action for the sustainable development goals. (2020). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

VANDENBERGHE, L. P. S. et al. Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 167, n. January 2021, p. 112721, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112721. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721>.

WANG, Jiang Jiang; JING, You Yin; ZHANG, Chun Fa; ZHAO, Jun Hong. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 13, n. 9, p. 2263–2278, 2009. DOI: 10.1016/j.rser.2009.06.021.

YANG, Jiashuai et al. Assessing the development potential of non-food biofuel crops under the water-land-biofuel nexus perspective. **Science of The Total Environment**, v. 847, p. 157659, 2022.

YING, Hoo Poh; CHIEN, Cassandra Bong Phun; VAN, Fan Yee. Operational management implemented in biofuel upstream supply chain and downstream international trading: Current issues in Southeast Asia. **Energies**, [S. l.], v. 13, n. 7, 2020. DOI: 10.3390/en13071799.

YOU, Chanhee; HAN, Seulki; KIM, Jiyong. Integrative design of the optimal biorefinery and bioethanol supply chain under the water-energy-food-land (WEFL) nexus framework. **Energy**, [S. l.], v. 228, p. 120574, 2021. a. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120574.

ZHAI, Yijie; ZHANG, Tianzuo; BAI, Yueyang; JI, Changxing; MA, Xiaotian; SHEN, Xiaoxu; HONG, Jinglan. Energy and water footprints of cereal production in China. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 164, n. August 2020, p. 105150, 2021. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105150. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105150>.

ZHONG, Jia et al. Effect of land use change for bioenergy production on feedstock cost and water quality. **Applied Energy**, v. 210, p. 580-590, 2018.

Apêndices

Apêndice 1 – Instrumento piloto



PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS

Caro Especialista,

Este trabalho é parte de uma pesquisa de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (MEPROS) da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC).

Estamos realizando uma pesquisa com o tema relacionado à otimização da cadeia de produção do etanol oriundo de cana de açúcar produzida no estado de Goiás. O objetivo da pesquisa é analisar três cenários de otimização nessa cadeia: econômico, balanceado e ambiental. Os cenários devem ser avaliados sob o ponto de vista dos principais decisores/especialistas (stakeholders) atuando em atividades diversas da cadeia produtiva do etanol (organizações produtivas, entidades da classe e Estado), para, a partir de alguns critérios de decisão considerados relevantes na literatura, determinar o cenário ideal para a cadeia de produção de Goiás.

O primeiro cenário (econômico) objetiva (exclusivamente) minimizar os custos na cadeia de suprimentos do etanol de primeira geração (E1G). O segundo cenário (balanceado) visa minimizar os custos atendendo demandas hídricas, alimentícias, energéticas e fundiárias, considerando o etanol de 1ª geração. O terceiro cenário (ambiental) visa minimizar custos, atendendo às demandas hídricas, alimentícias, energéticas e fundiárias na cadeia de suprimentos integrada de etanol de primeira e segunda geração (1G2G).

Considerando sua *expertise* no tema dessa pesquisa, V.Sra. foi convidada a participar desta pesquisa como especialista (*stakeholder*). A pesquisa envolve a aplicação de um questionário, cujo tempo de resposta é de até 15 minutos. Os critérios de decisão estão descritos na figura 1 e no quadro 1, apresentados a seguir.

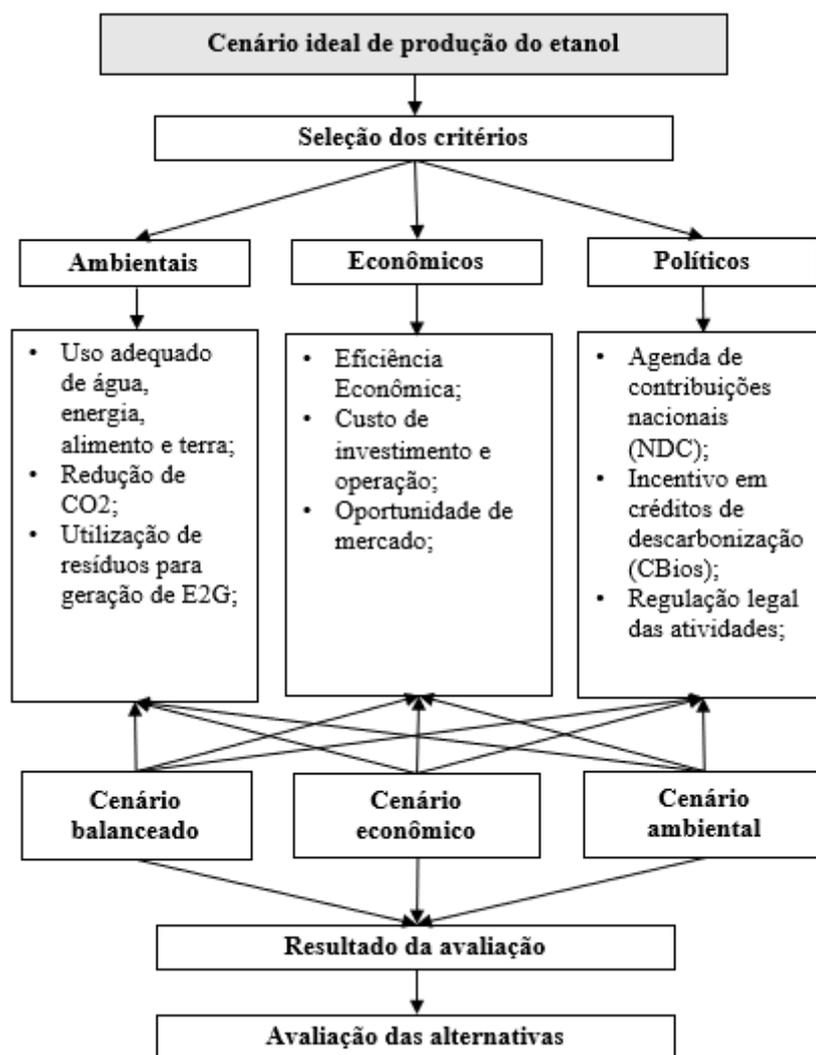


Figura 1: Cenários avaliados na pesquisa

Quadro 1: Critérios de avaliação de cenários

Critérios	
Aspectos ambientais(C1)	Priorizam alcançar a meta de geração energia limpa, reduzir a emissão de CO2, reduzir o consumo de recursos hídricos, reduzir a substituição de alimentos e ocupação de terras com a plantação da cana-de-açúcar (Büyüközkan et al., 2018; United Nations, 2020).
Aspectos econômicos(C2)	Priorizam a redução de investimentos e custos de produção e manutenção das unidades produtoras, de modo que os projetos de geração de etanol sejam rentáveis, além de buscar um mercado competitivo para a venda dos produtos (Büyüközkan et al., 2018).
Aspectos políticos(C3)	Priorizam a diversificação da matriz energética nacional a partir da atuação das unidades produtoras do Estado de Goiás, tornando-a mais aderente com as prioridades nacionais (Büyüközkan et al., 2018).
Subcritérios	
Ambientais (C1)	Descrição

Uso adequado de água, energia, alimento e terra	<p>Água: Compreende o consumo mínimo de água em toda a cadeia de produção do etanol e o mínimo descarte de águas residuais (ODS6).</p> <p>Energia: Representa o aumento da autossuficiência energética de usinas, biorrefinarias e armazéns, a eficiência energética na mesma área plantada e a diversificação da matriz energética nacional (ODS 7).</p> <p>Alimento: Compreende o alcance da segurança alimentar e promoção da sustentabilidade por meio do incentivo ao uso de culturas não alimentares e subutilizadas, como a palha e o bagaço, para produção de etanol de 2º geração e energia (ODS 2).</p> <p>Terra: Compreende a redução dos impactos ambientais no uso da terra, e da expansão indiscriminada de áreas plantadas, além da busca por locais ideais para produção (ODS 15).</p>
Utilização de resíduos para geração de E2G	Compreende a utilização de resíduos para a produção do etanol de segunda geração, aumentando a produtividade por área plantada.
Redução de CO ²	Compreende a redução da emissão de CO ² com o aumento do uso de biocombustíveis (ODS 13).
Econômicos (C2)	
Eficiência econômica	Representa o retorno sobre o investimento, a lucratividade que o produtor pode alcançar no processo produtivo do etanol.
Custos de investimento e operação	Compreende todos os custos relacionados com a compra de equipamentos, instalações tecnológicas, tecnologias de conversão, além dos custos com mão de obra, insumos e produção para a operação e distribuição na cadeia de suprimentos do etanol.
Oportunidade de mercado	Representa a valorização do produto no mercado, isto é, o etanol produzido deverá ser vendido quando o retorno for satisfatório, e não necessariamente conforme a demanda, de modo que deve ficar armazenado até que chegue ao preço adequado.
Políticos (C3)	
Agenda de contribuições nacionais (NDC)	Representa os acordos voluntários em consonância com as prioridades nacionais, a exemplo agenda de contribuições nacionais. Tais medidas versam sobre aumentar a produção sustentável de biocombustíveis e diversificar a matriz energética nacional, a fim de reduzir a emissão de carbono em 37% até 2025 e 43% até 2030, tomando por base o ano 2005.
Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)	Compreende o suporte e incentivo de instituições governamentais para a produção sustentável, como os créditos de descarbonização (CBios), que podem ser disponibilizados na bolsa de valores pelos produtores de etanol, à medida em que atestam a sustentabilidade do processo produtivo.
Regulação legal das atividades	Designa que as atividades do processo produtivo devem estar em acordo com as regulamentações legais estipuladas pelo Estado, à exemplo do limite de água por região, modo de colheita e tipo de fertilizante.

Questionário:

Gostaríamos de obter sua opinião através de escolhas entre alternativas indicadas nos questionários apresentados a seguir. Conforme preconiza o método multicritério de apoio à tomada de decisão utilizado nesta pesquisa (Análise Hierárquica de Processo - AHP), as perguntas deste questionário devem ser respondidas da seguinte maneira: se o atributo à esquerda for mais importante que o

correspondente à direita, coloque sua marca de seleção à esquerda, no nível de importância que você preferir. Se um atributo à direita for mais importante que o correspondente à esquerda, coloque sua marca de seleção, no nível de importância que você preferir.

Por exemplo, frente as opções A e B, apresentadas na Figura 2, você pode avaliar a importância relativa da seguinte maneira: se você acha que os critérios A e B têm a mesma importância, então marque com (X) o nível 1.

Se você acha que a Opção D é extremamente mais importante do que a Opção C, marque 9 com (X) no lado direito, no nível 9.

Se você acha que a Opção E tem uma importância fortemente maior que a Opção F, marque com (X) no lado esquerdo, no nível 5.

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior		
Opção A	9	8	7	6	5	4	3	2	X	2	3	4	5	6	7	8	9	Opção B	
Opção C	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	X	Opção D	
Opção E	9	8	7	6	X	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Opção F	

A escala de comparação de pares é usada para expressar a importância de um elemento sobre outro, conforme a tabela abaixo.

Definição	Intensidade de Importância
Importância igual	1
Importância moderadamente maior	3
Importância fortemente maior	5
Importância muito fortemente maior	7

Importância extremamente maior
Valores intermediários entre os julgamentos

9
2, 4, 6, 8

Ao final da pesquisa, a presente autora se compromete a relatar a você os resultados obtidos. Destaca-se que todas as informações e resultados serão apresentados de forma sigilosa, e nenhum dado pessoal do respondente será divulgado sem que haja a prévia autorização.

Desde já agradeço sua colaboração.

Atenciosamente,

Mestranda: Myllenna Rodrigues de Abreu

Orientador da Pesquisa: Prof. Ricardo Luiz Machado, Dr.

Avaliação dos critérios

Considerando a Figura 1 e a definição dos critérios no Quadro 1, dê sua opinião, comparando o grau de importância dos critérios abaixo para o cenário ideal de produção do etanol:

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Aspectos Ambientais	9	8	7	6	5	4	X3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Aspectos Econômicos
Aspectos Ambientais	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	X3	4	5	6	7	8	9	Aspectos Políticos
Aspectos Econômicos	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	X3	4	5	6	7	8	9	Aspectos Políticos

Em relação aos Aspectos Ambientais, considere o grau de importância dos subcritérios:

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior			Importância fortemente maior			Importância moderadamente maior			Importância igual		Importância moderadamente maior			Importância fortemente maior			Importância muito fortemente maior			Importância extremamente maior		
Redução de CO2	9	8	7	6	5	4	X3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Utilização de resíduos para etanol de 2ª geração							
Redução de CO2	9	8	7	6	5	4	3	2	X1	2	3	4	5	6	7	8	9	Uso adequado de água, energia, alimento e terra							
Utilização de resíduos para etanol de 2ª geração	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	X3	4	5	6	7	8	9	Uso adequado de água, energia, alimento e terra							

Em relação aos Aspectos Econômicos, considere o grau de importância dos subcritérios:

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior			Importância fortemente maior			Importância moderadamente maior			Importância igual		Importância moderadamente maior			Importância fortemente maior			Importância muito fortemente maior			Importância extremamente maior		
Custos de investimento e operação	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	X3	4	5	6	7	8	9	Eficiência Econômica							
Custos de investimento e operação	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	X3	4	5	6	7	8	9	Oportunidade de mercado							

Eficiência Econômica	9	8	7	6	5	4	X3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Oportunidade de mercado
----------------------	---	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-------------------------

Em relação aos Aspectos Políticos, considere o grau de importância dos subcritérios:

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Agenda de contribuições nacionais	9	8	7	6	5	4	3	2	X1	2	3	4	5	6	7	8	9	Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)
Agenda de contribuições nacionais	9	8	7	6	5	4	3	2	X1	2	3	4	5	6	7	8	9	Regulação legal das atividades
Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)	9	8	7	6	5	4	3	2	X1	2	3	4	5	6	7	8	9	Regulação legal das atividades

Em relação as alternativas: Cenário Ambiental, Cenário Econômico e Cenário Balanceado, qual a importância de cada subcritério:

Agenda de Contribuições Nacionais																		
	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Cenário Ambiental	9	8	7	6	X5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	X3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado

Cenário Econômico	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	X3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado
-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	---	--------------------

Custos de investimento e operação																		
	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	X1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	X1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado
Cenário Econômico	9	8	7	6	5	4	3	2	X1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado

Eficiência Econômica																		
	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	X1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	X1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado
Cenário Econômico	9	8	7	6	5	4	3	2	X1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado

Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior		
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	X	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado
Cenário Econômico	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	X	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado

Regulação legal das atividades

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior		
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado
Cenário Econômico	9	8	7	6	5	4	3	2	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado

Desenvolvimento de Mercado																							
	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior			Importância fortemente maior			Importância moderadamente maior			Importância igual		Importância moderadamente maior			Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior		
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	X	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico				
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	X	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado				
Cenário Econômico	9	8	7	6	5	4	3	2	1	X	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado				

Redução de CO2																							
	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior			Importância fortemente maior			Importância moderadamente maior			Importância igual		Importância moderadamente maior			Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior		
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	X	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico				
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	X	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado				
Cenário Econômico	9	8	7	6	5	4	3	2	1	X	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado				

Utilização de resíduos para produção de E2G

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior			
Cenário Ambiental	X	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico	
Cenário Ambiental	X	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado	
Cenário Econômico		9	8	7	6	5	4	3	2	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado

Uso de água, energia, alimento e terra

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior			
Cenário Ambiental		9	8	7	6	X	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico
Cenário Ambiental		9	8	7	6	X	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado
Cenário Econômico		9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	X	5	6	7	8	9	Cenário Balanceado

Apêndice 2 – Instrumento final

PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS

Caros Sr. Especialista,

Este trabalho é parte de uma pesquisa de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (MEPROS) da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC).

Estamos realizando uma pesquisa com o tema relacionado à otimização da cadeia de produção do etanol oriundo de cana de açúcar produzida no estado de Goiás. O objetivo da pesquisa é analisar dois cenários de otimização nessa cadeia: econômico, e ambiental. Os cenários devem ser avaliados sob o ponto de vista dos principais decisores/especialistas (*stakeholders*) atuando em atividades diversas da cadeia produtiva do etanol (organizações produtivas, entidades da classe e Estado), para, a partir de alguns critérios de decisão considerados relevantes na literatura, determinar o cenário ideal para a cadeia de produção de Goiás.

O primeiro cenário (econômico) objetiva (exclusivamente) minimizar os custos na cadeia de suprimentos do etanol de primeira geração (E1G). O segundo cenário (ambiental) visa minimizar custos, atendendo às demandas hídricas, alimentícias, energéticas e fundiárias na cadeia de suprimentos integrada de etanol de primeira e segunda geração (1G2G).

Considerando sua *expertise* no tema dessa pesquisa, V.Sra. foi convidada a participar desta pesquisa como especialista (*stakeholder*). A pesquisa envolve a aplicação de um questionário, cujo tempo de resposta é de até 20 minutos. Os critérios de decisão estão descritos na figura 1 e no quadro 1, apresentados a seguir.

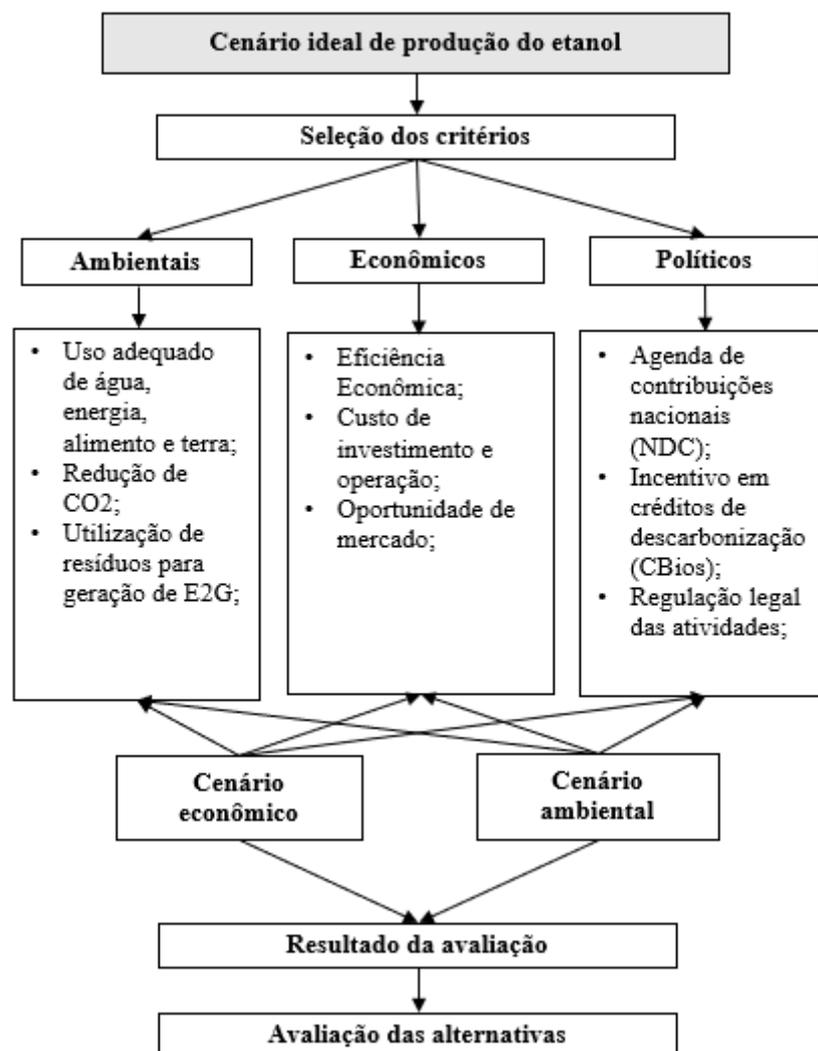


Figura 1: Cenários avaliados na pesquisa

A figura traz a árvore de decisão montada, nela é possível observar as três principais etapas no processo de decisão: (i) definição dos critérios e ponderação; (ii) ponderação das alternativas dentro de cada critério, (iii) comparação das alternativas e resultados.

Quadro 1: Critérios de avaliação de cenários

Critérios	
Aspectos ambientais(C1)	Priorizam alcançar a meta de geração energia limpa e a segurança energética, reduzir a emissão de CO2, reduzir o consumo de recursos hídricos, aumentar a segurança alimentar e reduzir os impactos no uso da terra (Büyüközkan et al., 2018; Nações Unidas, 2020).
Aspectos econômicos(C2)	Priorizam a redução de investimentos e custos de produção e manutenção das unidades produtoras, de modo que os projetos de geração de etanol sejam rentáveis, além de buscar um mercado competitivo para a venda dos produtos (Büyüközkan et al., 2018).
Aspectos políticos(C3)	Priorizam a diversificação da matriz energética nacional a partir da atuação das unidades produtoras do Estado de Goiás, tornando-a mais aderente com

	as prioridades nacionais (Büyüközkan et al., 2018).
Subcritérios	
Ambientais (C1)	Descrição
Uso adequado de água, energia, alimento e terra	Água: Compreende o consumo mínimo de água em toda a cadeia de produção do etanol e o mínimo descarte de águas residuais (ODS6). Energia: Representa o aumento da autossuficiência energética de usinas, biorrefinarias e armazéns, a eficiência energética na mesma área plantada e a diversificação da matriz energética nacional (ODS 7). Alimento: Compreende o alcance da segurança alimentar e promoção da sustentabilidade por meio do incentivo ao uso de culturas não alimentares e subutilizadas, como a palha e o bagaço, para produção de etanol de 2º geração e energia (ODS 2). Terra: Compreende a redução dos impactos ambientais no uso da terra, e da expansão indiscriminada de áreas plantadas, além da busca por locais ideais para produção (ODS 15).
Utilização de resíduos para geração de E2G	Compreende a utilização de resíduos para a produção do etanol de segunda geração, aumentando a produtividade por área plantada.
Redução de CO ²	Compreende a redução da emissão de CO ² com o aumento do uso de biocombustíveis (ODS 13).
Econômicos (C2)	
Eficiência econômica	Representa o retorno sobre o investimento, a lucratividade que o produtor pode alcançar no processo produtivo do etanol.
Custos de investimento e operação	Compreende todos os custos relacionados com a compra de equipamentos, instalações tecnológicas, tecnologias de conversão, além dos custos com mão de obra, insumos e produção para a operação e distribuição na cadeia de suprimentos do etanol.
Oportunidade de mercado	Representa a valorização do produto no mercado, isto é, o etanol produzido deverá ser vendido quando o retorno for satisfatório, e não necessariamente conforme a demanda, de modo que deve ficar armazenado até que chegue ao preço adequado.
Políticos (C3)	
Agenda de contribuições nacionais (NDC)	Representa os acordos voluntários em consonância com as prioridades nacionais, a exemplo agenda de contribuições nacionais. Tais medidas versam sobre aumentar a produção sustentável de biocombustíveis e diversificar a matriz energética nacional, a fim de reduzir a emissão de carbono em 37% até 2025 e 43% até 2030, tomando por base o ano 2005.
Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)	Compreende o suporte e incentivo de instituições governamentais para a produção sustentável, como os créditos de descarbonização (CBios), que podem ser disponibilizados na bolsa de valores pelos produtores de etanol, à medida em que atestam a sustentabilidade do processo produtivo.
Regulação legal das atividades	Designa que as atividades do processo produtivo devem estar em acordo com as regulamentações legais estipuladas pelo Estado, à exemplo do limite de água por região, modo de colheita e tipo de fertilizante.

Questionário:

Gostaríamos de obter sua opinião através de escolhas entre alternativas indicadas nos questionários apresentados a seguir. Conforme preconiza o método multicritério de apoio à tomada de decisão utilizado nesta pesquisa (Análise

Hierárquica de Processo - AHP), as perguntas deste questionário devem ser respondidas da seguinte maneira: se o atributo à esquerda for mais importante que o correspondente à direita, coloque sua marca de seleção à esquerda, no nível de importância que você preferir. Se um atributo à direita for mais importante que o correspondente à esquerda, coloque sua marca de seleção, no nível de importância que você preferir.

Por exemplo, frente as opções A e B, apresentadas na Figura 2, você pode avaliar a importância relativa da seguinte maneira: se você acha que os critérios A e B têm a mesma importância, então marque com (X) o nível 1.

Se você acha que a Opção D é extremamente mais importante do que a Opção C, marque 9 com (X) no lado direito, no nível 9.

Se você acha que a Opção E tem uma importância fortemente maior que a Opção F, marque com (X) no lado esquerdo, no nível 5

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior		
Opção A	9	8	7	6	5	4	3	2	<input checked="" type="checkbox"/>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Opção B
Opção C	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	<input checked="" type="checkbox"/>	9	Opção D
Opção E	9	8	7	6	<input checked="" type="checkbox"/>	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Opção F

A escala de comparação de pares é usada para expressar a importância de um elemento sobre outro, conforme a tabela abaixo.

Definição	Intensidade de Importância
Importância igual	1
Importância moderadamente maior	3
Importância fortemente maior	5

Importância muito fortemente maior	7
Importância extremamente maior	9
Valores intermediários entre os julgamentos	2, 4, 6, 8

Ao final da pesquisa, a presente autora se compromete a relatar a você os resultados obtidos. Destaca-se que todas as informações e resultados serão apresentados de forma sigilosa, e nenhum dado pessoal do respondente será divulgado sem que haja a prévia autorização.

Desde já agradeço sua colaboração.

Atenciosamente,

Mestranda: Myllenna Rodrigues de Abreu

Orientador da Pesquisa: Prof. Ricardo Luiz Machado, Dr.

Avaliação dos critérios

Considerando a Figura 1 e a definição dos critérios no Quadro 1, dê sua opinião, comparando o grau de importância dos critérios abaixo para o cenário ideal de produção do etanol:

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Aspectos Ambientais	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Aspectos Econômicos
Aspectos Ambientais	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Aspectos Políticos
Aspectos Econômicos	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Aspectos Políticos

Em relação aos Aspectos Ambientais, considere o grau de importância dos subcritérios:

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Redução de CO2	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Utilização de resíduos para etanol de 2ª geração
Redução de CO2	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Uso adequado de água, energia, alimento e terra
Utilização de resíduos para etanol de 2ª geração	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Uso adequado de água, energia, alimento e terra

Em relação aos Aspectos Econômicos, considere o grau de importância dos subcritérios:

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Custos de investimento e operação	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Eficiência Econômica
Custos de investimento e operação	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Oportunidade de mercado
Eficiência Econômica	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Oportunidade de mercado

Em relação aos Aspectos Políticos, considere o grau de importância dos subcritérios:

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior		
Agenda de contribuições nacionais	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)	
Agenda de contribuições nacionais	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Regulação legal das atividades	
Incentivo em créditos de descarbonização (CBios)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Regulação legal das atividades	

Em relação as alternativas: Cenário Ambiental e Cenário Econômico, qual a importância de cada subcritério:

Agenda de Contribuições Nacionais																			
	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior		
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico	

Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico
-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-------------------

Regulação legal das atividades

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico

Oportunidade de Mercado

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico

Redução de CO2

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
--	--------------------------------	--	------------------------------------	--	------------------------------	--	---------------------------------	--	-------------------	--	---------------------------------	--	------------------------------	--	------------------------------------	--	--------------------------------	--

Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico
-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-------------------

Utilização de resíduos para produção de E2G

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico

Uso de água, energia, alimento e terra

	Importância extremamente maior		Importância muito fortemente maior		Importância fortemente maior		Importância moderadamente maior		Importância igual		Importância moderadamente maior		Importância fortemente maior		Importância muito fortemente maior		Importância extremamente maior	
Cenário Ambiental	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cenário Econômico

Apêndice 4 – Algoritmo do Cenário Econômico

```

//Cenário 1 - Econômico

int nRegioes = 3;
range Regioes = 1..nRegioes;
int nArmazens = 2;
range Armazens = 1..nArmazens;
int nUsinas = 2;
range Usinas = 1..nUsinas;
int nProdutos = 2;
range Produtos = 1..nProdutos;
int nDistribuicao = 2;
range Distribuicao = 1..nDistribuicao;

//Custos
//Inhumas Itaberaí St Bárbara
float CTC [Regioes]= [7827.22, 7827.22, 7827.22]; // Custo médio de
preparação da terra + plantio na área r R$/ha

// Açúcar E1G
float CTP [Produtos]= [80, 3.07]; //Custo de Processamento do açúcar e
etanol R$/ton e R$/l

//Custo de transporte das regiões de cultivo para usinas R$/ton de cana
de açúcar

//Usina1 Usina2
float CTTC [Regioes][Usinas]= [[0, 41.55], //Inhumas
                                [0, 41.55], //Itaberaí
                                [0, 41.55]] ;//St Bárbara

//Custo de transporte de usinas para os centros de distribuição R$/ton/km
- R$/l/km
//Usina1 Usina2
float CTP [Usinas][Distribuicao] = [[104.34, 0], //CD1
                                    [0, 0.74]]; //CD2

//Custo de armazenamento
//P1 //P2
float CTA [Armazens]= [36.35, 0.036] ;//Armazém de açúcar e etanol
R$/ton e R$/l

//Capacidade
float CapacidadeR [Regioes]= [7922.7, 3554.2, 3405.0]; // Disponibilidade
de terra na região r em hectares/ano
float CapacidadeP [Produtos] = [0, 105171840]; // Capacidade de
processamento da usina ton ou L/ ano
float CapacidadeRTon [Regioes]= [505920, 375120, 267840]; // Capacidade de
produção em toneladas de cada região/ano

float CapUsina [Usinas]= [0, 1215200]; // capacidade de moagem da usina
ton/ano
float CapacidadeU [Usinas] = [0, 105171840]; //Capacidade de processamento
da usina ton/ano e litros/ano

```

```

//Demandas
float DemandaP [Usinas] = [0, 691991.84]; //Demanda de processamento da
usina em toneladas de cana/ano
float DemandaD [Distribuicao] = [0, 61231124.28]; //Demanda histórica
pelos produtos no mercado
float DemandaR [Regioes]= [5490.03, 2705.17, 2335.61]; // Demanda por área
na região

//Variáveis de decisão
dvar int+ Armazenar [Armazens]; //Quantidade de produto a ser armazenado
no armazém a;
dvar int+ TransportarU [Usinas][Distribuicao]; //Quantidade de produto a
ser transportado das Usinas para os centros de distribuição;
dvar int+ Plantar [Regioes]; //Área total de terra (hectare) utilizada na
região  $r \in R = \{1,2,3\}$ ;
dvar int+ Produzir [Produtos]; //Quantidade do produto  $p \in P$  gerado a
partir do processamento na usina;
dvar int+ TransportarR [Regioes][Usinas]; // Quantidade de produto a ser
transportado das Regiões para as Usinas

//Função Objetivo

minimize
    sum (r in Regioes)
        (CTC [r] * Plantar[r]) +
    sum (p in Produtos)
        (CTP [p] * Produzir [p]) +
    sum (r in Regioes, u in Usinas)
        (CTTC [r][u] * TransportarR [r][u]) +
    sum (u in Usinas, c in Distribuicao)
        (CTTP [u][c] * TransportarU [u][c]) +
    sum (a in Armazens)
        (CTA [a] * Armazenar [a]);

//Restrições

subject to {
forall (r in Regioes)
    Plantar [r] <= CapacidadeR [r]; // Disponibilidade de Terra
forall (r in Regioes)
    Plantar [r] >= DemandaR [r]; //Demanda de Terra

forall (p in Produtos)
    Produzir [p] <= CapacidadeP [p]; //Capacidade Usina
forall (c in Distribuicao)
    sum (p in Produtos)
        Produzir [p] >= DemandaD [c]; //Demanda de produto pelo mercado

forall (r in Regioes)
    sum (u in Usinas)
        TransportarR [r][u] <= CapacidadeRTon [r]; //Capacidade de produção por
área em toneladas de cana de açúcar

forall (u in Usinas)
    sum (r in Regioes)
        TransportarR [r][u] >= DemandaP [u]; //Demanda das Usinas em toneladas de
cana de açúcar

```

```
forall (u in Usinas)
  sum (r in Regioes)
    TransportarR [r][u] <= CapUsina [u]; // Capacidade das usinas em
toneladas de cana de açúcar

forall (u in Usinas)
  sum (c in Distribuicao)
    TransportarU [u][c] <= CapacidadeU [u]; //Capacidade de processamento de
produtos na usina

forall (c in Distribuicao)
  sum (u in Usinas)
    TransportarU [u][c] >= DemandaD [c]; //Demanda do mercado

forall (a in Armazens) //Capacidade do armazém
  Armazenar [a] <= 0;
}
```

Apêndice 5 - Algoritmo do Cenário Ambiental

```

//Cenário Ambiental
//Custo Total de Processamento

int nRegioes = 3;
range Regioes = 1..nRegioes;
int nArmazens = 2;
range Armazens = 1..nArmazens;
int nUsinas = 2;
range Usinas = 1..nUsinas;
int nProdutos = 3;
range Produtos = 1..nProdutos;
int nDistribuicao =3;
range Distribuicao = 1..nDistribuicao;

//Custos
//Inhumas Itaberaí St Bárbara
float CTC [Regioes]= [7827.22, 7827.22, 7827.22]; // Custo médio de
preparação da terra + plantio na área r R$/ha

//Custo Total de Processamento
//Açúcar E1G E2G
float CTP [Produtos]= [80, 3.07, 4.81]; //Custo de Processamento do açúcar
e etanol

//Custo de transporte de Regiões de cultivo para usinas R$/ton
//Usina1 Usina2
float CTC [Regioes][Usinas]= [[0, 41.55], //Inhumas
[0, 41.55], //Itaberaí
[0, 41.55]]; //St Bárbara

//Custo de transporte das usinas para os centros de distribuição
//Usina1 Usina2
float CTP [Distribuicao][Usinas] = [[104.34, 0], //CD1
[0, 0.74], //CD2
[0, 0.74]]; //CD3

//Custo de armazenamento
//Açúcar //Etanol
float CTA [Armazens]= [36.35, 0.036];//Armazém de açúcar

//Uso da água
float AguaConvert = 32000; // Quantidade de água necessária para converter
1 tonelada de cana de açúcar na usina (l/ton);
float AguaEnca [Regioes] = [48694.51, 40271.77, 44384]; // Disponibilidade
de água encanada água per capita/ano
float AguaDispRio = 32412000; // Disponibilidade de água do Bacia Meia
Ponte para usina l/ano

//Inhumas//Itaberaí //Santa Bárbara
float Populacao [Regioes] = [53259, 43622, 6057]; // População abastecida
de cada região

//Capacidade de Processamento

```

```

float Capacidade [Produtos] = [0, 105171840, 37468429.50]; // Capacidade
de processamento da usina ton ou L/ano
float CapacidadeR [Regioes]= [7922.7, 3554.2, 3405.0]; // Disponibilidade
de terra na região r em hectares
float CapacidadeRTon [Regioes]= [505920, 375120, 267840]; // Capacidade de
produção em toneladas de cada região/ano

float CapUsina [Usinas]= [0, 1215200]; // Capacidade de moagem da usina
ton/ano
float CapacidadeU [Usinas] = [0, 142640269.56]; //Capacidade de
processamento da usina 1g2g
float DemandaR [Regioes]= [5490.03, 2705.17, 2335.61]; // Demanda por área
na região

//Demanda por açúcar (alimento) e etanol (energia)
float Demanda [Produtos]= [0, 61231124.28, 37468429]; // Quantidade de
produto p demandado pelo mercado/ano
float DemandaP [Usinas] = [0, 691991.84]; //Demanda de processamento da
usina em toneladas de cana/ano

//Variável de decisão

dvar int+ Producao [Produtos]; //Quantidade do produto gerado a partir do
processamento na usina (ton ou litros)
dvar int+ Armazenar [Armazens]; //Quantidade de produto a ser armazenado
(ton ou litros);
dvar int+ TransportadoU [Distribuicao][Usinas]; //Quantidade de produto a
ser transportado das Usinas para os centros de distribuição;
dvar int+ AreaTotal [Regioes]; //Área total de terra (hectare) utilizada
na região  $r \in R = \{1,2,3\}$ ;
dvar int+ TransportadoR [Regioes][Usinas]; // Quantidade de produto a ser
transportado das Regiões para as Usinas
dvar float+ Wp [Usinas]; // Quantidade de água fornecida para operar uma
usina litros/ano;
dvar float+ Ws [Regioes]; // Quantidade de água a ser fornecida para
população da região litros/ano;

//Função Objetivo

minimize
  sum (p in Produtos)
    (CTP [p] * Producao [p]) +
  sum (r in Regioes)
    (CTC [r] * AreaTotal[r]) +
  sum (r in Regioes, u in Usinas)
    (CTTC [r][u] * TransportadoR [r][u]) +
  sum (c in Distribuicao, u in Usinas)
    (CTTP [c][u] * TransportadoU [c][u]) +
  sum (a in Armazens)
    (CTA [a] * Armazenar [a]);

//Restrições
//Capacidade Usina
subject to {

```

```

forall (p in Produtos)
Producao [p] <= Capacidade [p]; //Capacidade usina
forall (p in Produtos)
  Producao [p] >= Demanda [p]; //Demanda do mercado

//Uso do Solo
forall (r in Regioes)
  AreaTotal [r] <= CapacidadeR [r]; // Disponibilidade de terra
  forall (r in Regioes)
    AreaTotal [r] >= DemandaR [r]; //Demanda anual de terra

//Demanda por alimento e energia no processamento
forall (p in Produtos)
  Producao [p] <= Capacidade [p]; //Capacidade Usina

  forall (c in Distribuicao)
    sum (p in Produtos)
      Producao [p] >= Demanda [c]; //Demanda de produto pelo mercado

//Demanda por alimento e energia no transporte
forall (r in Regioes)
  sum (u in Usinas)
    Transportador [r][u] <= CapacidadeRTon [r]; //Capacidade de produção por
área em toneladas de cana de açúcar

    forall (u in Usinas)
      sum (r in Regioes)
        Transportador [r][u] >= DemandaP [u]; //Demanda das Usinas em toneladas
de cana de açúcar

forall (u in Usinas)
  sum (r in Regioes)
    Transportador [r][u] <= CapUsina [u]; // Capacidade das usinas em
toneladas de cana de açúcar

forall (u in Usinas)
  sum (c in Distribuicao)
    TransportadoU [c][u] <= CapacidadeU [u]; //Capacidade de processamento
de produtos na usina

forall (c in Distribuicao)
  sum (u in Usinas)
    TransportadoU [c][u] >= Demanda [c]; //Demanda do mercado

forall (a in Armazens) //Capacidade do armazém
  Armazenar [a] <= 0;

//Uso da água
forall (u in Usinas)
  Wp[u] <= DemandaP[u] * AguaConvert; // Quantidade de água fornecida para
operar uma usina;

forall (r in Regioes)
  Ws[r] <= AguaEnca [r] * Populacao[r]; //Quantidade de água consumida pela
população da região em ano

forall (r in Regioes)
  sum (u in Usinas)

```

```
Wp [u] + Ws[r] >= AguaDispRio + (AguaEnca [r] * Populacao[r]); //  
Disponibilidade na Bacia do Meia Ponte + Disponibilidade de água para as  
regiões  
}
```