



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



DIOGO HERON MACOWSKI

**OTIMIZAÇÃO BI-OBJETIVO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA CANA-DE-
AÇÚCAR BRASILEIRA: ABORDAGEM ECONÔMICA E AMBIENTAL**

Linha de Pesquisa: Síntese e Otimização de Processos

Maringá

2018

DIOGO HERON MACOWSKI

**OTIMIZAÇÃO BI-OBJETIVO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA CANA-DE-
AÇÚCAR BRASILEIRA: ABORDAGEM ECONÔMICA E AMBIENTAL**
Linha de Pesquisa: Síntese e Otimização de Processos

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Química.
Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

Orientador: Prof. Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani

Maringá

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

M171o Macowski, Diogo Heron
Otimização bi-objetivo da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar brasileira: abordagem econômica e ambiental / Diogo Heron Macowski. -- Maringá, 2018. 164 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2018.

1. Açúcar - Otimização - Cadeia de suprimentos. 2. Bioetanol - Otimização - Cadeia de suprimentos. 3. Açúcar - Avaliação do ciclo de vida. 4. Bioetanol - Avaliação do ciclo de vida. 5. Cana-de-açúcar - Indústria - Economia. 6. Cana-de-açúcar - Indústria - Meio ambiente. I. Ravagnani, Mauro Antônio da Silva Sá, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDD 21.ed. 665.3

Elaine Cristina Soares Lira - CRB 1202/9

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por Diogo Heron Macowski perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 21 de dezembro de 2018.

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani
Presidente/Orientador



Prof.ª Dr.ª Caliane Bastos Borba Costa
Membro



Prof. Dr. Gilberto Clóvis Antonelli
Membro



Prof.ª Dr.ª Flávia Aparecida Reitz Cardoso
Membro



Prof.ª Dr.ª Thelma Pretel Brandão Vechi
Membro

In Memoriam

Ao meu tio, Edgard Antônio Basso, em agradecimento ao cuidado e carinho a mim destinados, durante toda sua vida. Ele, que foi tio, pai, irmão, amigo, tio-avô da minha filha, partiu cedo demais...

AGRADECIMENTOS

Antes e acima de tudo, a Deus.

À minha esposa Vivian Senger Macowski, e à minha filha, Ana Luiza, pelo carinho de cada dia, e, especialmente, nesta fase da minha vida acadêmica, pelo tão necessário apoio, incentivo e tranquilidade que me proporcionaram.

À toda a minha família, em especial à minha mãe, Dra. Edcleia Aparecida Basso Didyk, pelo exemplo profissional que me inspira, pela determinação invejável, e por todo o suporte dado durante toda a minha vida. Sem seu apoio, com certeza não chegaria ao final de mais esta etapa.

Ao meu orientador, professor Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani, por sua pronta disponibilidade, oferecendo-me o alicerce interdisciplinar necessário em todas as etapas deste doutorado, regado sempre por muita paciência.

Aos meus amigos do grupo de estudo em ACV e demais colegas de doutorado, e em especial: Douglas Surco Fukunaga, Leandro Pavão, e Lucas Bonfim Rocha, que muito me ajudaram nas inúmeras dificuldades por mim encontradas durante o decorrer desse período.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, que me transmitiram conhecimentos em diversas novas áreas.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela liberação total das minhas funções, para que eu pudesse me qualificar.

Aos membros das bancas de qualificação e defesa, por terem aceitado contribuir para o enriquecimento deste trabalho, e, conseqüentemente, para a ciência do nosso país.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

MACOWSKI, Diogo Heron. **Otimização Bi-Objetivo da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar brasileira:** abordagem economia e ambiental. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá – UEM – Maringá – PR, Brasil, defendida em 21 de dezembro de 2018. 166 p. Orientador: Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani.

RESUMO

A cana-de-açúcar pode desempenhar um papel importante na resolução de muitos desafios econômicos e ambientais, pois tem o potencial de criar empregos, reduzir as emissões de dióxido de carbono, aumentar a segurança energética, e reduzir a dependência global de combustíveis fósseis, entre outros. Neste trabalho é apresentada uma abordagem matemática para otimizar a cadeia de suprimentos brasileira de açúcar e bioetanol, utilizando a cana-de-açúcar como matéria-prima. O gerenciamento desta cadeia de suprimento foi entendido como um problema para a área de otimização, por meio de uma formulação bi-PLIM, para encontrar soluções que equilibrem dois objetivos conflitantes: maximização do critério financeiro e minimização dos danos ambientais. O modelo matemático, implementado no GAMS, compara sete diferentes tecnologias de produção, propondo um conjunto de possibilidades otimizadas de cadeia de suprimentos para o cenário brasileiro. Os resultados indicam que as quantidades e a seleção de tecnologias apontadas pelas soluções ótimas de Pareto são diferenciadas, delineando três configurações diferentes: a primeira com ênfase ecológica, a segunda com ênfase econômica, e a terceira representando um cenário equilibrado. Consequentemente, a distribuição de tecnologias em cada uma das regiões brasileiras é mostrada nesses três cenários distintos, indicando que para aproximar a corrente da solução balanceada é necessário migrar as usinas de tecnologia para apenas produtos derivados do açúcar para tecnologias de produção mista (açúcar e bioetanol) e complementar a produção de bioetanol com destilarias autônomas, especialmente de produção de bioetanol anidro. Nesse sentido, autoridades governamentais, investidores do setor e tomadores de decisão podem criar estratégias para a implementação de novas indústrias com base nas recomendações aqui estabelecidas.

Palavras-chave: Otimização. Cadeia de Suprimentos. Avaliação do Ciclo de Vida. Açúcar. Bioetanol.

MACOWSKI, Diogo Heron. **Bi-Objective Optimization of the supply chain of Brazilian sugar cane**: economic and environmental approach. Doctoral Degree Thesis (Chemical Engineering Graduate Program) – State University of Maringá – UEM – Maringá – PR, Brazil, presented on December 21th, 2018, 166 p. Advisor: Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani.

ABSTRACT

Sugarcane can play an important role to solve many of the economic and environmental challenges as it has the potential to create jobs, lower carbon dioxide emissions, enhance energy security and reduce global dependence on fossil fuels. In this paper, a mathematical approach is presented to optimize Brazilian sugar and bioethanol supply chain (SC), having sugarcane as raw material. The supply chain management of sugarcane-based products can be seen as an optimization problem with a bi-MILP formulation, in order to find solutions to balance two conflicting objectives: maximization of the financial criterion and minimization of environmental damage. The mathematical model, implemented in GAMS, compares seven different production technologies, proposing a set of optimal supply chain possibilities for the Brazilian scenario. Results indicate that both quantities and selection of technologies pointed out by Pareto optimal solutions are distinguished, delineating three different configurations: the first with an ecological emphasis, the second with an economic emphasis, and the third representing a balanced scenario. Consequently, the distribution of technologies in each of the Brazilian regions is shown in these three distinct scenarios, indicating that to approximate the current chain of balanced solution is necessary to migrate technology plants of only sugar products to technologies of mixed production (i.e. sugar and bioethanol) and complement the bioethanol production with autonomous distilleries, especially those of anhydrous bioethanol production. In this sense, governmental authorities, sector investors and decision makers can strategize the implementation of new industries based on the recommendations now established.

Key-Words: Optimization. Supply Chain Management. Sugar. Ethanol. Life Cycle Assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de um problema de otimização segundo suas variáveis e equações	32
Figura 2 – Exemplo ilustrativo com cinco opções de plantas	38
Figura 3 – Fronteira de Pareto para o problema da implantação da indústria.....	39
Figura 4 – Processo de otimização e decisão: abordagem a-priori	41
Figura 5 – Processo de otimização e decisão: abordagem a posteriori.	42
Figura 6 – Processo de otimização e decisão: abordagem interativa.	43
Figura 7 – Estrutura da avaliação de ciclo de vida.....	49
Figura 8 - Procedimento simplificado para análise de ICV	52
Figura 9 – Elementos da fase de AICV	53
Figura 10 – Elementos da interpretação e as outras fases da ACV	55
Figura 11 – Distribuição das indústrias de cana-de-açúcar pelas regiões e estados.....	61
Figura 12 - Evolução da produção de etanol anidro e hidratado entre as safras 2007/08-2017/18.....	62
Figura 13 – Produção de açúcar e etanol, bioeletricidade e resíduos.....	66
Figura 14 – Distribuição atual da cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar no Brasil	110
Figura 15 – Satisfação da demanda pelos produtos principais nas regiões.....	111
Figura 16 – Configuração ótima para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil, para o objetivo econômico.....	112
Figura 17 – Distribuição das indústrias por tecnologias nos cenários avaliados.	117
Figura 18 – Configuração da cadeia nos diferentes cenários	118
Figura 19 – Comparação entre as tecnologias (T1-T7) quanto às categorias de impacto ao nível <i>midpoint</i>	119
Figura 20 – Fronteira de Pareto para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar considerando os indicadores VPL e GWP.....	122
Figura 21 – Comparação das tecnologias industriais implementadas em cada solução de Pareto	124
Figura 22 – Configuração ótima econômica da cadeia de açúcar/etanol no Brasil para o problema bi-objetivo	125
Figura 23 – Configuração ótima ecológica da cadeia de açúcar/etanol no Brasil.....	128
Figura 24 – Configuração ótima balanceada da cadeia de açúcar/etanol no Brasil	129

Figura 25 – Comportamento das categorias de impacto ao nível *midpoint* do método ReCiPe
..... 133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de caracterização associados a cada categoria de impacto (ReCiPe).....	56
Tabela 2 – Síntese do levantamento feito envolvendo Otimização, ACV e CS relacionado ao bioetanol.	86
Tabela 3 – Dados de entrada da produção de açúcar e etanol referente a 1ton de cana processada.....	91
Tabela 4 – Dados de saída da produção de açúcar e etanol referente a 1ton de cana processada.....	92
Tabela 5 – Coeficientes de balanço de massa para as tecnologias de produção.....	95
Tabela 6 – Resultados obtidos na análise de sensibilidade do modelo.....	114
Tabela 7 – Comparação entre a configuração atual da CS e as configurações obtidas nos cenários analisados	132
Tabela 8 – Valores obtidos nas três soluções avaliadas para as 18 categorias de impacto. ..	134

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise Ciclo da Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ALOP	Potencial de Ocupação de Terra Agrícola (m ² a)
CENAL	Comissão Executiva Nacional do Álcool
CIMA	Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool
CNAL	Conselho Nacional do Álcool
CML	Centro de Estudos do Meio-ambiente
COP-17, 21	Convenção das Nações Unidas sobre Mudança de Clima
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
EA	Etanol Anidro
EH	Etanol Hidratado
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FDP	Potencial de Depleção Fóssil (kg oil-Eq)
FEP	Potencial de eutrofização da água doce (kg 1,4-DC)
FETP	Potencial de ecotoxicidade da água doce (kg 1,4-DC)
GEE	Gases do Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global (kg CO ₂ -Eq)
HTP	Potencial de toxicidade humana (kg 1,4-DC)
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
INDC	(Sigla em inglês para Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas)
IRP	Potencial de radiação ionizante (kg U235-Eq)
MDP	Potencial de depleção mineral (kg Fe-Eq)
MEP	Potencial de eutrofização marinha (kg N-Eq)
METP	Potencial de ecotoxicidade marinha (kg 1,4-DC)
MILP	Programação Linear Inteira Mista
NBR	Normas Brasileiras

NDC	(Sigla em inglês para Contribuições Nacionalmente Determinadas)
NLTP	Potencial de Transformação de Terras Naturais (m ² a)
ODP	Potencial de Depleção do Ozônio (kg CFC-11)
PL	Problema de Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PLIB	Programa de Programação Linear Inteira Binária
PLIM	Programa de Programação Linear Inteira Mista
PM	Programação por Metas
PMFP	Potencial de Formação de Matéria Particulada (kg PM10-Eq)
PNL	Programação Não Linear
POFP	Potencial de Formação de Oxidante Fotoquímico (kg NMVOC)
POM	Problemas e Otimização Multiobjetivo
PSE	<i>Process Systems Engineering</i>
SETAC	<i>The Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SC/CS	<i>Supply Chain/Cadeia de Suprimentos</i>
SCM/GCS	<i>Supply Chain Management/Gestão da Cadeia de Suprimentos</i>
TAP	Potencial de Acidificação Terrestre (kg SO ₂ -Eq)
TETP	Potencial de Ecotoxicidade Terrestre (kg 1,4-DC)
ULOP	Potencial de Ocupação de Terras Urbanas (m ² a)
UNICA	União Nacional das Indústrias de Cana-de-açúcar
VPL	Valor Presente Líquido
WDP	Potencial de Depleção da Água (m ³)

Índices

<i>b</i>	continentes de exportação
<i>i</i>	materiais
<i>i'</i>	materiais principais
<i>g</i>	regiões geográficas
<i>l</i>	modos de transporte
<i>p</i>	tecnologias industriais
<i>s</i>	modos de armazenamento
<i>t</i>	períodos de tempo

Conjuntos

IB	conjunto de materiais que podem ser exportados
$IL(i,l)$	conjunto que relaciona os materiais i com o transporte l apropriado
$IM(p)$	conjunto de materiais principais para cada tecnologia p
$IS(i,s)$	conjunto de materiais i que podem ser armazenados no modo s
SEP	conjunto de materiais que podem ser vendidos

Parâmetros

avl_l	disponibilidade do modo de transporte l
$CapCrop_{g,t}$	capacidade total de cultivo de cana-de-açúcar na região g no período t
$DW_{l,t}$	salário do motorista
$EL_{g,g'}$	distância entre as regiões g e g'
$EPR_{i,b}$	preço do material i no continente b
FCI	limite superior de investimento de capital
FE_l	consumo de combustível do modo de transporte l
$FP_{l,t}$	preço do combustível
$FRC_{i,b}$	custo de frete do material i ao continente b
$GE_{l,t}$	despesas gerais do modo de transporte l
ir	taxa de atratividade de investimento
$LT_{i,g}$	impostos com aterro de resíduos
LUT_l	tempo de carga e descarga do transporte l
ME_l	despesas de manutenção do modo de transporte l
$PCap_p$	capacidade máxima de produção da planta de tecnologia p
$\underline{PCap_p}$	capacidade mínima de produção da planta de tecnologia p
$PR_{i,g,t}$	preços domésticos do material i
Q_l	fluxo máximo transportado pelo modo de transporte l
$\underline{Q_l}$	fluxo mínimo transportado pelo modo de transporte l
$SCap_s$	capacidade máxima de armazenamento do modo s
$\underline{SCap_s}$	capacidade mínima de armazenamento do modo s
$SD_{i,g,t}$	demanda atual do material i na região g no período t
SP_l	velocidade média do modo de transporte l
sv	valor de salvamento (ou de recuperação)

T	número de intervalos de tempo
$TCap_l$	capacidade total de transporte pelo modo l
$TEA_{l,g,t}$	capacidade máxima de exportação do produto i na região g no período t
$TMC_{l,t}$	custo para estabelecer o transporte de modo l no período t
$UPC_{i,p,g,t}$	custo unitário de produção
$USC_{i,s,g,t}$	custo unitário de armazenamento
$\alpha_{p,g,t}^{PL}$	coeficiente de investimento fixo para a tecnologia de produção p
$\alpha_{s,g,t}^S$	coeficiente de investimento fixo para a tecnologia de armazenamento s
β	período de armazenamento
$\beta_{p,g,t}^{PL}$	coeficiente de investimento variável para a tecnologia de produção p
$\beta_{s,g,t}^S$	coeficiente de investimento variável para a tecnologia s
$\rho_{p,i}$	coeficiente de balanço de material do produto i na tecnologia p
τ	percentual mínimo de produção desejado sobre a tecnologia instalada
φ	taxa de imposto
v_c	fator de impacto do componente c
ω_c^{Pr}	entrada associada ao <i>dataset</i> do componente c na fase de produção
ω_c^{Tr}	entrada associada ao <i>dataset</i> do componente c na fase de transporte

Variáveis

$AIL_{i,g,t}$	inventário médio
CF_t	fluxo de caixa no período t
DAM	dano ambiental
DC_t	custo de descarte no período t
$DTS_{i,g,t}$	quantidade de material i entregue na região g no período t
$EA_{i,b,g,t}$	quantidade de material i exportado da região g para o continente b no período t
EC_t	custo de exportação no período t
FC_t	custo do combustível no período t
FCI	capital de investimento fixo
FOC_t	custos operacionais no período t
$FTDC_t$	fração do capital total investido depreciado (ou amortizado) no período t
GC_t	custos gerais no período t

LC_t	custos de mão-de-obra no período t
LCI_c	impacto de ciclo de vida do componente c
MC_t	custos de manutenção no período t
NE_t	lucro líquido no período t
$NP_{p,g,t}$	número de plantas de tecnologia p instaladas na região g no período t
$NS_{s,g,t}$	número de armazéns de tecnologia s instalados na região g no período t
$NT_{l,t}$	número de unidades de transportes de modo l no período t
$PCap_{p,g,t}$	capacidade de produção da tecnologia p na região g no período t
$PCapE_{p,g,t}$	capacidade de expansão da tecnologia p na região no período t
$PE_{i,p,g,t}$	taxa de produção do material i na tecnologia p na região g no tempo t
$PT_{i,g,t}$	taxa de produção total do material i na região g no período t
$PU_{i,g,t}$	aquisição de material i na região g no período t
$Q_{i,l,g,g',t}$	fluxo de material i transportado pelo modo de transporte l da região g' para a região g no período de tempo t
Rev_t	receita no período t
$SCap_{s,g,t}$	capacidade de armazenamento da tecnologia s na região g no período t
$SCapE_{s,g,t}$	capacidade de expansão da tecnologia de armazenamento s na região no período t
$ST_{i,s,g,t}$	inventário total de material i na região g armazenado em s no período t
$TEA_{i,g,t}$	exportação total de material i da região g no período t
TOC_t	custos operacionais com transportes no período t
VPL	valor presente líquido da cadeia de suprimentos
$X_{l,g,g',t}$	variável binária, que é igual a 1 se o fluxo de material entre duas regiões g e g' for estabelecido e 0, caso contrário
$W_{i,g,t}$	quantidade de descartes de material i gerados na região g no período t

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	28
1.1.1 Objetivo Geral	28
1.1.2 Objetivos Específicos.....	28
1.2 JUSTIFICATIVA	29
1.3 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS.....	30
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE	30
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	32
2.1 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA.....	32
2.1.1 Programação Linear (PL).....	33
2.1.2 Programação Linear Inteira (PLIM).....	34
2.2 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	35
2.2.1 Conceitos Básicos.....	36
2.2.2 Métodos de Otimização Multiobjetivo.....	40
2.2.3 Classificação dos Métodos de Otimização Multiobjetivo.....	40
2.2.3.1 Métodos a Priori	41
2.2.3.2 Métodos a Posteriori.....	42
2.2.3.3 Métodos Interativos	43
2.2.4 Métodos Clássicos de Otimização Multiobjetivo.....	44
2.2.4.1 Método da Soma Ponderada	44
2.2.4.2 Método de restrição- ϵ	45
2.2.4.3 Método de Programação Por Metas.....	46
2.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV).....	47
2.3.1 Normas Estruturantes.....	48
2.3.1.1 Definição de Objetivo e Escopo	50
2.3.1.2 Análise de inventário	51
2.3.1.3 Avaliação de impacto	53
2.3.1.4 Análise de melhorias/interpretação	55
2.3.2 A Método ReCiPe	56

3 O ETANOL COMO BIOCOMBUSTÍVEL E ESTUDOS DE OTIMIZAÇÃO NA SUA PRODUÇÃO	58
3.1 O SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO NA CONTEMPORANEIDADE ..	60
3.1.1 Sustentabilidade.....	62
3.2 OTIMIZAÇÃO, CADEIA DE SUPRIMENTOS E SUSTENTABILIDADE DO BIOETANOL	68
3.2.1 Cadeia de Suprimentos	68
3.2.2 Avaliação do ciclo de vida (ACV).....	75
3.2.3 Otimização Multiobjetivo	82
4 ELABORAÇÃO DO MODELO PLIM E A ACV.....	88
4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	88
4.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL USANDO PRINCÍPIOS DE ACV	89
4.2.1 Definição de Objetivo e Escopo	89
4.2.2 Processo de Alocação.....	90
4.2.3 Análise de Inventário	90
4.2.4 Análise de Impacto	93
4.2.5 Análise de Melhorias/Interpretação.....	93
4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO	94
4.3.1 Plantas de Produção	94
4.3.2 Instalações de Armazenamento	95
4.3.3 Transporte.....	96
4.4 RESTRIÇÕES GERAIS E FUNÇÕES OBJETIVO	96
4.4.1. Restrições de Materiais	96
4.4.2 Restrições de Produção	97
4.4.3 Restrições de Armazenamento	98
4.4.4 Restrições de Transportes.....	100
4.4.5 Função Objetivo Econômico.....	100
4.4.6 Função Objetivo do Impacto Ambiental	104
4.4.7 O Problema Multiobjetivo	105
4.5 O SOFTWARE GAMS E O SOLVER CPLEX.....	106
4.6 A SEQUÊNCIA METODOLÓGICA	107
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	109
5.1 A SOLUÇÃO ÓTIMA PARA A MAXIMIZAÇÃO DA FUNÇÃO VPL.....	109

5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO	114
5.3 CENÁRIO ENVOLVENDO A CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO AMPLIADA.....	116
5.4 RESULTADOS DA ANÁLISE DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA (AICV).....	118
5.5 O MODELO MULTI-OBJETIVO	121
6 CONCLUSÕES.....	136
6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	139
REFERÊNCIAS	140
APÊNDICES	149
APÊNDICE A – PROCESSO INDUSTRIAL E OS LIMITES DO SISTEMA	148
APÊNDICE B – TRÁFEGO DE PRODUTOS PRINCIPAIS	149
APÊNDICE C – DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO.....	152
APÊNDICE D – IMPACTOS NA FASE INDUSTRIAL.....	159
ANEXOS	163
ANEXO A – CATEGORIAS <i>MIDPOINT</i> E <i>ENDPOINT</i> PELO MÉTODO ReCiPe 2016.....	164

1 INTRODUÇÃO

A questão ambiental como foco de discussões para políticas governamentais foi deflagrada nos anos 70, em muito devido à exploração dos recursos naturais pelo ser humano como se fossem infinitos. Isso tem oportunizado a ocorrência e recorrências de catástrofes naturais por todas as partes do planeta Terra, muito em nome do progresso e do desenvolvimento econômico e mesmo social, como discutem autores como Morin (2002, 2011b), Morin; Kern (2011), Basso et al. (2015), entre outros. Desnecessário se faz dizer que as mudanças climáticas se constituem em sérias ameaças ao ambiente, à sociedade, e à economia global. No entanto, alguns estudos confirmam que “o aumento desenfreado das emissões de gases de efeito estufa (GEE), por razões atroficas, é um dos principais responsáveis” (PALL *et al.*¹, 2011, *apud* SAMPAIO, 2013, p. 19) por tais mudanças, embora com origens e causas controversas.

A produção científica mais substancial na área surgiu na década de 1980, bem como os movimentos e encontros dos líderes governamentais para o estabelecimento de propostas com metas a serem cumpridas dentro dos prazos acordados. Já na década de 1990, destaca-se a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), que foi realizada na cidade do Rio de Janeiro, em junho de 1992 – Rio 92. Esta convenção conta atualmente com 192 países signatários que, desde então, se reúnem para avaliar as ações para alcançar o objetivo principal que consiste em reduzir as emissões de GEE na atmosfera.

Em 1997 os países signatários se reuniram no Japão, onde adotaram o Protocolo de Quioto², que estabeleceu um compromisso entre os países desenvolvidos e os em desenvolvimento para reduzir as emissões totais de GEE a níveis inferiores de, no mínimo 5%, aos praticados em 1990, com prazos de 2008 a 2012.

Concomitantemente e imerso neste contexto, tem origem o conceito de desenvolvimento sustentável, introduzido e conhecido pelo Relatório de Brundland³, proposto pela Assembleia Geral das Nações Unidas, em 1987 (p. 54), como sendo aquele que casa as necessidades do presente sem comprometer as necessidades futuras das novas gerações, com

¹ PALL, P., AINA, T., STONE, D. Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, vol. 470, p.382-385, 2011.

²Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto> Acesso em 11 nov. 2018.

³ Cópia do original, disponível em: <https://ambiente.files.wordpress.com/2011/03/brundtland-report-our-common-future.pdf> Acesso em 11 nov. 2018.

atenção prioritária aos mais pobres, e destacando o papel da tecnologia e organizações sociais na garantia da capacidade do meio-ambiente em atender às necessidades presentes e futuras. Isso significa dizer a capacidade de minimizar a utilização dos recursos naturais pela sociedade, numa tentativa de evitar seu esgotamento. Para tanto, todo cidadão é convocado a ser um consumidor responsável, combatendo o desperdício e poupando os recursos naturais em uma escala global ou, no dizer de Morin e Kern (2011), a serem cidadãos planetários, sendo a Terra, a Pátria-mãe.

Simultaneamente a todas as preocupações com o meio ambiente, instaura-se no mundo a crise do petróleo e conseqüente busca por combustíveis renováveis, sobretudo nas décadas de 1970 e 1980. No Brasil, uma queda expressiva no mercado açucareiro e o descontentamento dos grandes produtores de cana-de-açúcar e dos usineiros, instaura um cenário propício ao surgimento do programa estatal Pró-Álcool, brevemente descrito abaixo, envolvido no contexto político, econômico e ambiental, a nível nacional e internacional.

O programa Pró-Álcool, firmado no governo Geisel em 14 de novembro de 1975 pelo Decreto nº 76.593, incentivou a produção do etanol oriundo de diferentes matérias-primas como a cana-de-açúcar, mandioca, entre outras, enfatizando o aumento da produção agrícola, da modernização e ampliação das destilarias existentes e da instalação de novas unidades produtoras, anexas a usinas ou autônomas, bem como de unidades armazenadoras (BRASIL, 1975). A cana-de-açúcar mostrou ser mais lucrativa para os agricultores brasileiros por hectare plantado, acrescido dos lucros advindos da produção de açúcar, que tem, no Brasil, custos mais baixos, se comparado ao de outros países.

A título de informação contextual, a produção mundial de açúcar em 2000 foi de 131 milhões de toneladas, ficando a participação do Brasil em cerca de 13%. Segundo a Conab, no *site* da Exame⁴, a produção de açúcar no Brasil caiu 2,1% no período de 2017/2018. Este recuo deveu-se à menor quantidade de cana disponível e ao direcionamento da matéria-prima para o etanol. Por esta razão, a maioria das indústrias opera ou está preparada para operar com a produção de açúcar e de etanol, conforme discutido posteriormente nesta seção e nos capítulos 5 e 6.

Vale lembrar que o etanol como combustível para veículos foi proposto por Henri Ford, na última década do Sec. XIX. No Brasil, segundo Silva (2013) e Lorenzi (2018), desde 1903 já há registro de firmes intenções de incorporação do etanol como um novo combustível

⁴ Disponível em <https://exame.abril.com.br/economia/producao-de-acucar-do-brasil-conab/> Reuters, publicado em 24/04/ 2018, 09h21. Acesso em 11 nov. 2018.

e como saída para a agroindústria canavieira, porém ganhou mercado a partir de 1931, pelo Decreto de n. 19.717/1931, pela anuência do Presidente Getúlio Vargas.

De acordo com o Ministério das Minas e Energia, na fase inicial do Pró-Álcool (1975/1979), houve a concentração na produção do álcool anidro, para a mistura com gasolina, tarefa desempenhada, sobretudo, pelas destilarias anexas. A produção alcooleira cresceu de 600 milhões de L/ano (1975-76) para 3,4 bilhões de L/ano (1979-80) e surgem os primeiros carros movidos exclusivamente a álcool.

Os próximos seis anos (1980/1986) foram os mais lucrativos e de afirmação do programa, com a produção alcooleira atingindo 12,3 bilhões de litros em 1986-87, superando a meta inicial do governo. A proporção de carros a álcool no total de automóveis de ciclo Otto (passageiros e de uso misto) produzidos no país aumentou de 0,46% em 1979 para 26,8% em 1980, atingindo um teto de 76,1% em 1986.

Contudo, a época áurea do programa terminou, instaurando uma fase de estagnação (1986-1995) decorrente de vários fatores como caída dos preços do petróleo por uma década, levando a um retorno à gasolina em todo o mundo, à fabricação de modelos e motores padronizados mundialmente na versão à gasolina e a diesel, bem como à liberação das importações destes veículos automotivos e à introdução da política de incentivos para o carro de até 1000 cilindradas, desenvolvido para ser movido à gasolina. Não obstante, no Brasil, houve ainda uma diminuição de recursos públicos para subsidiar os programas e projetos de estímulo aos combustíveis energéticos alternativos.

Para piorar o quadro, em 1985 houve um aumento expressivo (98,5%) de vendas internas de veículos de ciclo Otto para o mercado interno, decorrente do preço competitivo do etanol nos postos e da manutenção de menores impostos nos veículos movidos a este combustível, comparados à gasolina, acarretando a chamada crise de abastecimento a álcool e, com ela, adveio a falta de credibilidade no programa, em muito por falta de previsibilidade do setor.

Completando o quadro negativo para o período, de acordo com dados obtidos no Portal da UNICA⁵ – União Nacional da Indústria de Cana-de-açúcar – houve uma redução das exportações de açúcar, de 1,9 milhões de toneladas na safra 1985-86 para 1,1 milhão de toneladas na safra 1989-90.

⁵ Disponível em www.unica.com.br, acesso em 12/12/2016.

A superação da citada crise, que envolveu diretamente o Pró-Álcool, se deu com a introdução no mercado da chamada mistura MEG, que substituíra, com igual desempenho, o álcool hidratado. Essa mistura, composta de 60% de etanol hidratado, 34% de metanol e 6% de gasolina fez com que o país realizasse importações de etanol e metanol superiores a 1 bilhão de litros, no período de 1985 a 1990, para garantir o abastecimento do mercado ao longo da década de 1990, sem que fossem constatados problemas sérios de contaminação e de saúde pública.

De 1996 a 2000, o Pró-Álcool entra na fase de redefinição. Os mercados de álcool combustível, tanto anidro quanto hidratado, foram liberados em todas as suas fases de produção, distribuição, e revenda, com preços determinados pelas condições de oferta e procura. A exportação do açúcar bateu recordes com até 10 milhões de toneladas por ano. Com a saída do governo do setor e no intuito de garantir o abastecimento do mercado interno e externo do novo combustível e de direcionar políticas para o setor sucroalcooleiro, foi criado, por meio do Decreto de 21 de agosto de 1997, o Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA).

Enfim, após 30 anos do Pro-Álcool, pode-se constatar que houve uma nova expansão dos canaviais para oferecer, em grande escala, o combustível alternativo, não mais comandado pelo governo, mas sim por decisões da iniciativa privada, que buscou ampliar unidades e construir novas usinas, convicta de que o álcool terá um papel cada vez mais importante como combustível, no Brasil e no mundo. Destaca-se também que a tecnologia dos motores *flex-fuel*, introduzida em março de 2003, veio garantir o consumo interno de álcool. Esta opção é oferecida para quase todos os modelos das indústrias e os automóveis bicomcombustíveis ultrapassam os movidos à gasolina na corrida do mercado interno.

De acordo com os especialistas em *sites* como os da UNICA, Biodiesel, Novacana, entre outros, o Pró-Álcool pode ser classificado como um programa bem-sucedido de substituição em larga escala dos derivados de petróleo, alcançando, de 1975 a 2000, a produção de cerca de 5,6 milhões de veículos a álcool hidratado.

O programa atendeu a dois critérios importantes e significativos para a contemporaneidade – foco desta tese – o ambiental e o econômico, como mostram os números apresentados por Lorenzi (2018): substituição de um volume de gasolina pura (entre 1,1% a 25%) por uma fração de álcool anidro em uma frota superior a 10 milhões de veículos movidos a gasolina; não propagação de emissões de gás carbônico na ordem de 110 milhões de toneladas de carbono (contido no CO₂) para o período de 1975 a 2000; redução da

importação de aproximadamente 550 milhões de barris de petróleo; economia de divisas da ordem de 11,5 bilhões de dólares.

Retornando à discussão sobre a necessidade de reduzir as emissões de GEE, que envolve decisão coletiva pelos países desenvolvidos e em desenvolvimento do mundo todo, chega-se à COP17⁶, conferência acontecida em Copenhague, em dezembro de 2011, quando então os representantes dos países signatários propuseram a prorrogação do Protocolo de Quioto⁷ por mais cinco anos e a criação de um instrumento, com resultado de valor legal, com prazo de finalização previsto para 2015, e implementação a partir de 2020.

Uma novidade trazida pela COP17 foi a criação de um Fundo Verde, com o objetivo único de financiamento de ações contra as mudanças climáticas. As citadas decisões foram entendidas como modestas pelos ambientalistas, uma vez que mudanças no clima levarão a um aumento entre 3,5°C e 5°C acima dos níveis pré-industriais. Segundo Sampaio (2013), o único avanço obtido foi o comprometimento de países como EUA, Índia e China a respeitar este instrumento para fiscalizar o cumprimento das metas.

É possível dizer que, apesar da demora de alguns países, mormente dos Estados Unidos da América, em assumir um comprometimento com a redução de suas emissões de GEE, é evidente que nos últimos anos tem havido um contexto propício à instauração de uma nova consciência na sociedade civil de que o futuro do planeta depende de ações tomadas no presente (CHIEN-WEI e YUEYUE, 2012; RABBANI et al., 2018; GHADERI et al., 2018).

Este quadro gerou, conseqüentemente, uma busca mais intensa para o desenvolvimento de energia renovável, desencadeando o surgimento de outra importante mudança quanto à forma com que as cadeias de produção são vistas. De acordo com Sampaio (2013), um ambiente saudável, capaz de dar continuidade à civilização, tornou-se central para os mais diversos setores da sociedade, com regulamentação e normatização específicas, incluindo o setor industrial, foco desta tese. Neste sentido, tem-se observado um crescente interesse em energias renováveis como uma alternativa adequada para substituição daquela advinda de recursos fósseis, em muito motivada pelas preocupações com o aquecimento global e questões ambientais (RABBANI et al., 2018).

⁶ Disponível em: <https://nacoesunidas.org/cop21/> Acesso em: 11 nov. 2018.

⁷ Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto> Acesso em 11 nov. 2018.

Este contexto colaborou para o surgimento do Acordo de Paris⁸, o qual, por sua relação e pertinência com esta tese, será descrito com mais detalhes do que os anteriores, porém ainda sem uma análise crítica dos resultados encontrados e posicionamentos políticos conflitantes quanto à sua implantação, por ser muito recente.

Em conformidade com as informações contidas no site oficial do Ministério de Minas e Energia⁹ e com os *sites* específicos¹⁰ sobre o tema, o Acordo de Paris é um novo documento proposto e aprovado por 195 países participantes da UNFCCC, sigla em Inglês para Conferência das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas, durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21). O acordo exige o fortalecimento de respostas globais à ameaça da mudança do clima e de reforço à capacidade dos países para lidar com os impactos por ela trazidos.

O compromisso fixado é de reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) no contexto do desenvolvimento sustentável, para manter o aumento da temperatura média global em bem menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais e de envidar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais.

Para o alcance do objetivo final deste acordo, foi necessária a ratificação de pelo menos 55 países responsáveis por 55% das emissões de GEE, ficando a incumbência a cada um de construir seus próprios compromissos, a partir das Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDC, na sigla em inglês), articulando-os ao seu cenário social e econômico.

No que diz respeito ao financiamento climático, o Acordo de Paris determina que os países desenvolvidos invistam 100 bilhões de dólares por ano em medidas de combate à mudança do clima e adaptação, em países em desenvolvimento. Uma novidade no âmbito do apoio financeiro é a possibilidade de financiamento entre países em desenvolvimento, chamada “cooperação Sul-Sul”, o que amplia a base de financiadores dos projetos.

O texto deixa evidente a preocupação em formalizar o processo de desenvolvimento de contribuições nacionais, além de oferecer aos países requisitos obrigatórios para avaliar e revisar o progresso das mesmas, exigindo uma atualização contínua de seus compromissos, podendo ampliar suas metas de redução de emissões, mas não diminuí-las. Para tanto, a partir do início da vigência do acordo, acontecerão ciclos de revisão desses objetivos de redução de

⁸ Documento integral disponível em <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf> Acesso em 11 nov. 2018.

⁹ Disponível em <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>> Acesso em 11 nov. 2018.

¹⁰ Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>> Acesso em 11 nov. 2018.

gases de efeito estufa a cada cinco anos. Desta feita, segundo o chefe da ONU: “ O Acordo de Paris prepara o terreno para o progresso na erradicação da pobreza, no fortalecimento da paz e na garantia de uma vida de dignidade e oportunidade para todos.”(Disponível em <https://nacoesunidas.org/cop21/>, acesso em 15/09/2018).

O Brasil concluiu seu processo de ratificação do Acordo de Paris, que foi aprovado pelo Congresso Nacional, e entregue às Nações Unidas em 21/09/2016. Com isso, as metas deixaram de ser pretendidas (*intended*), e tornaram-se compromissos oficiais, passando, portanto, a ficar com a sigla NDC.

A NDC do Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030. Para tanto, o país se propõe aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030. Neste ponto vale o registro de que, de acordo com a EPE¹¹ (Empresa de Pesquisa Energética), esta participação já se encontra em 43,5%.

A proposta da NDC do Brasil corresponde a uma redução estimada em 66% em termos de emissões de gases de efeito estufa por unidade do PIB (intensidade de emissões) em 2025 e em 75% em termos de intensidade de emissões em 2030, ambas em relação a 2005. O Brasil, portanto, reduzirá emissões de gases de efeito estufa no contexto de um aumento contínuo da população e do PIB, bem como da renda per capita, o que confere ambição a essas metas.

Como iniciativa para deslançar a NDC no Brasil, o governo propõe o Programa RenovaBio¹², que é uma política significativa para o setor sucroalcooleiro, constituindo-se na primeira ação por parte do Estado para atender aos critérios ambientais, ainda que não agradando totalmente aos fatores econômicos demandados pelas classes empresarial, industrial, e pelos grandes agricultores – nesta tese, representados pelos usineiros, cooperativas e donos de grandes canaviais, e mesmo a Petrobrás.

O RenovaBio surgiu em 2016 proposto pelo Ministério de Minas e Energia, que o colocou em consulta pública, encerrada em março de 2017. Em junho de 2017, o Conselho

¹¹ Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acesso em 11 nov. 2018.

¹² Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/economia-e-financas/2017/12/entenda-o-que-e-e-como-funciona-o-renovabio>> Acesso em 11 nov. 2018.

Nacional de Política Energética (CNPE) aprovou as diretrizes estratégicas do programa e nomeou um grupo de trabalho para avaliar as propostas normativas necessárias à implementação do programa. Tramitou em caráter de urgência no Congresso e no Senado, onde foi aprovado, para, em seguida, ser sancionado pelo Presidente da República, Michel Temer, e instituído pela Lei nº 13.576/2017, em 27/12/2017, tornando-se, a partir deste momento, uma sigla para uma Política Nacional de Biocombustíveis. O decreto que regulamenta o RenovaBio foi assinado no dia 14 de março de 2018, e publicado no Diário Oficial da União no dia 15 de março de 2018.

De acordo com o *site* do Ministério de Minas e Energia, o RenovaBio¹³ tem três objetivos principais: i) criar ferramentas para que o Brasil possa cumprir com os compromissos firmados em Paris; ii) incentivar a expansão dos biocombustíveis com foco na regularidade do abastecimento; e iii) a previsibilidade. Essa nova política auxilia na definição de uma estratégia para a segurança energética e, ao mesmo tempo, para garantir uma redução sensível nas emissões de GEE em toda a cadeia de produção e consumo. Destaca ainda a coexistência harmônica com os combustíveis fósseis, sem, contudo, deixar de incentivar de forma constante a inovação, a eficiência energética e a ambiental. Trata-se de um programa estruturante, que consolida uma visão estratégica de Estado para os combustíveis, por meio de mecanismos de mercado, sem subsídios ou medidas artificiais.

De acordo com o então Ministro das Minas e Energia Wellington Moreira Franco, essa lei reforça o compromisso do País com fontes de energias renováveis, significando uma energia nova a um setor que é prioritário para o país e que precisava de estímulo na direção correta, de regras mais claras. O programa agrega importância à biomassa brasileira, destacando o papel estratégico dos biocombustíveis na matriz energética nacional.

O RenovaBio foi elaborado para introduzir mecanismos de mercado para reconhecer a capacidade de cada biocombustível para redução de emissões, individualmente, por unidade produtora, sendo, basicamente, dois seus instrumentos principais: 1º) o estabelecimento de metas nacionais de redução de emissões para a matriz de combustíveis, definidas para um período de 10 anos, trazendo a previsibilidade, em termos de volume quantitativo de combustíveis (fósseis e renováveis) necessário à demanda, com metas nacionais desdobradas em metas individuais, anualmente, compulsórias para todos os distribuidores de combustíveis,

¹³Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138769/0/P%26R+-+RenovaBio.pdf/a29044a3-6315-4845-80d8-832852efbb7f>> Acesso em 11 nov. 2018.

conforme sua participação no mercado de combustíveis fósseis; 2º) certificação da produção de biocombustíveis, por firmas inspetoras privadas, atribuindo-se notas diferentes para cada unidade produtora (maior será a nota para o produtor que produzir maior quantidade de energia líquida, com menores emissões de CO₂-eq, no ciclo de vida). A nota refletirá exatamente a contribuição individual de cada agente produtor para a mitigação de uma quantidade específica de gases de efeito estufa, em relação ao seu substituto fóssil (em termos de toneladas de CO₂-eq). O processo de certificação da produção de biocombustíveis no âmbito do RenovaBio estará sob responsabilidade da ANP¹⁴ – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

Também será criado, a partir da lei, o Crédito de Descarbonização (CBIO). Esse crédito, segundo o Ministério de Minas e Energia, será um ativo financeiro, negociado na Bolsa Valores e emitido pelo produtor a partir da comercialização dos biocombustíveis. Isto significa, na prática, mais uma fonte de financiamento para os empresários do setor. A novidade está no fato de que outros agentes (pessoas físicas e jurídicas) poderão comprar e vender CBIOs na bolsa, como forma de trazer maior liquidez a esse mercado.

Para o cálculo da intensidade de carbono de cada biocombustível certificado será utilizada a RenovaCalc, ferramenta desenvolvida com base na metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV), especificamente e para esta finalidade, que será disponibilizada pela ANP. A ACV, conforme discutido no Capítulo 2 desta tese, avalia os impactos ambientais de um produto durante todo o seu ciclo de vida, a partir de estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final.

Vários dos pontos revisitados terão que ser definidos, como o CBios, por exemplo, para que o programa entre em funcionamento e se consolide. Segundo Lorenzi (2018), o programa indica um avanço no alinhamento entre o setor sucroenergético e o atual governo, disposto a, de certa forma, prejudicar o setor de combustíveis tradicionais, as distribuidoras e a Petrobrás para auxiliar o setor sucroenergético, uma vez que este será o maior beneficiado com base no volume de produção já estabelecido.

Isto implica dizer que as perspectivas para o setor são promissoras, uma vez que a preocupação com o ambiente e com o desenvolvimento econômico, propostos pelo Relatório de Brundtland, em 1987, estão cada vez mais em consonância com as novas tendências no

¹⁴ Disponível em <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/renovabio>, acesso em 23 de novembro de 2018.

mundo, que registra um retorno significativo à procura de combustíveis alternativos, não apenas movidos pelo valor do preço do barril do petróleo como na década de 1970, mas, agora, pela necessidade e vontade de desenvolver combustíveis menos poluentes, mais *green*. Isto garante um fôlego especial às usinas de cana-de-açúcar, que devem aumentar nas próximas décadas e, por essa razão, demandam estudos e pesquisas para otimizar seu trabalho de maneira a alcançar maior produtividade com os recursos disponíveis e com o menor impacto ambiental possível, objetivos propostos a seguir.

Finalmente, por envolver os critérios econômico e ambiental, os documentos e os programas discutidos até o momento serviram como ponto de partida para guiar a pesquisa, seja no levantamento bibliográfico, seja nas ponderações e reflexões sobre os resultados encontrados, quando do uso da tecnologia, por meio de proposta e aplicação de um modelo de otimização multiobjetivo, para auxiliar a tomada de decisões quanto à produção de etanol e de açúcar, considerando os princípios de Avaliação do Ciclo de Vida e a rentabilidade.

Para tal intento foi necessário um olhar multifocal, pelo viés da interdisciplinaridade, envolvendo pesquisadores de diferentes áreas, no caso, advindos da Química, da Matemática, da Tecnologia, entre outros, para juntos encontrar alternativas, pensadas sob um novo paradigma de pesquisa (VASCONCELOS, 2002), que se abre ao imprevisto, que se move nas fronteiras interdisciplinares (ALVARENGA, 2011; BASSO, TOGNATO; MACOWSKI, 2015; FLORIANI, 2000).

Adentrando no *locus* central da pesquisa, a indústria sucroalcooleira, é possível dizer que o amálgama entre uma nova consciência, imbuída de compromissos com a sustentabilidade e equilíbrio do planeta, a obrigatoriedade do cumprimento das metas para a indústria, levando ainda em consideração a rentabilidade, tem alavancado, ainda que timidamente, o desenvolvimento de novos estudos e pesquisas sobre o uso da tecnologia com vistas ao alcance dos objetivos da área.

Esta constatação é ratificada por Chien-Wei e Yueyue (2012) e Fei et al. (2017), ao afirmarem que o futuro da energia sustentável clama por mais pesquisas no mundo todo, buscando aliviar as questões prementes e cruciais que gravitam em torno da dependência do combustível fóssil e do efeito estufa, causado pela emissão de GEE. Contudo, apesar da inquestionável pauta, o desafio de encontrar soluções que equilibrem o custo efetivo e que busquem por soluções plausíveis para o conflito existente entre alimento x combustível, trazendo o mínimo impacto sobre a produção de alimentos e sobre outros recursos naturais, ainda não tem sido investigado suficientemente (REN et al., 2015).

Um novo olhar para a área de biocombustível deixa entrever uma mudança necessária, que vai desde o sistema de produção, consumo, até a gestão de resíduos, passa pelo pequeno produtor com suas necessidades presentes e futuras, até alcançar o desenvolvimento econômico em linhas gerais (VON BLOTTNITZ & CURRAN¹⁵, 2007, *apud* Mele et al., 2011; REN et al., 2015). A título de exemplificação, pode-se usar a Gestão da Cadeia de Suprimentos (SCM – *Supply Chain Management*), por focar na tomada de decisões em todo o processo, desde a concepção, passando pelas fases de planejamento e produção e, por fim, na entrega dos produtos aos clientes.

Nas últimas décadas, ferramentas para facilitar a tomada de decisões nesta área foram desenvolvidas pela comunidade de Engenharia de Sistemas de Processo (PSE – *Process Systems Engineering*). Especificamente, pesquisas e estudos envolvendo a programação matemática na cadeia de produção de biocombustíveis, no Brasil, ainda são escassos, e mais, ainda, quando se levam em consideração os aspectos ambientais concomitantemente com os aspectos econômicos envolvidos, conforme comprovados no Capítulo 3.

Rodrigues (2006) aprofunda a dimensão tecnológica da etapa industrial do processo de fabricação de etanol no Brasil, partindo do passado recente do setor sucroalcooleiro e olhando para o seu futuro. A autora afirma que a dimensão tecnológica foi e seguirá sendo determinante da competitividade do etanol como combustível substituto à gasolina e dos resíduos da cana-de-açúcar como fonte de bioeletricidade. Propõe uma confrontação da tecnologia de produção de etanol atualmente empregada com as novas tecnologias em desenvolvimento para identificar ações necessárias à manutenção da posição de vanguarda do país na atualidade.

Desta forma, considerando esta lacuna de pesquisa e tomando o etanol, biocombustível renovável com potencial para minimizar o uso dos combustíveis de origem fóssil no país, sem agredir tanto o planeta, esta tese objetiva otimizar sua produção, sentido dado pela área de PSE, tendo sempre como parâmetros os aspectos ambientais e econômicos.

Para tanto, foi feita uma proposta de utilização da programação matemática na formulação de um modelo robusto capaz de dar suporte à tomada de decisões na cadeia de suprimentos da indústria da cana-de-açúcar brasileira, utilizando os princípios de Avaliação

¹⁵ VON Blottnitz, H.; Curran, M. A. A review of assessments conducted on bioethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. **J. Clean. Prod.** 2007, 15 (7), 607–619.

do Ciclo de Vida (ACV), detalhados no Capítulo 2 e ilustrados pelos artigos, estudos, e trabalhos científicos apresentados no Capítulo 3.

1.1 OBJETIVOS

Diante do exposto, seguem explicitados os objetivos norteadores da pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é investigar uma metodologia que permita otimizar a cadeia de suprimentos (CS) da indústria da cana-de-açúcar – açúcar e álcool – no Brasil, considerando dois critérios: o econômico e o ambiental, apoiando-se em um modelo de programação matemática biobjetivo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos para a pesquisa, foram selecionados:

- Discutir a trajetória do etanol como combustível renovável, e sua relação com os programas governamentais específicos para sua expansão.
- Realizar a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) comparativa entre as tecnologias de produção de açúcar e etanol da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar (CS).
- Determinar, por meio da resolução do problema de programação linear mista inteira biobjetivo:
 - ◆ A quantidade ótima de cada modelo de planta industrial a ser instalada em cada região;
 - ◆ A quantidade ótima de armazéns para estocagem de produtos em cada região;
 - ◆ A quantidade ótima de caminhões de cada tipo necessária ao escoamento da produção.

- ◆ O período em que as instalações devem ser introduzidas, podendo haver expansão na cadeia ao longo do horizonte de tempo.

A seguir, os motivos, razões, e justificativa para a presente pesquisa são explicitados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Conforme apresentado anteriormente, a sociedade contemporânea, por meio de seus representais legais, governamentais, órgãos não governamentais, pelas diferentes mídias e, em nível individual, pelos cidadãos, tem dado alguns passos em direção à sustentabilidade do planeta, pela criação de leis, protocolos de compromisso, e outros documentos, com os quais assume o dever de cuidar, proteger e preservar o ambiente, legado para as gerações futuras. Por outro lado, há o grande impasse de encontrar formas alternativas para manter o desenvolvimento econômico, otimizando todos os recursos sem, contudo, trazer grandes impactos ambientais. Nesta lacuna, abre-se espaço para a tecnologia mostrar que, se aliada a um modelo matemático pensado e aplicado ao contexto brasileiro, pode ser de valia como um instrumento a mais para orientar a gestão de diferentes cadeias de suprimentos, quando das tomadas de decisões.

Assim, como base primeira da pesquisa, foi escolhido buscar uma otimização dos processos na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, visando contribuir para o desenvolvimento econômico do setor, aqui representado pelos produtores e usineiros, para uma maior credibilidade na produção do álcool como biocombustível de maior destaque atualmente, cuja produção pode libertar o Brasil das amarras ao petróleo, diminuindo, conseqüentemente, as emissões de CO₂ na atmosfera, favorecendo, portanto, simultaneamente, o meio-ambiente.

Quanto ao contexto e importância acadêmica, a tese propiciou um adentramento interdisciplinar a diferentes áreas do conhecimento, seja teoricamente, por meio dos autores arrolados e referenciados ao longo da pesquisa, seja para entender que nem sempre os resultados apresentados pela ciência e tecnologia atendem às necessidades dos produtores e/ou usineiros. Por exemplo, ficou comprovada a existência de um número maior de indústrias do que o apresentado no modelo. Ou ainda que as indústrias nem sempre utilizam as tecnologias sugeridas pelo modelo. O que pode ser explicado pela flutuação do preço do

açúcar e do etanol, que leva aos usineiros a optarem por plantas que produzem todos os produtos principais (açúcares, etanol anidro e etanol hidratado).

Tais divergências são frutos da situação do país, tanto nas décadas anteriores quanto atualmente, mostrando a riqueza que é a pesquisa interdisciplinar, e justifica todo o esforço intelectual dispendido nesta pesquisa para colocar a tecnologia, pela programação matemática, a serviço do desenvolvimento social, econômico, e do ambiente.

1.3 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

Como forma de contribuição espera-se discutir, criticamente, ao longo da tese, o papel do biocombustível para diminuir a emissão do GEE, gerado, sobretudo, pelo uso exacerbado de combustíveis derivados do petróleo. Neste contexto o etanol tem merecido lugar de destaque nas pesquisas, seja o etanol de primeira ou de segunda geração, fazendo com que o Brasil seja um dos líderes na sua produção, sendo muito utilizado tanto internamente quanto tem sido exportado. Assim sendo, uma elevação nesta produção, sem comprometer sua sustentabilidade, torna-se necessária para o setor sucroalcooleiro brasileiro. Neste ponto, entra a ciência interdisciplinar, procurando por alternativas, examinando-as e testando-as quanto à sua viabilidade.

No caso desta tese, a contribuição foi a proposta de um modelo que possa atender aos critérios ambientais e econômicos, ou seja, que busque maximizar os lucros, com o mínimo de impacto ambiental. O modelo proposto foi o Modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM, ou MILP, como é conhecido internacionalmente). Os dados utilizados para alimentar o modelo são reais, coletados no Brasil, visando contribuir para as necessidades do setor sucroalcooleiro. A pesquisa também foi divulgada em congressos da área, bem como por meio de publicações de artigos em revistas internacionais.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese encontra-se assim estruturada: o Capítulo 1 contextualiza a atual situação político-econômico-ambiental da produção do etanol como combustível alternativo aos de origem fóssil, discutindo os documentos e acordos firmados internacionalmente para a

redução das emissões de GEE, bem como os dois principais programas nacionais – Pró-Álcool e RenovaBio. Isso feito, explicita os objetivos, a justificativa, as contribuições científicas trazidas pela pesquisa desenvolvida, além de demonstrar a arquitetura da tese.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica para o modelo matemático utilizado, explicitando os principais conceitos e métodos em uso na área da tese. Já o Capítulo 3 apresenta, brevemente, a situação do setor sucroalcooleiro, com destaque dado ao etanol advindo da cana-de-açúcar, e sua trajetória como combustível alternativo. Traz, ainda, alguns trabalhos de cunho científico, selecionados pela pertinência ao tema em questão na tese, procurando, também, ilustrar como tem sido trabalhada a questão da otimização na área do etanol, preferencialmente, aquele advindo da cana-de-açúcar. Outro critério na seleção foi que os autores envolvessem também a Avaliação do Ciclo da Vida (ACV) e/ou a Cadeia de Suprimentos (CS).

Adentrando ao objetivo central da tese, o Capítulo 4 explicita a metodologia utilizada na elaboração do modelo e seus pressupostos, bem como a ACV. No Capítulo 5 estão colocadas as discussões e os resultados provenientes das soluções obtidas para o modelo nos diferentes cenários propostos, comparando-os entre si e entre a cadeia de suprimentos em uso no Brasil, ficando o Capítulo 6 com as conclusões gerais da tese, e a retomada dos objetivos propostos e explicitados no Capítulo 1. Aponta, também, lacunas de pesquisa para futuros estudos. São apresentadas as referências utilizadas, seguidas pelos anexos e apêndices.

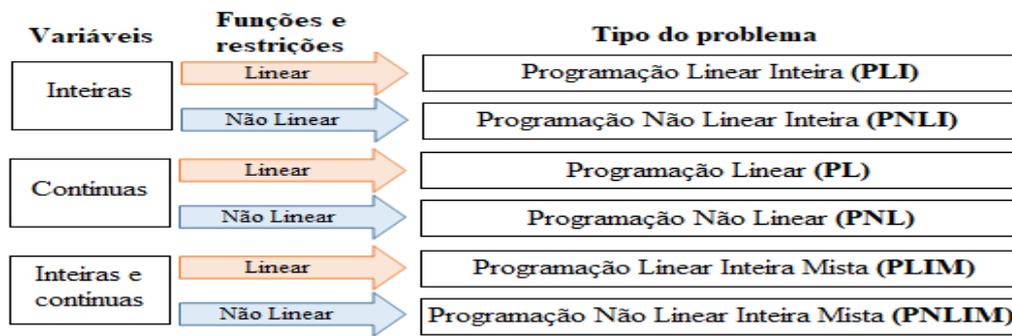
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão discutidos como os problemas de otimização, no caso, a otimização multiobjetivo, têm sido classificados e representados, de acordo com as variáveis e equações envolvidas. São apresentados os métodos clássicos de resolução, assim como é feita uma descrição da ACV e de suas partes.

2.1 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Os problemas de otimização podem ser classificados com base em dois critérios distintos. O primeiro é em relação às variáveis que podem ser contínuas, inteiras, ou uma combinação entre estas duas. O outro critério leva em consideração as equações e inequações utilizadas, seja na função objetivo que se deseja otimizar, seja no conjunto de restrições associado ao problema. Desta forma, se tais equações são lineares e as variáveis são contínuas, tem-se um problema de programação linear (PL). Caso as variáveis sejam inteiras, tem-se um problema de programação linear inteira (PLI) e, caso os dois tipos de variáveis estejam presentes no problema, tem-se uma programação linear inteira mista (PLIM). Por outro lado, se ao menos uma das equações ou inequações envolvidas for não linear e as variáveis forem contínuas, tem-se uma programação não linear (PNL); uma programação não linear inteira (PNLI), caso as variáveis forem todas inteiras; ou uma programação não linear inteira mista (PNLIM), caso haja variáveis contínuas e discretas. A Figura 1 sintetiza as informações apresentadas:

Figura 1 – Classificação de um problema de otimização segundo suas variáveis e equações



Fonte: Adaptado de Rocha (2018).

De forma generalizada, um problema de otimização pode ser descrito em formato equacional (BAZARAA et al., 2006):

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f(x, y) \\
 \text{s.a} \quad & h(x, y) = 0 \\
 & g(x, y) \leq 0 \\
 & x \in X \\
 & y \in Y
 \end{aligned} \tag{1}$$

A função objetivo é representada por $f(x, y)$, em que x são as variáveis contínuas e y são as variáveis discretas, $h(x, y) = 0$ representa as restrições de igualdade enquanto $g(x, y) \leq 0$ representa as restrições de desigualdades. Qualquer problema de otimização pode ser representado desta maneira. Vale ressaltar que o problema pode ser de maximização, que equivale a minimizar o oposto da função objetivo ($-f(x, y)$). Também as restrições de desigualdade podem ser da forma em maior que zero, dependendo do problema em uso.

2.1.1 Programação Linear (PL)

O Problema de Programação Linear (PL) é um problema de otimização em que a função objetivo Z é linear e o sistema de inequações e/ou equações que formam as restrições, ao qual a função está sujeita, também é linear. Segundo Pardalos e Resende (2002), um PL pode apresentar-se da seguinte forma genérica, em que x representa as variáveis de decisão:

$$\min \quad Z = c^T \cdot x \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \text{s.a } & A \cdot x = b \\ & C \cdot x \leq d \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

A programação linear foi desenvolvida no século XX para resolver problemas de logística. As técnicas para determinar numericamente a solução ótima de um PL são baseadas em dois métodos: O método Simplex (DANTZIG, 1949) e o Método de Pontos Interiores (KARMARKAR¹⁶, 1984, *apud* TOLENTINO, 2007).

O Método Simplex é um procedimento algébrico e iterativo que fornece a solução exata de qualquer PL em um número finito de iterações. É também capaz de indicar se o problema tem solução ilimitada, se não tem solução, ou se possui infinitas soluções (TOLENTINO, 2007).

O primeiro método dos pontos interiores polinomial para programação linear foi desenvolvido por Karmarkar, em 1984, e é baseado em transformações projetivas. Este método tem a grande vantagem de ser sua natureza polinomial (ADLER et al.¹⁷, 1989, TOLENTINO, 2007).

Segundo Méndez (2014), os principais *solvers* comerciais desenvolvidos para otimização de problemas PL são o CPLEX e OSL, baseados no Método Simplex, e o XPRESS que utiliza o Método de Pontos Interiores.

2.1.2 Programação Linear Inteira (PLIM)

A programação linear inteira teve seu início no final da década de 40 e início da década de 50, com aplicações operacionais de caráter puramente matemático. Em 1958, Gomory (1958) apresentou a primeira técnica para programação para a resolução de problemas de programação linear inteira. Desde então, outros algoritmos têm sido desenvolvidos para a resolução de problemas desta classe.

¹⁶ KARMARKAR, N. A new polynomial time algorithm for linear programming. *Combinatorica*, **New York**, v.4, p.376-395, 1984.

¹⁷ ADLER, I.; RESENDE, M. G. C.; KARMARKAR, N. An Implementation of Karmarkar's algorithm for Linear Programming. *Mathematical Programming*, v. 44, p.297-335, 1989.

Segundo Lachtermacher (2004), os problemas de programação matemática em que uma ou mais variáveis de decisão devem assumir valores inteiros podem ser de dois tipos básicos: Programação Linear Inteira (PLI), em que todas as variáveis de decisão são do tipo inteira, e Programação Linear Inteira Mista (PLIM), em que apenas uma parte das variáveis é do tipo inteira, enquanto as demais são do tipo real. Um problema PLIM pode ser escrito na seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f(x, y) = c^T \cdot x + b^T \cdot y \\
 \text{s.a:} \quad & A \cdot x + B \cdot y \leq d \\
 & x \geq 0 \\
 & y \in \{0, 1\}^m
 \end{aligned} \tag{3}$$

Existem vários métodos para a resolução de problemas de programação inteira, tais como: Algoritmo de Gomory, Algoritmo *Branch-and-Bound*, Geração de Colunas, Método de Pontos Interiores, entre outros (FLORENTINO, 2013). Em geral, esses métodos estão dentro de uma das três classificações: Métodos de Planos de Corte, Métodos Enumerativos e Algoritmos Iterativos e Heurísticos. O algoritmo de partição e avaliação sucessivas, *Branch-and-Bound*, introduzido por Land e Doing¹⁸ (1960, *apud* TOLENTINO, 2007) é o algoritmo que está na base da maioria dos códigos de computador relativos à programação linear inteira mista, sendo aplicável em problemas que assumem variáveis inteiras, mistas ou binárias.

Os principais *solvers* comerciais são o CPLEX, OSL, LINDO e ZOOM e combinam métodos de resolução.

2.2 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

A maior parte dos problemas reais encontrados na área de otimização não está limitada a um único objetivo, ou seja, há casos em que é desejado otimizar simultaneamente duas ou mais funções objetivo sujeitas ao mesmo conjunto de restrições e variáveis (ROCHA, 2018). Além disso, em geral, tais metas ou objetivos são conflitantes entre si, ou seja, não existe uma

¹⁸ LAND, A. H., DOING, I. G. An automatic method for solving discrete programming problems, **Ecoometria**, v.28, p. 497-529, 1960.

solução única capaz de otimizar todos os objetivos ao mesmo tempo. Desta forma, diferentemente daquilo que ocorre na otimização com apenas um objetivo, não é possível obter uma solução ótima única. Para esse tipo de problema busca-se encontrar um conjunto de soluções ditas ótimas.

Problemas envolvendo mais do que um objetivo são chamados de Problemas de Otimização Multiobjetivo (POM), por envolverem minimização ou maximização desses objetivos, sujeitos a um conjunto de restrições. Segundo Arroyo (2002, 2005), caberá ao pesquisador ponderar entre os objetivos globais e tomar uma decisão sobre qual entre as soluções ótimas encontradas para o problema deve ser adotada. Nesta situação, o conhecimento prévio do analista ou pesquisador sobre o problema em questão é de fundamental importância para a tomada de decisão sobre a solução.

Clímaco et al. (2003) apontam problemas que podem surgir ao enfrentar situações com vários objetivos, tais como: a) conflito entre as funções objetivo, já que não existe uma solução que otimize todas simultaneamente; b) incomensurabilidade entre as funções objetivo, que não podem ser reduzidas a uma unidade comum; c) incerteza resultante de conhecimentos imprecisos ou insuficientes e da informação de preferências do decisor numa realidade multidimensional.

A aplicabilidade em problemas reais, aliada ao fato de ainda haver questões em aberto sobre resoluções de problemas multiobjetivo (COELLO, 1999; ZITZLER, 1999, PANTUZA, 2011), tornam de extrema importância esse tópico dentro da programação matemática.

A seguir, faz-se uma breve revisão dos conceitos necessários para posterior apresentação dos métodos de otimização multiobjetivo.

2.2.1 Conceitos Básicos

Para Coello et al.¹⁹ (2007, *apud* FERNANDES, 2015) e Deb (2001), POM possui o objetivo de encontrar um vetor de variáveis de decisão x , que minimiza ou maximiza um vetor de m funções objetivo $f_i(x)$ onde $i = 1, 2, \dots, m$ sujeito a J restrições de desigualdade $g_j(x)$ e K restrições de igualdade $h_k(x)$ onde $j = 1, 2, \dots, J$ e $k = 1, 2, \dots, K$. Matematicamente, POM pode ser definido da seguinte forma:

¹⁹ COELLO, C.A.C.; LAMONT, G.B. e VAN VELDHUIZER, D.A. Evolutionary Algorithm for Solving Multi-Objective Problems. Springer, 2 ed., 2007.

$$\begin{aligned}
\min \quad & f_i x = f_1 x, \dots, f_m x ; \quad i = 1, 2, \dots, m \\
\text{s.a:} \quad & g_j x \leq 0; \quad j = 1, 2, \dots, J \\
& h_k x = 0; \quad k = 1, 2, \dots, K
\end{aligned} \tag{4}$$

Conforme anteriormente mencionado, enquanto que na otimização mono-objetivo uma solução ótima é claramente identificada, uma vez que o espaço de solução é ordenado, em um POM, por outro lado, há um conjunto de alternativas, conhecidas como soluções Pareto-ótimas, que, para Fonseca e Fleming (1995) e Pantuza (2011), também podem ser denominadas como soluções eficientes, ou conjunto admissível do problema.

Uma solução é dita ser ótima de Pareto, se não existir nenhuma outra solução que a domine num mesmo espaço de solução. Essa otimalidade de Pareto fornece um conjunto de soluções nomeadas de soluções não-dominadas. Pode-se afirmar que, considerando duas soluções quaisquer, x_1 e x_2 , a solução x_1 domina a solução x_2 se essas condições forem verdadeiras (DEB, 2001):

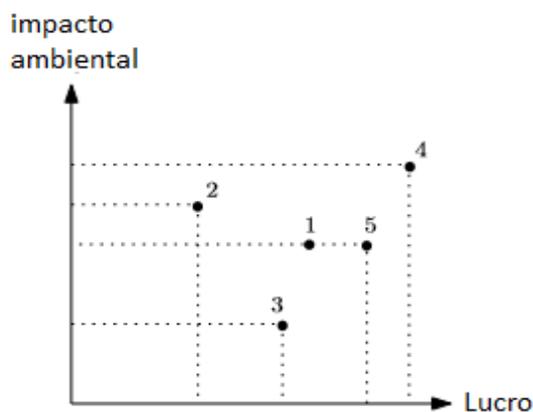
1. A solução x_1 não é pior que a solução x_2 , isto é, para todo $i = 1, 2, \dots, m$ a função objetivo $f_i(x_1)$ não é pior que $f_i(x_2)$;
2. A solução x_1 é estritamente melhor que x_2 em pelo menos um objetivo para todo $i = 1, 2, \dots, m$.

Considerando um problema de minimização das funções objetivo, se as condições acima foram atendidas, pode-se afirmar que as duas soluções x_1 e x_2 relacionam-se entre si da seguinte forma:

- x_2 é dominada por x_1 ;
- x_1 é não-dominada por x_2 ;
- x_1 domina x_2 ;
- x_1 não é inferior a x_2 em pelo menos um dos objetivos.

Em resumo, uma solução domina outra se seus valores das funções objetivos são melhores ou iguais para todos os objetivos, ou seja, a solução pode ser melhor em parte dos objetivos e igual em outra parte. Duas soluções são ditas indiferentes ou com mesmo grau de dominância se, e somente se, a primeira não domina a segunda e vice-versa. Nestas condições, não é possível dizer que uma solução é melhor do que a outra, a menos que informações adicionais de preferência ou importância dos objetivos sejam incluídas.

Figura 2 – Exemplo ilustrativo com cinco opções de plantas



Fonte: Adaptado de Fernandes (2015)

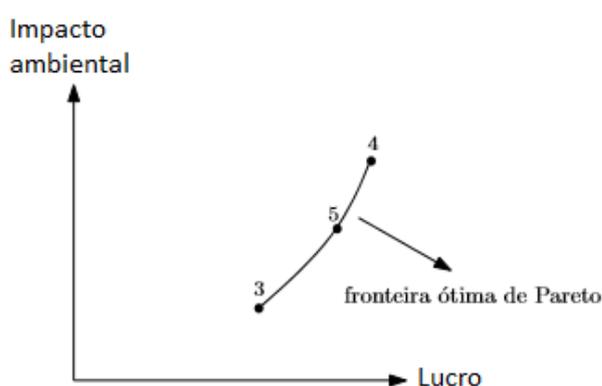
Para consolidar os conceitos revisados, coloca-se um exemplo prático, envolvendo a implantação de uma indústria com dois objetivos a serem otimizados: maximizar a lucratividade e minimizar o impacto ambiental, que são conflitantes entre si. A Figura 2 ilustra cinco soluções para o problema, utilizando diferentes plantas de produção.

Entre as cinco possibilidades de escolha, intuitivamente, as opções 1 e 2 podem ser eliminadas. Basta comparar estas opções com a planta 5. Deve-se observar que a planta dois possui lucro inferior e impacto ambiental superior quando comparada com a planta 5. Já a planta 1 possui o mesmo impacto ambiental da planta 5, contudo, seu lucro é inferior. Desta forma, pode-se concluir que as opções 1 e 2 são dominadas pela opção 5.

Com isso, é possível notar que existem três opções de implantação, soluções 3, 4 e 5, nas quais o ganho em um objetivo leva ao sacrifício o outro. Nenhuma delas é melhor que a outra em ambas as condições e, por isso, são consideradas soluções ótimas. Em síntese, nenhuma delas otimiza ambos os objetivos. Diante do impasse, conclui-se que não existe uma única solução ótima. Pode-se observar que nenhuma delas domina as demais, visto que cada uma delas perde em relação à outra em algum dos objetivos. Por exemplo, a planta 3 possui menor impacto ambiental, quando comparada às plantas 4 e 5, contudo, apresenta lucro inferior às demais. Tem-se então 3 soluções que não são dominadas por nenhuma outra. Desta

forma, este conjunto de soluções não-dominadas define a fronteira ótima de Pareto, ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Fronteira de Pareto para o problema da implantação da indústria



Fonte: Adaptado de Fernandes (2015).

De acordo com Pereira (2004), o problema de buscar uma solução Pareto-ótima torna-se uma atividade complexa de forma muito rápida à medida que se aumenta o número de objetivos a serem otimizados.

Uma estratégia para a resolução de um problema multiobjetivo seria otimizar cada função objetivo separadamente. Contudo, dificilmente soluções satisfatórias para o problema de forma global poderiam ser encontradas. Ou seja, uma solução ótima para um objetivo, comumente, implica em desempenho inaceitável em um ou mais outros objetivos, obrigando a realização de ajustes.

Para POM, existem métodos que permitem resolvê-los, utilizando técnicas clássicas de otimização mono-objetivo (DONOSO; FABRGAT²⁰, 2007, *apud* FERNANDES, 2015). Contudo, Pereira (2004) afirma que métodos de otimização convencionais, como os baseados no Gradiente e no Simplex, adaptados para POM, apresentam limitações, logo, tornam-se ineficientes. Alguns dos métodos de otimização clássicos empregados são o Método da Soma Ponderada, Método de restrição- ϵ e Programação por Metas (PM), explicados adiante.

²⁰ DONOSO, Y.; FABRGAT, R. **Multi-Objective Optimization in Computer Networks Using Metaheuristics**. Auerbach Publications, 2007.

A seguir, apresenta-se a classificação dos métodos de otimização multiobjetivo, focando em suas características quanto à tomada de decisão para, em seguida, discutir os métodos clássicos de resolução de um POM.

2.2.2 Métodos de Otimização Multiobjetivo

Conforme visto anteriormente, a existência de objetivos conflitantes torna a tarefa de encontrar soluções, que otimizem simultaneamente todos os objetivos de um problema, o maior desafio dentro da otimização multiobjetivo. Segundo Horn ²¹(1997, *apud* Pantuza, 2011), na solução de problemas multiobjetivos, dois problemas podem ser claramente identificados: busca de soluções e tomada de decisões. O primeiro refere-se ao processo de otimização no qual o conjunto de soluções viáveis, ou factíveis, deve ser guiado para o encontro do conjunto de soluções Pareto-ótimas. O segundo problema é o de tomada de decisão. Uma vez encontrada a fronteira de Pareto, caberá ao decisor a tomada de decisão sobre qual entre as soluções Pareto-ótimas será adotada para o problema. Para esta tomada de decisão se faz coerente a elaboração de um critério apropriado, que o ajude a ponderar entre as diferentes soluções conflitantes.

Para muitos autores, como Zitzler (1999), Veldhuizen e Lamont (2000), Fonseca e Fleming (1995) e Arroyo (2005), os métodos de otimização multiobjetivo podem ser classificados dentro de três categorias:

- Método a-priori ou tomada de decisão antes da busca.
- Método a-posteriori ou tomada de decisão depois da busca.
- Método iterativo ou tomada de decisão durante a busca.

2.2.3 Classificação dos Métodos de Otimização Multiobjetivo

²¹ HORN, J. (1997). **Handbook of Evolutionary Computation**, volume 1. Oxford University Press, Oxford, England.

A seguir são descritos os principais métodos utilizados na otimização multiobjetivo, com base em Rampazzo (2012).

2.2.3.1 Métodos a Priori

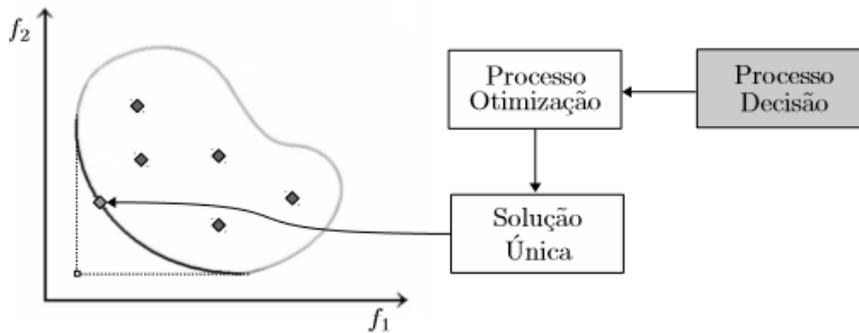
Neste caso, o decisor participa da busca de soluções antes da resolução do problema. Ele poderá atribuir elementos de preferência para os objetivos por meio de duas configurações diferentes.

Na primeira configuração, pode-se combinar os objetivos em um único objetivo. Neste caso deve-se atribuir pesos a cada um dos objetivos de forma que a preferência seja explicitada. Uma vez obtida a nova função objetivo, o problema passa a ser de otimização mono-objetivo e os métodos tradicionais podem ser aplicados.

A segunda configuração é a classificação ordinal das preferências. O problema é resolvido considerando apenas o primeiro objetivo elencado numa ordem predefinida de preferências, sem que os demais objetivos sejam levados em consideração. A seguir, o problema é resolvido para o segundo objetivo da ordem de preferências, porém, sujeito à solução encontrada para o objetivo anterior. O processo é repetido até que se esgotem os objetivos. Nesta opção, não existe a garantia de que a solução ótima seja encontrada.

O método a priori possui a vantagem quanto aos esforços computacionais ao direcionar a busca pela solução do POM, contudo, requer novas execuções sempre que a ordem de preferências entre os objetivos for de alguma maneira modificada. A Figura 4 ilustra o método de resolução a-priori para um problema bidimensional.

Figura 4 – Processo de otimização e decisão: abordagem a-priori

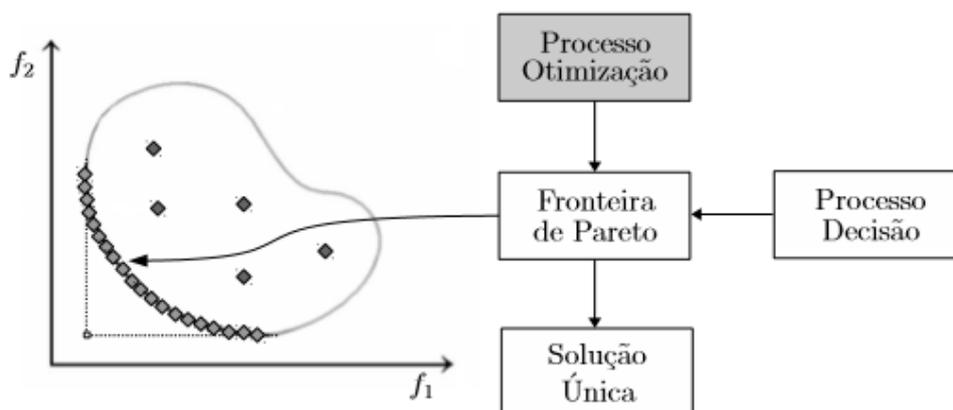


Fonte: Rampazzo (2012)

2.2.3.2 Métodos a Posteriori

Neste caso, a busca é feita considerando que todos os objetivos do POM possuem a mesma relevância. Então, a tomada de decisão é feita após a realização da busca de soluções Pareto-ótimas. Caberá ao tomador de decisão selecionar uma solução que se evidencia mais adequada com base na sua percepção do problema global.

Figura 5 – Processo de otimização e decisão: abordagem a posteriori.



Fonte: Rampazzo (2012).

O custo computacional nesse método é alto, ou seja, o tempo gasto para encontrar o conjunto de soluções Pareto-ótimas pode ser muito alto, dependendo da complexidade do problema em questão e, dessa forma, invalidar o método. Esse método é indicado para problemas de caráter investigativo ou então para problemas em que o decisor não esteja

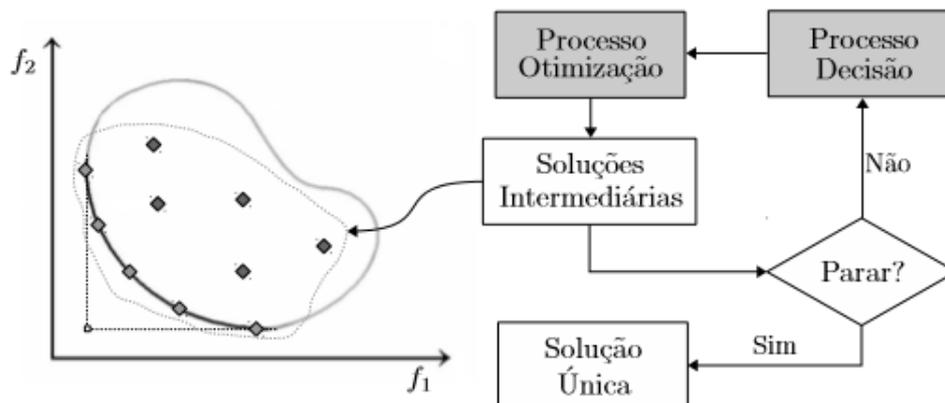
familiarizado com Espaço Objetivo Factível, pois, devido à decisão ser após a busca, a mudança na preferência do objetivo não implica em nova busca, ou seja, em custo operacional. É apresentado na Figura 5 o diagrama usado em uma abordagem a posteriori.

2.2.3.3 Métodos Interativos

Neste método, há uma interferência durante o processo de busca de soluções, subordinando as preferências para nortear a busca na direção das regiões nas quais pode haver soluções relevantes. Esta interferência se dá por meio do decisor, que pode articular o processo de otimização de uma forma iterativa. Ou seja, antes de cada iteração, o decisor define as prioridades, guiando a busca a partir de um conjunto de soluções conflitantes.

Nos métodos interativos, há a vantagem de estabelecer um método intermediário entre os métodos anteriores. Porém, devido à grande interação entre decisor e otimizador, a constante intervenção de um decisor humano pode tornar o método inapropriado para problemas multiobjetivo complexos. A Figura 6 apresenta de forma sintetizada o método interativo.

Figura 6 – Processo de otimização e decisão: abordagem interativa.



Fonte: Rampazzo (2012).

A seguir, são apresentados alguns dos métodos clássicos de otimização.

2.2.4 Métodos Clássicos de Otimização Multiobjetivo

Conforme mencionado, os métodos tradicionais de otimização de problemas com apenas um objetivo não são eficientes quando utilizados na tentativa de resolver um POM (PEREIRA, 2004). Por este motivo, a busca por métodos que consigam vencer o desafio da otimização multiobjetivo se tornou necessária.

Os métodos clássicos para resolução de problemas de otimização multiobjetivo surgiram da necessidade de encontrar soluções com prioridades, ou pesos, associados aos objetivos. Tais métodos colocam em escala os objetivos de maneira que o problema passe a ser constituído de apenas um objetivo final. Neste caso, o problema inicial multiobjetivo é transformado, criteriosamente, em um problema mono-objetivo (COHON,1978; STEUER, 1986)

Os três métodos clássicos utilizados comumente para resolver esta gama de problemas são:

- Método da soma ponderada
- Método restrição- ϵ
- Método de programação por metas

A seguir serão descritos de forma sucinta os três métodos clássicos utilizados na resolução de problemas de otimização multiobjetivo.

2.2.4.1 Método da Soma Ponderada

Este método de fácil compreensão e amplamente utilizado consiste na atribuição de diferentes pesos para cada um dos objetivos do problema inicial, de forma que o problema passe a ter uma única função objetivo expressa por meio da relação linear entre todos os objetivos originais e, desta forma, transformando o POM em um problema de otimização mono-objetivo.

Então, para um problema de minimização tem-se:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \sum w_i \cdot f_i \\ \text{s.a : } x &\in X^* \end{aligned} \tag{5}$$

No qual, w_i é o peso do objetivo f_i em relação com os outros objetivos e $W = (w_1, \dots, w_r)$ é chamado vetor de pesos.

Na primeira abordagem são resolvidos problemas de otimização individuais para cada função objetivo. Esses pontos representam os extremos da frente de Pareto (ROCHA, 2018). Assim sendo, para se alcançar as demais soluções Pareto-ótimas, este problema deve ser resolvido de forma iterativa. Neste caso, deve-se considerar diferentes vetores de pesos W definidos pelo decisor de acordo com a importância dos objetivos. O vetor W de pesos é arbitrário, contudo, os pesos devem ser normalizados para que expressem a importância de cada objetivo em relação aos demais.

O método não consegue gerar todas as soluções Pareto-ótimas quando o espaço objetivo é não convexo (ARROYO, 2002, 2005). Isso ocorre porque o método da soma ponderada consiste em gerar diferentes retas suportes, definidas pelos vetores W , e de forma geral, nem todos os pontos Pareto-ótimos admitem tais retas.

Este método possui como vantagens: a) simplicidade computacional; b) se o problema tem imagem convexa, é possível gerar todo o conjunto de soluções Pareto-ótimas para o problema; c) aplica qualquer mecanismo de otimização capaz de resolver um problema mono-objetivo.

Por outro lado, as desvantagens deste método, já mencionadas, são: a) se o problema tem imagem não convexa, não é possível gerar todo o conjunto de soluções Pareto-ótimas; b) várias ponderações podem estar associadas à mesma solução Pareto-ótima.

Vale ressaltar que esse enfoque é a base do Simplex Multiobjetivo (ZELENY²², 1973, *apud* LOBIANCO, 2007).

2.2.4.2 Método de restrição- ϵ

Este método consiste na otimização do objetivo mais importante, sujeitando-se às restrições dos outros objetivos.

²² ZELENY, M. “Compromise Programming”. In: **Multiple Criteria Decision Making**. Cochrane, J. L., Zeleny, M. (eds). University of South Carolina Press. Columbia, p. 262-301, 1973.

Considerando um problema de minimização com r funções objetivo, sendo f_1 considerado o objetivo mais importante e, por esta razão, selecionada para ser otimizada, tem-se:

$$\begin{aligned} \min f_1 x \\ \text{s.a : } f_i x \leq \varepsilon_i, \quad i = 2, \dots, r \end{aligned} \quad (6)$$

na qual, ε_i é o limite superior do objetivo f_i .

Observa-se que o problema torna-se uma otimização mono-objetivo com a busca pela solução que minimiza apenas o objetivo f_1 , transformando os demais objetivos em restrições adicionais de desigualdade.

Neste método, mesmo quando o espaço objetivo é não convexo, basta apenas variar o limite superior ε_i para obter o conjunto Pareto-ótimo. Porém, se este limite não é adequado, o conjunto de possíveis soluções obtido pode ser vazio e, desta forma, não existir solução viável. Autores como Clímaco et al. (2003) salientam que a determinação de valores para ε_i não é uma tarefa trivial. Além disso, dependendo da escolha da função objetivo a ser minimizada, o modelo pode se tornar pouco flexível, ou seja, os resultados ficam muito dependentes da função f_1 selecionada e dos valores dos limites ε_i .

Nessa perspectiva e na tentativa de sintetizar, pode-se apresentar como vantagem do método o fato de poder alcançar soluções Pareto-ótimas associadas a espaços objetivos não convexos. Como desvantagens, podem ser apontados: aumento do número de restrições do problema original; pode gerar pontos não pertencentes à fronteira Pareto-ótima; e que, com o aumento do número de objetivos, aumenta a probabilidade de serem gerados problemas infactíveis pela escolha inadequada dos valores de epsilon.

2.2.4.3 Método de Programação Por Metas

Nos problemas de programação linear por metas, usa-se uma técnica da pesquisa operacional que permite a modelagem e a busca de soluções para os problemas com múltiplas metas a serem otimizadas (MORAES, 2005).

Existem diversos métodos para a abordagem e resolução deste tipo de problema. Um dos mais usados é o método dos pesos (ARENALES et al., 2007). O método procura

converter os múltiplos objetivos em um único. Este método utiliza a inserção de variáveis de desvio que flexibilizam as restrições, ampliando o espaço de soluções factíveis. De modo geral, estas variáveis permitem que o problema seja otimizado com a avaliação das restrições que estão fora das metas pré-estabelecidas. Contudo, as soluções de interesse são aquelas em que as variáveis de desvio (ou de flexibilização) estejam o mais próximo de zero.

O problema de programação por metas é exemplificado a seguir:

$$\begin{aligned} \min Q &= \sum_{j=1}^n c_j x_j + \sum_{i=1}^m (w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^-) \\ \text{s. a: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - d_i^+ + d_i^- &= b_i \quad \forall i = 1, \dots, m \\ b_i &\geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \\ x_j &\geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n \\ d_i^+, d_i^- &\geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (7)$$

Nesta formulação $j = 1, \dots, n$ representam atividades a serem realizadas, $i = 1, \dots, m$ representam restrições a serem observadas, b_i a meta de recursos a serem utilizados ou exigências a serem alcançadas, c_j o custo da j -ésima atividade e a_{ij} é a quantidade de recurso i (ou exigência) em uma unidade da atividade j .

Neste modelo, x_j , d_i^+ e d_i^- representam variáveis de decisão. A primeira, x_j , quantifica o nível de operação da j -ésima atividade. A segunda, d_i^+ , denotada por desvio positivo do recurso (ou exigência) i , quantifica o quanto a meta b_i foi superada, enquanto a terceira, d_i^- , denotada por desvio negativo, quantifica o quanto falta para atingir a meta b_i . As constantes w_i^+ e w_i^- indicam, respectivamente, as prioridades dos i -ésimos desvios positivo e negativo em relação à meta.

A primeira equação representa a função multiobjetivo que incorpora as variáveis de desvio e suas prioridades, que devem ser minimizadas. As duas últimas equações são chamadas condições de não negatividades das variáveis de decisão. Elas garantem que não existe efeito de cancelamento ao buscar o mínimo para o problema.

2.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)

Segundo Jensen et al. (1997), os primeiros estudos a respeito do ciclo de vida de produtos e materiais datam do final da década de 1960 e início da década de 1970, focados em questões como eficiência energética, consumo de matérias-primas e, em certa medida, descarte de resíduos. Contudo, somente em meados dos anos de 1980, impulsionada pela crescente tendência de sustentabilidade, conforme discutido no Capítulo 1, é que a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) começa a ser empregada fora dos ambientes acadêmicos. Pode-se dizer que *The Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) modelou aquilo que hoje se conhece por ACV. Em 1990, o primeiro relatório apresentando o nome do método ACV e suas diretrizes foi apresentado no *workshop* de *Smuggles Notch*, nos Estados Unidos.

No início dos anos 1990, a SETAC organizou uma série de *workshops* que abordaram diferentes aspectos da ACV: *A Technical Framework for Life-Cycle Assessment* (1990), *Life-Cycle Assessment* (1991), *Conceptual Framework for Life-Cycle Data Quality* (1993) e *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice* (1993).

De forma geral, ACV pode ser entendida como uma técnica capaz de avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais ao longo da vida de um produto.

Segundo a ABNT (2009), a ACV pode subsidiar:

- A identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em vários pontos de seu ciclo de vida.
- A tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não governamentais como, por exemplo, no planejamento estratégico, na definição de prioridades, em projeto ou re-projeto de produtos ou processos, entre outros.
- A seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição.
- O *marketing* (como, por exemplo, uma declaração ambiental, um programa de rotulagem ecológica ou uma declaração ambiental de produto).

2.3.1 Normas Estruturantes

A técnica de ACV tem sua estrutura normalizada pela série ISO 14040 e, no Brasil, são editadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Até 2006, a série era composta pelas normas:

ISO 14040: Princípios gerais e estrutura (1997).

ISO 14041: Definição do objetivo e escopo e análise de inventário (1998).

ISO 14042: Avaliação de impacto do ciclo de vida (2000).

ISO 14043: Interpretação do ciclo de vida (2000)

ISO/TR 14047: Exemplos de aplicação da ISO 14042 (2003).

ISO/TS 14048: Formato de dados e documentação (2002).

ISO/TR 14049: Exemplos de aplicação da ISO 14041 para definição do objetivo e escopo e análise de inventário (2000).

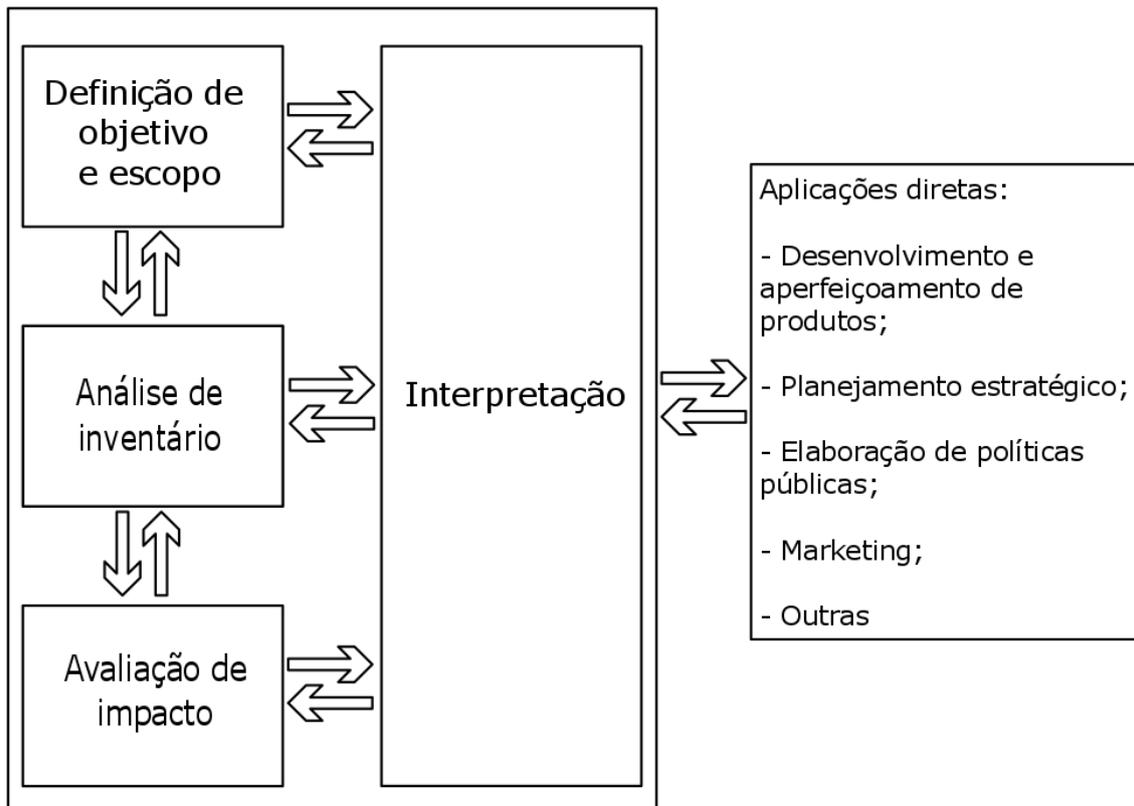
A partir de 2006, uma nova redação para a norma técnica ISO 14040 cancela e substitui as normas técnicas ISO 14041, 14042 e 14043. Essa norma trata dos princípios da ACV e apresenta a estrutura de avaliação de ciclo de vida composta por 4 fases: 1) definição do objetivo e escopo; 2) análise do inventário; 3) avaliação de impacto; e 4) interpretação.

A norma técnica ISO 14044 de 2006 aborda os requisitos e diretrizes da ACV e, após sua publicação, as normas ISO/TR 14047, ISO/TR 14048 e ISO/TR 14049 passaram a ser exemplos de aplicação da ISO 14044.

Segundo a ABNT (2009), os resultados da ACV podem ser subsídios úteis para uma variedade de processos decisórios. As aplicações diretas dos resultados de estudos de ACV, ou seja, as aplicações pretendidas na definição de objetivo e escopo do estudo de ACV são apresentadas na Figura 7, que também ilustra o relacionamento entre as fases da ACV.

Figura 7 – Estrutura da avaliação de ciclo de vida

Estrutura da avaliação de ciclo de vida



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009b)

Na sequência, apresenta-se a descrição de cada fase que compõe a ACV, segundo a ISO 14040 (ABNT, 2009b).

2.3.1.1 Definição de Objetivo e Escopo

Os seguintes pontos devem ser declarados como objetivos de uma ACV: i) a aplicação pretendida; ii) as razões para a execução do estudo; iii) o público-alvo, ou seja, aquele a quem se pretende comunicar os resultados do estudo; e iv) se existe intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

Ainda dentro deste tópico, a ABNT NBR ISO 14040 salienta que convém que o escopo seja bem definido para assegurar que o detalhamento do estudo seja compatível e suficiente para atender ao objetivo declarado (ABNT, 2009). Dessa forma, os itens que compõem o escopo são: i) o sistema de produto a ser estudado; ii) as funções do sistema de

produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas; iii) a unidade funcional; iv) a fronteira do sistema; v) procedimentos de alocação; vi) categorias de impacto selecionadas e metodologia para a avaliação de impactos bem como a interpretação subsequente a ser utilizada; vii) requisitos de dados; viii) pressupostos; ix) limitações; x) requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados; xi) tipo de análise crítica, se aplicável; e xii) tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

O documento que norteia a ACV deixa explícito que esta é uma técnica iterativa e dessa forma, à medida que as informações são coletadas, os aspectos do escopo podem exigir modificações visando atender ao objetivo do estudo. O texto ainda informa que um sistema pode ter várias funções possíveis, e aquela(s) selecionada(s) para o estudo dependem do objetivo e escopo da ACV. A unidade funcional define a quantificação das funções identificadas do produto com propósito de fornecer uma referência à qual as entradas e saídas são relacionadas. É importante determinar o fluxo de referência de cada sistema de produto, ou seja, a quantidade de produtos necessária para desempenhar a função.

A fronteira do sistema é definida na norma técnica como o conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto. Esta ressalta que é conveniente que o sistema seja modelado de forma que as entradas e saídas sejam materiais (ou energia) sem transformação prévia ou subsequente, ou seja, os limites de fronteira sejam fluxos elementares.

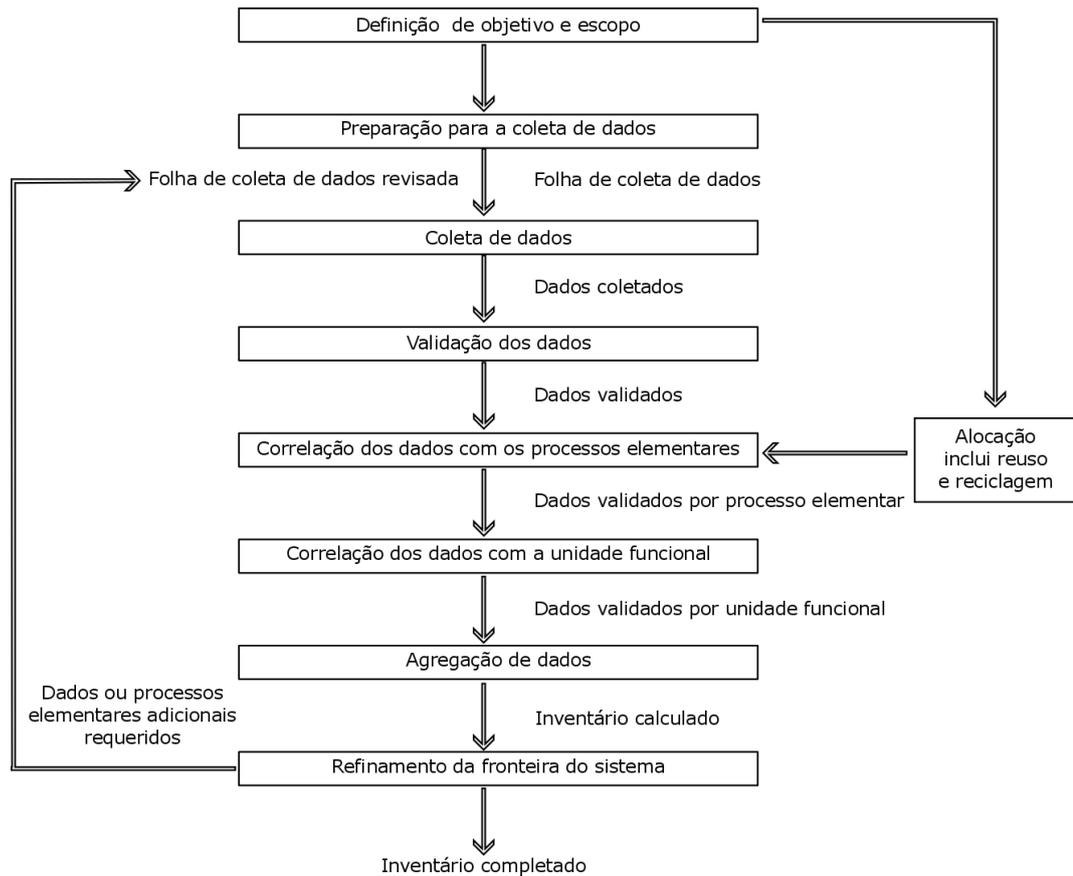
Os critérios utilizados no estabelecimento da fronteira do sistema são importantes para o grau de confiança nos resultados de um estudo e para a possibilidade de se atingir seu objetivo. Assim como no escopo, em muitas situações a fronteira do sistema definida inicialmente deverá ser refinada posteriormente.

O aspecto geográfico torna-se relevante na medida em que diferentes etapas do ciclo de vida podem ocorrer em diferentes localidades (principalmente nas etapas de extração de matéria-prima, produção de materiais e manufatura do produto) e as tecnologias utilizadas e a sensibilidade do meio ambiente aos diversos poluentes podem diferir de uma região para outra (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

2.3.1.2 Análise de inventário

A análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto (ABNT, 2009).

Figura 8 - Procedimento simplificado para análise de ICV



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009b)

Assim como o escopo, ICV é um processo iterativo, ou seja, à medida que os dados são coletados e se amplia o conhecimento sobre o sistema, novos requisitos ou limitações dos dados podem ser identificados, requerendo mudança nos procedimentos de coleta. É uma etapa de extrema importância dentro da ACV, uma vez que a confiabilidade dos resultados depende diretamente dele.

Os dados para cada processo elementar dentro da fronteira do sistema podem ser classificados sob títulos gerais como: i) entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares, outras entradas físicas; ii) produtos, coprodutos e resíduos; iii) emissões atmosféricas, descargas para água e solo; e iv) outros aspectos ambientais.

Após a coleta de dados, realizam-se processos de cálculos com esses dados buscando a validação dos mesmos, correlação dos dados aos processos elementares, correlação dos dados aos fluxos de referência e à unidade funcional. A ISO 14044 apresenta as disposições gerais e orientação para cada etapa da fase de ICV, ilustrada na Figura 8.

2.3.1.3 Avaliação de impacto

A fase de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) tem o objetivo de estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados do ICV.

Segundo Sonnemann et al. (2003), é uma tradução dos resultados do ICV em indicadores de impacto ambiental. A agregação dos resultados, por vezes ponderados, define o perfil da AICV e fornece informações relativas aos impactos ambientais associados ao consumo de recursos e emissões ao meio. Os elementos da fase de AICV estão ilustrados na Figura 9.

A descrição detalhada dos elementos obrigatórios de uma AICV está presente na norma técnica ISO 14044 (ABNT, 2009b), abaixo sintetizada:

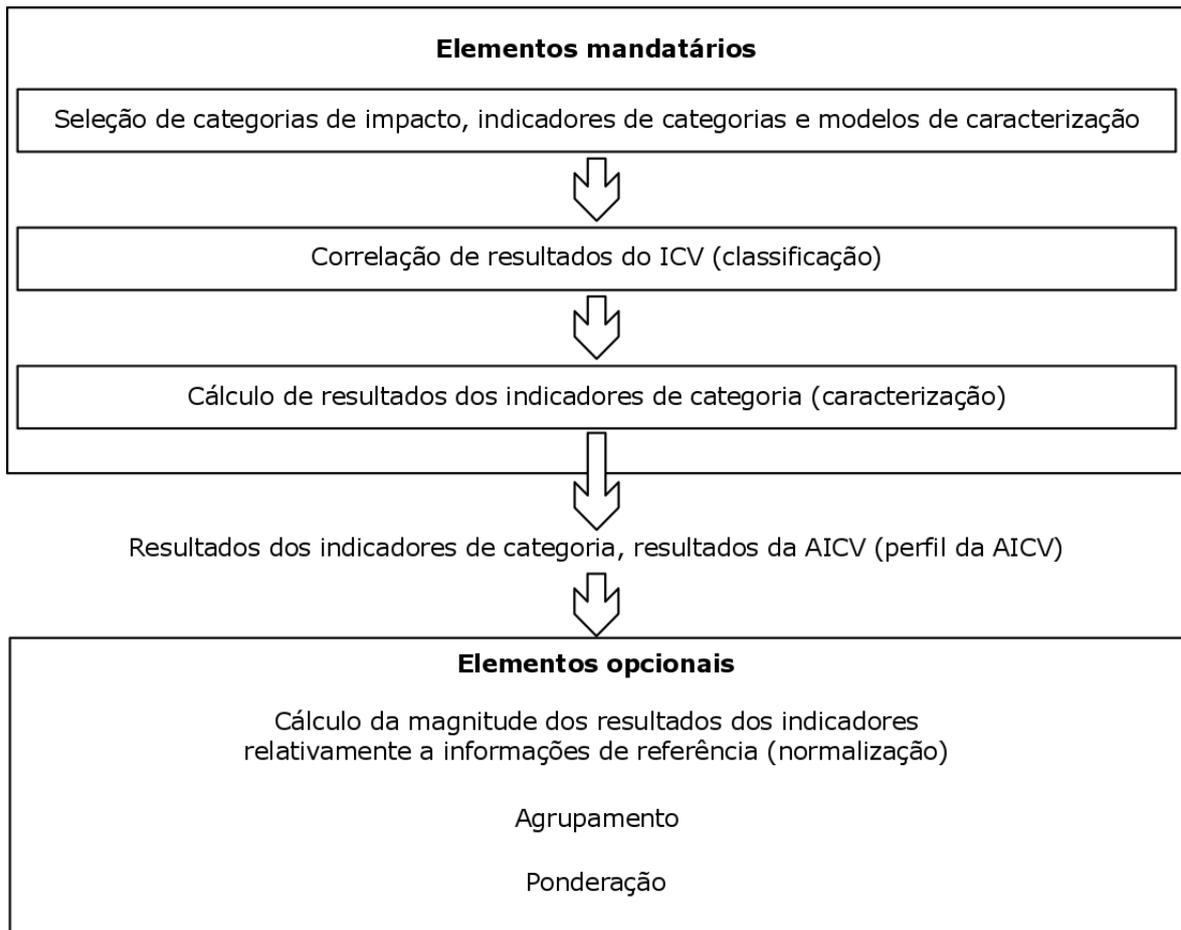
- Seleção de categorias de impacto: consiste na escolha e definição de categorias de impacto, indicadores de categoria, ou modelos de caracterização, referenciando as fontes relacionadas. Na maioria dos estudos, essas categorias, indicadores ou modelos já existem. Porém, quando não são suficientes para satisfazer o objetivo ou escopo definidos para a ACV, faz-se necessário defini-los.

- Classificação: correlação dos resultados do inventário do ciclo de vida a diferentes categorias de impacto, tais como ecotoxicologia, acidificação e mudança climática. A etapa de classificação é qualitativa, baseada na análise científica dos aspectos ambientais. A classificação é um elemento qualitativo.

- Caracterização: cálculo dos resultados dos indicadores para cada categoria de impacto e/ou dano por meio de fatores e modelos de caracterização. A caracterização é um elemento quantitativo.

Figura 9 – Elementos da fase de AICV

Avaliação de impacto do ciclo de vida



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009a).

De acordo com a norma ISO 14040 (ISO, 2009a), os elementos opcionais consistem na normalização, agregação e ponderação. A seguir, é realizada a descrição de cada um deles.

- **Normalização:** cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria referente a informações de referência, ou seja, a normalização transforma um resultado de indicador pela divisão do mesmo por um valor de referência selecionado.

- **Agrupamento:** esta etapa consiste no agrupamento de categorias de impacto e/ou danos segundo semelhanças e possível hierarquização das categorias de impacto (por exemplo, alta, média ou baixa prioridade).

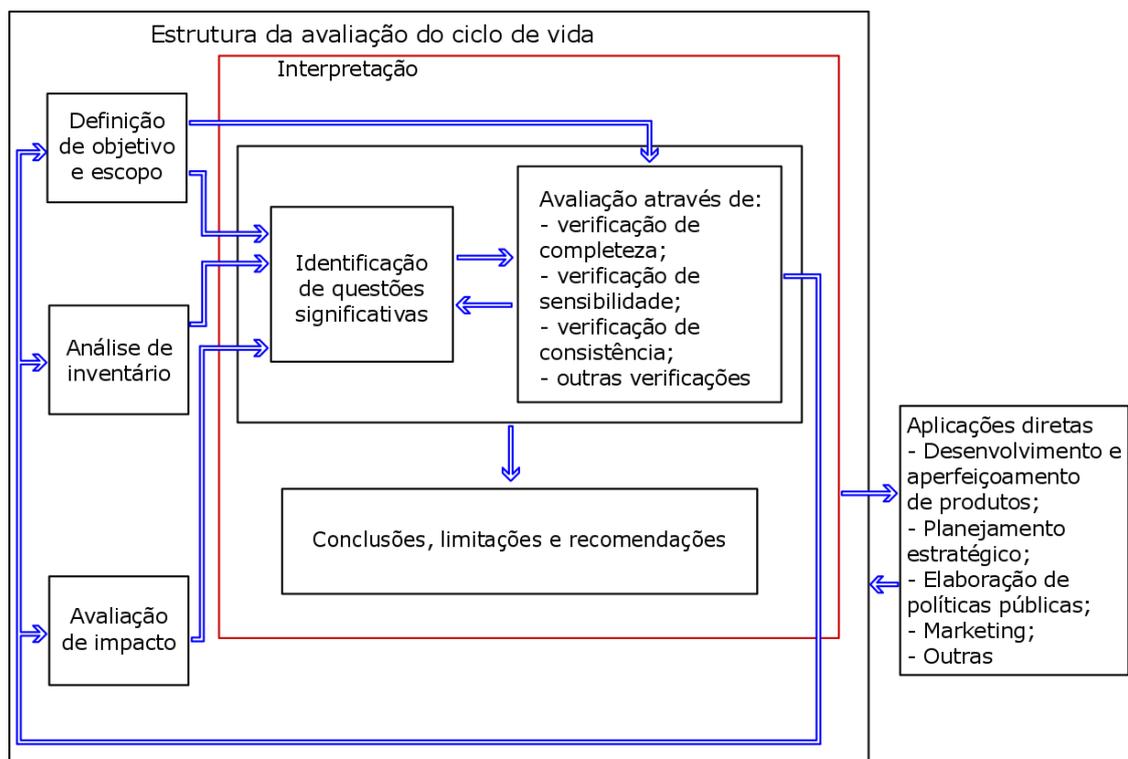
- **Ponderação:** conversão e possível agregação dos resultados dos indicadores em uma escala comum.

2.3.1.4 Análise de melhorias/interpretação

A interpretação é a fase da ACV em que constatações da ICV e da AICV são consideradas de forma conjunta. Esta fase visa fornecer uma apresentação compreensível, completa e consistente dos resultados de uma ACV (ABNT, 2009a). Portanto, convém que esta fase seja consistente com o objetivo e escopo definidos e que levem a conclusões, expliquem limitações e provejam recomendações.

O relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV estão ilustrados na Figura 10.

Figura 10 – Elementos da interpretação e as outras fases da ACV



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009b).

Conforme ilustrada, a fase de interpretação é dividida em três elementos, cujos objetivos são:

- Identificação das questões significativas: objetiva estruturar os elementos das fases de ICV e AICV para determinar as questões significativas, de acordo com a definição de objetivo e escopo e iterativamente com elemento avaliação.

- Avaliação: objetiva estabelecer e aumentar o grau de certeza e a confiabilidade dos resultados do estudo de ACV, incluindo as questões significativas identificadas no primeiro elemento desta fase. Durante a avaliação, o uso de três técnicas deve ser considerado: verificação de completeza, verificação de sensibilidade e verificação de consistência.

- Conclusões, limitações e recomendações: objetiva chegar a conclusões, identificar as limitações e fazer recomendações para o público alvo da ACV. As recomendações devem ser baseadas nas conclusões do estudo, refletindo uma consequência lógica e razoável dessas conclusões.

2.3.2 A Método ReCiPe

O método ReCiPe é uma evolução dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2001, reconhecidos e amplamente utilizados. Estes métodos são baseados em diferentes pontos de partida, visto que o CML usa uma abordagem focada na linha de base, ou seja, a nível *midpoint* enquanto que o Eco-Indicador foi elaborado com foco nos resultados e, desta forma, usa o nível *endpoint*. Já o ReCiPe integra e harmoniza as abordagens *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura consistente. No nível *midpoint* são 18 as categorias de impacto abordadas: mudança climática (CC), depleção de ozônio (OD), acidificação terrestre (TA), eutrofização aquática (água doce) (FE), eutrofização aquática (marinha) (ME), toxicidade humana (HT), formação de oxidantes fotoquímicos (POF), formação de matéria particulada (PMF), ecotoxicidade terrestre (TET), ecotoxicidade aquática (água doce) (FET), ecotoxicidade aquática (marinha) (MET), radiação ionizante (IR), uso da terra agrícola (ALO), uso da terra urbana (ULO), transformação de terra natural (NLT), depleção de recursos fósseis (FD), depleção de recursos minerais (MD) e depleção da água (WD).

Para a quantificação dos impactos dentro de cada categoria, o método proposto relaciona um fator de caracterização para a categoria de impacto, de forma que as diversas emissões que estão presentes na categoria sejam transformadas em uma única, através de equivalências. A Tabela 1 relaciona as categorias de impacto com os respectivos fatores de caracterização, no nível *midpoint*, bem como a unidade de medida equivalente usada para cada fator.

Tabela 1 – Fatores de caracterização associados a cada categoria de impacto (ReCiPe).

Categoria	Fator de caracterização	Sigla	Unidades
CC	Pot. de aquecimento global	GWP	kg (CO ₂ para o ar)
ALO	Pot. de ocupação de terra agrícola	ALOP	m ² x yr (de terra)
FD	Pot. de depleção fósfil	FDP	kg (óleo)
FET	Pot. de ecotoxicidade da água doce	FETP	kg (14-DCB para água)
FET	Pot. de eutrofização da água doce	FEP	kg (P para água doce)
HT	Pot. de toxicidade humana	HTP	kg (14-DCB para ar)
IR	Pot. de radiação ionizante	IRP	kg (U ²³⁵ para o ar)
MET	Pot. de ecotoxicidade marinha	METP	kg (14-DCB para água)
MET	Pot. de eutrofização marinha	MEP	kg (N para água)
MD	Pot. de depleção mineral	MDP	kg (Fe)
NLT	Pot. de transformação de terras naturais	NLTP	m ² (de terra)
OD	Pot. de depleção do ozônio	ODP	kg (CFC-11 para o ar)
PMF	Pot. de formação de matéria particulada	PMFP	kg (PM ₁₀ para o ar)
POF	Pot. de formação de oxidante fotoquímico	POFP	kg (NMVOC para o ar)
TA	Pot. de acidificação terrestre	TAP	kg (SO ₂ para o ar)
TET	Pot. de ecotoxicidade terrestre	TETP	kg (14-DCB para o solo)
ULO	Pot. de ocupação de terras urbanas	ULOP	m ² x yr (de terra)
WD	Pot. de depleção da água	WDP	m ³ (de água)

Fonte: GOEDKOOOP, M. et al. (2009)

Pode-se perceber que cada categoria de impacto será expressa por unidade de medida própria o que impede a simples adição destas categorias. O nível *endpoint* agrupa as categorias *midpoint*, atribuindo pesos distintos a cada uma, de maneira que ao final tem-se três categorias ao nível *endpoint*: danos à saúde humana (HH), danos à diversidade dos ecossistemas (ED) e danos à diversidade de recursos (RA) (GOEDKOOOP et al., 2009). No anexo A encontra-se um diagrama relacionando as categorias antes mencionadas.

Findas as explicações dos conceitos que sustentaram o modelo proposto, passa-se para um panorama do etanol como combustível para, em seguida, resenhar uma seleção de estudos, pesquisas e trabalhos, envolvendo a otimização, a ACV e/ou a CSs nesta área.

3 O ETANOL COMO BIOCOMBUSTÍVEL E ESTUDOS DE OTIMIZAÇÃO NA SUA PRODUÇÃO

Com base na proposta de Vasconcelos (2002) para o desenvolvimento de pesquisas interdisciplinares, este capítulo apresenta uma breve contextualização do setor sucroalcooleiro, objetivando oferecer um panorama geral, crítico e atualizado sobre a produção do etanol de primeira geração, advindo da cana-de-açúcar e da indústria no Brasil. Isto feito, passa-se a discutir alguns estudos de natureza científica, preferencialmente, mas não somente, aqueles que usam, simultaneamente, modelos de programação matemática para otimização do setor e envolvam a ACV e/ou a CS.

Conforme discutido na introdução desta tese, as décadas de 1970 e 1980 foram palco para grandes discussões quanto ao rumo que a sociedade quer dar para o planeta Terra, enquanto local de vida e sobrevivência humana.

Este contexto, aliado à crise do petróleo no mundo, deslançada pela alta do preço do barril em decorrência de problemas nas relações político-econômicas internacionais entre o mundo árabe, principais exportadores de petróleo, representados pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), e as grandes indústrias petrolíferas ocidentais, chamadas de “sete irmãs”, dominadas pelos Estados Unidos, que tinham o poder, inclusive, de influenciar o preço deste combustível, foi também favorecido por uma crescente conscientização da sociedade sobre a necessidade de reduzir as emissões de gás carbônico no ar, frente às consequências desastrosas advindas do aquecimento solar e o detrimento da camada de ozônio.

Diante disso, países importadores começam a buscar alternativas para a substituição do petróleo, contando, em diversos países, com incentivos governamentais para o desenvolvimento de programas específicos de combustíveis alternativos. De acordo com Olsson²³ (2007 *apud* Mele et al. 2011), China, Índia, Colômbia, Tailândia, México e Venezuela são exemplos de países que adotaram essa medida a médio e a longo prazo, além dos Estados Unidos e do Brasil, cujas ações governamentais de suporte tornaram ambos nos maiores produtores de etanol no mundo.

²³ Olsson, L. *Advances in Biochemical Engineering and Biotechnology*. Ed. **Biofuels**. Springer: Berlin/Heidelberg, 2007, v. 108.

Vale lembrar que o etanol como combustível para veículos foi proposto por Henry Ford, na última década do séc. XIX. No Brasil, segundo Silva (2013) e Lorenzi (2018), desde 1903, já existiam registros de firmes intenções de incorporação do etanol como um novo combustível e como saída para a agroindústria canavieira, mas somente ganhou mercado a partir de 1931, pelo Decreto de n. 19.717/1931, pela anuência do Presidente Getúlio Vargas.

Assim, muitos empresários de agroindústria, que já produziam alguns produtos derivados da cana-de-açúcar, e muitos proprietários de canaviais, abraçam a ideia de agregar e aumentar a produção de etanol, também desta matéria-prima, buscando obter mais lucros, sobretudo pela alternância na produção maior de açúcar ou/e de etanol, dependendo da demanda e do preço. Por sua vez, o governo brasileiro decide apoiar esta decisão para atender a vários objetivos como diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, evitar a evasão de divisas com combustíveis, ao contrário, incrementando-as pela exportação, diminuir a emissão de gases de efeito estufa (GEE), atendendo, portanto, aos compromissos assumidos com a comunidade internacional, considerando ser o etanol um combustível menos poluente. Para tanto, várias ações governamentais foram aprovadas e implementadas sob a forma de programas específicos para este fim, destacando-se o Pró-alcool e, recentemente, o RenovaBio, ambos descritos sucintamente no Capítulo 1.

Neste ponto é preciso destacar que há controvérsias sobre se os motivos citados foram reais e determinantes para que o governo fizesse um investimento estimado em mais de US\$3 bilhões (valores da época) na modernização e ampliação do setor sucroalcooleiro brasileiro. De acordo com Lorenzi (2018), a maioria dos autores que analisaram o PróAlcool concorda que o programa “não visava somente diminuir as importações de petróleo, mas tinha o duplo objetivo de salvar a indústria de açúcar que passava por séria crise” (p.57). De acordo com Paixão²⁴ (2003:3 *apud* Lorenzi, 2018:58), é preciso considerar, para bem compreender o PróAlcool, a força do “poderio político tradicional detido pela classe dirigente do setor sucroalcooleiro (usineiros e fornecedores de cana), e o momento de ameaças pelo qual passava este setor no começo dos anos 1970.” Santos (2010) lembra que, à época, a ociosidade das destilarias brasileiras alcançava 38%, enquanto que as destilarias paulistas alcançavam os 50%.

De toda forma e por diversos ângulos, o etanol se estabeleceu fortemente na economia brasileira buscando atender a vários objetivos, por vezes conflitantes, que eram maximizar os

²⁴ PAIXÃO, M (2003). **O PROÁLCOOL enquanto uma política alternativa: uma resenha crítica.** Disponível em: < <https://www.rits.org.br/pbsd> > Acesso em 15 Julh. 2014 por Lorenzi (2018).

lucros atendendo à pressão dos dirigentes do setor sucroalcooleiro, minimizar o impacto ambiental atendendo aos compromissos firmados internacionalmente, e investir em um combustível renovável. Tais objetivos bem se aproximam do foco desta tese, que busca, pela otimização, propor e testar um modelo de programação matemática, usando dados reais do setor no Brasil, no qual os ganhos econômicos e ambientais são os balizadores de todo o esforço intelectual produzido.

3.1 O SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO NA CONTEMPORANEIDADE

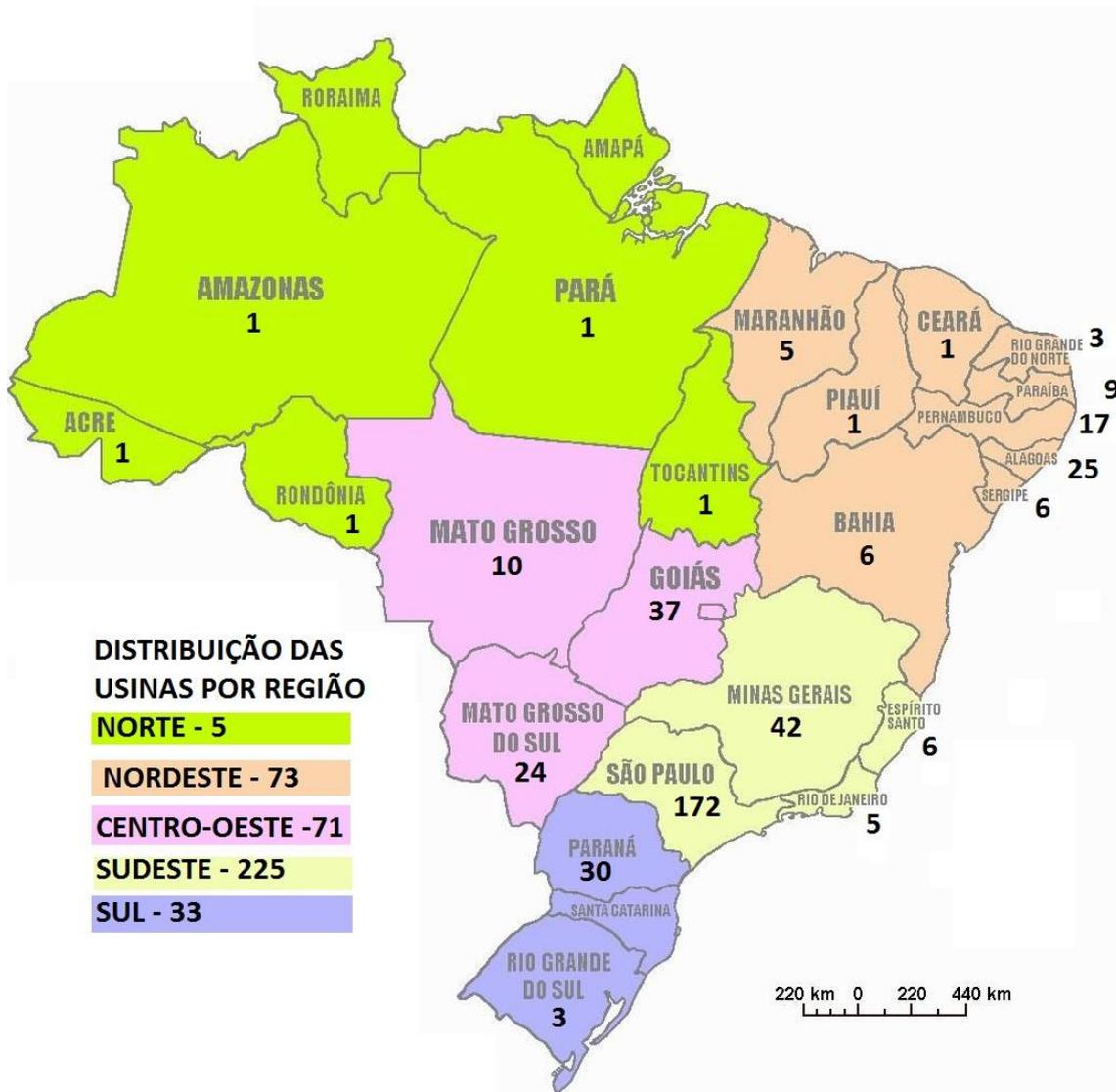
O setor sucroenergético brasileiro conta hoje com 407 usinas de cana-de-açúcar distribuídas por 23 dos 27 estados brasileiros, conforme ilustrado pela Figura 11. Apenas os estados do Amapá, Roraima, Santa Catarina e o Distrito Federal não dispõem de usinas alcooleiras.

A região que concentra a maior quantidade de usinas é a região sudeste, representando pouco mais que 55% do total instalado no país, contabilizando, assim, 225 usinas, das quais 172 encontram-se no estado de São Paulo. De acordo com dados obtidos no Portal da UNICA (2016), este estado, sozinho, produziu aproximadamente 48% do etanol na safra 2014/2015, com volume superior a 13,7 milhões de m³. A região conta também com 42 usinas instaladas no estado de Minas Gerais.

A região Norte é a que menos concentra indústrias de cana-de-açúcar, contando com apenas 5. Nenhum estado dessa região possui mais do que uma indústria instalada e, como já mencionado, os estados de Roraima e Amapá não possuem esse tipo de indústria.

Na safra 2017/2018, o total de etanol produzido no Brasil foi de 27.858 milhares de m³, sendo, desses, 11.366 milhares de m³ na forma de etanol anidro, e os 16.492 milhares de m³ restantes na forma de etanol hidratado (UNICA,2018). A quantidade produzida entre as duas formas de etanol varia de acordo com as demandas.

Figura 11 – Distribuição das indústrias de cana-de-açúcar pelas regiões e estados brasileiros



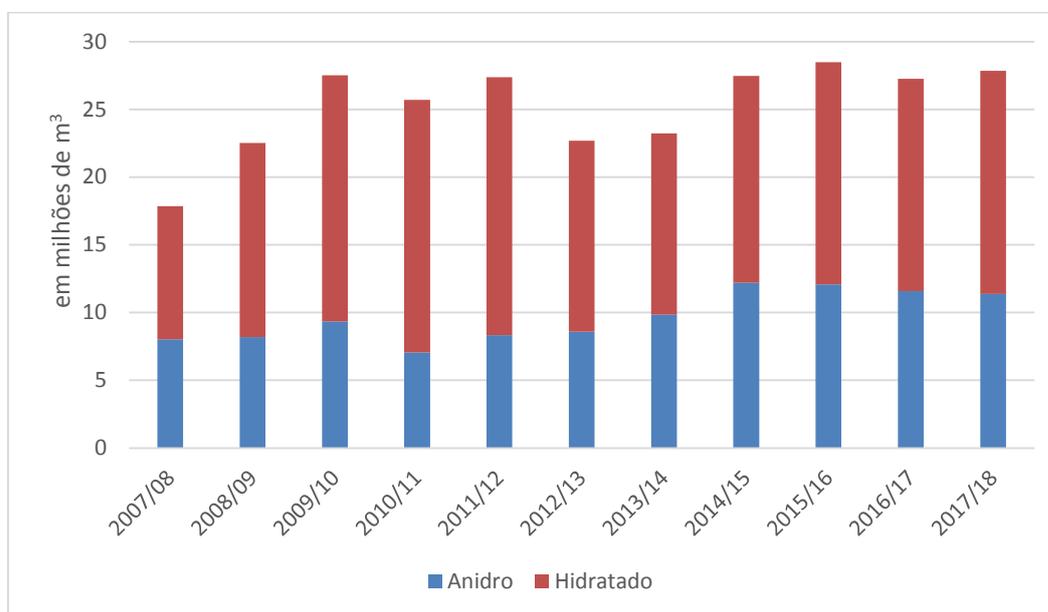
Fonte: Mapa elaborado pelo autor com dados disponíveis em <http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/>. Acesso em 22 jun. 2017.

Já a Figura 12 ilustra a evolução na quantidade produzida entre as safras 2007/2008 e 2017/2018. Nela pode-se observar que, após uma queda na produção entre as safras de 2012/2013 e 2013/2014, a produção retomou o crescimento. Na safra de 2014/2015 o volume total de etanol atingiu novo recorde que, mesmo sendo superado já na safra seguinte, ainda mantém o recorde de produção para o etanol anidro. Também pode-se perceber que o volume

de etanol total se mantém praticamente estável a partir da safra de 2014/2015, com pequena diminuição na produção do etanol anidro e leve aumento na produção do etanol hidratado.

Contudo, a situação econômica atual do setor sucroalcooleiro do Brasil não é tranquila, acumulando uma dívida que ultrapassou R\$ 84 bilhões em 2017, com fechamento de 83 usinas entre 2008 e 2014. Em 2016, outras 86 estavam em recuperação judicial, com sério risco de falir (LORENZI, 2018).

Figura 12 - Evolução da produção de etanol anidro e hidratado entre as safras 2007/08-2017/18



Fonte: Dados disponíveis em <http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/> Acesso em 22 jun. 2017.

Diante deste quadro é feita, abaixo, uma síntese da sustentabilidade relacionada à matéria-prima utilizada: a cana-de-açúcar.

3.1.1 Sustentabilidade

A cana-de-açúcar²⁵ é uma gramínea da qual muito se aproveita. Além dos produtos principais, açúcar e etanol, os subprodutos e resíduos podem ser utilizados na alimentação

²⁵Disponível em : http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html Acesso em 25 jun./2017.

humana e animal, na fertilização de solos, e na co-geração de energia. Entre os subprodutos e resíduos, destacam-se:

• **Bagaço**

É o resíduo fibroso da extração do caldo pelas moendas. Segundo a União da Indústria de Cana-de-açúcar, uma tonelada de cana produz em média 280 kg de bagaço, com 46% de fibra e 50% de umidade. O bagaço constitui um dos mais importantes resíduos da indústria sucroalcooleira, sendo suas principais aplicações: produção de celulose, alimentação de gado confinado e, principalmente, como insumo na cogeração de energia. Neste aspecto, Pellegrini (2002) cita as vantagens do uso do bagaço: a) a lavoura é organizada e os custos de produção do bagaço são debitados no produto nobre, o açúcar e/ou o álcool; b) o sistema de transporte entre campo e indústria é organizado e vinculado ao mesmo produto nobre; c) a produção de bagaço é grande e concentrada; e d) o produto é liberado semi-beneficiado após a moagem da cana.

De acordo com Nogueira e Garcia (2013), a bioeletricidade é uma forma de obter energia elétrica a partir da biomassa disponível, como restos de madeira, cascas de arroz, capim-elefante, carvão vegetal, resíduos da cana-de-açúcar, entre outras. Segundo Maeda (2012), no Brasil, 80% da bioeletricidade vem dos resíduos da cana-de-açúcar que, pelo alto teor de fibras e podendo alcançar um poder calorífico de $18,62 \text{ MJ.kg}^{-1}$, o bagaço da cana tem sido empregado na produção de vapor e energia elétrica para a produção de açúcar e etanol, garantindo autossuficiência energética das usinas durante o período de safra (LORENZI, 2018).

• **Palhiço**

De acordo com a definição de Ripoli e Ripoli (2009), palhiço é o material que fica sobre o solo após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, constituído de folhas verdes, palha, ponteiros, frações de raízes e partículas de terra a eles aderida. Pode permanecer no solo de 9 a 28t/ha de palhiço sendo, em média, 14,4 t de matéria seca por hectare colhido, segundo o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) da Coopersucar (2005). A parte seca do palhiço também pode ser utilizada na cogeração de energia para as usinas. Enquanto uma tonelada de bagaço pode gerar 342,4kWh, uma tonelada de palhiço pode gerar 500kWh, em função da menor quantidade de umidade presente.

• Torta de filtro

A torta de filtro é um resíduo proveniente do lodo de decantação, do tratamento do caldo extraído das moendas no filtro rotativo no processo de produção de açúcar. Contudo, as novas unidades alcooleiras, que da mesma forma passaram a utilizar um filtro rotativo, também obtêm esse resíduo na produção do etanol. Segundo dados obtidos na Embrapa²⁶ (2018), de 20 a 40 kg de torta são gerados para cada tonelada de cana moída e sua composição é constituída de 1,2% a 1,8% de fósforo, dos quais, aproximadamente, 50% podem ser considerados prontamente disponíveis. Possui ainda elevada umidade (70%), matéria orgânica (16,90%), magnésio, cálcio e nitrogênio (PARANHOS, 1987; VITTI et.al., 2006).

Por sua concentração de fósforo e alta umidade, a principal aplicabilidade para este resíduo é como rico fertilizante orgânico. Contudo, não suficiente para garantir todos os nutrientes necessários para a cana-de-açúcar, que necessita de complementação mineral. Conforme Rosseto e Santiago (2007) – artigo disponibilizados no site da EMBRAPA – existem três formas básicas de utilização no canavial: 1ª) aplicação em superfície total nas áreas de renovação dos canaviais, com grandes quantidades incorporadas ao solo por meio de gradagens; 2ª) distribuição nas entrelinhas da cana-soca (toda cana que já produziu ao menos um corte) e incorporadas por meio de cultivadores de disco; 3ª) aplicações nos sulcos de plantio, com quantidades reduzidas distribuídas levando em consideração a quantidade de nutrientes que serão incorporados ao solo.

• Melaço

O melaço, ou mel final, é o principal subproduto da indústria açucareira, sendo produzido na proporção de 40 a 60 kg por tonelada de cana processada. De acordo com a EMBRAPA (2018), a principal utilização do melaço no Brasil, por seu alto teor de açúcares totais, se dá na produção de álcool etílico. Porém, existem outras utilizações para esse subproduto, como em processos biotecnológicos, nos quais entra como matéria-prima para produção de proteína, rações, levedura prensada para panificação, antibióticos, entre outros.

• Vinhaça

²⁶Disponível em http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html. Acesso em 12 ago. 2018.

É um resíduo associado à produção do álcool. A cada litro de álcool produzido, uma quantidade variando entre 07 e 16 litros de vinhaça é gerada com diferentes concentrações de potássio, de acordo com a matéria-prima utilizada. A média, porém, fica entre 11 e 12 litros, segundo *sites* de referência nacional como UNICA e Embrapa (2018). A vinhaça, originária da fermentação do melaço, possui maior concentração em relação à vinhaça gerada na fermentação do caldo de cana.

Com o grande aumento na produção de álcool impulsionado pelo Programa Federal Proálcool, o descarte da vinhaça, que era feito diretamente no leito de rios, passou a causar impactos ambientais relevantes como, por exemplo, a morte de peixes. Então, com o Decreto-Lei n.323 de 29 de novembro de 1978, ficou definitivamente proibido seu descarte em rios, lagos, e cursos de água. Estudos sobre aplicação desse resíduo já vinham sendo desenvolvidos desde a década de 1950 na Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz (ESALQ) e intensificaram-se após o desequilíbrio ambiental causado pela concentração de vinhaça nos rios, buscando o reaproveitamento deste resíduo com a geração de menor impacto ambiental possível.

De acordo com Corazza (2000), Vitti et al. (2006), Rosseto e Santiago (2017), as principais aplicações para a vinhaça são: alimentação de animais, produção de proteínas, produção de metano e, principalmente, fertilização de solos, sendo esta empregada em grande escala nos próprios canaviais na forma de fertirrigação desde a década de 80 do século passado, utilizando-se de vários métodos existentes como sulcos de infiltração, caminhões tanque, aspersão convencional, aspersão com canhão hidráulico, entre outros. Essa prática amplamente difundida é caracterizada pelo baixo investimento inicial (tanques, caminhões e bombas), baixo custo de manutenção, rápida disposição da vinhaça no solo, aumento da produtividade da safra e da produtividade na fabricação de açúcar (VIANA, 2006).

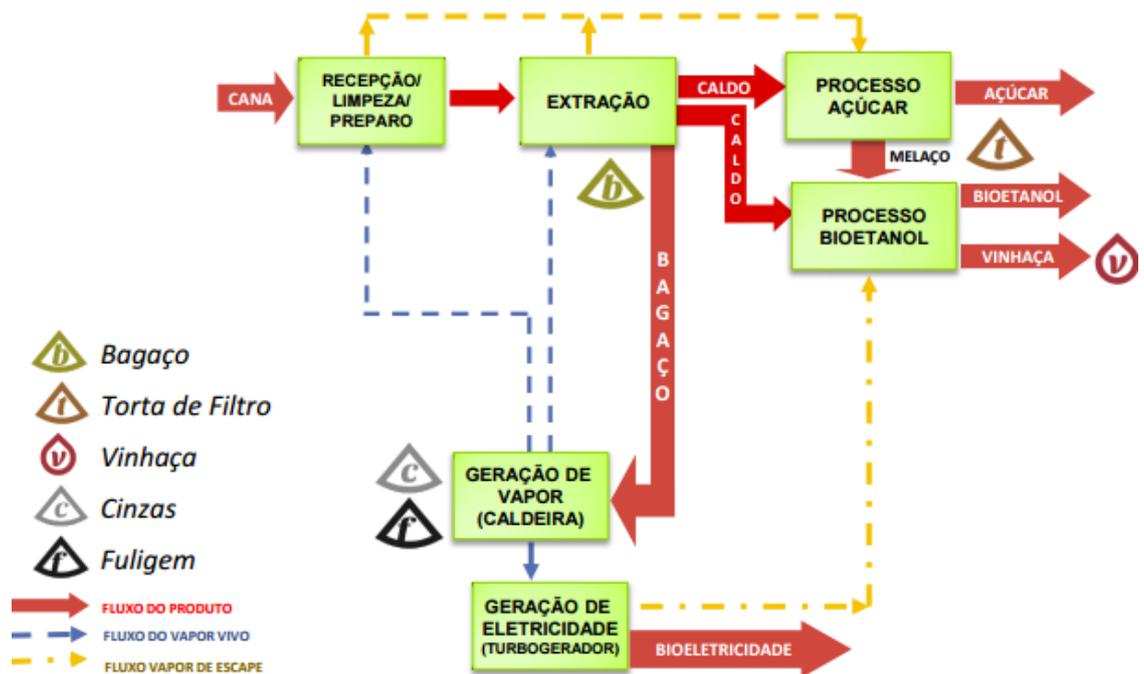
De acordo com Rosseto e Santiago (2007), a dosagem de vinhaça a ser empregada no canavial depende do teor de potássio e da análise química do solo. A aplicação de doses adequadas de vinhaça oferece uma série de benefícios, tais como: 1) melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo; 2) aumento da matéria orgânica e microflora do solo; 3) facilidade na mineralização do nitrogênio; 4) melhoria das condições gerais de fertilidade do solo; 5) aumento do poder de retenção de água; e 6) aumento da produtividade da cana.

Entretanto, o uso em excesso da vinhaça pode retardar o processo de maturação da planta e comprometer sua qualidade final, além de poder contaminar o lençol freático em função do excesso de potássio.

• Óleo Fúsel

É um subproduto gerado na destilação do álcool combustível, de cor amarelada, odor desagradável, líquido viscoso em condições ambientes. Apresenta em sua maior parte os álcoois iosamílico e isobutílico e, em menor parte, os álcoois n-amílico, n-butílico e isopropanol (BARRA et al., 2011). Segundo a Embrapa (2018), o óleo fúsel é produzido na proporção de 50 a 200 ml para cada 100 l de álcool combustível, e sua quantidade e qualidade dependem do tipo e do método de preparação do caldo usado para a fermentação, condição e ambiente sob as quais a fermentação procede, além do método de fermentação.

Figura 13 – Produção de açúcar e etanol, bioeletricidade e resíduos



Fonte: Gurgel (2012).

Conforme Patil et al. (2002), o óleo fúsel é utilizado como matéria-prima para o processo de refinação, de onde se obtém álcoois com diferentes graus de pureza e outras

substâncias químicas. Está presente nas bebidas alcoólicas, sendo responsável pelo sabor e aroma característicos.

A aplicabilidade do óleo fúsel se restringe, normalmente, à indústria de perfumaria, sendo empregado como fixador para perfumes, à indústria cosmética, e ao preparo de aromatizantes. Estudos como o de Azania (2007) apontam para a possibilidade de aplicação desse produto como dessecante de plantas. Para uma melhor compreensão, a Figura 13 ilustra, por meio de um fluxograma, os resíduos obtidos no processo de produção de açúcar e etanol.

Ambientalmente, é possível dizer que a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar possui balanço energético praticamente positivo, o que pode auxiliar na redução do aquecimento global. Além disso, os motores à combustão que utilizam este combustível são menos poluentes do que aqueles que utilizam a gasolina. No entanto, existem algumas desvantagens associadas a este biocombustível, tais como:

- O uso de terra para o plantio da cana-de-açúcar, matéria-prima deste combustível, que poderia ser destinado ao cultivo de alimentos.
- A geração de grande quantidade de resíduos durante o processo de produção pois, ainda que procurando reutilizar grande parte destes resíduos em outros setores, esse continua sendo um problema a ser resolvido.
- O impacto ambiental associado com o setor dos transportes.

Além do etanol, a indústria de cana-de-açúcar brasileira produz o açúcar, produto de extrema importância econômica desde a época em que o Brasil ainda era colônia portuguesa. A produção brasileira de açúcar superou 36 milhões de toneladas na safra 2017/2018, segundo a UNICA-2018. Esta produção divide-se basicamente em dois tipos de açúcar: o primeiro, chamado açúcar branco, destinado ao consumo interno e o segundo, chamado açúcar bruto ou VHP, destinado à exportação, gerando importantes divisas para o país. Contudo, embora tenha havido avanço e progresso no setor sucroalcooleiro no Brasil, eles ainda estavam baseados no uso de apenas um terço do potencial energético da cana-de-açúcar: o caldo, para produção do açúcar e etanol. A partir dos anos 2000 o setor entra no limiar do uso em larga escala dos outros dois terços da planta – o bagaço e a palha – para gerar eletricidade, conhecida como bioeletricidade (JANK; RODRIGUES, 2007).

3.2 OTIMIZAÇÃO, CADEIA DE SUPRIMENTOS E SUSTENTABILIDADE DO BIOETANOL

A presente seção destina-se a ilustrar por meio de artigos científicos, algumas teses e dissertações sobre como a otimização tem sido uma ferramenta para auxiliar a indústria alcooleira na produção do bioetanol, seja ele derivado de matéria-prima que serve também ao setor alimentício, como a da cana-de-açúcar, caso mais usual no Brasil e foco desta tese, seja de outras gramíneas energéticas como *switchgrass* (*Panicum Virganum*), sorgo, miscanthus, ou de raízes energéticas como a mandioca, ou ainda lixo biológico, entre outras.

O critério para a seleção dos trabalhos ora resenhados foi utilizar a programação matemática multiobjetivo para a otimização da cadeia de suprimentos, levando em consideração os fatores econômicos e ambientais. O recorte temporal compreendeu a última década - de 2008 a 2018 - quando, então, as pesquisas usando tecnologias se intensificaram.

A princípio pensou-se em discutir apenas os resultados de pesquisas realizadas no Brasil, porém ficou demonstrado que há uma lacuna bem expressiva de estudos nesta área (KOSTIN et al., 2018). Assim, optou-se por expandir o foco também para algumas pesquisas e estudos conduzidos em outros países.

A literatura da área será discutida em três seções: Cadeia de Suprimentos (CS), Otimização Multiobjetivo, e ACV. No caso específico da ACV a revisão bibliográfica se restringe aos estudos e pesquisas com foco na produção do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, por haver uma quantidade mais expressiva e significativa de trabalhos nesta área e ser, conforme já dito inicialmente, um dos objetos de estudo desta tese.

Vale destacar que a grande maioria dos trabalhos selecionados entrelaçam os três aspectos e poderiam estar, portanto, em mais de uma seção. A opção por uma delas foi o foco maior do trabalho resenhado e sua pertinência para com o tema do presente estudo. Para fins de organização, os trabalhos serão apresentados por ordem cronológica, de forma sintética, com destaque para os objetivos, a metodologia utilizada, e os resultados alcançados.

3.2.1 Cadeia de Suprimentos

A cadeia de suprimentos (CS), também conhecida como *supply chain* (SC), pode ser entendida como todo o processo relacionado a um determinado produto, desde a obtenção da

matéria-prima até a sua entrega ao consumidor final. Essa trajetória envolve a integração de todos os elementos envolvidos, recursos, informações, entre outros, buscando tanto agregar valor ao produto visando a satisfação do cliente, bem como trazer os lucros aos empresários ou produtores.

A gestão – *management* – de toda a cadeia de modo eficiente (GCS) exige um planejamento cuidadoso. A maioria, atualmente, é respaldada por sistemas de informatização customizados, capazes de lidar com desafios e incertezas advindos de diferentes fontes – principalmente, da situação político-econômica do país, das demandas internas e externas pelo produto, e das alterações climáticas. De acordo com Handfield e Nichols (1999), a GCS lida com o compartilhamento de custos, atua junto à resolução de conflitos, e na definição das responsabilidades de todos os agentes envolvidos no processo. Na conjuntura atual faz-se necessário acrescentar a estas funções a capacidade de tomada de decisões, lembrando que tal capacidade extrapola os interesses econômicos, uma vez que precisa alcançar o equilíbrio entre lucro e menor impacto ambiental.

Dentre a literatura revisada destaca-se a proposta de Masoumiki et al. (2014) para uma cadeia de suprimentos sustentável (CSS), baseada em três vertentes: Eficientes, Inovadoras e Reconhecidas no Setor.

De forma reduzida, pode-se dizer que as CSS Eficientes seguem a estratégia de prevenção de poluição, objetivando minimizar o desperdício e as emissões de gases nas operações. Seu foco seria a redução de custos e de riscos alcançado pelo fornecimento e compra de produtos *green*, recuperação de materiais, de produtos, e de investimentos, e processos verdes, projetados para serem de custo efetivo, padronizados e procedimentais. Um planejamento centralizado das estruturas deve levar a uma redução de custo em toda a cadeia.

Já as CSS Inovadoras seguem as estratégias de tecnologia limpa para alcançar um reposicionamento no setor e as competências para a inovação e modelagens futuras. As práticas indicadas são produtos planejados de maneira ecológica e o uso de energia e tecnologias limpas. Os processos são geralmente flexíveis e inovadores de modo a prover um rápido desenvolvimento das competências requeridas no futuro. Neste caso, estruturas descentralizadas podem ser a solução para um planejamento-base de redes reversas.

Por último, as CSS Reconhecidas no setor seguem a estratégia de gerenciamento de produtos, integrando as visões das partes interessadas no negócio. O foco é a reputação e a legitimidade, tendo como práticas a colaboração entre fornecedores e clientes, envolvendo

todos os agentes no processo. Redes reversas podem ser desenvolvidas por meio de uma abordagem conjunta com redes já reconhecidas no setor sucroalcooleiro.

Os autores sugerem que o estudo feito pode ajudar a “analisar o elo entre uma CSS apropriadamente configurada e o desempenho e a competitividade da empresa” (MASOUMIKI et al., 2014, p. 13).

Isto posto, passa-se a uma discussão da literatura sobre a produção de bioetanol compreendida entre 2008 e 2018, e que entrelace, além da CS, no mínimo, mais um dos seguintes aspectos: otimização ou sustentabilidade (ACV). Neste último caso, considerando os aspectos econômicos e os impactos ambientais, aberta a exceção para os trabalhos de Jabbour (2015) e Jabbour et al. (2017), que tratam exclusivamente da CS no contexto brasileiro, cenário desta tese.

Com foco para pesquisas realizadas no Brasil tendo como fonte a produção de etanol, Colin (2009) apresenta uma proposta para tornar mais rápidas as implementações de complexos agroindustriais para a produção deste combustível, de 6 para 4 anos, observando um ganho de 10% com essa diminuição.

Para tanto, dada a produção desejada e um horizonte de implementação-alvo, o autor utiliza um modelo de programação quadrática de forma que não ocorra o efeito de cancelamento devido aos valores positivos e negativos da função desvio utilizada e que esta seja capaz de oferecer um cronograma de plantio viável com desvio mínimo do plano. Enfim, é possível concluir que o modelo pode agregar valor como uma ferramenta importante em plantas para o setor de produção de etanol.

Chien-wei, e Yueyue (2012), em seu artigo, buscam encontrar na programação matemática um modelo para sustentar um planejamento estratégico de toda a cadeia de suprimentos de bioenergia com soluções confiáveis, levando em consideração as incertezas do potencial futuro dos suprimentos e da demanda.

No estudo de caso usando dados reais da Califórnia e objetivando explorar o potencial de produção de etanol a partir de resíduos, os autores utilizam um modelo estocástico em duas fases, dividindo o problema em vários cenários. Os autores afirmam que as flutuações na oferta de matéria-prima não geram grande impacto na configuração da CS formada. Essa informação é avaliada no modelo com uma análise de sensibilidade, em que uma das fontes de variação é a matéria-prima (resíduos biológicos).

Os autores concluem que existe ganho computacional utilizando o modelo sem perda de precisão se comparado ao modelo determinístico, e que os resultados encontrados indicam

que o etanol produzido por resíduos biológicos pode ser uma parte viável para a solução de energia sustentável no futuro.

Ren et al. (2015) desenvolveram um modelo objetivando otimizar o custo do ciclo de vida da CS do combustível biológico, considerando também as incertezas do setor agrícola. As inúmeras zonas agrícolas, tipos de transportes usados para os grãos e combustíveis, vários tipos de plantas energéticas e vários tipos de mercados foram considerados no modelo. O preço dos recursos, as plantações e a demanda do mercado foram considerados como intervalos e não como constantes, como nos modelos mais tradicionais na literatura.

Para tanto foi desenvolvida uma programação linear de intervalo. O estudo foi ilustrativo e os resultados comprovam que o modelo é viável para o planejamento de CS de combustível biológico em contexto de incertezas.

Gonela et al. (2015) discutem um projeto de uma CS para o fornecimento de bioetanol de geração híbrida (CSBGH), considerando a sustentabilidade com base nos aspectos econômicos e ambientais, além de considerar também o contexto de incertezas.

Os autores propõem um modelo de programação linear inteira mista para projetar uma cadeia de suprimentos híbrida para geração do bioetanol (HGBCS) aplicada em estudo de caso realizado nos Estados Unidos, e verificam que o projeto dessa cadeia sofre grande variação quando submetido a diferentes padrões de sustentabilidade.

Já Carvalho, Antunes e Freire (2016) propõem uma estrutura híbrida de *Input-Output* (IO) desenvolvida para o Brasil. O modelo de programação linear multiobjetivo (MOLP) é formulado para uma análise energético-econômico-ambiental do sistema econômico brasileiro e da cadeia doméstica do bioetanol, levando em consideração dois cenários envolvendo produção do etanol de primeira geração, e oito de segunda geração acoplados.

Os autores concluem que a proposta de acoplamento das usinas geradoras de segunda geração, observando as associações entre as tecnologias, pode ser uma alternativa de melhoramento no fornecimento de energia, redução da emissão dos gases de efeito estufa, e garantia de empregos.

Relacionando este estudo ao tema da tese em questão, pode-se dizer que os autores trouxeram importante contribuição teórica por envolver os três eixos abordados neste capítulo: um modelo multiobjetivo linear, a análise de ciclo de vida, e a cadeia de suprimentos do bioetanol brasileiro.

Wan-Yu, Chung-Cheng Tsu-Lai (2017), em seu estudo investigativo, formularam um modelo para determinar as estratégias para uma produção ótima, visando maximizar os lucros

e minimizar os custos das emissões de carbono por meio de programação linear inteira mista (PLIM) da cadeia de suprimentos de uma biomassa florestal em que uma planta da coprodução de bioetanol de segunda geração é acoplada a uma planta de geração de energia.

Os resultados da simulação empírica indicaram que o modelo de coprodução rende mais lucro do que o independente, pois quando a demanda da eletricidade é reduzida o modelo mitiga suas perdas por meio de um aumento da produção do bioetanol. Porém, no tocante aos custos de emissão de carbono, o modelo de coprodução perde suas vantagens. Portanto, pode-se concluir que o modelo utilizado favorece o aspecto econômico, porém não atende ao ambiental de maneira adequada.

Já Fei et al. (2017) propõem, para tomada de decisão do setor, uma modelagem para a CS do bioetanol produzido a partir da mandioca. Foram consideradas a incerteza do campo (dependente de condições atmosféricas), as políticas para o setor, a economia, e, entre outras, a capacidade de produção e a aversão a riscos dos agricultores. Os autores utilizaram a abordagem *game-theoretic* por possibilitar explorar o comportamento de decisões nessas condições.

Os resultados mostram que a modelagem pode garantir o suprimento da mandioca, aumentar a utilidade da CS como um todo, e reduzir o nível de emissão de gases de efeito estufa. Como consequência, os autores acreditam que pode haver um estímulo ao desenvolvimento rural.

Por sua vez, Babazadeh et al. (2017) propõem uma abordagem integrada híbrida, baseada nos métodos DEA (*Data Envelopment analysis*) e PLIM para o planejamento de uma CS de produtos derivados do biodiesel, objetivando que este modelo seja capaz de determinar o número ótimo, as locações, capacidades de facilidades, modos de transporte adequados, tecnologia adequada à biorrefinaria, fluxo de material e planejamento em diferentes períodos. O estudo se aproxima de um dos objetivos desta tese, principalmente, no tocante à CS.

Ghaderi, Alireza e Pishvee (2018), em estudo de caso realizado com dados reais coletados no Irã, testam um modelo de programação multiobjetivo robusto e possibilístico para a proposição de uma rede sustentável para a CS do bioetanol advindo da *switchgrass*, sob a incerteza epistêmica de dados de entrada, considerando objetivos econômicos, ambientais e sociais, por vezes conflitantes. Autores como Oberkampf e Barone (2007) utilizam o termo incerteza epistêmica para descrever qualquer falta de conhecimento ou informação numa qualquer fase ou atividade do processo de modelação do sistema.

Para tanto, métodos recentes e eficazes de avaliação do ciclo de vida ambiental e social são utilizados no modelo para medir os impactos nessas áreas. Por outro lado, para lidar com os parâmetros incertos de modo mais eficaz, o modelo deve ser capaz de maximizar o valor médio do desempenho da CS, controlar a otimalidade, assim como sua viabilidade.

Os principais resultados apontam que, com um aumento de 2,43% na função objetivo econômico, um nível desejável de proteção ambiental e social é alcançado, assim como o valor médio do desempenho da CS alcançará valores mais desejáveis se a influência da robustez da otimização e da viabilidade diminuir. Além disso, os resultados também demonstram que o modelo possibilístico supera o modelo determinístico em termos das medidas de média e desvios-padrão.

Já Rabbani et al. (2018), ainda com base em estudo de caso com dados reais coletados no Irã, tendo como fonte primária a CS da produção do bioetanol produzido da *switchgrass* ou *Panicum Virganum*, propõem e analisam o desempenho de um novo modelo MILP multiobjetivo como uma ferramenta para a tomada de decisões na CS, de modo a torná-la sustentável, incorporando os conflitos econômicos e ambientais.

Os resultados demonstram que, ao atingir um nível desejável de preservação social e ambiental, há um aumento de aproximadamente 15% na função objetivo econômico no final do horizonte de planejamento. Além disso, os resultados também apontam para o alto custo de investimento como uma pré-condição para melhorar a CS sustentável da bioenergia advinda da produção da *switchgrass*.

Trazendo estudos especificamente sobre CS para o contexto brasileiro são analisados os artigos de Jabbour (2015) e Jabbour et al. (2017). No primeiro artigo, a autora discute os processos internos de estruturação de empresas líderes ao adotar práticas verdes de gerenciamento da CS, considerando produtos verdes fundamentais para iniciar um processo de proteção ambiental, tanto entre fornecedores quanto entre clientes. Os dados foram coletados junto a quatro grandes empresas brasileiras líderes em seus segmentos de mercado.

Os resultados evidenciam a importância de se ter equipes, áreas funcionais, e empregos verdes para apoiar e sustentar tais práticas, instaurando novas atitudes e comportamento nas empresas.

Já em Jabbour et al. (2017) os pesquisadores colocam o foco nos clientes, buscando analisar sua cooperação ou não para o desempenho ambiental das organizações, e as circunstâncias que concorrem para isso. Foram utilizadas a Modernização Ecológica e a Teoria da Dependência para analisar os efeitos das práticas externas do gerenciamento da CS

verde. A pesquisa foi multi-método, combinando uma pesquisa e estudos múltiplos de caso em empresas brasileiras.

Os autores concluem que o contexto brasileiro, no âmbito da modernização ecológica, oferece incentivos para a adoção de práticas de gerenciamento da cadeia de suprimentos verde, e que as organizações brasileiras dependem mais dos clientes do que dos fornecedores para melhorar o desempenho ambiental. Como contribuição, os autores propõem uma matriz para melhor compreensão dos papéis dos clientes e dos fornecedores para alcançarem um melhor desempenho quanto ao meio-ambiente, por meio da abordagem de gerenciamento da cadeia de suprimento verde.

Vale o registro de que esse estudo foi resenhado por ter o foco da CS da produção de etanol no Brasil, pois, como já dito anteriormente, as pesquisas neste contexto são mais raras.

Kostin et al. (2018), por sua vez, propõem uma abordagem matemática para otimizar e planejar as cadeias de fornecimento de bioetanol no Brasil, utilizando uma formulação de MILP, objetivando maximizar o valor presente líquido (VPL) de toda a CS do etanol.

O modelo leva em consideração sete tecnologias de produção diferentes, dois tipos de armazéns, três tipos de meios de transporte, e sete opções de exportação, com dados obtidos junto às industriais brasileiras visando encontrar a configuração ótima da rede de bioetanol, isto é, a localização das instalações de produção e armazenamento, sua capacidade de expansão, a tecnologia selecionada para fabricação, armazenamento de materiais, e fluxos de todas as matérias-primas e produtos finais envolvidos na CS do bioetanol produzido no Brasil.

O modelo desenvolvido serve como uma ferramenta quantitativa para tomada de decisões na área de projeto e planejamento ótimos da CS do bioetanol neste país. Foi testado usando a rede brasileira de bioetanol. Foi feita também uma comparação entre a situação atual da CS do bioetanol e a configuração ótima alcançada pelo modelo proposto. De acordo com a disposição geográfica das indústrias e a localização dos portos, três das sete tecnologias consideradas foram responsáveis por 97% das plantas instaladas. Este dado indica que algumas das tecnologias atualmente utilizadas no Brasil não são eficientes quando estudadas com parte de uma CS completa. As T3 (usinas que produzem os dois produtos: etanol e açúcar) representam 45% do total.

Finalizando esse tópico, foi possível verificar os autores cujas pesquisas foram aqui resenhadas abordam as cadeias de suprimentos com variados objetivos, prevalecendo o critério econômico embora, em sua maioria, contemplem também o ambiental. Usam também diferentes abordagens quanto à programação matemática para a otimização da CS. Contudo,

as variáveis presentes na cadeia de suprimento são similares, devido à presença comum dos escalões – matéria-prima, produção, transporte – e, dessa forma, colaboram com a elaboração do modelo proposto no presente estudo.

3.2.2 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Essa seção apresenta estudos que tratam da ACV, que envolvam, no mínimo, mais de um dos critérios-foco da tese: cadeia de suprimentos (CS) e problema de otimização multiobjetivo (POM).

A revisão da literatura se inicia com Wang et al. (2008), que analisam a ACV do uso da energia e as implicações das emissões de gases de efeito estufa para o etanol advindo da cana-de-açúcar no Brasil, usando para a simulação o modelo GREET (*Greenhouse gases, Regulated emissions, Energy use and Transportation*).

Os autores expandiram o modelo GREET para incluir a produção de etanol da cana-de-açúcar, examinando o uso da energia e as emissões de gases de efeito estufa, do início ao final da produção no Brasil e seu uso nos Estados Unidos. Os resultados foram comparados com os produzidos pelo uso do combustível fóssil. A trajetória do etanol desde a sua produção até sua utilização, avaliado pelo GREET, incluiu os fertilizantes, a plantação da cana, seu transporte, a produção do etanol no Brasil, o transporte do produto até os portos dos Estados Unidos, e ainda seu abastecimento nos postos de combustíveis e o seu uso pelos veículos em solo americano. Para lidar com as incertezas envolvidas nos parâmetros-chave, foram desenvolvidos e examinados vários casos de sensibilidade dos parâmetros para testar os efeitos destes nos resultados.

Os resultados mostram que a utilização do etanol em substituição da gasolina poderia atingir uma redução de 78% nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), e uso da energia fóssil em 97%, principalmente pelo uso do bagaço da cana-de-açúcar com fonte de energia para a própria indústria.

Os maiores contribuintes para este número são a queima da cana e das folhas ainda no campo, as emissões de N_2O também nas plantações, a produção de fertilizantes, as usinas, e a terra utilizada para a plantação. A implantação da Lei que proíbe a queima da cana e de suas

folhas no Brasil, bem como o uso de critérios para os fertilizantes com NO_x, entre outros, podem contribuir em até nove pontos percentuais na redução de emissões de GHG.

Como se pode observar, as vantagens mencionadas referem-se, sobretudo, ao ambiente, diferentemente do buscado nesta tese, que procura maximizar a rentabilidade e minimizar o impacto ambiental.

Papong e Malakul (2010), por sua vez, conduzem um estudo com dados obtidos na Tailândia, utilizando a ACV para todos os estágios da produção de bioetanol extraído da mandioca, incluindo o cultivo, o processamento, o transporte e a conversão em bioetanol. Os dados foram coletados nas plantações e em indústrias de etanol que incluem o uso de materiais, consumo de energia e emissão de gases que compõem o inventário, compilados no *software* SimaPro 7.1 para avaliar os impactos usando o método CML 2000 nas seguintes categorias: depleção abiótica (ADP), aquecimento global (GWP), depleção da camada de ozônio (ODP), toxicidade humana (HTP), oxidação fotoquímica (POCP), acidificação (AP) e eutrofização (EP).

Os resultados mostram que o bioetanol advindo da mandioca apresenta restrições tanto no balanço entre a energia obtida pelo bioetanol frente à energia consumida em sua produção, como na questão ambiental, devido ao uso de carvão para energia e produção de vapor nas usinas. Os autores sugerem a substituição parcial por biogás produzido no tratamento de águas residuais, levando a uma significativa redução no impacto ambiental.

Já Chauhan et al. (2011) ratificam a importância da ACV para a análise de um processo ou sistema de uma matéria-prima, desde o início até o final de sua utilidade, considerando esta técnica muito útil para a estimativa do uso de energia e da carga ambiental trazida pelo sistema. Os autores tomam o açúcar proveniente da cana-de-açúcar que, devido à alta demanda por diferentes tipos deste produto, faz com que os co-produtos ou resíduos, como bagaço, melão, torta de filtro e cinzas aumentem também. Alguns desses resíduos são utilizados como insumos em outras indústrias, como em destilarias, por exemplo.

Como conclusão, os autores afirmam que a ACV e outros métodos de gerenciamento de resíduos podem ser de muita valia para análise e redução de efeitos ambientais, apontando para um uso ótimo para os resíduos deixados pelas indústrias.

Zamboni et al. (2011), em sua pesquisa, partem do pressuposto de que uma abordagem de modelagem para o planejamento estratégico voltado para sistemas de produção do etanol, combinado com uma ACV e uma otimização da CS, podem contribuir significativamente para

garantir a sustentabilidade econômica e ambiental para guiar as tomadas de decisões em direção a uma implementação mais conscientes de cultivos e práticas na agricultura.

Fugindo às aplicações de modelagens descritivas, os autores propõem um modelo normativo visando guiar as ações para resultados ótimos como, por exemplo, a otimização do balanço do nitrogênio em toda a CS. Utilizando como indicador o potencial de aquecimento global (GWP) e seguindo a metodologia dada pelo Painel Internacional sobre Mudança Climática (IPCC, 2001), a modelagem foi concebida para conduzir políticas estratégicas por meio de um planejamento específico geograficamente, considerando critérios econômicos e ambientais.

Os resultados mostram como o gerenciamento estratégico de uma colheita, derivado de uma perspectiva total, pode contribuir para diminuir o aquecimento global, mesmo com a primeira geração de tecnologias. Os resultados encontrados estão relacionados a um dos objetivos desta tese que é o ambiental, além de também contemplar a ACV, agregando-lhe a devida importância.

Díaz-Díaz (2011), em dissertação de mestrado pela PUC-Rio de Janeiro, avalia o consumo de energia, a produção de energia renovável, e as emissões dos principais gases de efeito estufa (CH_4 , N_2O , CO_2) advindos do etanol produzido da cana-de-açúcar brasileira, levando em consideração todas as entradas/saídas do ciclo de produção, usando a metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV) e a metodologia IPCC 2006.

O sistema analisado inclui o plantio de cana, o manejo da cultura, a colheita, as atividades na usina, e a distribuição do etanol, considerando as condições impostas pelos aspectos ambientais, legais, regulatórios e de mercado, que atuam como condicionantes para uma futura certificação do etanol brasileiro.

Os resultados apontam que, quanto ao consumo de recursos não renováveis, o plantio da cana-de-açúcar exige uso intensivo de óleo diesel e de agrotóxicos. Já quanto à emissão de GEE, a etapa da colheita é a principal causadora, devido à queima da palha. O estudo não registra que a expansão do cultivo da cana-de-açúcar e da produção de etanol esteja afetando diretamente a produção de alimentos e o desflorestamento amazônico.

Seabra et al. (2011) usaram a ACV para o uso de energia e emissões de gases de efeito estufa relacionados à cana-de-açúcar e etanol, considerando o bagaço e a eletricidade por ele gerada como coprodutos. Foi realizado um balanço completo para a região do centro-sul do Brasil, adotando diferentes métodos para avaliar a produção de etanol e de açúcar separadamente.

O modelo foi usado para os cálculos do produtor ao consumidor adaptado aos parâmetros brasileiros que melhor representam a região estudada. Como referência, o uso de energia fóssil e as emissões de gases de efeito estufa relacionados à produção de açúcar foram avaliados como 721 kJ/kg e 234g CO₂.eq/kg, respectivamente. Para o ciclo de vida do etanol, estes valores foram 80 kJ/MJ e 21,3 g CO₂.eq/MJ. Uma simulação pelo método de Monte Carlo mostrou que as incertezas nos parâmetros de produção são relativamente altas. Projeções para os anos 2020 são propostas.

Zapparoli e Silva (2011) estudaram a metodologia ACV nos aspectos econômicos e ambientais concernentes à produção do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, baseando-se no pressuposto de que este pode ser passível de melhorias ambientais durante seu ciclo de vida, e que pode ser um combustível alternativo àquele advindo de fósseis, com grande relevância estratégica para o Brasil.

A estrutura metodológica baseou-se nas recomendações da série ISO 14040 e foi utilizado o método CML 2000 na avaliação do ciclo de vida. Foram consideradas as seguintes categorias de impacto: mudança climática; destruição da camada de ozônio; acidificação; eutrofização; ecotoxicidade de águas doces e toxicidade humana.

Os resultados comprovam que os maiores problemas do setor sucroalcooleiro estão nos aspectos socioambientais, e que a ACV se mostrou capaz de ser uma ferramenta de grande valia.

Em 2012, Silva analisa por meio da ACV os aspectos econômicos, sociais e ambientais relacionados à produção do etanol hidratado obtido a partir da cana-de-açúcar, na Unidade Paranacity-PR, pertencente ao Grupo Santa Terezinha. Os procedimentos metodológicos adotados foram: revisão de literatura, coleta de dados e aplicação do método CML-2000, seguindo recomendações da série ISO 14040.

Quanto aos aspectos ambientais do ciclo de vida do etanol hidratado produzido no contexto estudado, a fase agrícola representa, relativamente, o maior impacto ambiental potencial, quando confrontada com a etapa industrial e de transporte do biocombustível ao Porto de Paranaguá.

O destaque para as categorias de impacto ocorreu devido às questões de toxicidade humana e ecotoxicidade em águas doces, em que a relevância do plantio da cana-de-açúcar supera 90%. As interferências ambientais da fase agrícola somente não se manifestam na depleção da camada de ozônio. Para as demais fases desse ciclo de vida, os ápices de

relevância para a fermentação do etanol e do transporte do produto ocorrem, respectivamente, nas categorias de eutrofização e depleção da camada de ozônio.

Em última análise, pelos resultados apresentados nas categorias de impacto, a conclusão do estudo confirma a hipótese de que o etanol hidratado pode ser considerado um combustível renovável, porém, não limpo.

Por sua vez, Cavalett et al. (2012) concentram seus esforços nos impactos técnicos, ambientais e econômicos ocorridos em usinas de cana-de-açúcar no Brasil, usando, para tanto, o *framework* conhecido como Biorrefinaria de Cana Virtual. O impacto ambiental foi calculado, usando o *software* SimaPro com o método CML – 2000.

Os resultados indicam que a otimização tem potencial para reduzir os impactos ambientais e melhorar os resultados econômicos tanto em indústrias produtoras só de açúcar (usinas) ou só de etanol (destilarias autônomas) quanto nas que produzem ambos, açúcar e etanol (destilarias anexas).

Foi possível constatar que as plantas que canalizaram mais caldo de cana para a produção de açúcar foram mais lucrativas durante os dez últimos anos. Somadas a este fato, os resultados apontam também que indústrias que têm maior flexibilidade para optar quanto desviarão para cada produto são mais rentáveis, pois podem atender à demanda e ao preço do produto.

Já em Cavalett et al. (2013) encontra-se uma análise sobre como e em quanto o desempenho ambiental é afetado pelo uso de combustíveis. Avaliações sobre o impacto para o ciclo de vida (ACV) foram feitas por meio de um estudo de caso comparativo entre os impactos ambientais causados pelo uso da gasolina e daqueles gerados pela utilização do bioetanol extraído da cana-de-açúcar no Brasil.

Foram considerados os seguintes métodos para fazer a ACV: CML 2001, Impact 2002+, EDIP 2003, Eco-indicator 99, TRACI 2, ReCiPe, e Ecological Scarcity 2006. A alocação de energia foi usada para dividir o gasto entre o etanol e o excedente de eletricidade gerada na usina de cana-de-açúcar. As fases da matéria-prima e produção, distribuição e uso de combustíveis estão incluídos nos limites do sistema.

Os resultados da aplicação de diversos métodos de avaliação de impacto ao nível *midpoint* indicam que a decisão sobre o melhor combustível dependerá de quais categorias de impacto serão priorizadas. Ao nível de *endpoint*, somente o método ReCiPe conseguiu registrar vantagem no uso do etanol sobre a gasolina.

Tsiropoulos et al. (2014), buscando preencher uma lacuna de pesquisa sobre os impactos ambientais trazidos pela cadeia de produção do etanol na Índia, propõem avaliar este impacto fazendo, também, uma análise comparativa entre o etanol brasileiro, advindo do caldo da cana-de-açúcar e produzido no centro-sul do Brasil, e o etanol indiano que, por sua vez, é produzido do melaço da cana-de-açúcar, sendo, portanto, já um aproveitamento de um dos resíduos da matéria-prima.

Como metodologia, foi feita a ACV “do berço ao portão”. O problema da multifuncionalidade foi resolvido aplicando duas variantes de expansão do sistema e alocação econômica. Os impactos ambientais foram avaliados com Impact 2002+. Os resultados foram apresentados em nível de *midpoint* para emissões de gases com efeito estufa, energia não renovável, eutrofização de água doce e uso de água. Além disso, os resultados incluíram também impactos na saúde humana e na qualidade do ecossistema a nível de *endpoint*. A análise de sensibilidade também foi realizada, baseando-se nos principais parâmetros como pesticidas, tratamento e uso da água de irrigação.

Verificou-se que, comparado ao etanol brasileiro, o etanol indiano causa impactos menores ou semelhantes na emissão de gases poluentes, no uso de energia não renovável, na saúde humana, e no comprometimento com o ecossistema. Uma razão levantada pelos autores é por ser o etanol indiano produzido exclusivamente a partir de melaço, um coproduto da produção de açúcar, alocando, portanto, recursos ambientais pesados. Além disso, 46% das refinarias e destilarias indianas produzem eletricidade excedente pela qual recebem créditos, diminuindo as emissões de CO₂ de alta intensidade. Neste quesito, os autores sugerem uma modernização do setor, de modo que mais destilarias possam utilizar a eletricidade produzida. Quando a alocação econômica é aplicada, as emissões de gases de efeito estufa parecem ser semelhantes aos produzidos por outros países exportadores de etanol. Para medir tais efeitos, os autores sugerem novos estudos.

O recebimento de créditos pela diminuição de emissões de CO₂, assemelha-se ao RenovaBio, mais recente programa feito pelo governo do Brasil para apoiar o etanol como combustível renovável e alternativo ao uso dos derivados do petróleo, trazer mais divisas para o país e, sobretudo, dar início ao cumprimento das metas assumidas pela NDC do Brasil, relacionadas ao Encontro de Paris (confira Capítulo 1).

Renó et al. (2014) apontam a cana-de-açúcar como uma alternativa frente ao crescente apelo para o uso de biomassas como solução, ainda que parcial, para a falta de energia, e que combina uma abordagem ecológica para sua produção que pode acoplar um complemento

novo e valioso, que é o conceito de biorrefinarias em suas instalações. O objetivo da biorrefinaria é alcançar o máximo da matéria-prima com o menor impacto ambiental, com o mínimo de entrada de energia, e com o máximo dela como saída. Assim posto, as biorrefinarias podem ser uma opção valiosa para uma ampla diversificação, com coprodutos, como biomassa microbiana e biogás, advindos das destilarias de vinhaça, novos oxidantes como metano, biocombustíveis de segunda geração, biobutanol, entre outros.

Para este contexto o artigo analisa a possibilidade de diversificar os produtos da indústria sucroalcooleira do Brasil, dentro do conceito de biorrefinaria, para diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e, conseqüentemente, a emissão de gás carbônico, além de revitalizar áreas rurais. Para tanto, os autores propõem cinco configurações de biorrefinarias e utilizam o método Eco-Indicator 99 para a realização da ACV comparativa, a qual mostra que em todas as configurações as fases de cultivo e transporte da biomassa são as de maiores impactos na produção de biocombustíveis. Assim, o estudo indicou algumas práticas sustentáveis para o cultivo, destacando o plantio rotativo da cana-de-açúcar e outras culturas, e para o transporte da biomassa por serem fundamentais, garantindo o suprimento de energia renovável de forma realmente ecológica.

Com base em estudos comparativos realizados em Taiwan sobre os diferentes impactos trazidos pela produção de bioetanol de diferentes origens como palha de arroz, capim Napier, e talhes de rotação curta de eucalipto, Fang-Chih et al. (2017) analisaram os potenciais que os arrozais em desuso existentes no local têm para ser utilizados para a produção do bioetanol, considerando os impactos ambientais advindos desta proposta por meio de uma avaliação de ciclo de vida, usando o método IMPACT 2002+ ao nível *midpoint*.

Devido a uma maior biomassa, o capim Napier e os talhes de eucalipto apresentaram resultados de 47% e 28%, respectivamente, com menos impacto negativo baseado nos resíduos, se comparados ao arroz. Os resultados demonstram também necessidade de reflexão sobre os impactos trazidos pelas produções analisadas. Os autores concluem que esquemas de fermentação de lixos orgânicos, feitos no local da colheita, pode prover uma avaliação mais ampla para o planejamento de culturas alternativas para o bioetanol.

Finalizando esta seção, pode-se afirmar que a ACV tem sido uma ferramenta de muita valia para pesquisas e estudos com objetivos para o meio-ambiente e para o setor econômico. Em se tratando da indústria sucro-alcooleira, foco desta tese, a ACV permite obter um panorama completo da indústria/empresa, analisando desde a área plantada com conseqüentes problemas, a matéria-prima e seus subprodutos, até sua chegada ao mercado. Utilizando as

diferentes categorias nos níveis de *midpoint* e *endpoint*, com a ACV é possível identificar os problemas que precisam ser enfrentados, bem como sugerir maneiras de melhorar a produção sem dizimar o ambiente. Por esta razão, tem sido muito utilizada para nortear buscas por tecnologias que facilitem o alcance de tais objetivos, conforme demonstrado nesta breve revisão da literatura na área em estudo.

3.2.3 Otimização Multiobjetivo

A otimização multiobjetivo é utilizada com muita frequência em situações complexas em diferentes áreas como Economia, Finanças, Transportes, Engenharia, entre outras, que requerem soluções que atendam às suas necessidades específicas da melhor forma possível (SAMPAIO, 2011). Este tipo de problema requer o uso de métodos e técnicas apropriadas para obter boas soluções, encontradas na área denominada de otimização multiobjetivo, já discutida no Capítulo 2. Guillén-Gosálbez (2012) afirma ser a otimização multiobjetivo de muita utilidade, sobretudo na análise da sustentabilidade, pois pode ajudar no estudo de soluções *trade-off* ideais que equilibram vários critérios.

Nesta seção são apresentados alguns estudos e pesquisas relacionados ao uso da Otimização Multiobjetivo, realizados no período de 2008 a 2018, no intuito de implementar sua utilização na indústria sucroalcooleira, visando a um melhor desempenho econômico e ambiental.

A revisão da literatura inicia-se com Florentino, Moreno e Sartori (2008) que utilizam um problema multiobjetivo implementado no *software* Matlab, usando Programação Linear Inteira com variáveis binárias, com o objetivo de determinar a variedade de cana-de-açúcar i que deve ser plantada na região j de área B_j , situada a uma distância L_j do centro de processamento, de forma que o balanço econômico seja maximizado e o custo com o transporte dos resíduos seja minimizado, usando resíduos da biomassa com rendimento igual ou superior à média das variedades pré-selecionadas.

A proposta feita pelos autores entra na seguinte lacuna: o Brasil é um dos maiores produtores da cana-de-açúcar e o palhiço (folhagem da gramínea), considerado um resíduo, ou é queimado, quando a colheita é realizada de forma manual, ou desperdiçado no campo quando a colheita é mecanizada. Este resíduo tem potencial de geração de energia, contudo há necessidade de mais estudos sobre sua viabilidade econômica.

Os resultados da aplicação mostraram a viabilidade do uso do modelo, mostrando uma redução de 19% no custo de coleta desta biomassa, além de garantir um saldo econômico de US\$ 60.756,18.

Posteriormente Balbo, Homem e Silva (2011) reaperentaram o problema utilizando o algoritmo híbrido do método Primal-Dual de Pontos Interiores e o método *Branch and Bound* (PDPI-BB), implementado em C++, e demonstraram a viabilidade dessa abordagem em comparação aos resultados obtidos anteriormente.

Dal-Mas et al. (2011), usando uma estrutura de modelagem dinâmica, especialmente explícita e multi-escalada da Programação Linear Mista Inteira (PLIM), buscaram auxiliar os tomadores de decisão e mesmo os investidores potenciais na avaliação do desempenho econômico e o risco de investimento de toda a cadeia de fornecimento de etanol.

O padrão matemático aborda a questão da otimização da rede de fornecimento de etanol ao longo de um período de dez anos, sob a incerteza quanto ao custo de produção da biomassa e ao preço de venda do produto. Foi possível observar que o modelo se mostrou capaz de otimizar o desempenho econômico e de minimizar o risco financeiro do investimento, identificando a melhor topologia de rede em termos de locais de cultivo de biomassa, capacidade de produção de etanol, localização e logística de transporte.

Guillén-Gosálbez (2011) considera o uso da otimização multiobjetivo para a área ambiental de muita valia, por poder partir dos problemas detectados pela ACV ou outra metodologia, para propor os objetivos desejados, em sua maioria, em grande número. Assim, para tentar encontrar uma solução possível e otimizada para esta situação, o autor propôs uma nova abordagem para a redução do número excessivo de objetivos na otimização multi-objetivo, que depende de uma nova formulação PLIM. O modelo reduz a carga computacional, que cresce proporcionalmente ao número de objetivos propostos, e, ao mesmo tempo, minimiza o erro de omitir objetivos e indicadores ambientais preocupantes.

A capacidade dessa técnica foi testada por meio de dois problemas ambientais de natureza diferente, sendo que em cada um as métricas da ACV foram minimizadas a partir de formulações PLIM implementadas no software GAMS. Exemplos numéricos demonstram que certas métricas ambientais tendem a se comportar de maneira não conflituosa em certos problemas de engenharia. Esta observação permite descartar alguns desses problemas sem afetar a estrutura de Pareto, reduzindo assim a carga computacional associada.

Segundo os autores, a ferramenta mostrou-se eficaz para melhorar as capacidades de otimização multiobjetivo, quando aplicada a problemas ambientais dos pontos de vista da eficiência computacional e visualização das soluções ótimas de Pareto.

Mele et al. (2011) propõem uma ferramenta quantitativa para apoiar a tomada de decisão na área de projeto para a cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar na Argentina. O problema formulado como PLIM e multiobjetivo pretende otimizar o desempenho econômico e ambiental da rede. Uma ACV é estruturada usando as metodologias CML-2000 e Ecoindicator 99 para avaliação de impactos nos níveis *midpoint* (GWP) e *endpoint*, respectivamente.

O modelo considera cinco formas de produção de etanol e açúcar, três modelos de transporte e dois tipos de armazéns que podem ser utilizados na CS. Após essa otimização, é determinada a quantidade de cada tipo de instalação que deve ser implantada nas regiões definidas do país, fornecendo valiosa informação sobre estratégias mais sustentáveis na definição da rede.

Kostin et al. (2012) tratam do planejamento estratégico de cadeias de fornecimento integrado de bioetanol e açúcar sob incerteza na demanda. A tarefa é formulada como um problema de programação linear inteira mista multi-cenário (PLIM) com duas fases, sendo uma delas estocástica.

O modelo procura otimizar o desempenho esperado da SC sob várias opções de minimização de risco financeiro. Esta consideração dá origem a uma formulação multi-objetivo, cuja solução é dada por um conjunto de projetos de rede que respondem de maneiras diferentes à realização real da demanda (o parâmetro incerto). As capacidades da abordagem são demonstradas por meio de um estudo de caso baseado na indústria argentina de cana-de-açúcar, cujos produtos são açúcar e etanol.

O problema foi resolvido aplicando o *Sample Average Approximation* (SAA), que fornece soluções aproximadas para a formulação estocástica multiobjetiva em tempo reduzido de CPU.

Com base nos resultados numéricos, os autores chegaram às seguintes conclusões: a produção centralizada é mais favorável; as instalações das indústrias devem estar próximas das plantações; as tecnologias que produzem melaço como subproduto são preferíveis; o etanol deve ser produzido por fermentação do caldo de cana ou melaço de usinas de açúcar; o modelo testado mostrou-se capaz de fornecer soluções que se comportam melhor que o

determinístico frente à incerteza; a metodologia oferece diferentes alternativas relacionadas ao risco para a tomada de decisão.

A análise dos resultados estocásticos revela que existem dois fatores críticos que influenciam o desempenho da CS sob incerteza: a capacidade de produção que depende do tamanho físico da indústria, e a quantidade de armazéns e unidades de transporte. Ambos exigem maiores investimentos de capital, conseqüentemente, com lucros menores. Enfim, os autores concluem o estudo dizendo que a ferramenta pode ajudar nas políticas e no planejamento estratégico de infraestrutura para o etanol.

Por sua vez, Giarola, Shah e Bezzo (2012) fazem uso, também, de uma modelagem de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para avaliar o projeto e o planejamento de uma cadeia de suprimento de bioetanol, considerando a incerteza do mercado. A produção italiana de etanol baseada em biomassa foi adotada como um estudo de caso para a aplicação da modelagem.

O projeto de otimização dos sistemas de produção de biocombustíveis visou selecionar as melhores opções de biomassa e tecnologias dentre várias alternativas de acordo com o desempenho econômico e ambiental. O foco foi, sobretudo, no potencial de aquecimento global (GWP), usando os princípios de ACV e o método IPCC – 2007 para avaliar os impactos. Uma característica fundamental da abordagem proposta é o reconhecimento de um valor econômico para as emissões globais de GEE, implementado por meio de um esquema de comércio de licenças de emissão, e que pode ser usado para a redução de custos.

Os resultados mostraram a eficiência do modelo como uma ferramenta decisória para orientar decisões e investimentos de longo prazo.

Khatiwada et al. (2016) apresentam uma análise técnico-econômica de biorrefinarias de cana-de-açúcar aprimoradas no Brasil, visando a utilização do excedente de bagaço e cana para produção de eletricidade e/ou etanol de segunda geração. O estudo investiga o *trade-off* no uso de biomassa de cana-de-açúcar para produção de energia: bioeletricidade versus produção de etanol 2G.

A Programação Linear Inteira Mista (PLIM), *BeWhere*, é usada para otimizar a escolha da tecnologia para produção de produtos e serviços energéticos em biorrefinarias de cana-de-açúcar. Diferentes cenários são desenvolvidos para encontrar a melhor utilização da biomassa da cana-de-açúcar, de forma a maximizar os ganhos e minimizar a emissão de

gases. Para tanto, uma ACV utilizando a categoria de impacto GWP é realizada com a cadeia de suprimentos da refinaria.

Os autores puderam concluir que os preços da energia, o tipo de eletricidade substituída, o suporte para o biocombustível, os impostos sobre o carbono, os custos de investimento e a eficiência na conversão são os principais fatores que influenciam a opção feita pelos tomadores de decisões.

Este estudo fornece um quadro metodológico sobre como otimizar o uso alternativo de resíduos agrícolas e coprodutos industriais para a produção de energia nas agroindústrias, considerando as cadeias de fornecimento de biomassa, o padrão de demanda de energia doméstica e o comércio de biocombustível.

No intuito de ilustrar as principais aplicações destacadas ao longo do texto, apresenta-se a Tabela 2 com os autores e suas respectivas pesquisas realizadas na última década.

Tabela 2 – Síntese do levantamento feito envolvendo Otimização, ACV e CS relacionado ao bioetanol.

Autores	Aplicação	Foco	Abordagem matemática	Local
Florentino, Moreno e Sartori (2008)	Produção de energia de biomassa	E	0-1 PLIM	BR
Wang et al. (2008)	Uso do bioetanol	A	---	BR
Colin (2009)	Implantação de indústria de etanol	E	Progr. quadrática	BR
Papong e Malakul (2010)	Produção de bioetanol	E, A	---	TH
Balbo, Homem e Silva (2011)	Produção de energia de biomassa	E	PDPI - BB	BR
Chauhan et al. (2011)	Indústria de açúcar	E	---	---
Dal-Mas et al. (2011)	CS do bioetanol	E	PLIM	IT
Díaz-Díaz (2011)	CS de bioetanol	A	---	BR
Guillén-Gonsálbez (2011)	Redução de Variáveis	A	multi - PLIM	---
Mele et al. (2011)	CS cana-de -açúcar	E, A	multi - PLIM	AR
Seabra et al. (2011)	CS de bionergia	E, A	---	BR
Zamboni et al.. (2011)	Produção de bioetanol	E, A	---	IT
Zapparoli e Silva (2011)	CS de bioetanol	E, A	---	BR
Cavalett et al. (2012)	CS da cana-de-açúcar	E, A	---	BR
Chien-Wei , C.; Yueyue, F(2012)	CS de bionergia	E	PLIM	US
Kostin et al. (2012)	CS cana-de-açúcar	E	multi - PLIM	AR
Giarola, Shah e Bezzo (2012)	CS de bioetanol	E, A	multi - PLIM	IT
Silva (2012)	CS de bioetanol	A	---	BR
Cavalett et al.(2013)	Comp.entre etanol x gasolina	E, A	---	---
Renó et al. (2014)	Implantação de biorrefinaria	E, A	---	BR
Tsiropoulos et al. (2014)	Produção de bioetanol	E, A	---	IN
Gonela et al. (2015)	CS do bioetanol	E, A	PLIM	US

Ren et al. (2015)	CS de biocombustíveis	E, A	single - ILP	---
Carvalho, Antunes e Freire (2016)	Produção de bioetanol	E, A, S	multi - LP	BR
Khatiwada et al. (2016)	Produção de energia de biomassa	E, A	PLIM - BeWhere	BR
Babazadeh et al. (2017)	CS do Biodiesel	E	PLIM + DEA	IR
Fang-Chih, C. et al. (2017)	Produção de bioetanol	A	---	TW
Fei et al. (2017)	CS de bioetanol	E	game theoretic	CN
Wan-Yu, Chung-Cheng e Tsu-Lei (2017)	CS de biomassa florestal	E	PLIM	CA
Ghaderi, Alireza e Pishvee (2018)	CS do bioetanol	E, A, S	multi - PLIM	IR
Kostin et al. (2018)	CS da cana-de-açúcar	E	PLIM	BR
Rabbani et al. (2018)	CS de bioenergia	E, A, S	multi - PLIM	IR

Legenda para a coluna foco: E – critério econômico; A – critério ambiental; e S – critério social.

A ausência de indicação de país significa que o estudo foi ilustrativo.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018)

Findos os três primeiros capítulos, que buscam propor os objetivos, contextualizar o cenário, revisar os conceitos básicos utilizados, e situar algumas pesquisas na área com pontos em comum com essa tese, passa-se Capítulo 4, que versa sobre a elaboração do modelo.

4 ELABORAÇÃO DO MODELO PLIM E A ACV

4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Nesta análise, considera-se a cadeia de produção dividida em três escalões genéricos: produção, estocagem e mercado. Essa rede inclui um conjunto de produtores de cana-de-açúcar, produção, estocagem dos produtos finais e mercado final. Assume-se que é dado um horizonte de tempo dividido em intervalos e uma área geográfica dividida em sub-regiões onde podem ser estabelecidas as instalações da CS. Admite-se que cada região possui uma capacidade de colheita de cana-de-açúcar em cada intervalo de tempo. Além disso, a cana-de-açúcar pode ser convertida em etanol ou açúcar. O sub-produto obtido na produção de açúcar, o melaço, pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de etanol, através da fermentação do mesmo. Emissões e resíduos são gerados durante as etapas de produção. Os produtos finais, etanol e açúcar, são armazenados antes de serem entregues ao mercado final. As instalações da CS (campo, usinas, armazéns e mercado final) são ligadas por estradas. Três tipos de veículos são usados: caminhões pesados de carroceria aberta para a cana-de-açúcar, caminhões de porte médio para o açúcar e, caminhões tanque para o etanol.

A cadeia de produção da cana-de-açúcar ambientalmente consistente pode ser obtida a partir dos seguintes dados: um horizonte de tempo fixo, preços dos produtos, custo dos parâmetros de produção, armazenamento e transporte dos materiais, previsão de demanda

para os produtos, taxas de impostos, capacidade das plantas, armazéns e ligações de transporte, investimento de capital fixo, taxas de juros, tempo de detenção de armazenamento, limite superior de investimento de capital e dados ambientais.

O objetivo neste capítulo é apresentar a formulação do modelo capaz de configurar uma CS da cana-de-açúcar dividida em três escalões e decisões de planejamento a ela associados, de forma que o valor presente líquido (VPL) seja maximizado e o impacto ambiental gerado seja minimizado.

4.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL USANDO PRINCÍPIOS DE ACV

Parte essencial deste trabalho está relacionada à performance ambiental da cadeia de produção da cana-de-açúcar. Nesta seção apresenta-se a aplicação dos princípios da ACV ao problema em questão para, então, o modelo matemático multiobjetivo ser detalhado. A performance ambiental é quantificada de acordo com algumas métricas de ACV, de forma similar aos trabalhos realizados por Guillén-Gosálbez e Grossmann (2009) e Mele et al. (2011). Vale registrar que Azapagic e Cliff (1999) foram os introdutores formais do uso combinado da programação matemática e ACV, abordagem que teve muita aceitação pela área específica.

A performance ambiental é otimizada de acordo com a métrica potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*), representante da categoria de impacto das mudanças climáticas avaliado pelo método ReCiPe.

Para obter essas métricas são utilizadas as três primeiras fases da ACV descritas anteriormente: definições de objetivo e escopo, análise de inventário (ICV), e análise de impacto (AICV). A fase restante, interpretação, é obtida neste estudo unindo ACV e programação matemática.

A seguir, as fases da avaliação de ciclo de vida são aplicadas ao problema em questão.

4.2.1 Definição de Objetivo e Escopo

A ACV do estudo de caso visa avaliar e comparar os diferentes cenários possíveis existentes na ampla faixa do setor industrial brasileiro de processamento da cana-de-açúcar, em termos de impactos ambientais no nível médio. A avaliação inclui as etapas de moagem da cana e transformação industrial para as etapas de bioetanol e/ou açúcar, além das etapas de transporte.

A ACV começa no recebimento da cana-de-açúcar na indústria e termina no estágio de transporte de etanol e/ou açúcar, dependendo do cenário analisado. Então, é uma abordagem "portão-a-portão", pois não avaliará os impactos provenientes do uso dos produtos pelos consumidores finais. É importante notar que algumas atividades (recepção e limpeza de cana-de-açúcar, extração de açúcar, e combustão de bagaço) são comuns em todos os cenários, assim, a avaliação ambiental associada é contada apenas uma vez até a preparação do suco extraído. Para melhor visualização da influência sobre os impactos ambientais em todo o processo, o estudo de caso foi dividido nas seguintes etapas: produção de melação, produção de açúcar bruto, produção de açúcar branco, produção de etanol hidratado, produção de etanol anidro e transporte de produtos. Um fluxograma mais detalhado, incluindo informações sobre os limites específicos do sistema, consta no Apêndice A.

4.2.2 Processo de Alocação

Neste estudo de caso, em especial, a alocação mássica foi adotada para concordar com o modelo de impacto ambiental que calcula os impactos de acordo com a quantidade de produtos produzidos em cada cenário. Entretanto, para critérios de comparação dos cenários investigados com produtos diferentes, todos os impactos foram normalizados para a unidade funcional comum adotada de 1 tonelada de cana-de-açúcar, o que facilita o estágio de inventário (entrada/saída).

4.2.3 Análise de Inventário

Nesta segunda fase da ACV, realizam-se os balanços de massa e energia para determinar as entradas e saídas mais relevantes associadas com o processo. Essa informação é

posteriormente transformada em um conjunto de impactos ambientais na terceira fase do estudo.

Na implementação do ICV, a etapa que requer mais esforço é a coleta de dados do inventário, necessária para estabelecer as tabelas de inventário (DAYLAN; CILIZ, 2016).

Os dados do inventário para o problema em estudo foram obtidos de diferentes formas: uma abordagem de atribuição foi considerada e os principais dados de entrada/saída para cada estágio de bioetanol e/ou produção de açúcar foram coletados da literatura. Já os dados para as etapas de produção de açúcar e bioetanol são obtidos dos conjuntos de dados brasileiros e globais relacionados ao processamento de cana, usando a versão 3.5 do Ecoinvent, e um banco de dados de ACV para coletar, analisar e monitorar o desempenho ambiental de produtos e serviços (Ecoinvent Center, 2018). A etapa de transporte é a última abordada na ICV, sendo, novamente, utilizado o banco de dados do Ecoinvent.

Ressalta-se que esta fase é essencial para a obtenção de bons resultados na ACV, que é dependente da qualidade de dados obtidos na fase de ICV. Portanto, a coleta e/ou obtenção dos dados precisa ser criteriosa e sujeita à modificação na metodologia, se esta for julgada incompatível com o objetivo proposto.

Os insumos considerados no estágio industrial do ciclo de vida da cana-de-açúcar são: cana-de-açúcar, vapor e eletricidade consumida durante o processamento industrial da cana-de-açúcar, matéria-prima para clarificação do suco e açúcar, e solvente para destilação azeotrópica do etanol hidratado para o etanol anidro. Enquanto a saída refere-se aos produtos produzidos, às emissões liberadas pelos processos (ao ar e à água), à combustão do bagaço no sistema de cogeração e aos resíduos do processo, ou seja, torta de filtro, vinhaça, óleo fúsel. Os principais dados de entrada e saída para cada etapa de produção de etanol e/ou açúcar foram coletados da literatura.

Na Tabela 3 há um resumo dos dados de entrada e na Tabela 4 um resumo dos dados de saída, com os respectivos conjuntos de dados e referências associados ao Ecoinvent, considerados para avaliação de todo o processo de produção de etanol e açúcar. Esses dados referem-se a 1 tonelada de cana processada produzida (unidade funcional).

Tabela 3 – Dados de entrada da produção de açúcar e etanol referente a 1 tonelada de cana processada

Input	Process stage	Value	Units
Electricity, high voltage ^(a)	All industry	178,529063	kWh

Steam ^(a)	All industry	379,075057	MJ
Carbon dioxide ^(b)	Juice clarification	1,271186	kg
Lime ^(c)	Juice clarification	1,179379	kg
Phosphoric acid ^(d)	Sugar Clarification	0,078202	kg
Sulfur dioxide ^(e)	Juice clarification	0,018715	kg
Sulfuric acid ^(f)	Juice clarification	0,358000	kg
Cyclohexane ^(f)	Extractive distillation	0,074578	kg

Fontes: (a) *Treatment of bagasse, from sugarcane, in heat and power co-generation unit, 6400kW thermal (Ecoinvent dataset).* (b) *Carbon dioxide production, liquid (Ecoinvent dataset).* (c) *Lime production, milled, packed (Ecoinvent dataset).* (d) *Purification of wet-process phosphoric acid to industrial grade, product in 85% solution state (Ecoinvent dataset).* (e) *Sulfur dioxide production liquid (Ecoinvent dataset).* (f) Chagas et al. (2015).

Tabela 4 – Dados de saída da produção de açúcar e etanol referente a 1 tonelada de cana processada.

Process	Classification	Value	Units
Molasses ^(a)	Byproduct	50	kg
Raw sugar ^(a)	Main/byproduct	141	kg
White sugar ^(a)	Main/byproduct	145	kg
Hydrated ethanol ^(b)	Main/byproduct	70	kg
Anhydrous ethanol ^(b)	Main/byproduct	66,5	kg
Bagasse ^(c)	Waste	20	kg
Filter cake ^(d)	Waste		kg
OM	Elementary flow	0,000408	kg
N	Elementary flow	0,005968	kg
P	Elementary flow	0,000026	kg
K	Elementary flow	0,002069	kg
Ca	Elementary flow	0,000516	kg
Mg	Elementary flow	0,000032	kg
S	Elementary flow	0,000220	kg
Vinasse ^(e)	Waste		kg
N ₂ O	Elementary flow	0,000688	kg
NO _x (as NO ₂)	Elementary flow	0,000729	kg
NH ₃	Elementary flow	0,000358	kg

	NO ₃ ⁻	Elementary flow	0,000894	kg
	PO ₄ ³⁻	Elementary flow	0,000827	kg
	Ethanol	Elementary flow	0,141273	kg
Fusel oil ^(f)	Waste			kg
	Methanol	Elementary flow	0,003767	kg
	Ethanol	Elementary flow	0,006204	kg
	1-Propanol	Elementary flow	0,002659	kg
	Isoamyl alcohol	Elementary flow	0,086415	kg
	Isobutyl alcohol	Elementary flow	0,035009	kg

Fontes: (a) *Cane sugar production with ethanol by-product*. (b) Chagas et al. (2015). (c) *Treatment of bagasse, from sugarcane, in heat and power co-generation unit, 6400kW thermal (Ecoinvent dataset)*. (d) Prado et al. (2013); (e) Silva et al. (2018). (f) Peres et al. (2001).

4.2.4 Análise de Impacto

Nesta etapa, o impacto ambiental do processo é determinado de acordo com um modelo de avaliação de impactos. Como antes mencionado, o método ReCiPe será utilizado e, com isso, os resultados do ICV serão traduzidos em um número limitado de indicadores. Neste trabalho, as dezoito categorias de impactos do nível *midpoint* serão trabalhadas, os impactos de cada uma serão estimados, e o indicador de categoria GWP será minimizado.

4.2.5 Análise de Melhorias/Interpretação

Nesta última fase, os resultados da ACV são analisados e um conjunto de conclusões e recomendações sobre o sistema é formulado. O objetivo final da ACV é fornecer critérios e medidas quantitativas para comparar diferentes alternativas operacionais. Uma deficiência da ACV é a carência de uma forma sistemática para gerar tais alternativas. Neste sentido, este trabalho utiliza a combinação entre os resultados da ACV e um modelo de programação matemática para apoiar a tomada de decisão. Tal decisão é obtida após o processo de otimização em que soluções Pareto-ótimas são obtidas para o problema.

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO

O modelo matemático apresentado neste trabalho é baseado na formulação PLIM, introduzido por Almansoori e Shah²⁷ (2006), e depois por Guillén-Gosálbez et al. (2009), que aborda o projeto da cadeia de produção (CS) de hidrogênio. Além deste, o modelo segue a formulação desenvolvida por Guillén-Gosálbez e Grossmann (2009, 2010) para o caso da cadeia de produção petroquímica, na forma ao qual os balanços de massa são manipulados.

Tanto o açúcar quanto o etanol utilizam em seu processo de produção a mesma matéria-prima no Brasil, a cana-de-açúcar. O modelo proposto considera infra-estruturas integradas para a sua produção. A formulação leva em conta todas as possíveis configurações da CS ideal de açúcar/etanol, bem como todos os aspectos tecnológicos associados à performance dessa SC tais como as tecnologias de produção e armazenamento, descarte de resíduos, formas de transporte de matérias-primas, produtos e resíduos.

A seguir, algumas características gerais do modelo são apresentadas, antes de se abordar a descrição detalhada de suas equações.

4.3.1 Plantas de Produção

A cana-de-açúcar é a matéria-prima principal para a produção do açúcar e do bioetanol no Brasil, assim como na maior parte das regiões tropicais em todo o mundo. O sumo é extraído da cana-de-açúcar, principalmente por meio de moagem. Após a etapa de extração, o caldo de cana obtido pode ser tratado de diferentes maneiras (RAVAGNANI et al. 2010, 2007). Indústrias açucareiras podem usar esse caldo para produzir açúcar refinado ou açúcar bruto. Existem quatro tecnologias de produção (T1-T4) de açúcares juntamente com etanol anidro e etanol hidratado (EA e EH, respectivamente). O melaço, conforme já descrito, é um subproduto destas tecnologias contendo baixo teor de sacarose que não pode ser separada por cristalização. Neste modelo, a torta de filtro e a vinhaça são tratados como resíduos. As últimas três tecnologias de produção presentes no modelo (T5-T7) produzem apenas etanol, em diferentes rendimentos de EA e EH, devido a diferenças nos parâmetros do processo.

²⁷ ALMANSOORI, A.; SHAH, N. Design and operation of a future hydrogen supply chain-snapshot model. *Chem. Eng. Res. Des.* 2006, 84 (A6), 423–438.

Os detalhes de cada tecnologia, incluindo os coeficientes do balanço de massa, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficientes de balanço de massa para as tecnologias de produção

Plantas	Cana-de-açúcar	Açúcar branco	Açúcar bruto	Etanol anidro	Etanol hidratado	Melaço	Vinhaça	Torta de filtro
T1	-14,5900	1,0000	0,7507	0,0000	0,0000	0,7295	0,0000	0,4377
T2	-25,0000	1,0000	0,7504	0,3108	0,7760	0,0000	13,0400	0,7500
T3	-21,1800	0,8470	0,6360	0,0000	1,0000	0,0000	11,9960	0,6364
T4	-25,0100	1,0000	0,7510	0,9600	0,0000	0,0000	11,5200	0,7503
T5	-18,0800	0,0000	0,0000	0,7350	1,0000	0,0000	20,8200	0,5424
T6	-12,0600	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	11,9925	0,3618
T7	-10,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	12,0000	0,3000

Fonte: Kostin et al. (2018)

Todas as tecnologias consideradas necessitam de alimentação de água para embebição da cana picada, extração e diluição do caldo obtido. O modelo não considera o suprimento de água, mas o custo é incluído no parâmetro $UPC_{i,p,g,t}$ (custo de produção unitário).

Cada tipo de planta possui custos de capital fixo e operacionais e pode ser expandida em capacidade ao longo do tempo para atender um padrão de demanda específico. O estabelecimento de um tipo de planta é determinado a partir da demanda da região, da capacidade que a região tem de suprir suas necessidades internas, e dos dados de custo.

4.3.2 Instalações de Armazenamento

O modelo inclui dois tipos distintos de instalações para armazenamento: armazéns para produtos líquidos e armazéns para produtos sólidos. Cada tipo de instalação tem um custo de capital fixo, um custo de armazenamento unitário e um limite inferior e superior para a capacidade de expansão. A capacidade de armazenamento pode ser expandida a fim de seguir alterações na procura e no fornecimento. O modelo não considera instalações de armazenamento na cadeia de suprimento até a indústria. A razão para isso é que a cana-de-açúcar deve ser transportada para a indústria tão logo após ser colhida, pois perde o seu teor de açúcar muito rapidamente. Além disso, danos à cana-de-açúcar durante a colheita

mecânica aceleram esse declínio. Desta forma, a cana-de-açúcar deve ser transportada do canal diretamente a uma unidade de produção dentro de, no máximo, 24 horas após a colheita (SHREVE; AUSTIN, 1984).

4.3.3 Transporte

O transporte permite oferecer os produtos finais (açúcares e etanois) aos consumidores, fornecer matérias-primas às indústrias e eliminar os resíduos do processo. O modelo assume que as atividades de transporte no Brasil, para esse setor, podem ser realizadas por três tipos de caminhões: caminhões pesados com carroceria aberta para transporte da cana-de-açúcar, caminhões fechados para transporte do produto final sólido (açúcares), e caminhões tanque para o transporte dos produtos finais líquidos (EA e EH). Quanto à exportação, o modelo assume que todo produto final é transportado para outros continentes por navios de carga.

4.4 RESTRIÇÕES GERAIS E FUNÇÕES OBJETIVO

A seguir serão apresentadas as principais restrições do modelo matemático para a indústria de bioetanol no Brasil e as funções-objetivo usadas no modelo. Para facilitar a leitura e compreensão, destaca-se o conjunto de índices que serão comumente usados na elaboração das equações e inequações do modelo:

regiões	$g = \{G01, \dots, G27\}$
materiais	$i = \{\text{cana-de-açúcar, açúcar branco, açúcar bruto, EA, EH, melaço, óleo fúsel, vinhaça, torta de filtro}\}$
transporte	$l = \{\text{caminhão pesado, caminhão médio, caminhão tanque}\}$
tecnologias de plantas	$p = T1, \dots, T7$
tipos de armazéns	$s = S1, S2$
período de tempo	$t = \{\text{year1}, \dots, \text{year4}\}$

4.4.1. Restrições de Materiais

O balanço de massa global para cada região é apresentado na Equação 8. De acordo com essa equação, para cada material i , o inventário inicial mantido na região g no período anterior $\langle ST_{i,s,g,t-1} \rangle$, acrescido do montante produzido $\langle PT_{i,g,t} \rangle$, da quantidade de matérias-primas adquiridas $\langle PU_{i,g,t} \rangle$ e da entrada a partir de outras instalações na CS $\langle Q_{i,l,g',g,t} \rangle$ deve ser igual ao inventário final $\langle ST_{i,s,g,t} \rangle$ acrescido da quantidade entregue ao consumidor $\langle DTS_{i,g,t} \rangle$, da saída para outras regiões $\langle Q_{i,l,g,g',t} \rangle$, do montante de resíduos $\langle W_{i,g,t} \rangle$ e, por fim, da quantidade exportada do produto i $\langle TEA_{i,g,t} \rangle$.

$$\begin{aligned} & \sum_{s \in IS \langle l \rangle} ST_{i,s,g,t-1} + PT_{i,g,t} + PU_{i,g,t} + \sum_{l \in IL \langle l \rangle} \sum_{g' \neq g} Q_{i,l,g',g,t} \\ & = \sum_{s \in IS \langle s \rangle} ST_{i,s,g,t} + DTS_{i,g,t} + \sum_{l \in LI \langle l \rangle} \sum_{g' \neq g} Q_{i,l,g,g',t} + W_{i,g,t} + TEA_{i,g,t}, \quad \forall i, g, t \end{aligned} \quad (8)$$

Nessa equação, $IS \langle s \rangle$ representa o conjunto de tipo de armazéns utilizados para estocar o produto i , enquanto que $IL \langle l \rangle$ é o conjunto de modos de transporte correspondente ao produto i . Além disso, a quantidade de produtos entregues ao mercado final deve ser inferior ou igual à demanda doméstica atual $\langle SD_{i,g,t} \rangle$, conforme Equação 9.

$$\langle DTS_{i,g,t} \rangle \leq SD_{i,g,t}, \quad \forall i, g, t \quad (9)$$

4.4.2 Restrições de Produção

A taxa de produção total do material i na região g é determinada a partir da taxa de produção particular $\langle PE_{i,p,g,t} \rangle$ de cada tecnologia p instalada na região.

$$\langle PT_{i,g,t} \rangle = \sum_p PE_{i,p,g,t}, \quad \forall i, g, t \quad (10)$$

Os detalhes de cada tecnologia, incluindo os coeficientes de balanço de massa, são apresentados na Tabela 5. Resíduos menores, alimentação de água, perdas e emissões ao ar são omitidas neste momento. Pode se observar que os coeficientes de balanço de materiais dos produtos principais (açúcar refinado e etanol) foram normalizados para 1. As taxas de produção dos sub-produtos e materiais brutos de cada tecnologia são calculados para os coeficientes de balanço de material, $\rho_{p,i}$, e a taxa de produção dos produtos principais, PE_i :

$$PE_{i,p,g,t} = \rho_{p,i} PE_{i',p,g,t} , \forall i, p, g, t \quad \forall i' \in IM \quad (11)$$

Nesta equação, IM representa o conjunto de produtos principais associados a cada tecnologia. Para os coeficientes de balanço de material, serão considerados os valores negativos para as matérias-primas e positivos para os produtos e sub-produtos. A taxa de produção de cada tecnologia p em cada região g é limitada pelo percentual mínimo da tecnologia disponível que deve ser utilizada, τ , multiplicada pela capacidade existente (representada pela variável contínua $PCap_{p,g,t}$) e a capacidade máxima:

$$\tau PCap_{p,g,t} \leq PE_{i,p,g,t} \leq PCap_{p,g,t} , \forall i, p, g, t \quad (12)$$

A capacidade da tecnologia p em qualquer período de tempo t é computada como a soma da capacidade existente ao fim do período previsto e a expansão na capacidade $PCapE_{p,g,t}$ no período t :

$$PCap_{p,g,t} = PCap_{p,g,t-1} + PCapE_{p,g,t} , \forall p, g, t \quad (13)$$

Na Equação 14, é limitada a expansão da capacidade $PCapE_{p,g,t}$ entre limites superior e inferior que são calculados para o número de plantas $NP_{p,g,t}$ instaladas na região e as capacidades mínima e máxima associadas com cada tecnologia p , \underline{PCap}_p e \overline{PCap}_p , respectivamente:

$$\underline{PCap}_p NP_{p,g,t} \leq PCapE_{p,g,t} \leq \overline{PCap}_p NP_{p,g,t} , \forall p, g, t \quad (14)$$

As aquisições de cana-de-açúcar são limitadas pela capacidade da plantação de cana-de-açúcar existente na região g no intervalo de tempo t :

$$PU_{i,g,t} \leq CapCrop_{g,t} , i = \text{cana de açúcar}, \forall g, t \quad (15)$$

4.4.3 Restrições de Armazenamento

A capacidade de armazenamento possui limites inferior e superior dados pelo número de instalações de armazenamento na região g $(NP_{p,g,t})$ e a capacidade de armazenamento mínima e máxima, $(SCap_s)$ e $(\overline{SCap_s})$, respectivamente, associadas a cada tecnologia de armazenamento:

$$\underline{SCap}_s NS_{s,g,t} \leq SCapE_{s,g,t} \leq \overline{SCap}_s NS_{s,g,t}, \quad \forall s, g, t \quad (16)$$

A capacidade da tecnologia de armazenamento s em qualquer período de tempo t é determinada a partir da capacidade existente no final do período anterior e a expansão da capacidade no período atual $(SCapE_{s,g,t})$:

$$SCap_{s,g,t} = SCap_{s,g,t-1} + SCapE_{s,g,t}, \quad \forall s, g, t \quad (17)$$

A capacidade de armazenamento deve ser suficiente para o inventário total $(T_{i,s,g,t})$ do produto i durante o intervalo de tempo t :

$$\sum_{i \in IS(s)} ST_{i,s,g,t} \leq SCap_{s,g,t}, \quad \forall s, g, t \quad (18)$$

Nesta equação, $IS(s)$ denota o conjunto de produtos que pode ser armazenado pela tecnologia s . Durante a operação em estado estacionário, o inventário médio $(AIL_{i,g,t})$ é uma função da quantidade entregue aos consumidores e o período de armazenamento β :

$$AIL_{i,g,t} = \beta (OTS_{i,g,t}), \quad \forall i, g, t \quad (19)$$

A capacidade de armazenamento $(SCap_{s,g,t})$ que pode ser estabelecida na região para lidar com flutuações na oferta e na demanda, é o dobro do somatório dos níveis médios dos inventários de armazenagem dos produtos i (Simchi-Levi et al., 2000).

$$2AIL_{i,g,t} \leq \sum_{s \in SI(s)} SCap_{s,g,t}, \quad \forall i, g, t \quad (20)$$

4.4.4 Restrições de Transportes

A existência de uma ligação de transporte entre duas sub-regiões g e g' é representada por uma variável binária $X_{l,g,g',t}$ que é igual a 1 se existe ligação de transporte entre as duas sub-regiões e, igual a 0, se não existe. A definição desta variável é aplicada na equação seguinte, a qual restringe o fluxo de materiais entre os limites de capacidade mínimo e máximo permitidos (\underline{Q}_l e \overline{Q}_l , respectivamente):

$$\underline{Q}_l X_{l,g,g',t} \leq \sum_{i \in IL(l)} Q_{i,l,g,g',t} \leq \overline{Q}_l X_{l,g,g',t}, \quad \forall l, t, g, g' \in G, g' \neq g \quad (21)$$

Nesta equação, $IL(l)$ denota o conjunto de materiais i que podem ser transportados pelo modo de transporte l . Além disso, a região pode tanto importar quanto exportar material i , mas nunca ambos ao mesmo tempo:

$$X_{l,g,g',t} + X_{l,g',g,t} = 1, \quad \forall l, g, g' \in G, g' \neq g \quad (22)$$

A quantidade de material exportado para outros países ou continentes não pode exceder um nível superior que corresponde a capacidade dos portos brasileiros $\overline{TEA}_{i,g,t}$. Esse parâmetro tem valor não nulo para as sub-regiões onde os portos internacionais estão instalados:

$$TEA_{i,g,t} \leq \overline{TEA}_{i,g,t}, \quad \forall i, g, t \quad (23)$$

A quantidade de materiais exportada é a soma dos fluxos do produto i da região g para o continente $b \in CA_{i,b,g,t}$:

$$TEA_{i,g,t} = \sum_b EA_{i,b,g,t}, \quad \forall i, g, t \quad (24)$$

4.4.5 Função Objetivo Econômico

O modelo tem como objetivo otimizar a CS quanto ao critério econômico e quanto à performance ambiental. O objetivo econômico é representado pelo Valor Presente Líquido (*VPL*), enquanto o objetivo ambiental será quantificado de acordo com os princípios da ACV.

A utilização do *VPL* como função objetivo é amplamente empregada no planejamento de investimento. O *VPL* pode ser determinado pelos fluxos de caixa descontados, gerados em cada intervalo de tempo t , no qual o horizonte de tempo é dividido:

$$VPL = \sum_t \frac{CF_t}{(1+ir)^{t-1}} \quad (25)$$

Nesta equação, ir representa a taxa de desconto, fixada em 0,1 para a resolução do modelo. O fluxo de caixa que é apresentado na Equação 26 em cada período de tempo, é computado pelo Lucro Líquido (NE) e a fração do capital total depreciado ($FTDC_t$) como segue:

$$CF_t = NE_t - FTDC_t, \quad t = 1, \dots, T-1 \quad (26)$$

No cálculo do fluxo de caixa do último período de tempo ($t = T$), assume-se que parte do capital fixo total investido pode ser recuperado ao final do horizonte de tempo. Este montante, é obtido através da multiplicação de um fator de recuperação (sv), que indica o percentual do capital de custo fixo (FCI) a ser recuperado.

$$CF_t = NE_t - FTDC_t + svFCI, \quad t = T \quad (27)$$

O lucro líquido da rede é dado pela diferença entre os rendimentos (Rev_t), as facilidades operacionais (FOC_t) e os custos de transporte (TOC_t) com apresentado a seguir:

$$NE_t = (-\phi)(Rev_t - FOC_t - TOC_t) + \phi DEP_t, \quad \forall t \quad (28)$$

Nesta equação, ϕ representa a taxa de imposto e DEP , termo de depreciação. As receitas são determinadas pela venda dos produtos finais e os correspondentes preços domésticos ($PR_{i,g,t}$) e os preços no continente b ($EPR_{i,b}$):

$$Rev_t = \sum_{i \in SEP} \sum_g DTS_{i,g,t} PR_{i,g,t} + \sum_{i \in IB} \sum_g \sum_b EA_{i,b,g,t} EPR_{i,b}, \quad \forall t \quad (29)$$

Nesta equação, SEP e IB representam o conjunto de materiais i que podem ser vendidos no Brasil e fora dele, respectivamente. O custo das facilidades operacionais é obtido, multiplicando a unidade de produção e custos de armazenamento ($UPC_{i,p,g,t}$ e $USC_{i,s,g,t}$, respectivamente) pelas correspondentes taxas de produção e nível médio do inventário, respectivamente. Esse termo inclui ainda o custo para eliminação de resíduos \overline{OC}_t :

$$FOC_t = \sum_i \sum_g \sum_{i \in IM} UPC_{i,p,g,t} PE_{i,p,g,t} + \sum_i \sum_g \sum_{i \in IS} USC_{i,s,g,t} AIL_{t,g,t} + DC_t, \forall t \quad (30)$$

O custo de eliminação de resíduos é uma função da quantidade de resíduos e os impostos de aterro $\overline{LT}_{i,g}$:

$$DC_t = \sum_i \sum_g W_{i,g,t} LT_{i,g}, \forall t \quad (31)$$

O custo de transporte inclui os custos com combustível \overline{FC}_t , trabalho \overline{LC}_t , manutenção \overline{MC}_t , geral \overline{GC}_t e exportação \overline{EC}_t :

$$TOC_t = FC_t + LC_t + MC_t + GC_t + EC_t, \forall t \quad (32)$$

O custo com combustível é uma função do preço do combustível $\overline{FP}_{l,t}$ e quantidade consumida de combustível:

$$FC_t = \sum_g \sum_{g' \neq g} \sum_l \sum_{i \in IL} \left[\frac{2EL_{g,g'} Q_{i,l,g,g',t}}{FE_l TCap_l} \right] FP_{l,t}, \forall t \quad (33)$$

Nesta equação o termo fracionário representa o combustível usado e é determinado pela distância total em uma viagem $\overline{EL}_{g,g'}$, o consumo de combustível para o modelo de transporte l \overline{FE}_l e o número de viagens por período de tempo $\left(\frac{Q_{i,l,g,g',t}}{TCap_l} \right)$. Observe que essa equação assume que as unidades de transporte operam apenas entre duas regiões pré-definidas. Além disso, como é apresentado na Equação 34, o custo de trabalho no transporte (mão de obra) é função do salário do motorista $\overline{OW}_{l,t}$ e tempo total de entrega (termo dentro dos colchetes).

$$LC_t = \sum_g \sum_{g' \neq g} \sum_l DW_{l,t} \sum_{i \in IL} \left[\frac{Q_{i,l,g,g',t}}{TCap_l} \left(\frac{2EL_{g,g'}}{SP_l} + LUT_l \right) \right], \forall t \quad (34)$$

O custo de manutenção é função do custo por unidade de distância percorrida $\langle ME_l \rangle$ e da distância total dirigida:

$$MC_t = \sum_g \sum_{g' \neq g} \sum_l \sum_{i \in IL} ME_l \frac{2EL_{g,g'} Q_{i,l,g,g',t}}{TCap_l}, \forall t \quad (35)$$

Finalmente, o custo geral com transporte inclui o seguro do veículo, licenças e registros, e custos excepcionais. Isso pode ser determinado pelas despesas gerais unitárias $\langle GE_{l,t} \rangle$ e o número de unidades de transporte $\langle NT_{l,t} \rangle$ como segue:

$$GC_t = \sum_l \sum_{t' \leq t} GE_{l,t} NT_{l,t'} \quad \forall t \quad (36)$$

O custo associado com a exportação dos produtos $\langle EC_t \rangle$ é calculado com base na quantidade do material i enviado da região g para o continente b e o custo de frete para tal destino $\langle FRC_{l,g,b,t} \rangle$:

$$EC_t = \sum_{i \in IB} \sum_g \sum_b EA_{i,g,b,t} FRC_{i,b}, \quad \forall i, g, b, t \quad (37)$$

O termo de depreciação é calculado pelo método linear (ou quotas constantes):

$$DEP_t = \frac{\langle -sv \rangle FCI}{T}, \quad \forall t \quad (38)$$

em que FCI denota custo total de investimento fixo, que é determinado pela capacidade de expansão feita nas plantas e nos armazéns, bem como a compra de unidades de transportes ao longo de todo o horizonte de tempo, como se segue:

$$FCI = \sum_p \sum_g \sum_t \left(\langle \alpha_{p,g,t}^{PL} \rangle NP_{p,g,t} + \beta_{p,g,t}^{PL} PCapE_{p,g,t} \right) + \sum_s \sum_g \sum_t \left(\langle \alpha_{s,g,t}^S \rangle NS_{p,g,t} + \beta_{s,g,t}^S PCapE_{s,g,t} \right) + \sum_l \sum_t \langle NT_{l,t} \rangle TMC_{l,t} \quad (39)$$

Os parâmetros $\mathbb{C}_{p,g,t}^{PL}$ e $\mathbb{C}_{s,g,t}^S$ representam os investimentos fixos para a implantação das plantas e armazéns, respectivamente. Enquanto que $\mathbb{C}_{p,g,t}^{PL}$ e $\mathbb{C}_{s,g,t}^S$ representam os investimentos variáveis correspondentes às plantas e armazéns, respectivamente. Por outro lado, $\mathbb{MC}_{l,t}$ é o custo de investimento associado com o modelo de transporte l . O número médio de caminhões necessários para satisfazer um determinado fluxo entre diferentes regiões é calculado a partir da taxa de fluxo de produtos entre as sub-regiões, a disponibilidade do modelo de transporte $\mathbb{C}_{vl,t}$, a capacidade para transportar *container*, a distância média viajada entre as sub-regiões, a média de velocidade, e o tempo de carga e descarga, como mostra a Equação 40:

$$\sum_{t \leq T} NT_{l,t} \geq \sum_{i \in LL} \sum_g \sum_{g' \neq g} \sum_t \frac{Q_{i,l,g,g',t}}{avl_l TCap_l} \left(\frac{2EL_{g,g'}}{SP_l} + LUT_l \right) \quad \forall l \quad (40)$$

O quantidade total do capital investido pode ser restringida a ser inferior a um limite superior, ou seja:

$$FCI \leq \overline{FCI} \quad (41)$$

E, finalmente, o modelo assume que o capital total de investimento é dividido em parcelas iguais ao longo do horizonte de tempo. Então, o termo de desconto (ou amortização) sobre o investimento total de capital \mathbb{FTDC}_t é calculado da seguinte forma:

$$FTDC_t = \frac{FCI}{T}, \quad \forall t \quad (42)$$

4.4.6 Função Objetivo do Impacto Ambiental

Os principais impactos ambientais associados a CS de produção do etanol/açúcar estão na produção da matéria-prima, na fabricação e armazenamento e no transporte de materiais entre as regiões. Matematicamente, o inventário das emissões provenientes do funcionamento da CS pode ser expresso como uma função de algumas variáveis contínuas do modelo. Especificamente, as entradas do inventário de ciclo de vida (ICV) podem ser calculadas a partir das taxas da produção das plantas $\mathbb{PE}_{i,p,g,t}$ e o fluxo de transportes $\mathbb{Q}_{i,l,g,g',t}$, como segue:

$$LCI_b = \sum_i \sum_g \sum_p \sum_t PE_{i,g,p,t} \omega_{bp}^{Pr} + \sum_i \sum_g \sum_{g' \neq g} \sum_{l \in IL} \sum_t Q_{i,l,g,g',t} EL_{g,g'} \omega_b^{Tr}, \forall b \quad (43)$$

O primeiro termo desta equação representa as emissões associadas à fabricação, que inclui a moagem da cana-de-açúcar, fabricação do açúcar, fabricação do etanol e geração de utilidades, como eletricidade. O segundo termo considera as emissões provenientes das etapas de transporte. Os coeficientes ω_{bp}^{Pr} e ω_b^{Tr} representam entradas do ICV associadas ao composto químico b pelo fluxo de referência da atividade. Nas atividades de fabricação já descritas, o fluxo de referência é uma unidade do produto principal produzido. Para as atividades de transporte, o fluxo de referência é uma unidade de massa transportada por uma unidade de distância.

O impacto causado é calculado pela multiplicação das entradas do ICV com o correspondente fator de impacto ω_b , como apresentado na Equação 44:

$$DAM = \sum_b \nu_b \cdot LCI_b \quad (44)$$

A função DAM deve ser minimizada e avaliada pela métrica ambiental GWP, enquanto que o valor do parâmetro ν_b é obtido pela metodologia ReCiPe.

4.4.7 O Problema Multiobjetivo

De acordo com as funções anteriormente definidas e suas restrições, pode-se escrever, de forma compacta, a formulação global bi-PLIM para o problema em questão:

$$(M) \quad \min_{x, X, N} \{ NPV(x, X, N); DAM(x, X, N) \} \\ \text{s.a : restrições 8 - 44} \\ x \in R, \quad X \in \{0, 1\}, \quad N \in Z^+ \quad (45)$$

Aqui, de forma genérica, x representa as variáveis contínuas do problema (capacidade de expansão, taxas de produção, níveis de inventário, e fluxo de materiais), X representa as variáveis binárias (por exemplo, estabelecimento de ligações de transporte), e N representa as variáveis inteiras (número de plantas, número de instalações de armazenagem e número de

unidades de transporte de cada modelo selecionado). A solução para esse problema será dada por um conjunto de alternativas de Pareto, representando o equilíbrio ótimo entre os objetivos considerados na análise.

Neste trabalho, as soluções Pareto-ótimas são determinadas pelo método restrição- ε , que implica na resolução, de forma iterativa, do seguinte problema de formulação mono-objetivo, para diferentes valores do parâmetro auxiliar ε :

$$\begin{aligned}
 \text{(M1)} \quad & \min_{x, X, N} \{NPV(x, X, N)\} \\
 & \text{s.a : restrições 8 - 44} \\
 & DAM(x, X, N) \geq \varepsilon \\
 & \underline{\varepsilon} \leq \varepsilon \leq \bar{\varepsilon} \\
 & x \in R, \quad X \in \{1, \dots\}, \quad N \in Z^+
 \end{aligned} \tag{46}$$

onde os limites inferior e superior, dentro do qual o parâmetro ε deve cair, é obtido pela otimização de cada objetivo escalar separadamente:

$$\begin{aligned}
 \text{(M1a)} \quad & \underline{\varepsilon} = \arg \min_{x, X, N} DAM(x, X, N) \\
 & \text{s.a : restrições 8 - 44} \\
 & x \in R, \quad X \in \{1, \dots\}, \quad N \in Z^+
 \end{aligned} \tag{47}$$

$$\text{a qual define } \underline{\varepsilon} = DAM(x, \bar{X}, \bar{N}) \tag{48}$$

e

$$\begin{aligned}
 \text{(M1b)} \quad & \bar{\varepsilon} = \arg \min_{x, X, N} \{NPV(x, X, N)\} \\
 & \text{s.a : restrições 8 - 44} \\
 & x \in R, \quad X \in \{1, \dots\}, \quad N \in Z^+
 \end{aligned} \tag{49}$$

$$\text{a qual define } \bar{\varepsilon} = DAM(x, \hat{X}, \hat{N}) \tag{50}$$

4.5 O SOFTWARE GAMS E O SOLVER CPLEX

O GAMS (*General Algebraic Modeling System*) é um sistema de modelagem de alto nível para programação e otimização matemática. Ele consiste em um compilador de linguagem e um conjunto de *solvers* integrados de alto desempenho. O *software* é personalizado para aplicações complexas de modelagem em grande escala e permite a construção de grandes modelos de manutenção que podem ser adaptados rapidamente a novas situações. O GAMS é especificamente projetado para modelar problemas lineares, não lineares, inteiros mistos, e problemas de complementaridade mistos.

Um grande número de *solvers* para modelos de programação matemática estão embutidos no GAMS. Especificamente, para os problemas de programação linear mista inteira, os seguintes *solvers* estão disponíveis: BDMLP, CBC, CPLEX, GUROBI, XA e XPRESS.

O CPLEX permite aos usuários combinar os recursos de modelagem de alto nível do GAMS com o poder dos otimizadores CPLEX que são projetados para resolver problemas grandes e difíceis com rapidez e com mínima intervenção do usuário. Com o CPLEX é possível resolver problemas de programação linear, com restrições quadráticas e mistas inteiras. Embora várias opções de solução estejam disponíveis, de acordo com Rosenthal (2006), este *solver* calcula e define automaticamente a maioria das opções com os melhores valores para problemas específicos.

4.6 A SEQUÊNCIA METODOLÓGICA

Essa seção tem o objetivo de sintetizar as ações desenvolvidas na realização do trabalho para facilitar a compreensão sobre os métodos utilizados e relacionando com as partes da fundamentação que foram apresentadas nos capítulos anteriores.

Após a realização das leituras sobre o setor sucroalcooleiro brasileiro, incluindo os programas governamentais de fomento à expansão da rede de usinas e destilarias (vide introdução) e obter o perfil do setor (tópico 3.1) com a sua dimensão e também as dificuldades que atualmente enfrenta, decidimos propor um modelo matemático capaz de contribuir com o setor sendo uma ferramenta a mais para o auxílio na tomada de decisões estratégicas. Baseados nos resultados das pesquisas envolvendo a programação matemática em cadeias de suprimentos diversas, sobretudo enfocando aquelas cujo enfoque são os

biocombustíveis (tópico 3.2), elaboramos o modelo de programação linear mista inteira, PLIM, pois utiliza em sua estrutura variáveis contínuas e discretas (vide tópico 2.1.2).

Além do objetivo econômico, foco maior de qualquer setor industrial, o objetivo de preservação ambiental é incorporado ao modelo que desta forma passa à condição de bi-PLIM, descrito neste capítulo 4. Para a resolução do problema de programação multiobjetivo, o método de restrição $-\varepsilon$, apresentado no tópico 2.2.4.2, foi o escolhido, por ser aquele que melhor se enquadra ao processo exploratório das soluções obtidas, tendo em vista que várias soluções ótimas são obtidas e caberá ao decisor eleger a mais adequada.

Com o modelo matemático formulado, a etapa seguinte foi a implementação do mesmo em um *software* capaz de resolver o problema que conta com um grande número de equações e variáveis, conforme detalhado nos tópicos iniciais deste capítulo. O *software* GAMS foi escolhido por ser um ambiente de alto nível de programação e fácil adequação do problema a sua linguagem algébrica (vide tópico 4.5). O *solver* CPLEX disponível no *software* GAMS foi escolhido como método de resolução iterativo para o problema proposto.

Com o modelo implementado, a fase seguinte foi a obtenção dos dados necessários para alimentar o modelo. Diversas plataformas governamentais e não governamentais com bancos de dados sobre o setor foram consultados e citados durante o texto deste trabalho. Sobretudo os bancos de dados da UNICA e do portal especializado NOVACANA forneceram a maior parte dos dados necessários para a resolução do problema. A compilação dos dados de entrada utilizados neste trabalho estarão apresentados no apêndice C.

A seguir, no Capítulo 5, os resultados obtidos e as discussões sobre o modelo proposto serão feitas e o Capítulo 6 encerrará a presente tese tecendo os comentários finais sobre o trabalho proposto e as sugestões sobre trabalhos complementares e subsequentes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são demonstrados os resultados obtidos pela otimização do modelo em cenários criados, usando os dados da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar brasileira. Em um primeiro momento, uma formulação PLIM foi utilizada para maximizar o valor presente líquido da rede, usando dois diferentes cenários quanto à capacidade de produção. Posteriormente, o modelo recebe a segunda função objetivo, de forma que, em uma formulação bi-PLIM, objetiva-se otimizar a função econômica, representada pelo VPL, e a função ambiental, representada pelo potencial de aquecimento global GWP.

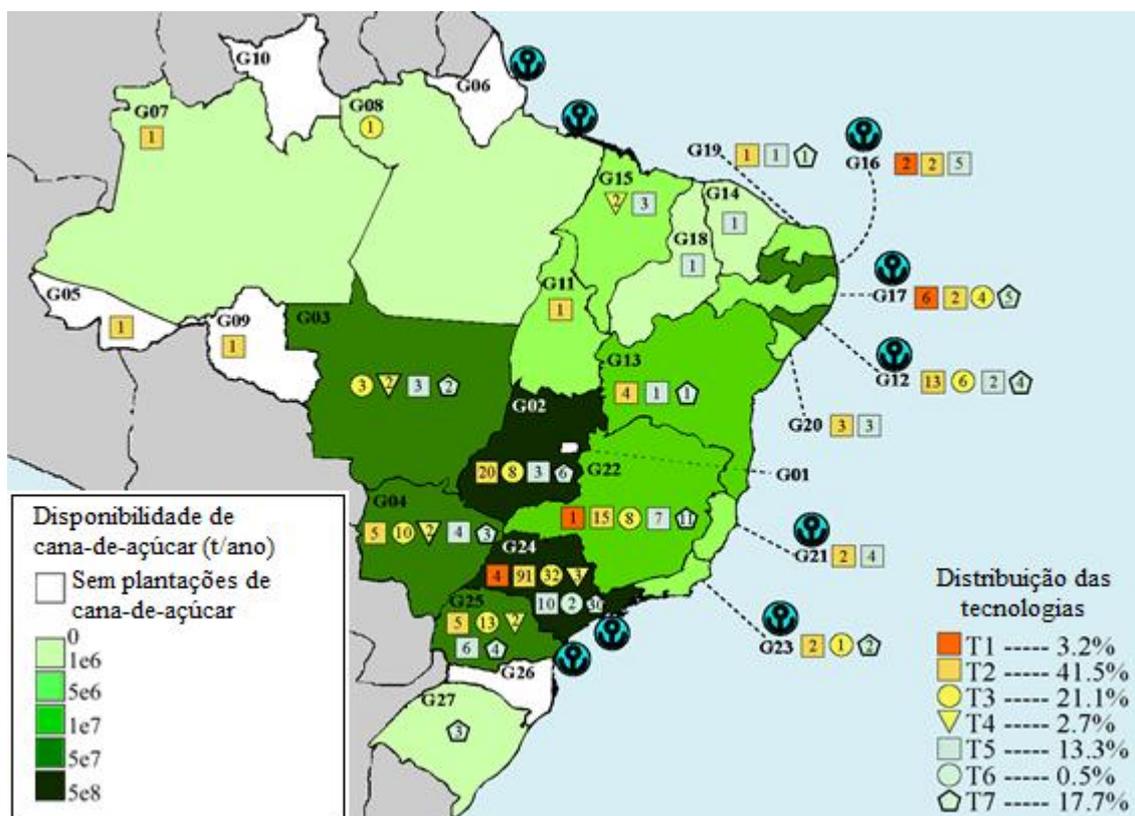
5.1 A SOLUÇÃO ÓTIMA PARA A MAXIMIZAÇÃO DA FUNÇÃO VPL

Nesta primeira otimização o modelo busca encontrar a configuração da cadeia de suprimentos que apresenta o maior VPL possível e, para tanto, a produção não é condicionada, de forma que as demandas pelos produtos nas diversas regiões sejam obrigatoriamente cumpridas. Apenas é restringida a quantidade de materiais entregues a tais regiões de modo que seja menor ou igual a sua própria demanda.

Para resolver o modelo MILP foi utilizado o *software* GAMS com o *solver* CPLEX 11.0, em um computador com processador Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU @ 2.50GHz, 2592 Mhz, 2 núcleos e 4 processadores lógicos. O modelo inclui 44.070 equações, 57.245 variáveis contínuas e 9.408 variáveis discretas. O tempo de execução necessário para obtenção da solução foi de 85 segundos.

Na Figura 14 é apresentada a configuração atual da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar instalada no Brasil, explicitando o número de plantas de cada tecnologia instaladas em cada região. Pode-se perceber que a faixa costeira concentra grande quantidade de indústrias de cana-de-açúcar. Essa concentração deve-se, sobretudo, ao período colonial brasileiro, em que os engenhos de açúcar foram instalados nas capitânicas, próximos ao litoral, de forma que o açúcar produzido pudesse ser mais facilmente exportado. A proximidade das indústrias com os portos marítimos ainda hoje apresenta benefícios, impactando, sobretudo, no custo associado ao transporte terrestre entre a indústria e o porto por onde o produto final, seja açúcar ou etanol, será exportado.

Figura 14 – Distribuição atual da cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

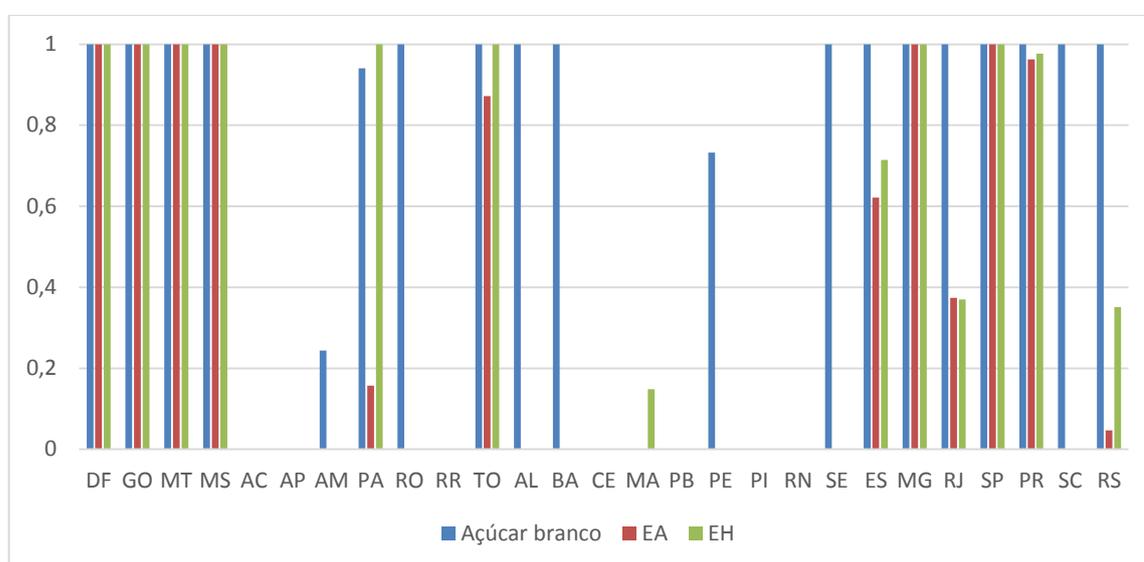
Também pode-se perceber que a região centro-oeste, mesmo sem faixa costeira, possui grande representatividade no setor sucroalcooleiro. A indústria de cana-de-açúcar teve seu desenvolvimento nesta região posterior à região nordeste, impulsionada principalmente pelo programa Pro-Álcool para suprir a demanda de combustíveis.

A quantidade ideal de plantas apontada pelo modelo proposto é 183. É muito menor do que a rede atual que conta com 407 instalações. Contudo, as indústrias existentes, bem como as tecnologias empregadas, não foram planejadas levando em conta uma perspectiva ampla, ou seja, uma CS para o país, exatamente como o modelo proposto usado no estudo faz, e sim uma perspectiva específica de atendimento da demanda e geração de lucros de forma isolada. As razões mencionadas podem estar contribuindo para explicar a situação frágil deste setor em que vários grupos empresariais enfrentam dificuldades financeiras, passando por recuperações judiciais e pedidos de falência, por exemplo, a NOVACANA (2013). Também é importante ressaltar que algumas regiões específicas recebem incentivos à instalação de indústrias como parte do planejamento político para o desenvolvimento regional, tais como

geração de empregos locais e impostos. Tal política não é contemplada pelo modelo em estudo.

Conforme mencionado, nem todas as regiões têm suas demandas totalmente supridas. As regiões G05(Acre), G06(Amapá), G10(Roraima), G14(Ceará), G16(Paraíba), G18(Piauí) e G19(Rio Grande do Norte) têm suas demandas ignoradas e outros estados têm as demandas parcialmente atendidas, como mostra a Figura 15. Em geral, 77% da demanda é atendida nesta primeira abordagem.

Figura 15 – Satisfação da demanda pelos produtos principais nas regiões

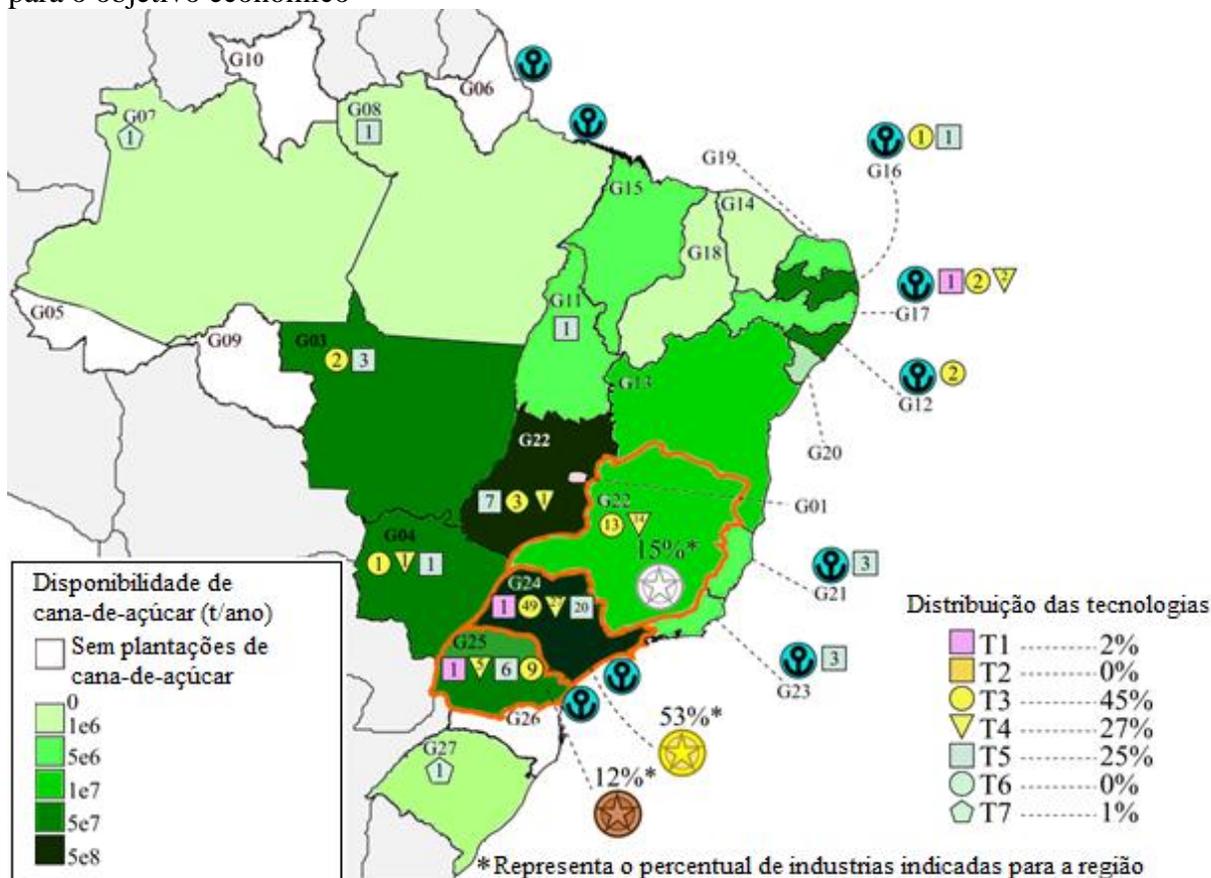


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Assim sendo, a configuração ótima obtida para o modelo é representada pela Figura 16. O VPL obtido de US\$ 13.270.300.000,00, que é o maior possível para esta cadeia, considerando a capacidade média de processamento das usinas atualmente instaladas que é cerca de 1,8 milhões de toneladas por ano (UNICA, 2017)

A região G24 corresponde ao estado de São Paulo, estado com o maior número de indústrias indicado pela solução ótima, equivalente a 53% do total. Na configuração atual, essa região também prevalece sobre as demais em relação ao número de usinas instaladas em função da alta demanda pelos produtos, por ser a região mais populosa do país e pela maior capacidade de colheita de cana-de-açúcar, conforme apresentado no anexo C.

Figura 16 – Configuração ótima para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil, para o objetivo econômico



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Completando o *ranking* dos estados com maior número de indústrias indicadas, tem-se G22 (Minas Gerais), com 14,8%, e G25 (Paraná), com 11,5% (destacadas em vermelho na Figura 16), seguidas da região G02 (Goiás) que aparece com 6%.

As regiões que não produzem cana-de-açúcar não receberam nenhum tipo de planta na solução fornecida pelo modelo. Além disso, algumas regiões cujas capacidades de colheita são muito pequenas (menor que 0,5%), aliadas à baixa demanda por produtos e localizadas próximas às regiões produtoras, também não receberam indicações de implantação de indústrias pelo modelo. Em alguns casos a demanda foi satisfeita pela produção em outras regiões, e, em outros, foi ignorada, conforme já comentado.

Entre as tecnologias disponíveis, três foram destacadas na resolução do modelo. As tecnologias T3-T4 são indústrias de multiprodutos, produzindo açúcar e etanol. Juntas, respondem por aproximadamente 72% do total - T3 produz açúcar e EH (45%) e T4 produz

açúcar e EA (27%). Essa configuração é importante para a competitividade econômica, porque uma indústria não está limitada a apenas um produto e, desta forma, está mais protegida quanto à queda de preços de um dos produtos no cenário mercantil.

Cavalett et al. (2012) concluíram que as plantas mistas, cuja proporção de cada produto final (açúcares ou etanol) varia para atender a demanda, podem se adaptar aos preços flutuantes desses produtos no mercado, um fator determinante para a rentabilidade do setor. Contudo, no presente modelo, as taxas de produção não são variáveis.

A terceira tecnologia de maior representação na solução ótima foi a T5, uma destilaria autônoma. Nesse tipo de planta, toda a matéria-prima é convertida em etanol, em suas duas variedades, EA e EH, e ela representa 25% das plantas apontadas na solução ótima com o objetivo econômico. A demanda doméstica por etanol, atualmente maior que a demanda por açúcar, ajuda compreender a necessidade da utilização da destilaria autônoma, de maneira a complementar a produção de etanol, além da quantidade produzida nas usinas mistas, sobretudo as de tecnologias T3 e T4, apontadas pelo modelo.

Compondo a cadeia, tem-se 3% de instalações divididas entre as tecnologias T1 e T7, que podem produzir somente açúcar e EH, respectivamente. Uma indústria de tecnologia T1 foi indicada para três regiões expressivas no cenário brasileiro: G17 (Pernambuco), G24 (São Paulo) e G25 (Paraná). Vale lembrar que essas regiões também contam, em maior número, com outras designações tecnológicas (T3, T4 e T5), como mostra a Figura 16. Entre as tecnologias empregadas, somente a tecnologia T1 entrega melaço como co-produto de sua produção, o que justifica sua indicação nestas regiões. Já a tecnologia T7 produz apenas EH como produto final e foi designada para duas regiões, G07 (Amazonas) e G27 (Rio Grande do Sul), com uma planta instalada em cada região. Ambas são regiões de baixa produção de cana-de-açúcar e não estão próximas de regiões que produzem EH.

A solução ótima sugere a instalação da grande maioria das indústrias no primeiro ano do período analisado. As exceções estão nas sub-regiões G02 (Goiás) e G21 (Pernambuco), que deverão receber indústrias do tipo T1 apenas no segundo ano. O motivo parece ser a oportunidade de explorar a infraestrutura instalada no período inicial e instalar T1 pra suprir o aumento esperado na demanda a partir do segundo ano.

Quanto aos centros de armazenamento, o modelo aloca um armazém para os produtos líquidos (ou seja, EA e EH), em cada região que possui sua demanda satisfeita, ainda que parcialmente. A única região que recebe duas unidades deste modelo é G24 (São Paulo), região de maior produção e demanda destes produtos no cenário nacional. Relacionado a

produtos a granel (açúcares), somente as regiões em que a demanda por açúcar foi negligenciada ficaram com um centro de armazenamento, todas as demais receberam a indicação de instalação de uma unidade. Desta forma, algumas regiões do norte e nordeste do país não receberam indicações para a instalação de indústrias ou armazéns, embora exista demanda por açúcar nessas regiões.

Quanto ao período de instalação dos centros de armazenamento, a região G09 (Rondônia) deve instalar o armazém para sólidos (S1) somente no terceiro ano. As regiões G13 (Bahia) e G15 (Maranhão) devem instalar um armazém para líquidos (S2) no segundo e no terceiro período, respectivamente. Todas as outras instalações de armazenamento devem ser implantadas no primeiro ano.

5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO

Para analisar a sensibilidade do modelo, foram criados cenários nos quais as demandas dos principais produtos como açúcar branco, etanol anidro e etanol hidratado foram modificadas ($\pm 10\%$ e $\pm 20\%$, em cada produto, individualmente). A Tabela 6 mostra os resultados obtidos nos diferentes cenários. Em geral, o modelo fornece respostas às mudanças de demanda, de acordo com as expectativas, sendo mais evidente quando a variação na demanda é maior. A variação no número total de indústrias instaladas não muda significativamente na maioria dos cenários. Contudo, ocorrem mudanças nas tecnologias apontadas pelo modelo em cada situação. Nos próximos parágrafos, são descritas as variações encontradas nos cenários mais extremos (ou seja, com variações de 20% de acréscimo ou redução), devido ao seu impacto nos resultados.

Tabela 6 – Resultados obtidos na análise de sensibilidade do modelo

<u>Cenários</u>	<u>Tecnologia (# de plantas)</u>							<u>Total</u>
	<u>T1</u>	<u>T2</u>	<u>T3</u>	<u>T4</u>	<u>T5</u>	<u>T6</u>	<u>T7</u>	
Caso-base	3	0	82	50	46	0	2	183
10% de aumento no açúcar branco	4	0	88↑	55↑	35↓	0	4↑	186↑
20% de aumento no açúcar branco	4↑	1↑	84↑	63↑	40↓	0	3↑	195↑
10% de redução no açúcar branco	4↑	0	82	48↓	45↓	0	3↑	182↓
20% de redução no açúcar branco	3	0	78↓	41↓	51↑	0	3↑	176↓

10% de aumento no EA	4↑	0	82	57↑	43↓	0	5↑	191↑
20% de aumento no EA	4↑	2↑	77↓	60↑	44↓	0	6↑	193↑
10% de redução no EA	4↑	0	85↑	52↑	38↓	0	4↑	183
20% de redução no EA	4↑	0	86↑	49↓	33↓	0	2	174↓
10% de aumento no EH	2↓	0	87↑	44↓	50↑	0	5↑	188↑
20% de aumento no EH	3	0	90↑	40↓	59↑	0	7↑	199↑
10% de redução no EA	4↑	2↑	79↓	64↑	32↓	0	3↑	184↑
20% de redução no EA	4↑	1↑	73↓	73↑	27↓	0	2	180↓
20% de aumento na cana-de-açúcar	3	1↑	83↑	54↑	39↓	0	5↑	185↑
20% de redução na cana-de-açúcar	2↓	0	83↑	50	44↓	0	5↑	184↑

Os símbolos ↓ e ↑ indicam redução ou aumento, respectivamente, no número de plantas de tecnologia p no cenário avaliado em comparação com o caso-base.

Para o açúcar branco, à medida que a demanda aumenta, o número de indústrias instaladas na CS aumenta 6,6%. As tecnologias de produção de açúcar aumentam 12,5%, enquanto as destilarias, que produzem apenas etanol, sofrem uma redução de 10,4%. Este comportamento é esperado, pois as tecnologias produtoras de açúcar impactadas são T3 e T4, que produzem açúcar e etanol hidratado e açúcar e etanol anidro, respectivamente. Dessa forma, ao aumentar o número dessas indústrias, a produção de açúcar e etanol aumenta proporcionalmente, possibilitando a redução de unidades que produziam apenas etanol. Da mesma forma, quando a demanda por açúcar branco é reduzida em 20%, observa-se uma redução de 3,4% no número total de instalações, e uma redução de 10% no número de indústrias produtoras de açúcar, diferentemente das destilarias que têm um aumento de 12%.

Para o etanol anidro, ao aumentar a demanda, o número total de indústrias aumenta 5,5%. A tecnologia T4, que produz açúcar e EA, é expandida, enquanto que a tecnologia T3 (produção de açúcar e EH) é reduzida. Desta forma, a produção de açúcar é mantida. No entanto, o número de plantas T7, que produz EH, aumenta para suprir a demanda por este produto. Pelo contrário, se a demanda de etanol anidro é reduzida, há uma redução de 5% das indústrias. Destilarias são reduzidas em 27%, sendo T5 (EA e EH) a tecnologia mais impactada. O volume de etanol hidratado que não é mais produzido devido à redução é suprido pelo aumento das plantas de T3 (açúcar e EH) e, para evitar o excesso de açúcar, há uma ligeira redução no número de plantas T4 (açúcar e EA).

Finalmente, para o etanol hidratado, um aumento na demanda ocasiona um aumento de 9% no número de indústrias indicadas, com um aumento significativo (37%) nas destilarias e 10% na tecnologia T3 (açúcar e EH), que desvia parte da produção de açúcar para si mesma,

enquanto que o aumento no número de destilarias T5 (EH e EA) desvia parte da produção de etanol anidro, permitindo a redução de plantas de T4 (açúcar e EA), de modo que a quantidade produzida de açúcar e etanol anidro não seja alterada. Da mesma forma, ao reduzir a demanda por etanol hidratado, há uma redução nas plantas que o produzem, principalmente T3 e T5, o que causa um aumento significativo nas plantas T4, de maneira que a produção de açúcar e o etanol anidro possam ser mantidos.

Além dos cenários desenvolvidos com as variações nas demandas dos principais produtos, outro cenário proposto foi analisado, variando a disponibilidade de cana-de-açúcar. Neste caso, o número total de plantas não sofre alterações significativas, com apenas pequenas alterações na configuração. Por exemplo, aumentando a disponibilidade, o número de plantas mistas T3 e T4 também aumenta, enquanto o número de destilarias T5 diminui, que são as tecnologias mais empregadas, de acordo com a solução proposta no caso-base, discutido anteriormente.

Conforme dito anteriormente, os resultados apresentados até o momento levaram em consideração o valor médio para a capacidade máxima de processamento de cana-de-açúcar das indústrias em funcionamento. Contudo, as indústrias com maior expressividade no setor podem processar até 5 milhões de toneladas por ano. Um novo cenário foi criado utilizando essa capacidade de processamento como base para as indústrias a serem instaladas e os resultados desta análise foi usado em comparação como o cenário atual e com o cenário obtido no caso-base resolvido anteriormente pelo modelo.

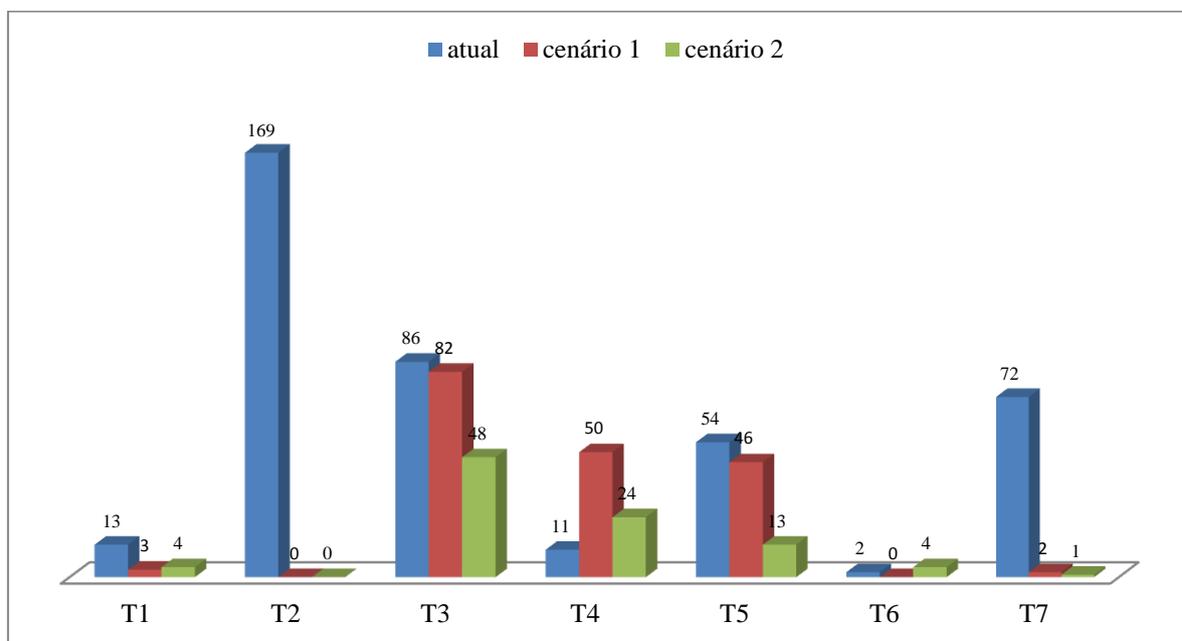
5.3 CENÁRIO ENVOLVENDO A CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO AMPLIADA

O número de indústrias apontado pela solução ótima neste cenário é 94 e o valor obtido para a função VPL é de US\$ 14.414.800.000,00, sendo, portanto, 8,6% superior ao problema resolvido com a capacidade de produção média. Apenas 13 estados receberam indicações de instalações de indústrias. São Paulo, Minas Gerais e Paraná permanecem com maior representatividade, sendo 52%, 16% e 11%, respectivamente, seguidos de Goiás com 4%.

A similaridade com o caso-base permanece quanto às tecnologias mais indicadas pela resolução do modelo. Neste cenário, usinas mistas de tecnologias T3 e T4 representam 77%

do total, sendo 51% e 26% correspondentes a cada uma, respectivamente. A destilaria autônoma T5 é a terceira tecnologia mais apontada com 14% do total.

Figura 17 – Distribuição das indústrias por tecnologias nos cenários avaliados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

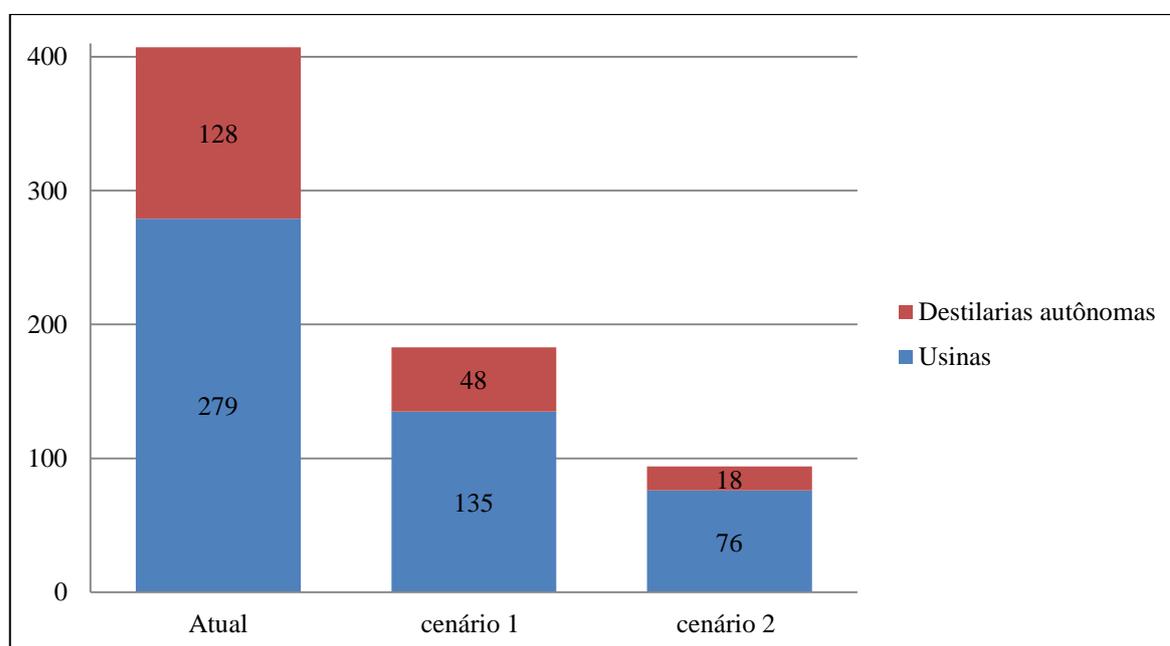
Ao comparar os três cenários envolvidos: cenário atual, cenário 1 (otimizado com capacidade de processamento de 1,8 milhões de toneladas por ano) e cenário 2 (otimizado com capacidade de processamento ampliada para 5 milhões de toneladas por ano), o detalhe que se destaca é a redução no número total de indústrias obtidos nos cenários 1 e 2, 183 e 94, respectivamente, quando comparados aos 407 referentes às indústrias instaladas na cadeia atual. Contudo, vale mais uma vez ressaltar que até o momento, as demandas não estão sendo obrigatoriamente cumpridas em todas as regiões. Assim, o cenário 1 apresenta uma redução de 55% no número de instalações, enquanto que o cenário 2 reduz a rede atual em 77%. Nesta nova solução, o percentual de satisfação da demanda, no geral é de 78% (praticamente idêntica ao apresentado no cenário 1). A região G19 (RN) se junta aos demais estados negligenciados no caso anterior, quanto ao atendimento de suas demandas. Além disso, pode-se perceber diferença nas tecnologias selecionadas pelo modelo em comparação ao atualmente instalado. A Figura 17 compara os três cenários quanto à distribuição das tecnologias.

Pode-se perceber que na atual rede instalada, a tecnologia mais utilizada é T2, que corresponde à usina com destilaria anexa que produz todos os produtos possíveis (açúcar e as

duas variedades de etanol). Conforme já discutido, a importância deste tipo de indústria mista se dá pela possibilidade de produção de vários produtos distintos, permitindo certa proteção quanto a variações nos preços de determinados produtos. Entretanto, a seleção feita pelo modelo não é pontual, ou seja, não avalia a rentabilidade em cada instalação separadamente e sim na cadeia de suprimentos como um todo e, assim sendo, opta por não utilizar a indústria T2, distribuindo a produção obtida com esta tecnologia em outras, de forma que a demanda total seja satisfeita e a rentabilidade da cadeia, maximizada.

Outra observação pertinente se refere à proporção entre as destilarias autônomas e as usinas mistas. Pode-se perceber que o percentual correspondente às destilarias decresce à medida que a cadeia torna-se mais enxuta. Desta maneira, ocorre uma transferência de tecnologias de destilarias autônomas para as tecnologias mistas, principalmente para T3 e T4. Na atual configuração, as destilarias representam 31% das instalações, diminuindo para 26% no cenário 1 e apenas 19% no cenário 2. A Figura 18 mostra a redução no tamanho da cadeia e ilustra a proporção entre destilarias e usinas nos três cenários.

Figura 18 – Configuração da cadeia nos diferentes cenários



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

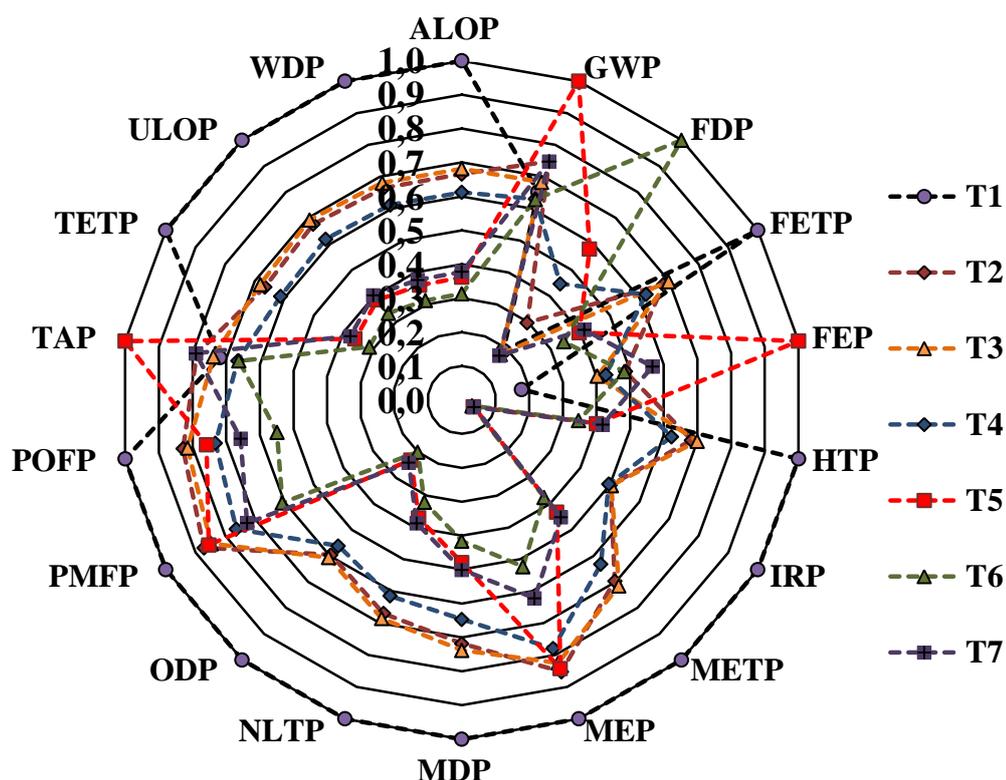
5.4 RESULTADOS DA ANÁLISE DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA (AICV)

Com base nos dados de entrada e saída, é possível calcular os principais impactos ambientais da produção industrial de etanol e açúcar, e as tecnologias podem ser comparadas entre si em termos de todas as categorias de impacto *midpoint*, como ilustra a Figura 19.

Os resultados obtidos aplicando o método ReCiPe 2016 e a normalização da unidade funcional indicam que alguns impactos ambientais têm baixa contribuição, se comparados ao estágio agrícola (Renó et al., 2014), como o uso de terra agrícola, natural e urbana, e a depleção de metais e ozônio. Além disso, a categoria de impacto da depleção fóssil é pouco expressiva (valor de 5,03 kg de óleo-eq/tonelada de cana-de-açúcar para produção de açúcar e valor de 22,09 kg de óleo-eq/tonelada de cana-de-açúcar para produção de etanol), devido ao baixo consumo de combustível fóssil na fase industrial de processamento de cana-de-açúcar.

O processo de produção de etanol contribui com maior intensidade no impacto ambiental do aquecimento global, como é observado na Figura 19. A tecnologia T5, que produz EH e EA, tem mais impacto em 3 categorias *midpoint* (GWP, FEP e TAP). Esta etapa emite uma considerável quantidade de CO₂, durante a fase de fermentação, de modo que o valor normalizado é 180,09 kg CO₂ eq./ton de cana-de-açúcar, mais que o dobro se comparado ao processo de produção de açúcar. A tecnologia T6 (produz apenas EA) tem o maior impacto considerando a depleção fóssil (FDP), causado pela alta demanda de solventes (como o ciclohexano) para separar o etanol da água na destilação azeotrópica.

Figura 19 – Comparação entre as tecnologias (T1-T7) quanto às categorias de impacto ao nível *midpoint*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A tecnologia que produz somente açúcar (T1) apresenta o maior impacto, ao processar 1 tonelada de cana-de-açúcar, em 14 das 18 categorias de impacto, e o menor impacto em outras duas categorias. A razão desta discrepância está associada ao consumo de vapor e produção de energia, uma vez que nesta tecnologia todo o caldo deve ser mais concentrado do que nas demais, removendo mais água no estágio de evaporação e secagem, bem como recebendo mais agentes clarificantes para o branqueamento do açúcar.

Os resultados normalizados mostram que, na maioria dos casos, essas tecnologias mistas, produtoras de bioetanol e açúcar, podem atingir entre 40 e 60% do possível impacto causado pelas tecnologias que produzem apenas açúcar ou apenas bioetanol. Portanto, observou-se que essas tecnologias podem distribuir os danos ambientais de forma mais homogênea e equilibrada entre as categorias de impacto de ponto médio (*midpoint*) consideradas.

Uma vez obtidos os dados dos impactos associados aos cenários investigados, a formulação matemática para o cálculo do impacto ambiental associado de cada cenário é composta por duas partes: a) quantificando o impacto associado a cada atividade ou fluxo

elementar ao longo do processo de produção e b) calculando a soma dos impactos de cada categoria de impacto em cada cenário, conforme descrito na seção de modelagem.

5.5 O MODELO MULTI-OBJETIVO

Nesta seção, o modelo utilizado anteriormente recebe uma segunda função objetivo. Optou-se por minimizar a categoria de impacto GWP – Potencial de Aquecimento Global – por ser uma categoria que possui representatividade na composição do dano ambiental, ser a mais utilizada como indicador ambiental nas pesquisas que envolvem otimização e por não ser conflitante com as demais categorias de impacto da metodologia ReCiPe, como apresentado adiante. Conforme mencionado na descrição do modelo, foram considerados na função ambiental (DAM) os impactos relativos à produção em cada planta e os impactos relativos ao transporte dos materiais da usina até o armazém, bem como o impacto de transporte marítimo para os materiais exportados.

Para o problema bi-objetivo, optou-se pela inserção de uma restrição que impõem que as demandas pelos produtos principais (açúcar branco, etanol anidro e etanol hidratado) sejam completamente supridas em cada região.

Para a resolução do modelo bi-PLIM, com 44.359 equações, 57.317 variáveis contínuas e 9.408 variáveis discretas, o mesmo computador foi utilizado e o tempo de execução necessário para a obtenção de um ponto da fronteira de Pareto variou entre 67s e 7.140s.

O método de restrição- ε é utilizado, e a função objetivo é transformada em uma restrição adicional e o problema é resolvido de forma iterativa para os vários valores do epsilon (MAVROTAS, 2009).

Para a determinação do intervalo em que o parâmetro ε deve variar, o problema é otimizado levando em consideração apenas uma função objetivo por vez. Inicialmente, a função ambiental foi minimizada, conforme mostrado na Equação 44, na descrição do modelo. O resultado obtido nesta otimização fornece o limite inferior para o intervalo de variação do parâmetro ε .

$$\underline{\varepsilon} = 7,83173 \times 10^{11} \text{ kg} - \text{CO}_2\text{-eq.} \quad (51)$$

O limite superior é obtido do valor da função ambiental DAM, quando o problema foi resolvido com apenas uma função objetivo, maximizando então o VPL:

$$\bar{\varepsilon} = 1,63496 \times 10^{12} \text{ kg} - \text{CO}_2\text{-eq.} \quad (52)$$

Desta forma, o intervalo de variação para o parâmetro ε será:

$$7,83173 \times 10^{11} \leq \varepsilon \leq 1,63496 \times 10^{12} \quad (53)$$

Como a quantidade de epsilons utilizada é arbitrária, optou-se por dez valores, ou seja, os oito valores interiores ao conjunto acima descrito, além dos dois extremos, ε_1 e ε_{10} , mínimo e máximo, respectivamente. Para tanto, a amplitude do intervalo obtido é dividida em nove, obtendo o valor Δ .

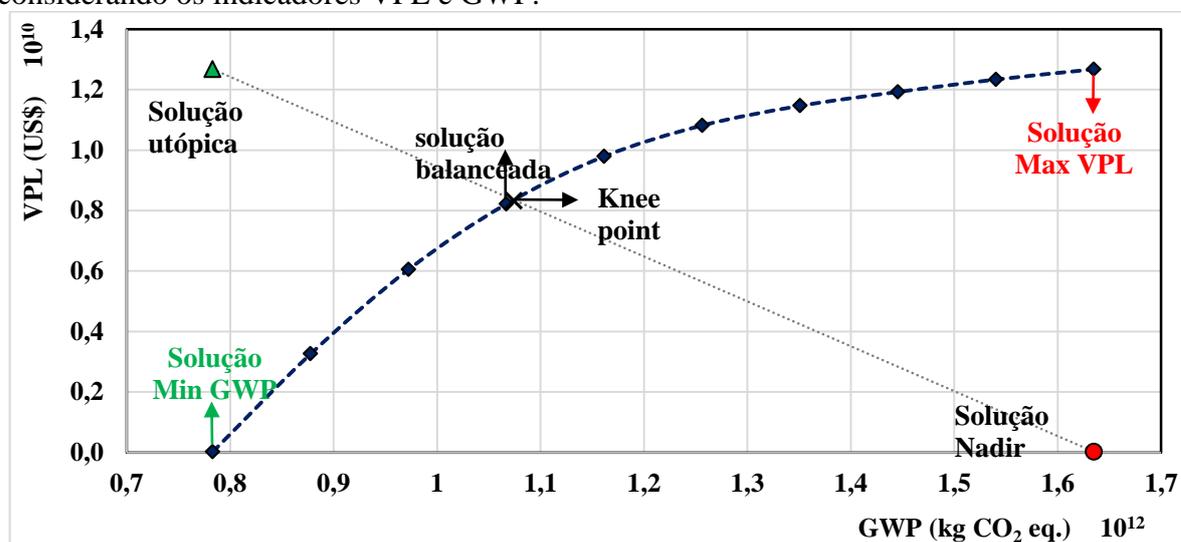
$$\Delta = \frac{1,63496 \times 10^{12} - 7,83496 \times 10^{11}}{9} = 9,46430 \times 10^{10} \quad (54)$$

Desta forma, para a obtenção dos valores de ε basta utilizar a fórmula recorrente:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_1 + k - 1 \cdot \Delta \quad k = 1, \dots, 10 \quad (55)$$

O problema bi-objetivo é então resolvido maximizando a função econômica VPL, sujeito a restrição imposta por cada um dos valores de ε_k , conforme descrito no modelo, de tal forma que são obtidos 10 pontos, pertencentes à fronteira de Pareto.

Figura 20 – Fronteira de Pareto para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar considerando os indicadores VPL e GWP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na fronteira de Pareto, ilustrada na Figura 20, cada ponto indica uma solução para o problema, ou seja, uma configuração para a rede de suprimentos analisada. Pode-se observar que a parte inicial da curva (da esquerda para a direita), que engloba os 4 pontos iniciais, possui a maior inclinação. Nesta etapa, cujas soluções atendem a restrições ambientais mais rígidas, existe crescimento mais relevante no valor obtido para VPL a cada ponto, ou seja, a cada relaxamento feito na restrição ambiental. A partir do quinto ponto, temos uma região de transição na fronteira de Pareto, em que a configuração da cadeia começa a trocar tecnologias com menor impacto ambiental por tecnologias com maior rentabilidade financeira, mudando a característica que marcou os pontos iniciais.

Os quatro últimos pontos, incluindo o Max VPL, apresentam-se na região da curva com menor inclinação, isso quer dizer que o VPL nesta etapa tem pouca variação entre os pontos, permanecendo quase estável à medida que os valores de GWP continuam aumentando. Nesta região, a transição de tecnologias mais ecologicamente sustentáveis para as tecnologias com maior rentabilidade financeira já está concluída e a característica dessa fase é bem desenhada.

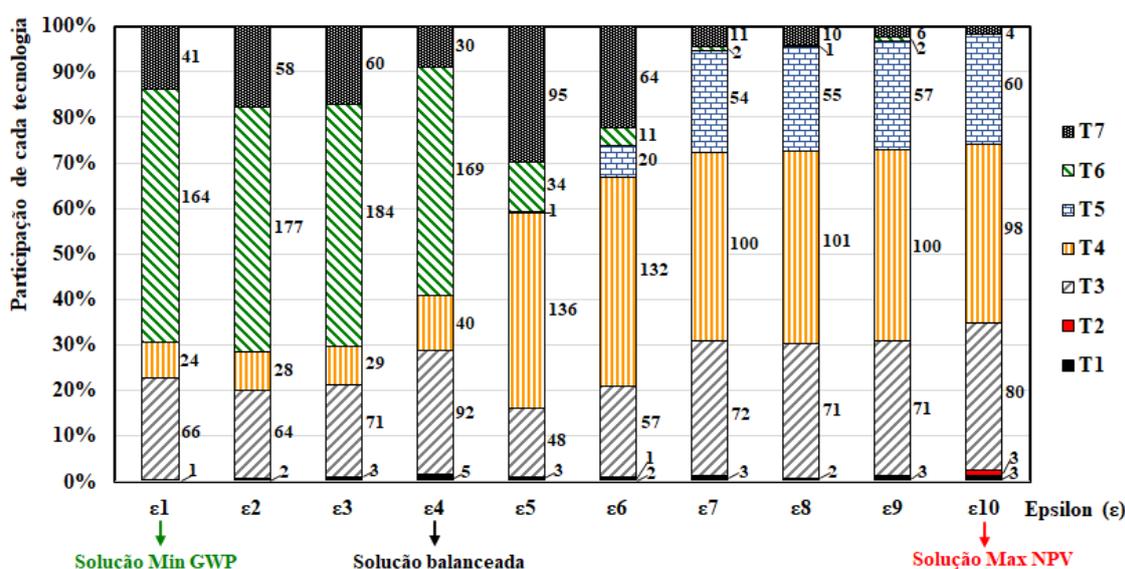
Pode-se observar que a solução balanceada para o problema é o extremo do primeiro intervalo citado anteriormente, ou seja, o quarto ponto da fronteira de Pareto, sendo este o mais próximo ao chamado *knee point*, obtido na intersecção da curva com uma reta construída, unindo as soluções Utópica e Nadir. O *knee point* representa a solução mais próxima do ideal sob os dois critérios analisados. É importante ressaltar que todos os pontos obtidos na fronteira de Pareto são ótimos quando ambos os critérios são considerados, desta forma, a utilização do *knee point* é uma estratégia para eleger a solução ótima que será adotada como a solução balanceada para a cadeia.

As soluções ótimas extremas são representadas por $f^{\text{Min GWP}} = [7,83 \times 10^{11}, 2,31 \times 10^7]$ e $f^{\text{Max VPL}} = [1,63 \times 10^{12}, 1,26 \times 10^{10}]$. Estas soluções ótimas apresentam variação de $8,5 \times 10^{11}$ kg de CO₂ entre elas, ou seja, a solução de Max VPL emite 109% mais CO₂ que a solução de MinGWP. Contudo, ao comparar os valores obtidos para a função VPL, a diferença se torna mais marcante, visto que a rentabilidade da solução de MinGWP é bem inferior, resultando num aumento de aproximadamente 54.456%, indicando que esta solução não atende de forma satisfatória ao critério econômico envolvido. A solução balanceada, por sua vez, possui as seguintes componentes $f^{\text{Balanceada}} = [1,07 \times 10^{12}, 8,22 \times 10^9]$ e, desta forma, a redução no

valor de VPL em relação a solução utópica é de 35% enquanto que o aumento no valor de GWP é de 36%.

A Figura 21 mostra a distribuição das plantas nas diferentes soluções obtidas nos 10 valores de epsilon.

Figura 21 – Comparação das tecnologias industriais implementadas em cada solução de Pareto



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Ao analisar a Figura 21, pode-se destacar 3 configurações com características definidas bem como compreender a transição entre elas. A primeira delas corresponde ao intervalo que compreende de ϵ_1 a ϵ_4 . Neste intervalo, cujos valores de ϵ são menores, ou seja, com restrição ambiental mais severa, as tecnologias mais utilizadas são, nesta ordem, T6, T3, T7 e T4. A demanda por açúcar é suprida nas plantas mistas T3 e T4, que também produzem EH e EA, respectivamente. Neste caso, T4 é menos empregada para satisfazer a demanda por EA do que T3, assim, um grande número de plantas com tecnologia T6 é necessário para complementar a produção. Consequentemente, a quantidade necessária de plantas T7 é menor, pois parte considerável da demanda por EH é suprida pela usina mista de tecnologia T3. Ainda neste intervalo, é importante notar que à medida que ocorrer um relaxamento do critério ambiental, ou seja, à medida que ϵ se torna maior, as usinas mistas passam a ter mais representatividade dentro da cadeia, aumentando de 23% para 40% em ϵ_1 e ϵ_4 , respectivamente.

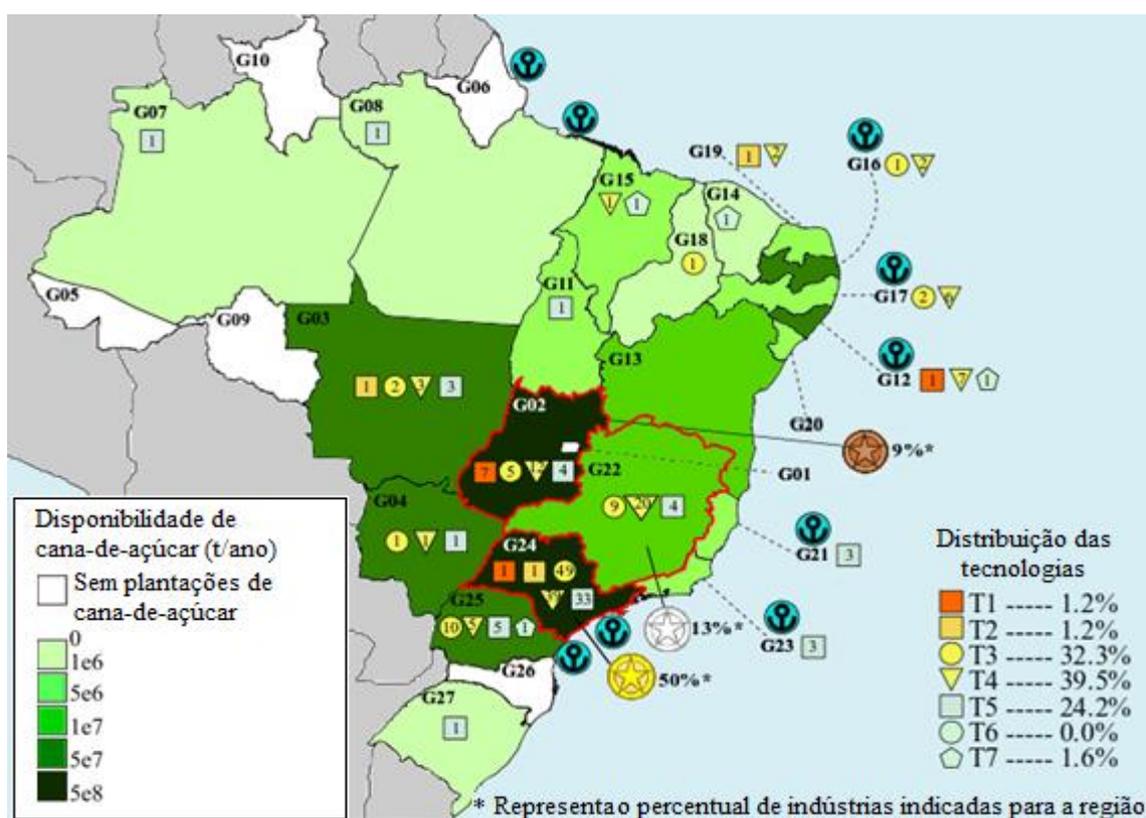
A segunda configuração é localizada entre ε_5 e ε_6 . Nesta etapa, as usinas mistas superam as destilarias autônomas, sendo T4, a mais empregada. Em ε_5 , a demanda por EA é suprida pela união de T4 e T6 e a demanda por EH, suprida pela união de T3 e T7. Em ε_6 , parte do etanol produzido é desviado das plantas T6 e T7 para a destilaria T5, que produz ambas as formas do etanol. Esta mudança é explicada pelo relaxamento do critério ambiental, uma vez que tal planta é economicamente mais interessante, contudo, apresenta maior impacto ambiental.

A última configuração se dá no intervalo de ε_7 a ε_{10} . As usinas mistas T4 e T3 são as mais indicadas, nesta ordem, e suprem quase toda a demanda pelo açúcar e considerável parte da demanda por etanol, sendo o restante produzido, quase que exclusivamente pelas indústrias com planta T5, seguindo a tendência já apontada na solução para ε_6 . Ao passo que na solução em ε_{10} , se obtém o máximo VPL com as plantas T4, T3 e T5, representando 96% do total de indústrias apontadas.

A seguir, são descritos os resultados obtidos para as soluções com mínimo GWP, máximo VPL e a solução balanceada para o problema.

O maior valor obtido para a função objetivo econômico é alcançado neste cenário, ou seja, o VPL é igual a US\$ 12.635.273.388,15, associado ao maior GWP, na ordem de $1,63 \times 10^{12}$ kg de CO₂-eq.

Figura 22 – Configuração ótima econômica da cadeia de açúcar/etanol no Brasil para o problema bi-objetivo



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

É a configuração que apresenta o menor número de indicações de indústrias, 248 no total, que devem ser instaladas desde o primeiro ano e distribuídas em quase sua totalidade entre as plantas T4, T3 e T5, nesta ordem, representando 96% das indicações obtidas na solução ótima para este cenário. Conforme já mencionado anteriormente, as destilarias autônomas T6 e T7 são substituídas quase que totalmente pelas destilarias de tecnologia T5, que produzem ambas as variedades de etanol. Apenas três estados do Nordeste, G12 (Alagoas), G14 (Ceará) e G15 (Maranhão), e um estado da região Sul, G25 (Paraná), ainda receberam uma indicação de instalação de indústrias de tecnologia T7, o que representa apenas 6,7% das destilarias apontadas pelo modelo e 1,6% do total de indústrias. A Figura 22 mostra a configuração da cadeia nesta solução.

São Paulo (G24) permanece em todos os cenários com a maior cadeia de indústrias. Neste cenário, são 123, o que representa cerca de metade das indústrias indicadas no país. As tecnologias predominantes são as mesmas que dominam o cenário nacional, com alteração apenas na ordem entre as usinas mistas, ou seja, T3 é a mais utilizada no estado, seguida por T4 e T5, com 40%, 32% e 27%, respectivamente. Além destas, uma unidade das tecnologias T1 e T2 completam a cadeia deste estado que, desta forma, tem a maior variedade de tecnologias instaladas, ainda que as últimas duas não alcancem 2% de representatividade.

O segundo estado com maior quantidade de indústrias apontadas pelo modelo neste cenário é Minas Gerais (G22), totalizando 33 indústrias distribuídas em apenas três tecnologias, T4, T3 e T5, seguindo a mesma ordem de posição que o apresentado no cenário geral nacional. A usina mista T4, é amplamente empregada neste estado, representando 61% das indústrias, enquanto que T3 tem 27% das indicações e os 12% restantes cabem a tecnologias T5.

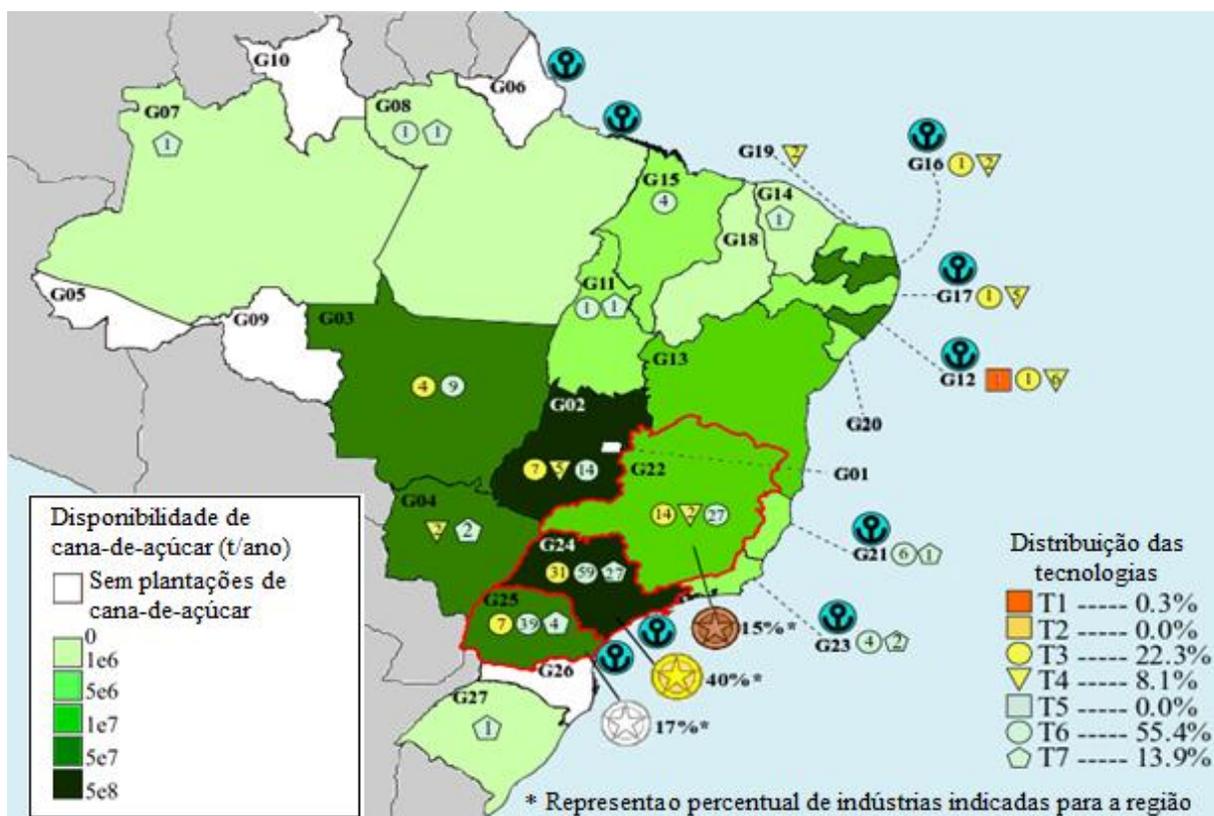
Goiás (G02), com 22 indústrias apontadas neste cenário, assume o posto de terceiro estado, superando o Paraná (G25) em uma unidade. Somente neste cenário o Paraná deixa de ocupar a terceira posição no *ranking* dos estados com maior indicação de indústrias. Goiás utiliza quatro tecnologias em sua rede, sendo que a tecnologia T1, usina de açúcar sem destilaria anexa, é a segunda mais empregada, representando 32% do total, perdendo apenas para T4, com 56%. As tecnologias que fecham o estado são T3 e T5, com 23% e 18%, respectivamente.

Ainda merecem destaque neste cenário, os estados do Paraná (G25), que distribui sua rede nas tecnologias T3, T4, T5 e T7 e tem 8% do total das indústrias do país, seguido pelos estados de Mato Grosso (G03), Alagoas (G12) e Pernambuco (G17) que, somados, representam 10,5% das indicações de instalação de indústrias.

É importante ressaltar que os estados acima mencionados, além de suprirem as demandas locais pelos produtos principais, ainda produzem o necessário para complementar ou suprir totalmente as demandas dos oito estados que não receberam indicações de instalações (Santa Catarina (G26), Rondônia (G09), Acre (G05), Roraima (G10), Amapá (G06), Distrito Federal (G01), Bahia (G13), Sergipe (G20), sendo que as seis primeiras regiões não produzem cana-de-açúcar atualmente). Neste ponto se encontra a diferença obtida neste cenário e aquele obtido na otimização do modelo com o objetivo único apresentado no início da seção, que obteve um valor para a função VPL igual a US\$ 13.270.330.000,00, sendo 5% superior ao apresentado neste cenário, contudo, sem que as demandas locais sejam obrigatoriamente atendidas, como são no presente estudo.

A Figura 23 apresenta a configuração da rede cujo GWP é mínimo dentro dos cenários otimizados. Dentre os cenários avaliados, esta é a configuração que possui o menor GWP, sendo igual a $7,83 \times 10^{11}$ kg de CO₂-eq e, conseqüentemente, tem o menor valor para a função VPL deste estudo, igual a US\$ 23.160.085,97. Em comparação ao cenário de máximo VPL, a redução no indicador GWP é de 52%, contudo, o valor de VPL sofre uma redução da ordem de 99%.

Figura 23 – Configuração ótima ecológica da cadeia de açúcar/etanol no Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na configuração deste cenário, cujo número de indústrias é 19% maior, pode-se verificar que a tecnologia T5 nunca é selecionada pela solução ótima do modelo, sendo o etanol produzido pelas destilarias T6 e T7, e complementado pelas usinas mistas T3 e T4. Estas tecnologias somam 295 indústrias do total de 296 presentes nesta solução, sendo que o estado de Alagoas (G12) foi o único a receber indicação para instalação de planta T1.

São Paulo (G24) continua liderando com folga quanto ao número de indicações de indústrias, com 117 unidades. Ainda que com percentual de participação inferior ao obtido no cenário anterior, o estado ainda detém 40% das indústrias do país. A destilaria T6 é a mais utilizada, com metade das usinas do estado, seguida pela usina mista com tecnologia T3 e a destilaria T7, representando 26% e 23%, respectivamente.

Em segundo lugar no número de instalações aparece o Paraná (G25), com 50 unidades. As tecnologias empregadas são as mesmas de São Paulo, contudo T6 prevalece em 78% das indicações, enquanto T3 tem 14%, e os 8% restantes correspondem às destilarias com tecnologia T7.

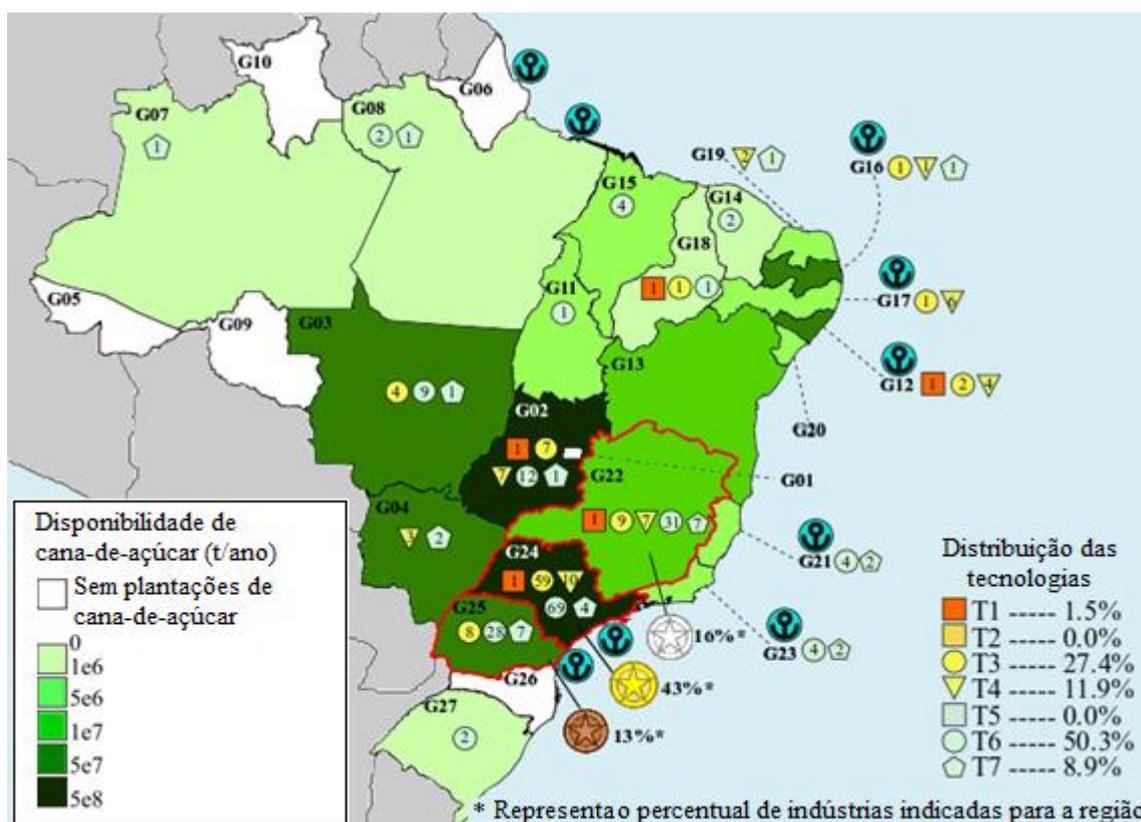
Fechando a lista dos três estados com maiores indicações, Minas Gerais tem 15% das indústrias apontadas pelo modelo. Diferindo das duas anteriores quanto à distribuição das

tecnologias, este estado utiliza as plantas T6, T3 e T4, com percentuais iguais a 63%, 33% e 4%, respectivamente.

Os estados de Goiás (G02) e Mato Grosso (G03) possuem relevância no cenário e possuem 9% e 4% das usinas do país, respectivamente. As mesmas 8 regiões permanecem sem indicações de indústrias, em razão, principalmente, da ausência de matéria-prima em 6 destas regiões, o que impossibilita a produção.

Por fim, a Figura 24 apresenta a configuração da cadeia para a solução balanceada apresentada para o problema, sendo a mais próxima do *knee point*, conforme descrito anteriormente. Nesta solução intermediária, temos o valor da função VPL igual a US\$ 8.220.221.584,85 e a função GWP assume valor igual a $1,0671 \times 10^{12}$ kg de CO₂-eq.

Figura 24 – Configuração ótima balanceada da cadeia de açúcar/etanol no Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Nesta solução, ambas as funções objetivo apresentam uma redução de aproximadamente 35%, quando comparadas com a solução ótima econômica, cujo VPL e GWP são máximos neste estudo. Já, ao comparar com a solução ótima ecológica, em que VPL e GWP assumem os menores valores do estudo, o aumento no nível de CO₂-eq é de

36%, no entanto, para o critério econômico, o aumento é extremamente acentuado, acima de 35.000%. Desta forma, esta solução é adotada como aquela que melhor equilibra as duas funções de maneira que a cadeia não tenha seu valor presente líquido muito reduzido, ao mesmo tempo em que consegue reduzir o impacto ambiental em relação ao potencial máximo observado.

Esta solução balanceada encontra-se no limite do conjunto de soluções que possuem maior rigidez ambiental, apresentada na Figura 20, que mostra a fronteira de Pareto. Desta forma, a configuração desta cadeia segue a configuração similar àquela apresentada no cenário anterior. Contudo, por estar no limite de transição tecnológica, conforme discutido anteriormente, a participação das usinas mistas T3 e T4 que, no cenário anterior era de 30% contra 68% das destilarias T6 e T7, agora são de 39% contra 58%, ou seja, as destilarias, sobretudo T6, ainda são maioria nesta configuração que conta com 336 indústrias. Tal como no cenário anterior, as tecnologias T2 e T5 não recebem indicações e a usina de açúcar com tecnologia T1 é designada para 5 estados, com uma unidade produtora em cada um deles.

Quanto aos estados com maior número de indústrias apontadas, novamente São Paulo (G24) lidera com 43%, seguido por Minas Gerais (G22) e Paraná (G25), com 16% e 13%, respectivamente, ocorrendo inversão na posição destes dois últimos em relação ao cenário anterior.

No estado de São Paulo, as destilarias T6 e T7 representam 51% das indústrias do estado, enquanto que as usinas mistas T3 e T4, 48%. Uma usina de açúcar T1 é indicada para completar a cadeia do maior produtor nacional. As mesmas tecnologias são empregadas em Minas Gerais, contudo, o percentual referente às destilarias é maior, atingindo 69% das instalações apontadas.

O Paraná conta com rede composta por 43 indústrias, que são distribuídas somente em três tecnologias de produção, sendo 65% em plantas T6, 19% em usinas mistas T3, e o restante em destilarias autônomas de tecnologia T7.

Goiás (G02) utiliza as mesmas tecnologias apontadas para São Paulo e Minas Gerais, enquanto que o Mato Grosso (G03) recebe as mesmas tecnologias do Paraná. Ambos merecem destaque na composição desta cadeia e juntos representam 12,5% das indústrias instaladas.

As soluções ótimas encontradas nos três cenários avaliados (Max VPL, Min GWP e balanceada) sugerem que todas as indústrias apontadas para as regiões devem ser instaladas logo no período inicial, ou seja, no primeiro ano. Desta forma, considerando que o aumento

na demanda pelos produtos principais seja o esperado, não haverá necessidade de expansão na cadeia durante o horizonte de tempo estipulado neste estudo.

Cada uma das 27 regiões recebeu a indicação de instalação de um centro de armazenamento para produtos sólidos, açúcar branco ou açúcar bruto, bem como a instalação de um centro de armazenamento para os produtos na forma líquida, etanol anidro ou etanol hidratado. A exceção é o estado de São Paulo (G24) que recebe duas instalações deste último tipo. A configuração para os centros de armazenamento de produtos não difere nos três cenários estudados. Assim como nas plantas de produção, todos os centros de armazenamento devem ser instalados no primeiro ano.

O transporte de produtos entre as regiões, conforme já mencionado, é realizado por caminhões específicos. O cenário de menor impacto ambiental é o que necessita da menor frota, sendo 2223 caminhões para transporte de sólidos, chamado de caminhões médios, e 1472 caminhões para transporte de líquidos, chamados de tanques. Neste cenário todos os veículos devem ser adquiridos no período inicial. Na solução balanceada, são apontados 2243 caminhões médios e 1700 caminhões do tipo tanque, sendo 1 unidade deste último incorporada à frota no segundo ano.

O cenário de maior rentabilidade econômica é o que apresenta a maior frota de veículos, sugerindo uma relação direta entre a rentabilidade e o tamanho da frota. Nesta última configuração, a cadeia apresenta o menor número de indústrias e necessita de um maior número de veículos transportando os materiais entre as regiões produtoras e consumidoras, o que provoca um aumento nas emissões de CO₂ e impacta na função ambiental. Neste cenário, são apontados 2670 caminhões médios e 1765 do tipo tanque, sendo uma unidade de cada tipo incorporado à frota a partir do segundo ano. Os veículos canavieiros não são apontados pela solução nestes cenários, uma vez que não existe transporte de matéria-prima entre as regiões. Para visualizar o tráfego de materiais, tabelas relacionando as regiões produtoras e as regiões que recebem os produtos, bem como figuras ilustrando o tráfego dos produtos estão presentes no Apêndice B.

Comparando a configuração da cadeia atual com os três cenários discutidos para o modelo multiobjetivo, apresentados nesta pesquisa, pode-se verificar que não existe uma similaridade marcante com nenhum deles. Quanto ao número de plantas instaladas, a configuração apresentada pela solução balanceada é a que mais se aproxima, com redução de apenas 17%. Contudo, como visto, esta solução não faz uso das destilarias de tecnologia T5, produtoras das duas variedades de etanol, e estas são amplamente utilizadas na cadeia atual,

de forma que, sob este aspecto, a solução de MaxVPL se assemelha com a atual. Entretanto, o número de instalações nesta solução é o menor entre os cenários, representando apenas 61% do tamanho da cadeia atual. O uso das tecnologias T3 e T4 também colabora para que a cadeia atual tenha características levemente mais próximas da solução de melhor rendimento econômico do que as demais. O ponto crucial que afasta a cadeia atual das soluções ótimas apontadas neste estudo é a grande utilização das usinas mistas de tecnologias T2, que produzem todos os produtos principais em uma única planta. Conforme Kostin et al. (2018), tal configuração é promissora, pois ao produzir diferentes produtos, a indústria fica menos suscetível às variações dos preços de tais produtos no mercado e por este motivo é a escolhida pelos grupos privados que exploram o setor. Contudo, nesta tese, a cadeia foi considerada como um todo, de maneira a ser otimizada de forma geral, sem levar em consideração o risco individual de cada instalação.

Assim sendo, para que a cadeia atual se aproxime da configuração apresentada na solução MaxVPL, ela precisa migrar as plantas de tecnologia T2 para as tecnologias T3 e, principalmente, T4, que atualmente têm baixa utilização. Além disso, é necessário reduzir as plantas T7, transferindo a produção de etanol hidratado para as destilarias T5. Por outro lado, para que a cadeia atual se assemelhe com a solução balanceada, novamente deve ocorrer a mudança das indústrias com tecnologia T2 para as tecnologias T3 e T4. Porém, a diferença está nas destilarias, em que a produção de etanol da tecnologia T5 deve migrar para as destilarias T6 e T7, sobretudo a primeira, que atualmente é pouco utilizada. O cenário de minGWP é mais distante do atual do que os outros dois mencionados e, conforme discutido, apresenta rentabilidade muito inferior, motivo pelo qual não foi considerada a aproximação da cadeia corrente à sua configuração.

A Tabela 7 mostra o número de plantas de cada tecnologia presentes em cada cenário discutido anteriormente e ilustra o aumento ou redução em cada tecnologia quando comparado com a configuração atual da cadeia.

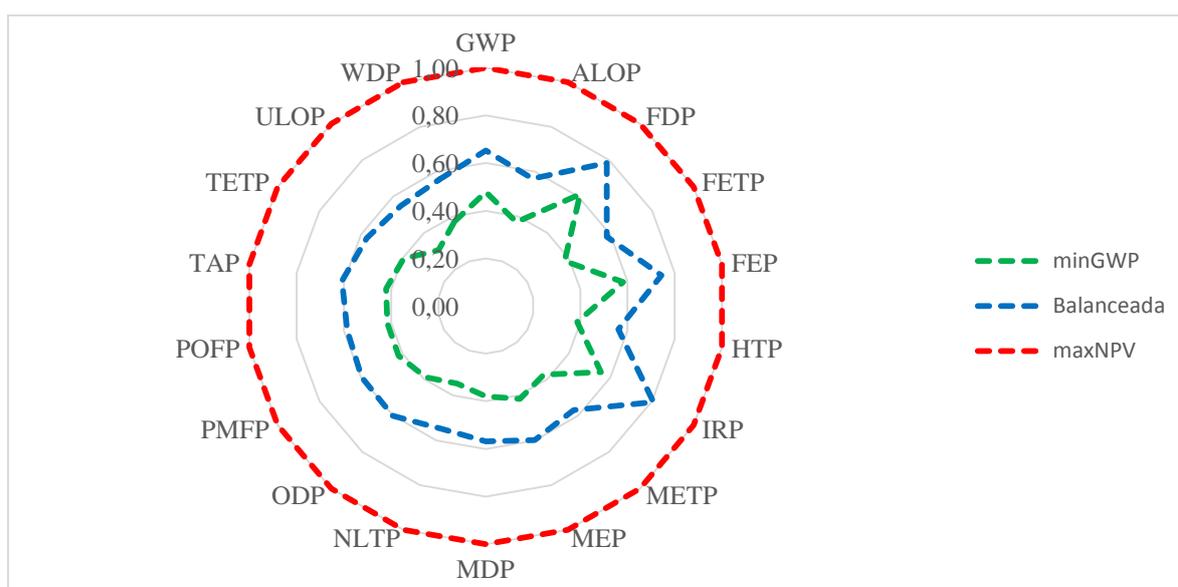
Tabela 7 – Comparação entre a configuração atual da CS e as configurações obtidas nos cenários analisados no estudo bi-objetivo

Cenários	Tecnologia (# de plantas)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Total
Configuração atual	13	169	86	11	54	2	72	407
Configuração ótima econômica	3 ↓	3 ↓	80 ↓	98 ↑	60 ↑	0 ↓	4 ↓	248 ↓
Configuração ótima ecológica	1 ↓	0 ↓	66 ↓	24 ↑	0 ↓	164 ↑	41 ↓	296 ↓
Configuração ótima balanceada	5 ↓	0 ↓	92 ↑	40 ↑	0 ↓	169 ↑	30 ↓	336 ↓

Os símbolos ↓ e ↑ significam redução e aumento, respectivamente, no número de plantas de cada tecnologia no cenário avaliado em comparação com a atual configuração da CS.

A Figura 25 apresenta como as demais 17 categorias de impacto ao nível *midpoint* do método ReCiPe são afetadas pela variação no GWP, obtidas nas três soluções em discussão. Com pode ser observado, o indicador GWP utilizado na função ambiental não entra em conflito com as demais categorias, o que significa que, ao minimizar a função dos danos ambientais, reduz-se também as demais categorias de impacto, ainda que não seja possível garantir que os valores destas sejam mínimos. Como as unidades de medidas das categorias de impacto diferem entre si, uma comparação em valores absolutos perde o significado. Portanto, os resultados apresentados na figura são normalizados em cada uma das categorias.

Figura 25 – Comportamento das categorias de impacto ao nível *midpoint* do método ReCiPe



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Desta forma, comparando a solução ótima balanceada com a solução de MaxVPL, pode-se observar uma redução de 35% na emissão de CO₂-eq, na categoria otimizada GWP. A redução percentual média das demais categorias é de 38,5%. A categoria Potencial de Radiação Ionizante (IRP – *Ionising Radiation Potencial*) foi a que apresentou a menor redução, 19%, deixando de emitir o equivalente a $1,7 \times 10^{10}$ kg de U²³⁵ para o ar.

Já a categoria que apresentou a maior redução percentual foi a Potencial de Transformação de Terra Natural (NLTP – *Natural Land Transformation Potencial*) com redução de 45%, o que equivale a uma redução na ordem de $4,6 \times 10^8$ m² de terra

transformada. Vale ressaltar que estes impactos referem-se aos estágios de produção e transporte dos produtos e não são computados os impactos de construção das indústrias.

Ainda nesta figura é possível perceber que os impactos da solução balanceada se aproxima mais daqueles produzidos na solução de menor impacto ambiental (MinGWP) do que daqueles produzidos pela solução de maior rentabilidade econômica (MaxVPL).

A Tabela 8, que encerra este capítulo, apresenta os impactos das 18 categorias, com seus valores absolutos nos três cenários, discutidos para o problema multiobjetivo.

Tabela 8 – Valores obtidos nas três soluções avaliadas no estudo bi-objetivo para as 18 categorias de impacto.

Fator de caracterização / <i>categoria de impacto</i>	Unidade de medida (do fator de caracterização)	Sigla	Soluções		
			minGWP	Balanced	MaxVPL
Pot. de aquecimento global/ <i>Mudança climática</i>	kg (CO ₂ para o ar)	GWP	7,8E+11	1,1E+12	1,6E+12
Pot. de ocupação de terra agrícola/ <i>Uso da terra agrícola</i>	m ² x yr (de terra agrícola)	ALOP	3,8E+11	5,8E+11	1,0E+12
Pot. de depleção fóssil/ <i>Depleção de recursos fósseis</i>	kg (óleo)	FDP	1,2E+11	1,5E+11	1,9E+11
Pot. de ecotoxicidade da água doce/ <i>Ecotoxicidade aquática (água doce)</i>	kg (14-DCB para água doce)	FETP	5,2E+09	8,0E+09	1,4E+10
Pot. de eutrofização da água doce/ <i>Eutrofização aquática (água doce)</i>	kg (P para água doce)	FEP	5,8E+08	7,5E+08	1,0E+09
Pot. I de toxicidade humana/ <i>Toxicidade humana</i>	kg (14-DCB para ar urbano)	HTP	2,8E+11	4,1E+11	7,3E+11
Pot. de radiação ionizante/ <i>Radiação ionizante</i>	kg (U ²³⁵ para o ar)	IRP	4,8E+10	7,0E+10	8,7E+10
Pot. de ecotoxicidade marinha/ <i>Ecotoxicidade aquática (marinha)</i>	kg (14-DCB para água)	METP	2,4E+09	3,7E+09	6,5E+09
Pot. de eutrofização marinha/ <i>Eutrofização aquática (marinha)</i>	kg (N para água)	MEP	2,1E+09	3,0E+09	5,1E+09
Pot. de depleção mineral/ <i>Depleção de recursos minerais</i>	kg (Fe)	MDP	1,3E+10	2,0E+10	3,5E+10
Pot. de transformação de terras naturais/ <i>Transformação da terra natural</i>	m ² (de terra natural)	NLTP	3,5E+08	5,6E+08	1,0E+09
Pot. de depleção do ozônio/ <i>Depleção de Ozonio</i>	kg (CFC-11 para o ar)	ODP	1,9E+04	2,9E+04	4,8E+04
Pot. de formação de matéria particulada/ <i>Formação de matéria particulada</i>	kg (PM ₁₀ para o ar)	PMFP	1,8E+09	2,5E+09	4,2E+09
Pot. de formação de oxidante fotoquímico/ <i>Formação de oxidantes fotoquímicos</i>	kg (NMVOC para o ar)	POFP	5,7E+09	8,0E+09	1,4E+10

Pot. de acidificação terrestre/ <i>Acidificação terrestre</i>	kg (SO ₂ para o ar)	TAP	4,4E+09	6,4E+09	1,1E+10
Pot. de ecotoxicidade terrestre/ <i>Ecotoxicidade terrestre</i>	kg (14-DCB para o solo)	TETP	2,9E+09	4,2E+09	7,3E+09
Pot. de ocupação de terras urbanas/ <i>Uso da terra urbana</i>	m ² x yr (de a terra urbana)	ULOP	4,1E+09	7,3E+09	1,3E+10
Pot. de depleção da água/ <i>Depleção da água</i>	m ³ (de água)	WDP	1,2E+11	1,8E+11	3,3E+11

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

6 CONCLUSÕES

Ao longo de toda esta tese, procurou-se discutir de modo crítico a situação do setor sucroalcooleiro do Brasil, pontuando os interesses declarados ou não, para que a produção do etanol se deslanchasse, sobretudo, a partir dos anos 1970. Portanto, é possível afirmar que, a tomada de decisão pelo etanol, advindo da cana-de-açúcar foi de natureza econômica, decorrente da crise do petróleo no mundo, da queda do preço do açúcar no mercado internacional, da necessidade de independência dos combustíveis fósseis e, ao mesmo tempo, trazer divisas para o país. Assim como também, foi por muita pressão dos usineiros e de agricultores para voltarem a ter lucros no setor. Esta conjuntura culminou com políticas governamentais e investimentos de aproximadamente R\$ 3 bilhões de reais para o setor.

Por sua vez, com a retirada do governo do programa Pró-Álcool, a iniciativa privada passou a investir no etanol por ver nele um forte potencial para rentabilidade e ainda com menor impacto ambiental, foco de grande preocupação do mundo todo, frente às mudanças climáticas e suas consequências tanto para o planeta quanto para o ser humano, ainda que isso signifique investir na proteção ambiental, muito mais para minimizar os grandes prejuízos econômicos trazidos pelas catástrofes do que por pura preservação da terra-pátria (MORIN, 2012). De uma maneira ou de outra, o programa RenovaBio, para atender o acordo de Paris, foi aprovado e seus números demonstram que o Brasil não está tão longe de alcançar as metas propostas. Entretanto, não se sabe quais serão as decisões que o novo presidente, eleito em novembro e que tomará posse em janeiro de 2019, e sua equipe tomarão com respeito a este programa ou mesmo ao Acordo de Paris.

É oportuno ratificar autores como Lorenzi (2018) e Rodrigues (2006), afirmando que, mesmo com a criação de centros de inovação e tecnologia no governo militar, a verdade é que o Brasil pouco investiu ou pensou em criar suas tecnologias, ficando apenas no consumo das importadas. É preciso, portanto, que o setor sucroalcooleiro e os governos estaduais e federal proporcionem condições de pesquisas sobre o uso de tecnologias, novas e as já em uso, tanto para confirmar quanto para garantir a posição do país na produção do etanol.

No tocante ao uso da otimização no setor, ao final desta pesquisa, pode-se concluir que a aplicação do modelo matemático proposto mostrou ser uma ferramenta útil para a análise das possibilidades de configurações da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil, bem como para inferir sobre as mudanças na atual rede que poderiam direcioná-la para uma das soluções ótimas apontadas pela resolução do problema.

O primeiro modelo utilizado teve apenas uma função objetivo representada pela função valor presente líquido, VPL. Esta formulação PLIM mostrou que a maior rentabilidade para a cadeia se dá quando não existe a exigência de suprimento das demandas pelos produtos principais nas regiões. Usando a capacidade média de produção das tecnologias envolvidas, a solução ótima para esta situação foi de US\$ 13.270.300.000,00, alocando apenas 183 indústrias na cadeia.

Os estados do Acre, Amapá, Roraima, Ceará, Paraíba, Piauí e Rio Grande do Norte tiveram suas demandas pelos três produtos principais totalmente negligenciadas. Outros estados como Rondônia, Pernambuco e Amazonas, por outro lado, tiveram suas demandas parcialmente supridas. Em geral, 77% da demanda é atendida por esta solução que, do ponto de vista econômico a que se propõe, é a melhor encontrada. Desta forma, a solução mostra qual seria a maior rentabilidade da rede. Entretanto, tal configuração deve ser abandonada, caso o foco esteja na satisfação dos consumidores, aqui representados pela demanda regional dos produtos.

Quanto a análise de sensibilidade do modelo, em que as demandas pelos produtos principais variam entre $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$, bem como a oferta de cana-de-açúcar, pode-se concluir que o modelo reage de forma coerente a cada variação executada.

A ampliação na capacidade de processamento, passando para 5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra, capacidade a qual grandes indústrias podem processar, também foi testada no modelo. Para esta situação, aproximadamente 78% da demanda é atendida pelas 94 indústrias apontadas pela solução, e um valor igual a US\$ 14.414.800.000,00 é obtido para VPL. Além da redução no número de indústrias, foi perceptível que o percentual de destilarias autônomas decresce a medida que um menor número de indústrias é indicado.

Já o problema multiobjetivo foi resolvido usando uma formulação bi-PLIM, buscando otimizar duas funções conflitantes, ou seja, maximizar a performance econômica representada pela função VPL e minimizar o impacto ambiental na cadeia, minimizando o GWP da mesma, considerando que as demandas das regiões pelos produtos principais devem ser atendidas. O método de restrição- ϵ foi empregado para a obtenção da fronteira de Pareto. Os dados presentes neste estudo de caso que alimentam o modelo proposto referem-se à cadeia de suprimentos sucroalcooleira brasileira e foram obtidos de formas variadas, a saber, literatura especializada, portais governamentais, pesquisa de campo e banco de dados do EcoInvent, para a avaliação de ciclo de vida.

O modelo considera 7 tecnologias de produção que produzem, um ou mais dos três produtos principais, açúcar branco, etanol anidro e etanol hidratado, além de produtos secundários como açúcar bruto, melado, óleo fúsel, que possuem valor econômico considerados no modelo, e os resíduos da produção, vinhaça e torta de filtro. Além disso, o modelo trabalha com dois tipos de centro de estocagem, um para os produtos sólidos e outro para os líquidos. O transporte dos produtos é feito por caminhões específicos para cada atividade, com suas particularidades consideradas. As exportações também são consideradas nas duas funções trabalhadas no modelo.

Com foco principal nas configurações das redes quanto à distribuição das tecnologias, foram discutidos três cenários, cujas características foram definidas. O primeiro cenário apresenta valor mínimo para a função ambiental, contudo, mostrou-se pouco atrativo por reduzir demasiadamente o valor econômico a ele associado. O segundo cenário mostra a configuração da rede com máxima *performance* econômica e, conseqüentemente, o maior nível de impacto, sendo esta a configuração com a menor quantidade de indústrias indicadas. O terceiro cenário mostra a solução balanceada para o problema, obtida ao usar a estratégia de *knee point*. Esta solução apresenta uma redução de, aproximadamente, 35% em ambas as funções envolvidas.

Percebe-se que as configurações obtidas são distintas, pois as tecnologias designadas são dependentes da opção por um resultado de maior rentabilidade ou de maior sustentabilidade ambiental, no entanto, as usinas mistas de tecnologias T3 e T4 são comumente utilizadas nos três cenários. A configuração atual da cadeia instalada foi comparada com as soluções obtidas e apontamentos sobre as mudanças necessárias para aproximá-la da solução ótima econômica e da solução balanceada foram sugeridos.

Os resultados obtidos provam que a rentabilidade e também o viés ecológico da rede, incluindo a produção de bioetanol e açúcar, estão disponíveis para melhorias na indústria brasileira de cana-de-açúcar. É importante destacar que as soluções ótimas apresentadas consideram os fatores econômicos e ambientais, e ambos os critérios podem ser significativamente melhorados com uma melhor concentração e seleção de tecnologia das indústrias instaladas.

Finalmente, pode-se afirmar que o modelo desenvolvido se mostrou adequado como uma ferramenta quantitativa para a tomada de decisão na área de projeto ideal e planejamento de cadeias de fornecimento de bioetanol, considerando, sempre, que os custos e o impacto do ciclo de vida da produção do etanol dependem do desenho completo da CS.

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A ciência se renova a cada estudo, a cada experiência feita, que, por sua vez, abrem lacunas de pesquisas que a impelem para novos horizontes, sobretudo na área interdisciplinar, cujas perspectivas são ampliadas e fortalecidas com conhecimentos diferenciados e especializados. Neste sentido, para futuras pesquisas, de modo a complementar os resultados obtidos até o momento, pode-se deixar alguns pontos:

- Incorporar uma perspectiva social sobre a cadeia de suprimentos avaliada, a fim de propor uma melhor distribuição regional das indústrias, oferecendo empregos para a população da região onde o setor canavieiro não está bem estabelecido.

- Uma vez localizada a posição específica de cada indústria, inserir as componentes de distância entre o cultivo e a indústria produtora, minimizando as rotas e inserindo os dados de transporte da matéria-prima dentro das regiões.

- Estudar o impacto ambiental da instalação de cada uma das tecnologias de plantas industriais trabalhadas, de forma que os resultados possam aprimorar o modelo.

O modelo também pode ser adaptado para outras cadeias de suprimento, por se tratar de um modelo robusto, disposto em três escalões - produção, armazenamento e transporte - itens elementares em qualquer cadeia de suprimento.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. 2. Ed. Rio de Janeiro, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, fev. 2009b.
- ALVARENGA, A.T. de et al. Histórico, fundamentos filosóficos e teóricos – metodológicos da interdisciplinaridade. IN: PHILLIPPI JUNIOR, Arlindo; SILVA NETO, Antônio José (ed.). **Interdisciplinaridade em ciência, tecnologia & inovação**. Barueri: Manole, 2011, p.3-68.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Editora Campus, 2007.
- ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. Tese de doutorado, Unicamp, Campinas-SP, 2002.
- ARROYO, J.E. C.; ARMENTANO, V. A. Genetic Local Search for Multiobjective Flowshop Scheduling Problems. *European Journal of Operational Research*. v. 167, p. 717-738, 2005.
- AZANIA, A. A.P. M. **Potencialidade herbicídica do óleo fúsel**. Tese de doutorado. UNESP-Campus de Jaboticabal, Jaboticabal-SP, 2007.
- AZAPAGIC, A.; CLIFT, R. The application of life cycle assessment to process optimization. *Computers & Chemical Engineering*. 1999, 23 (10), 1509–1526.
- BABAZADEH, R. et al. An integrated data envelopment analysis-mathematical programming approach to strategic biodiesel supply chain network design problem. *Journal of Cleaner Production*. v.147, p. 694-707, 2017.
- BALBO, A. R.; HOMEM, T. P. D.; SILVA, H. O. F. Métodos de Pontos Interiores e *Branch and Bound* em Problemas de Biomassa Residual da Cana-de-Açúcar. In: Congresso de Matemática Aplicada e Computacional da Região Sudeste, 2011, São Paulo. **Anais**, 2011, p. 1-10.
- BARRA, A. R. C. da et al. Óleo Fúsel: Caracterização e Aplicações. In **VII ENTEC – Encontro de Tecnologia da UNIUBE**. UNIUBE/Uberaba. 2011.
- BASSO, E. A.; TOGNATO, M. I. R.; MACOWSKI, D. H. Interdisciplinaridade e desenvolvimento na sociedade contemporânea. In: BASSO, E. A.; TOGNATO, M. I. R. (Orgs.). **Sociedade e desenvolvimento: diálogos interdisciplinares**. Campo Mourão: Fecilcam, 2015. p. 15-30.

- BAUMANN, H.; TILLMAN, A.M. *The Hitch Hiker's Guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application*. Lund: Studentlitteratur, 2004.
- BAZARAA, M. S., SHERALI, H. D., SHETTY, C. M. *Nonlinear programming: theory and algorithms*. John Wiley and Sons. 2006
- BRASIL (1975). Decreto-lei no 76.593, de 14 de novembro de 1975. **Diário Oficial da União** – seção 1 - 14/11/1975, Página 15257.
- BRASIL (1975). **Decreto MINTER n. 323, de 29/11/1978**. Disponível em: <<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/bra14330.pdf>> Acesso em 10 de nov. 2018.
- CARVALHO, A. L.; ANTUNES, C. H.; FREIRE, F. Economic-energy-environment analysis of prospective sugarcane bioethanol production in Brazil. *Applied Energy*. v. 181, p. 514-526, 2016.
- CAVALETT, O. et al. Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. *Clean Technologies and Environment Policy*. v. 14, p. 399–410, 2012.
- CAVALETT, O. et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. *International Journal Life Cycle Assessment*. v. 18, p. 647–658, 2013.
- CHAGAS, M.F., BONOMI, A., CAVALETT, O., Ethanol Life Cycle Inventory. *Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory (CTBE)*. 2015
- CHAUHAN, M. K. et al. Life cycle assessment of sugar industry: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 15, p. 3445-3453, 2011
- CHIEN-WEI, C. ;YUEYUE, F. Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. v. 48, Issue 1, p. 150-164.
- CLÍMACO, J. N., Alves, M. J. G. & Antunes, C. H. **Programação Linear Multiobjetivo: Do Modelo de Programação Linear Clássico à Consideração Explícita de Várias Funções Objectivo**. 1 ed. Imprensa da Universidade de Coimbra. Portugal: Coimbra, 2003.
- COHON, J. L. *Multiobjective Programing and Plannig*. Academic Press, New York. 1978.
- COLIN, E. C. Mathematical programming accelerates implementation of agro-industrial sugarcane complex. *European Journal of Operational Research*. v.199, p. 232–235, 2009.
- CORAZZA, I.C. **Reflexões sobre o papel das políticas ambientais e de ciência e tecnologia na modelagem de opções produtivas ‘mais limpas’ numa perspectiva evolucionista: um estudo sobre disposição da vinhaça**. Tese de Doutorado-Departamento de política científica e tecnológica. Instituto de Geociências, da Unicamp: Campinas, 2000.
- DAL-MAS, M. et al. Strategic design and investment capacity planning of the ethanol supply chain under price uncertainty. *Biomass and Bioenergy*. v. 35, n. 5, p. 2059-2071, 2011.

DANTZIG, G. B. *Programming in a linear structure, comptroller*. United States Air Force. Washington, D. C., 1949.

DAYLAN, B.; CILIZ, N. Life Cycle Assessment and environmental life cycle costing analysis of lignocellulosic bioethanol as an alternative transportation fuel. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 89, p. 578-587, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.059>>. Acesso em: 20 set. 2016.

DEB, K. **Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms**. John Wiley & Sons, Inc, 2001.

DÍAZ-DIAZ, M. A. D. **Análise do ciclo de vida do etanol brasileiro visando à certificação ambiental**. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

FANG-CHIH, C. et al. Life cycle assessment of bioethanol production from three feedstocks and two fermentation waste reutilization schemes. *Journal of Cleaner Production*. v. 143, p. 973-979, 2017.

FEI, Y. et al. Modeling of China's cassava-based bioethanol supply chain operation and coordination. *Energy*. v. 120, p. 217-228, 2017.

FERNANDES, J. P.T. **Abordagem Lexicográfica na Otimização da Operação de Usinas Hidrelétricas**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas, SP. 2015.

FLORENTINO, H. O.; VERGARA, E. R. ; SARTORI, M. M. P. Multiobjective optimization of economic balances of sugarcane harvest biomass. *Scientia Agricola*. 2008.

_____ et al. Modelo Matemático para plantio e colheita da cana-de-açúcar. In: 1º **CMAC-Sudeste**, 2013, p. 21-26.

FLORIANI, D. Marcos conceituais para o desenvolvimento da interdisciplinaridade. In: PHILIPPI JR., A.; TUCCI, C. E. M.; HOGAN, D. J.; NAVEGANTES, R. (orgs.). **Interdisciplinaridade em ciências ambientais**. São Paulo: Signus Editora, 2000, p. 95-107.

FONSECA, C. M. , FLEMING, P. J. An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. *Evolutionary Computation*, v. 3, n. 1, p. 1-16, 1995.

GHADERI, H. et al. A multi-objective robust possibilistic programming approach to sustainable switchgrass-based bioethanol supply chain network design. *Journal Cleaner Production*. v.179, p. 368-406, 2018.

GIAROLA, S. SHAH, N. BEZZO, F. A comprehensive approach to the design of ethanol supply chains including carbon trading effects. *Bioresource Technology*. v. 107, p. 175-185, 2012.

GOEDKOOP, M. et al. **ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level (Report I:**

Characterisation). 1 ed. Haia – Holanda: Ministerie van Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening em Milieubeheer, 2009. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/302559709_ReCiPE_2008_A_life_cycle_impact_assessment_method_which_comprises_harmonised_category_indicators_at_the_midpoint_and_the_endpoint_level Acesso em 20 nov. 2018.

GOMORY, R. E. Outline of an algorithm for integer solutions to linear programs. *Bulletin of the American Mathematical Society*, New York, v.64, p. 275-278, 1958.

GONELA, V et al. Stochastic optimization of sustainable hybrid generation bioethanol supply chains. *Transportation Research Part E- Logistics and transportation Review*, v. 77 p. 1–28, 2015.

GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. A novel MILP-based objective reduction method for multi-objective optimization: Application to environmental problems. *Computers & Chemical Engineering*. v. 35, n. 8, p. 1469-1477, 2011.

GUILLEN-GOSALBEZ, G.; GROSSMANN, I. E. Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty. *AIChE Journal*. v. 55 (1), 99–121.2009.

GURGEL, M. N. A. **Tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas / Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas: SP, 2012.

HANDFIELD, R. B.; NICHOLS, E. L. Jr. *Introduction to Supply Chain Management*. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1999.

JABBOUR, A. L. Understanding the genesis of green supply chain management: lessons from leading Brazilian companies. *Journal of Cleaner Production*. v. 87, p. 385-390, 2015.

JABBOUR, A. B. et al. Green supply chain practices and environmental performance in Brazil: Survey, case studies, and implications for B2B. *Industrial Marketing Management*. v. 66, p. 13–28, 2017.

JANK, M.S.; RODRIGUES, L. Dinâmica e agenda do setor sucroalcooleiro na próxima década. *Revista de Política Agrícola (Brazil)*. Oct-Nov-Dec, v. 16(4) p. 86-96,2007.

JENSEN, A.A., HOFFMAN, L., MOLLER, B.T., SCHMIDT, A., Life Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources. *Environmental Issues Series* v. 6, p. 12-14. 1997.

KHATIWADA. I., et al. Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable Energy*. v. 85, p. 371-386, 2016.

KOSTIN, A. M. et al. Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty. *Chemical Engineering Research and Design*. v. 90, p. 359–376, 2012.

_____. et al. Optimization-based approach for maximizing profitability of bioethanol supply chain in Brazil. *Computers & Chemical Engineering*. v.115, p. 121-132, 2018.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisão: Modelagem em Excel**. 2º ed.- 3º ed.- Rio de Janeiro: Elsevier, 321p, 2004.

LOBIANCO, A. T. M.; ÂNGULO-MEZA, L. Uma comparação de métodos de solução para problemas de programação linear multiobjetivo. *SPOLM*, 2007. Rio de Janeiro. p. 1-14.

LORENZI, B. R. **Etanol de Segunda Geração no Brasil: política e translações**. 2018. Tese. (Doutorado em Ciências Políticas) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Política da Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos-SP, 2018. 186p

MAEDA, F. **Influências do protocolo agroambiental do setor Sucroalcooleiro na produção de açúcar, álcool e Energia: estudo de caso em uma usina no interior do Estado de São Paulo**. Dissertação. UNESP-Campus de Botucatu. Botucatu-SP, 2012.

MASOUMIK, S. M. et al. Sustainable Supply Chain Design: A Configurational Approach. *Scientific World Journal*. p. 1-16, 2014.

MAVROTAS, G. Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, v. 213, p. 455–465, 2009.

MELE, F.D. et al. Multiobjective Model for More Sustainable Fuel Supply Chains. A case Study of the Sugar Cane Industry in Argentina. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50, 4939-4958.

MÉNDEZ, P.J.C. *Contribution to the development of efficient algorithms for solving complex single-objective and multi-objective optimization models*. Departament of Chemical Engineering, University Rovira i Virgili. Tese de Doutorado. Tarragona, 2014.

MORAES, E. F. **Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina cauê da cvrd**. Dissertação de Mestrado: Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

MORIN, E. **Educação e complexidade: os sete saberes e outros ensaios**. São Paulo: Cortez, 2002.

_____. **Os sete saberes necessários à educação do futuro**. 2ª ed. ver. São Paulo: Cortez; Brasília, DF: UNESCO, 2011b.

_____; KERN, A.B.. **Terra-pátria**. 6ª ed. Porto Alegre: Editora Sulina, 2011.

NOGUEIRA, M. A. F. S.; GARCIA, M.S. Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: estudo de caso de uma usina no município de Rio Brillhante. Mato Grosso do Sul. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**; v. 17. n.17. 2013.

OBERKAMPF, W.L., and M.F. BARONE. 2006. Measures of agreement between computation and experiment: validation metrics. *Journal of Computational Physics* 217: 5–36.

PANTUZA JÚNIOR, G. **Métodos de Otimização Multiobjetivo e de Simulação Aplicados ao Problema de Planejamento Operacional de Lavra em Minas de Céu Aberto.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 2011.

PAPONG, S.; MALAKUL P. Life-cycle energy and environmental analysis of bioethanol production from cassava in Thailand. *Bioresource Technology* . v.101, p. 112–118, 2010.

PARANHOS, S.B. (Ed.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização.** Campinas: Fundação Cargill, 1987.

PARDALOS, P., RESENDE, M. *Handbook of Applied Optimization.* Oxford University Press, New York, NY. 230p, 2002.

PATIL, A. G.; KOOLWAL, S. M.; BUTALA, H. D. Fusel oil: composition, removal and potential utilization. *International Sugar Journal*, Pune, v. 104, n. 1238, p. 51-63, 2002.

PELLEGRINI, M. C. **Inserção de Centrais Cogedoras a Bagaço de Cana no Parque Energético do Estado de São Paulo: Exemplo de Aplicação de Metodologia para Análise dos Aspectos Locacionais e de Integração Energética.** Tese de Mestrado- Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia – PIPGE- USP- São Paulo: São Paulo, 2002.

PEREIRA, G. W. **Aplicação da técnica de recozimento simulado em problemas de planejamento florestal multiobjetivo.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

PÉREZ, E.R., CARDOSO, D.R., FRANCO, D.W., 2001. Análise dos alcoóis, ésteres e compostos carbonílicos em amostras de óleo fúsel. *Quím. Nova*, 2001, v. 24, n. 1, p. 10–12.

PRADO, R.M., CAIONE, G., CAMPOS, C.N.S., Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013, Article ID 581984, 8 pages.

RABBANI, M. et al. Developing a sustainable supply chain optimization model for switchgrass-based bioenergy production: A case study. *Journal of Cleaner Production*. v. 200, p. 827-843, 2018.

RAMPAZZO, P. C. B. **Planejamento Hidrelétrico: Otimização Multiobjetivo e Abordagens Evolutivas.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Unicamp: Campinas, 2012.

RAVAGNANI, M. S. S.; RIGHETTO, A. R; MARQUINI, M. F. Improving Energetic Performance and Water Usage in an Industrial Ethanol Distillery. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 85, 1-7, 2007.

- RAVAGNANI, M. A. S. S et al. Anhydrous ethanol production by extractive distillation: A solvent case study. **Process Safety and Environmental Protection**. v. 8, p. 67–73. 2010.
- REN, J. et al. Life cycle cost optimization of biofuel supply chains under uncertainties based on interval linear programming. **Bioresource Technology**. v. 187, p. 6-13, 2015.
- RENÓ, M. L. G. et al. Sugarcane biorefineries: Case studies applied to the Brazilian sugar–alcohol industry. **Energy Conversion and Management**. v. 86, p. 981–991, 2014.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Edição dos Autores, 2009.
- ROCHA, L. **Análise integrada da utilização de CO₂ em destilarias de etanol para produção de biometanol no Brasil**. Departamento de Engenharia Química da UEM. Tese de Doutorado. Maringá, 2018.
- RODRIGUES, A. H. **Três patamares tecnológicos na produção de Etanol: a Usina do Proálcool, a Usina atual e a Usina do futuro**. Tese de Doutorado–Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006.
- ROSENTHAL, R. E., GAMS Development Corporation. 2006. Washington, DC, USA
GAMS- A User's Guide.
- ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Adubação: resíduos alternativos. Brasília, DF: EMBRAPA**, 2007. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html> Acesso em 10 ago. 2016.
- SANTOS, G. F. **Política energética e desigualdades regionais na economia brasileira**. – Tese de Doutorado-USP, São Paulo, SP. 2010.
- SAMPAIO, C. M. S. **Avaliação do Setor Sucroalcooleiro Brasileiro quanto ao atendimento a requisitos de sustentabilidade da produção de etanol combustível**. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.
- SAMPAIO, P. R. **Teoria, métodos e aplicações de otimização multiobjetivo**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- SEABRA, J. E. A. et al. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels, Bioproduction & Biorefining**. v. 5, p. 519–532, 2011.
- SHREVE, R., AUSTIN, G. **Chemical Process Industries**. McGraw Hill Professional, 1984.
- SIMCHI-LEVI, D., KAMINSKY, P., SIMCHI-LEVI, E. **Designing and Managing the Supply Chain. Concepts, Strategies, and Case Studies**. Irwin/McGraw-Hill, Boston, MA, 1999.

SILVA, S.S. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) do etano combustível: uma análise econômica, social e ambiental**. Dissertação (Mestrado em Economia Regional) – Centro de Estudos Sociais Aplicados, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

SILVA, G. **Aprendizado do etanol celulósico no Brasil: o caso do projeto DEDINI Hidrólise Rápida (DHR)**. Dissertação. (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) – Instituto de Ciências Geopolíticas da Universidade de Campinas, Campinas, São Paulo, 2013.

SILVA, R.O., et al. Multi-objective optimization of an industrial ethanol distillation system for vinasse reduction – A case study. *Journal of Cleaner Production*. 183, 956–963, 2018.
SONNEMANN, G.; CASTELLS, F.; SCHUHMACHER, M. *Integrated Life Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes*. London: Lewis Publishers, 2003.

STEUER, R. E. *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*. Wiley, New York: Wiley, 1986.

TOLENTINO, G. **Programação Linear Inteira Aplicada Ao Aproveitamento Do Palhão Da Cana-De-Açúcar**. Dissertação de Mestrado – UNESP – Campus de Botucatu. Botucatu, 2007.

TSIROPOULOS, I. et al.. . Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil. *International Journal of Life Cycle Assessment*. v. 19, p. 1049–1067, 2014.

VASCONCELOS, E. M. **Complexidade e pesquisa interdisciplinar. Epistemologia e metodologia operativa**. Petrópolis:Vozes, 2002.

VAN VELDHUIZEN, D. A; LAMONT, G. B. Multiobjective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art. *Evolutionary Computation*, v. 8, n. 2, p. 125 147, 2000.

VIANA, A. B. **Tratamento anaeróbio da vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55° C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2006.

VITTI, G. C.; OLIVEIRA, D. B. de; QUINTINO, T. A. Micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V. et al. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 121-138.

WANG, M. et al. Life Cycle Energy Analysis and Green house Gas Emission Implications of Brazilian Sugar Cane Production. *International Sugar Journal* . v. 10, n. 1317, pp. 526-545, 2008.

WAN-YU, L.; CHUNG-CHENG, L.; TSU-LEI, Y. Supply chain optimization of forest biomass electricity and bioethanol coproduction. *Energy*, v.1, n. 5, 2017.

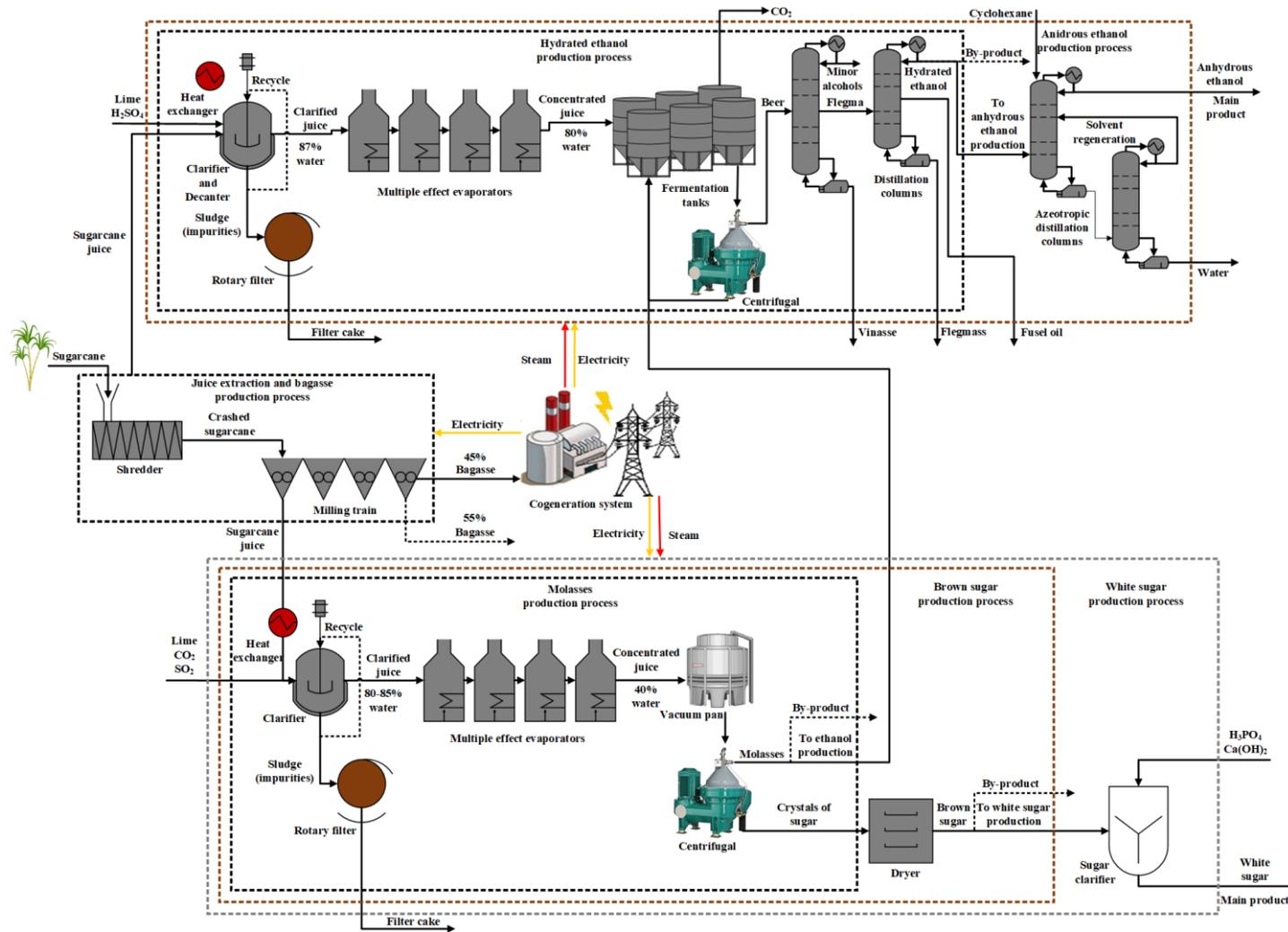
ZAMBONI, A. et al. Biofuels carbon footprints: Whole-systems optimisation for GHG emissions reduction. *Bioresource Technology*. v. 102, p. 7457–7465, 2011.

ZAPPAROLI, D.; SILVA, S. S. da. Desenho da Metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do Etanol Combustível pelo Método CML 2000 com SimaPRO. In: 3rd International workshop – Advances in cleaner production. 2011. São Paulo. **Anais**: São Paulo: Cleaner Production initiatives and challenges for a sustainable world.2011. p. 1-10.

ZITZLER, E. *Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: methods and applications*. PhD thesis, Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, Swiss, 1999.

APÊNDICES

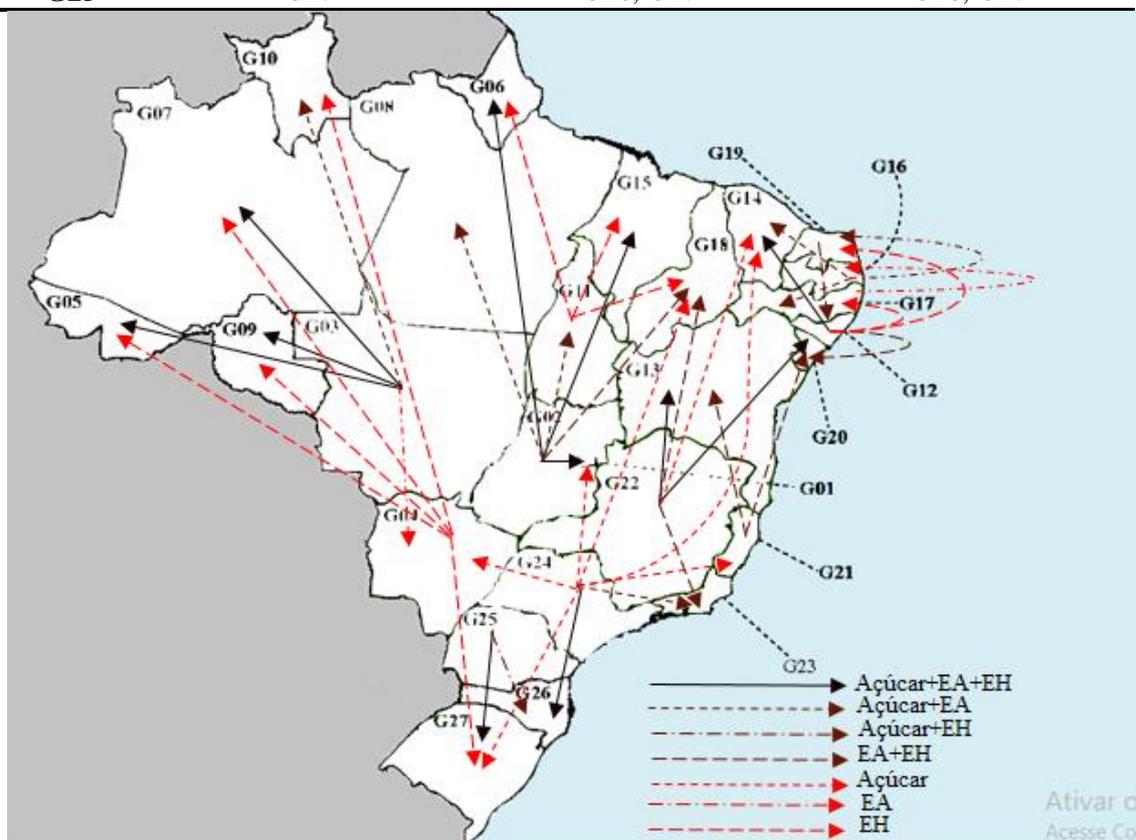
APÊNDICE A – PROCESSO INDUSTRIAL E OS LIMITES DO SISTEMA



APÊNDICE B – TRÁFEGO DE PRODUTOS PRINCIPAIS

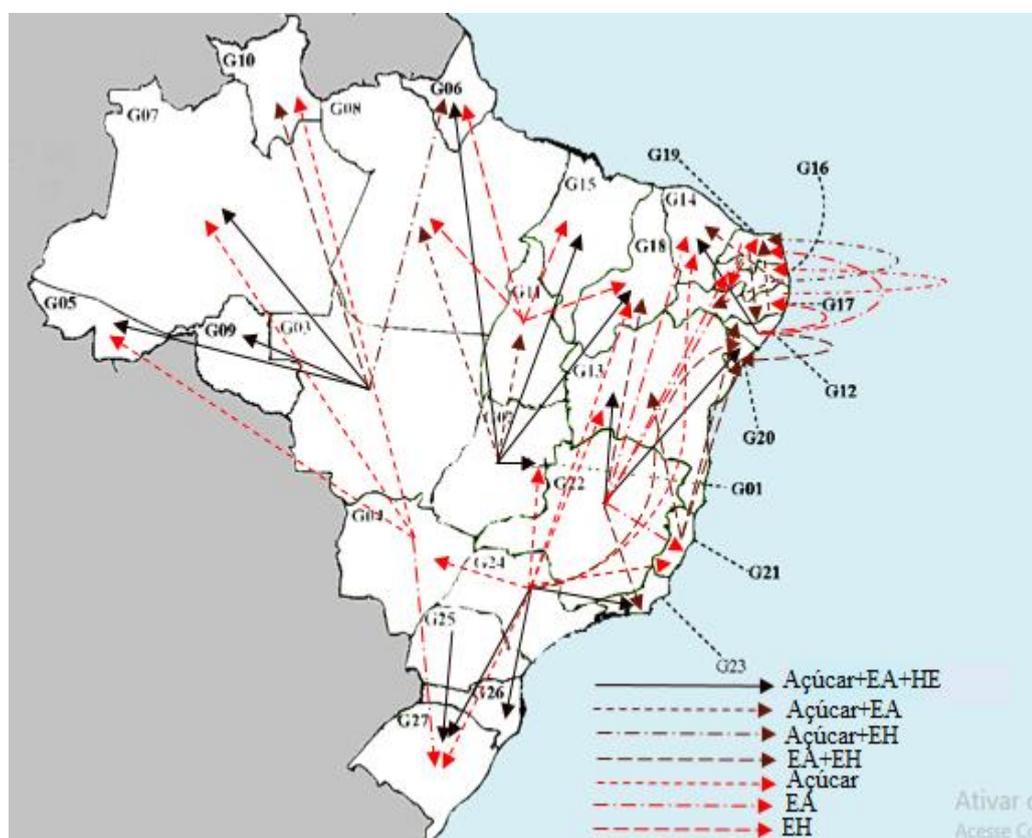
Solução minGWP

Produtor	Recebedor		
	Açúcar Branco	Anidro	Hidratado
G02	G01, G06, G08, G11 G15	G01, G06, G08, G11 G15, G18	G01, G06, G15, G18
G03	G05, G07, G09, G10	G04, G05, G06, G07 G09, G10	G05, G07, G09
G04			G05, G07, G09, G10 G27
G11			G06, G15, G18
G12	G14	G14, G20	G14, G17, G19, G20
G16	G14, G17, G19		G19
G17		G16, G19	
G19			G17
G21		G13, G20	G13, G20
G22	G13, G14, G20	G13, G18, G20, G23	G13, G18, G20, G23
G24	G01, G04, G14, G18 G21, G23, G26, G27	G23, G26	G26
G25	G27	G26, G27	G26, G27



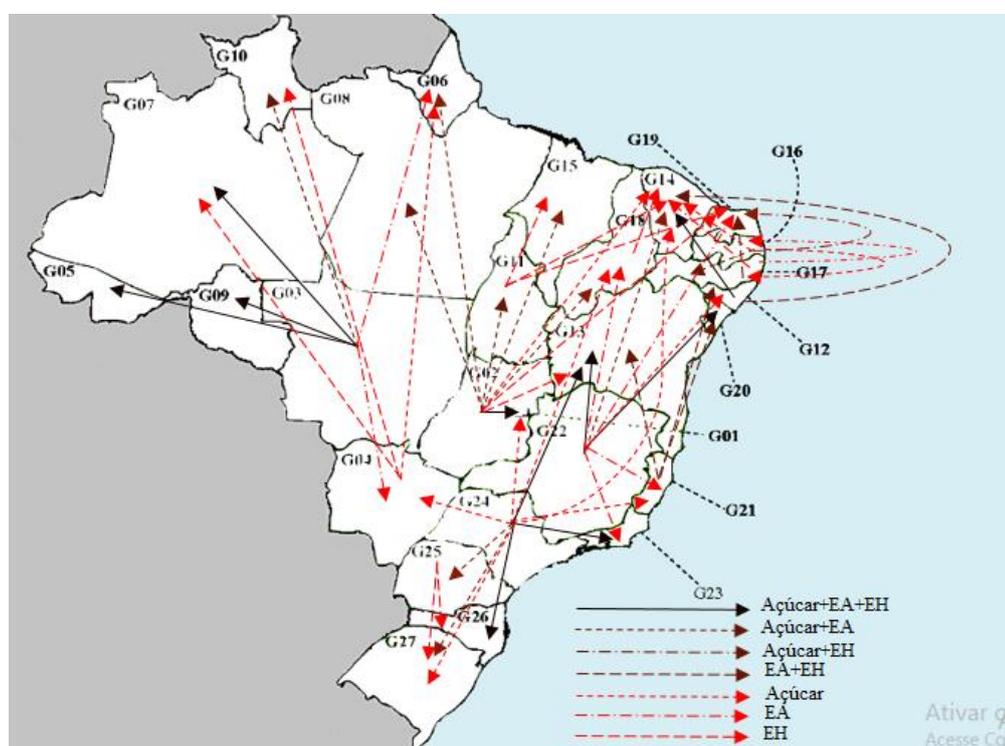
Solução Balanceada

Produtor	Recebedor		
	Açúcar Branco	Anidro	Hidratado
G02	G01, G06, G08, G11	G01, G06, G08, G11	G01, G06, G14, G15
	G15, G18	G14, G15, G18	G18
G03	G05, G07, G09	G05, G06, G07, G09	G05, G07, G09, G10
		G10	
G04	G05, G07, G10	G27	
G11			G06, G08, G15, G18
G12	G14	G14, G16	G14, G17
G16			G14, G17, G19
G17	G14, G19	G14, G16, G19	
G19	G16		G17
G21			G13, G17, G20
G22	G13, G20	G13, G14, G16, G19	G13, G17, G20, G23
		G20, G21, G23	
G24	G13, G14, G18, G20	G23, G26, G27	G23, G26, G27
	G21, G23, G26, G27		
G25	G27	G27	G27



Solução maxVPL

Produtor	Recebedor		
	Açúcar Branco	Anidro	Hidratado
G02	G01, G06, G08, G11 G14, G15, G18	G01, G06, G08, G11 G15, G18	G01, G13, G19
G03	G05, G07, G09, G10	G04, G05, G06, G07 G09, G10	G05, G07, G09
G04	G06		G07, G10
G08			G06, G14, G15
G11			G14, G15, G19
G12		G14	
G16	G14, G17, G19		G19
G17		G14, G16, G19	G19
G18			G14
G21			G12, G13, G20
G22	G12, G13, G14, G20	G13, G14, G18, G20 G21, G23	G12, G13, G20
G24	G14, G21, G23, G25 G26, G27	G02, G23, G25, G26 G27	G23, G26
G25			26, G27



APÊNDICE C – DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO

Escalares:

Limite superior de investimento de capital (US\$)	$FCI = 4,0E+10$
Percentual de salvamento (ou de recuperação)	$sv = 0,2$
Número de intervalos de tempo (anos)	$T = 4$
Período de armazenamento (dias)	$\beta = 10$
Percentual mínimo de produção desejado sobre a tecnologia instalada	$\tau = 0,0$
Taxa de impostos	$\varphi = 0,3$
Taxa de atratividade de investimento	$ir = 0,1$

Parâmetros:

Impostos com o aterro de resíduos $LT_{i,g}$

Resíduo	Custo (US\$)
Vinhaça	0,68
Torta de filtro	10,44

Coefficientes de investimento fixo de capital ($\alpha_{p,g,t}^{PL}$) e operacionais ($\beta_{p,g,t}^{PL}$) de cada tecnologia de produção p .

Tecnologia	$\alpha_{p,g,t}^{PL}$	$\beta_{p,g,t}^{PL}$
T1	4,302E+06	305
T2	1,797E+07	1165
T3	1,797E+07	782
T4	1,797E+07	881
T5	1,367E+07	860
T6	1,367E+07	577
T7	1,367E+07	478

Coefficientes de investimento fixo de capital ($\alpha_{p,g,t}^S$), custos operacionais ($\beta_{p,g,t}^S$) e limites de capacidade de armazenamento (\underline{SCap}_s e \overline{SCap}_s) das tecnologia s .

Tipo	$\alpha_{p,g,t}^S(US\$)$	$\alpha_{p,g,t}^S(US\$)$	$\underline{SCap}_s(t)$	$\overline{SCap}_s(t)$
S1	1,365E+07	46	250	5,0E+5
S2	1,523E+07	1523	200	4,0E+5

Demanda doméstica dos produtos ($SD_{i,g,t}$) e disponibilidade de cana-de-açúcar ($CapCrop_{g,t}$) - (t/ano)

Região (estado)	Sigla da região	Produto final				Cana-de-açúcar
		Açúcar branco	EA	EH	Melaço	
Distrito Federal	G01	145742	235954	88778	706	---
Goiás	G02	330534	308592	980202	1602	68992300
Mato Grosso	G03	163274	118723	552446	791	19965796
Mato Grosso do Sul	G04	132712	139440	183040	643	47645471
Acre	G05	40176	29482	5834	195	---
Amapá	G06	38334	32313	1732	186	---
Amazonas	G07	196917	129764	62094	954	289014
Pará	G08	408756	237891	41843	1981	918107
Rondônia	G09	88410	87628	23064	428	---
Roraima	G10	25283	26033	2293	123	---
Tocantins	G11	75756	73170	44787	367	1426186
Alagoas	G12	167047	89404	46377	809	24126666
Bahia	G13	760197	430358	401414	3684	6292606
Ceará	G14	445223	279610	136344	2157	969850
Maranhão	G15	345212	208304	45198	1673	2728486
Paraíba	G16	198610	139117	103939	962	6818623
Pernambuco	G17	467259	289165	220158	2264	15751184
Piauí	G18	160201	121820	30334	776	923526
Rio Grande do Norte	G19	172109	135459	54430	834	3519494
Sergipe	G20	112147	82043	35928	543	3293953
Espírito Santo	G21	196496	192373	49747	952	4095203
Minas Gerais	G22	1043455	901150	1407440	5056	69168300
Rio de Janeiro	G23	827501	573861	524809	4010	4153018
São Paulo	G24	2219824	1981329	7466944	10756	354889524
Paraná	G25	558151	544108	1335441	2705	47849968
Santa Catarina	G26	340060	537670	124135	1648	---
Rio Grande do Sul	G27	562399	734004	132429	2725	840671

Fonte: ÚNICA, adaptado pelo autor (2018).

Tabela. Coeficientes de balanço de material ($\rho_{p,i}$) e limites de produção para cada tecnologia ($PCap_p$ e $PCap_p$)

	Matérias primas, produtos e resíduos									Limites de produção (t x 10 ³ do produto principal por ano)	
	Cana-de-açúcar	Açúcar branco	Açúcar bruto	EA	EH	Melaço	Óleo fúsel	Vinhaça	Torta de filtro	Min.	Max.
T1	-14.59	1	0.751	0	0	0.73	0	0	0.44	10	100
T2	-25	1	0.750	0.31	0.776	0	0,002	16,80	0.88	10	280
T3	-21.18	0.85	0.636	0	1	0	0,002	11.98	0.74	10	150
T4	-25.01	1	0.751	0.96	0	0	0,002	13.45	0.88	10	100
T5	-18.08	0	0	0.73	1	0	0,003	13.34	1.41	10	100
T6	-12.06	0	0	1	0	0	0,002	11.99	0.42	10	50
T7	-10	0	0	0	1	0	0,002	11.76	0.36	10	100

Capacidade portuária - $TEA_{l,g,t}$ - (t/ano)

Produto	Região						
	G12	G16	G17	G21	G23	G34	G25
Açúcar branco	678361		187134			3976601	1005846
Açúcar bruto	1580451		435986			9264713	2343427
EA	93160	15336	32391	7166	23648	1005414	256119
EH	173012	28480	60155	13309	43918	1867198	475650
Melaço	795	131	276	61	202	8582	2186

Parâmetros usados para calcular os custos de capital e operacionais para diferentes modos de transporte

	Pesados	Médios	Tanque
Velocidade média (km/h) - SP_l	55	60	60
Capacidade (t/viagem) - $TCap_l$	57	25	20
Disponibilidade do transporte (horas/dia) - avl_l	18	18	18
Custo de investimento no transporte (US\$) - $TMC_{l,t}$	160000	130000	117000
Salário do motorista (US\$/h) - $DW_{l,t}$	10	10	10
Consumo de combustível (km/L) - FE_l	1.5	2.5	3
Preço do combustível (US\$/L) - $FP_{l,t}$	0,92	0,92	0,92
Despesas gerais (US\$/dia) - $GE_{l,t}$	16,3	16,3	12,2
Tempo de carga/descarga (h/viagem) - LUT_l	6	6	6
Despesas de manutenção (US\$/km) - ME_l	0,0976	0,0976	0,0976
Fluxo mínimo transportado (t/ano) - Q_l	57	25	20
Fluxo mínimo transportado (t/ano) - Q_l	2,50E+07	2,92E+07	1,64E+07

Preços dos produtos ($EPR_{i,b}$) e custo de frete ($FRC_{i,b}$) para os diferentes continentes (US\$/t)

Produto	Continente						
	Asia	Europa	América do Norte	América do Sul	América Central	Oceania	África
Açúcar branco							
Preço	890	720	740	592	667	835	653
Frete	319	184	201	89	148	276	141
Açúcar bruto							
Preço	785	614	634	484	561	732	548
Frete	319	184	201	89	148	276	141
EA							
Preço	1500	1204	1460	1000	1230	1300	1100
Frete	254	147	161	71	118	221	113
EH							
Preço	1400	1104	1360	900	1130	1200	1000
Frete	254	147	161	71	118	221	113
Melaço							
Preço	804	785	276	627	796	770	686
Frete	254	147	161	71	118	221	113

Custo unitário de armazenamento nas regiões $USC_{i,s,g,t}$ - (US\$/ton)

Tipo de armazém	Açúcar branco	Açúcar bruto	EA	EH	Melaço	Óleo Fúsel
S1	17	17	0	0	0	0
S2	0	0	300	300	300	300

Custo unitário de produção nas regiões $UPC_{i,p,g,t}$ - (U\$/ton)

Regiões	Açúcar branco	Açúcar bruto	EA	EH	Melaço	Óleo Fúsel
G01	259	252	490	451	193	451
G02	259	252	490	451	193	451
G03	259	252	490	451	193	451
G04	259	252	490	451	193	451
G05	292	284	490	451	218	451
G06	292	284	490	451	218	451
G07	292	284	490	451	218	451
G08	292	284	490	451	218	451
G09	292	284	490	451	218	451
G10	292	284	490	451	218	451
G11	292	284	490	451	218	451
G12	326	317	639	589	243	589
G13	326	317	639	589	243	589
G14	326	317	639	589	243	589
G15	326	317	639	589	243	589
G16	326	317	639	589	243	589
G17	326	317	639	589	243	589
G18	326	317	639	589	243	589
G19	326	317	639	589	243	589
G20	326	317	639	589	243	589
G21	259	252	490	451	193	451
G22	259	252	490	451	193	451
G23	259	252	490	451	193	451
G24	259	252	490	451	193	451
G25	259	252	490	451	193	451
G26	259	252	490	451	193	451
G27	259	252	490	451	193	451

Preços domésticos dos produtos nas regiões ($PR_{i,g,t}$) – (U\$/t)

Regiões	Açúcar branco	Açúcar bruto	EA	EH	Melaço	Óleo Fúsel
G01	379	0	729	641	341	510
G02	379	0	729	641	341	510
G03	379	0	729	641	512	510
G04	379	0	729	641	427	510
G05	379	0	748	658	341	523
G06	379	0	748	658	341	523
G07	379	0	748	658	341	523
G08	379	0	748	658	341	523
G09	379	0	748	658	341	523
G10	379	0	748	658	341	523
G11	379	0	748	658	341	523
G12	370	0	748	658	417	523
G13	365	0	748	658	417	523
G14	365	0	748	658	417	523
G15	365	0	748	658	417	523
G16	365	0	748	658	417	523
G17	360	0	748	658	417	523
G18	365	0	748	658	417	523
G19	365	0	748	658	246	523
G20	365	0	748	658	417	523
G21	321	0	693	610	265	485
G22	321	0	693	610	265	485
G23	321	0	693	610	265	485
G24	321	0	693	610	265	485
G25	321	0	693	610	265	485
G26	321	0	693	610	607	485
G27	321	0	693	610	436	485

APÊNDICE D – IMPACTOS NA FASE INDUSTRIAL

Impacto por tonelada de cana-de-açúcar processada na tecnologia T1

categoria de impacto	melaço	Açúcar bruto	Açúcar branco	TOTAL T1
ALOP (m ² a)	57,65	118,61	236,93	413,19
GWP (kg CO ₂ - Eq)	69,16	141,17	264,57	474,89
FDP (kg oil-Eq)	5,03	10,09	20,03	35,16
FETP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,76	1,54	3,07	5,37
FEP (kg P-Eq)	0,03	0,04	0,07	0,15
HTP (kg 1,4-DCB-Eq)	41,31	84,04	167,28	292,63
IRP (kg U ²³⁵ -Eq)	15,10	31,02	42,78	88,90
METP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,34	0,70	1,39	2,43
MEP (kg N-Eq)	0,26	0,51	0,99	1,76
MDP (kg Fe-Eq)	1,79	3,62	7,19	12,61
NLTP (m ²)	0,05	0,11	0,21	0,37
ODP (kg CFC-11-Eq)	0,00	0,00	0,00	0,00
PMFP (kg PM10-Eq)	0,20	0,40	0,79	1,39
POFP (kg NMVOC)	0,67	1,37	2,72	4,76
TAP (kg S ₀₂ -Eq)	0,43	0,88	1,75	3,07
TETP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,44	0,90	1,80	3,14
ULOP (m ² a)	0,57	1,16	2,32	4,04
WDP (m ³)	18,56	38,21	76,33	133,11

Impacto por tonelada de cana-de-açúcar processada na tecnologia T2

	Açúcar bruto	Açúcar branco	EH	EA	TOTAL T2
ALOP (m ² a)	69,13	138,27	48,49	19,37	275,26
GWP (kg CO ₂ - Eq)	82,28	154,40	219,51	87,73	543,91
FDP (kg oil-Eq)	5,88	11,69	9,81	27,68	55,06
FETP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,90	1,79	0,69	0,28	3,66
FEP (kg P-Eq)	0,04	0,06	0,22	0,09	0,41
HTP (kg 1,4-DCB-Eq)	48,98	97,63	37,98	15,18	199,76
IRP (kg U ²³⁵ -Eq)	18,08	24,97	1,14	0,45	44,64
METP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,41	0,81	0,34	0,14	1,69
MEP (kg N-Eq)	0,32	0,60	0,42	0,17	1,50
MDP (kg Fe-Eq)	2,11	4,20	1,96	0,78	9,05
NLTP (m ²)	0,06	0,12	0,04	0,02	0,25
ODP (kg CFC-11-Eq)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PMFP (kg PM10-Eq)	0,23	0,46	0,37	0,15	1,21
POFP (kg NMVOC)	0,80	1,59	1,11	0,44	3,94
TAP (kg S ₀₂ -Eq)	0,51	1,02	1,30	0,52	3,36
TETP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,53	1,05	0,37	0,15	2,09
ULOP (m ² a)	0,67	1,36	0,50	0,20	2,74
WDP (m ³)	22,27	44,55	15,55	6,21	88,59

Impacto por tonelada de cana-de-açúcar processada na tecnologia T3

	Açúcar bruto	Açúcar branco	EH	TOTAL T3
ALOP (m ² a)	69,20	138,72	73,75	281,67
GWP (kg CO ₂ - Eq)	82,36	154,90	259,58	496,84
FDP (kg oil-Eq)	5,89	11,73	14,92	32,54
FETP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,90	1,80	1,05	3,75
FEP (kg P-Eq)	0,04	0,06	0,25	0,34
HTP (kg 1,4-DCB-Eq)	49,03	97,94	57,76	204,73
IRP (kg U ²³⁵ -Eq)	18,10	25,05	1,73	44,88
METP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,41	0,81	0,52	1,73
MEP (kg N-Eq)	0,31	0,60	0,55	1,45
MDP (kg Fe-Eq)	2,11	4,21	2,98	9,31
NLTP (m ²)	0,06	0,12	0,07	0,25
ODP (kg CFC-11-Eq)	0,00	0,00	0,00	0,00
PMFP (kg PM10-Eq)	0,23	0,46	0,48	1,18
POFP (kg NMVOC)	0,80	1,59	1,48	3,88
TAP (kg S ₀₂ -Eq)	0,51	1,03	1,61	3,15
TETP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,53	1,06	0,56	2,14
ULOP (m ² a)	0,67	1,36	0,77	2,80
WDP (m ³)	22,30	44,69	23,65	90,64

Impacto por tonelada de cana-de-açúcar processada na tecnologia T4

Categorias de impacto	Açúcar bruto	Açúcar branco	EA	TOTAL T4
ALOP (m ² a)	69,18	138,20	45,62	253,00
GWP (kg CO ₂ - Eq)	82,34	154,32	221,91	458,57
FDP (kg oil-Eq)	5,89	11,68	65,19	82,76
FETP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,90	1,79	0,65	3,34
FEP (kg P-Eq)	0,05	0,08	0,23	0,36
HTP (kg 1,4-DCB-Eq)	49,01	97,58	35,75	182,34
IRP (kg U ²³⁵ -Eq)	18,09	24,96	1,07	44,12
METP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,41	0,81	0,32	1,53
MEP (kg N-Eq)	0,33	0,62	0,42	1,37
MDP (kg Fe-Eq)	2,11	4,20	1,85	8,15
NLTP (m ²)	0,06	0,12	0,04	0,23
ODP (kg CFC-11-Eq)	0,00	0,00	0,00	0,00
PMFP (kg PM10-Eq)	0,23	0,46	0,36	1,06
POFP (kg NMVOC)	0,80	1,59	1,10	3,48
TAP (kg S ₀₂ -Eq)	0,51	1,02	1,30	2,84
TETP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,53	1,05	0,35	1,92
ULOP (m ² a)	0,67	1,35	0,48	2,50
WDP (m ³)	22,29	44,52	14,63	81,44

Impacto por tonelada de cana-de-açúcar processada na tecnologia T5

Categorias de impacto	EH	EA	TOTAL T5
ALOP (m ² a)	86,40	63,08	149,48
GWP (kg CO ₂ - Eq)	420,26	306,93	727,20
FDP (kg oil-Eq)	17,48	90,15	107,62
FETP (kg 1,4-DCB-Eq)	1,23	0,90	2,13
FEP (kg P-Eq)	0,49	0,36	0,84
HTP (kg 1,4-DCB-Eq)	67,67	49,43	117,10
IRP (kg U ²³⁵ -Eq)	2,02	1,48	3,50
METP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,61	0,44	1,05
MEP (kg N-Eq)	0,86	0,63	1,49
MDP (kg Fe-Eq)	3,49	2,55	6,05
NLTP (m ²)	0,08	0,06	0,14
ODP (kg CFC-11-Eq)	0,00	0,00	0,00
PMFP (kg PM10-Eq)	0,69	0,50	1,19
POFP (kg NMVOC)	2,08	1,52	3,61
TAP (kg S ₀₂ -Eq)	2,47	1,80	4,27
TETP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,65	0,48	1,13
ULOP (m ² a)	0,90	0,66	1,56
WDP (m ³)	27,71	20,23	47,95

Impacto por tonelada de cana-de-açúcar processada na tecnologia T6

Categorias de impacto	EA	TOTAL T6
ALOP (m ² a)	129,54	129,54
GWP (kg CO ₂ - Eq)	457,21	457,21
FDP (kg oil-Eq)	185,11	185,11
FETP (kg 1,4-DCB-Eq)	1,85	1,85
FEP (kg P-Eq)	0,41	0,41
HTP (kg 1,4-DCB-Eq)	101,51	101,51
IRP (kg U ²³⁵ -Eq)	3,04	3,04
METP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,91	0,91
MEP (kg N-Eq)	0,92	0,92
MDP (kg Fe-Eq)	5,24	5,24
NLTP (m ²)	0,12	0,12
ODP (kg CFC-11-Eq)	0,00	0,00
PMFP (kg PM10-Eq)	0,84	0,84
POFP (kg NMVOC)	2,61	2,61
TAP (kg S ₀₂ -Eq)	2,83	2,83
TETP (kg 1,4-DCB-Eq)	0,98	0,98
ULOP (m ² a)	1,35	1,35
WDP (m ³)	41,55	41,55

Impacto por tonelada de cana-de-açúcar processada na tecnologia T6

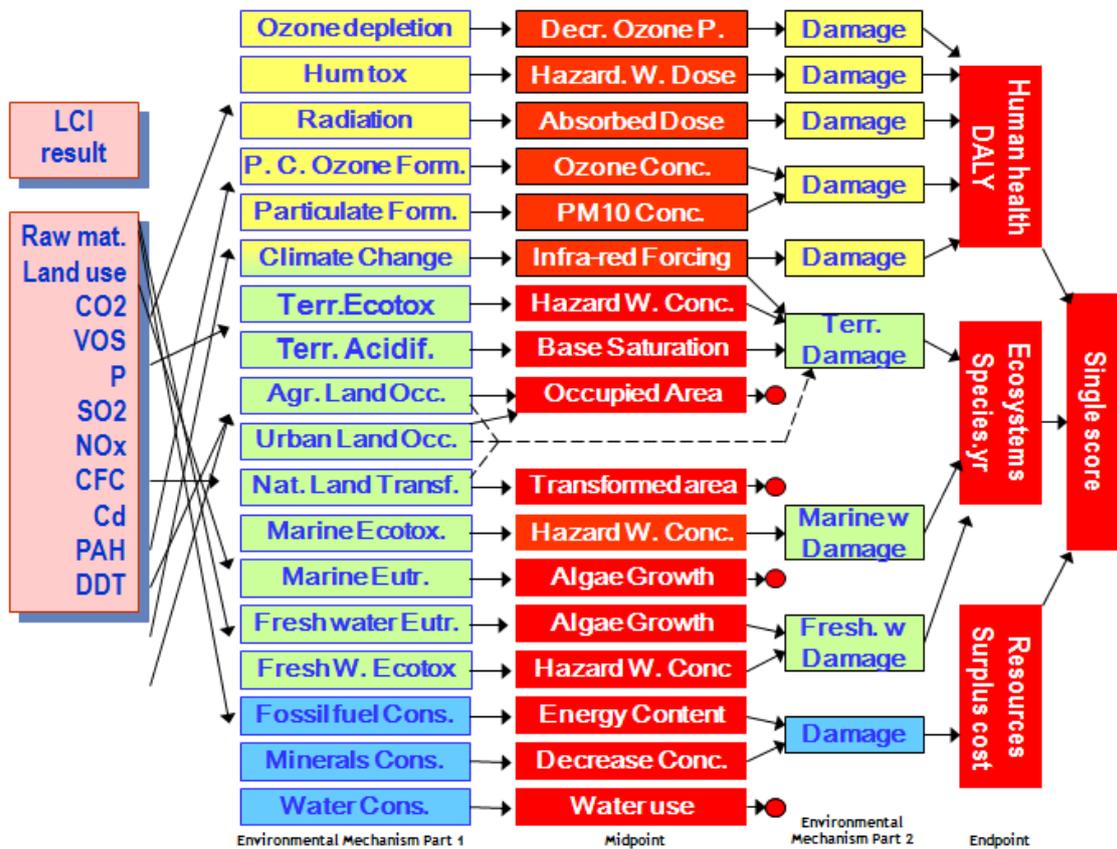
Categorias de impacto	EH	TOTAL T7
ALOP (m ² a)	156,21	156,21
GWP (kg CO ₂ - Eq)	543,65	543,65
FDP (kg oil-Eq)	31,60	31,60
FETP (kg 1,4-DCB-Eq)	2,22	2,22
FEP (kg P-Eq)	0,48	0,48
HTP (kg 1,4-DCB-Eq)	122,34	122,34
IRP (kg U ²³⁵ -Eq)	3,66	3,66
METP (kg 1,4-DCB-Eq)	1,10	1,10
MEP (kg N-Eq)	1,10	1,10
MDP (kg Fe-Eq)	6,32	6,32
NLTP (m ²)	0,14	0,14
ODP (kg CFC-11-Eq)	0,00	0,00
PMFP (kg PM10-Eq)	1,01	1,01
POFP (kg NMVOC)	3,13	3,13
TAP (kg SO ₂ -Eq)	3,37	3,37
TETP (kg 1,4-DCB-Eq)	1,18	1,18
ULOP (m ² a)	1,63	1,63
WDP (m ³)	50,10	50,10

Resumo do impacto em cada indicador de categoria nas 7 tecnologias

Categorias de impacto	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
ALOP (m ² a)	413,19	275,26	281,67	253,00	149,48	129,54	156,21
GWP (kg CO ₂ - Eq)	474,89	543,91	496,84	458,57	727,20	457,21	543,65
FDP (kg oil-Eq)	35,16	55,06	32,54	82,76	107,62	185,11	31,60
FETP (kg 1,4-DCB-Eq)	5,37	3,66	3,75	3,34	2,13	1,85	2,22
FEP (kg P-Eq)	0,15	0,41	0,34	0,36	0,84	0,41	0,48
HTP (kg 1,4-DCB-Eq)	292,63	199,76	204,73	182,34	117,10	101,51	122,34
IRP (kg U ²³⁵ -Eq)	88,90	44,64	44,88	44,12	3,50	3,04	3,66
METP (kg 1,4-DCB-Eq)	2,43	1,69	1,73	1,53	1,05	0,91	1,10
MEP (kg N-Eq)	1,76	1,50	1,45	1,37	1,49	0,92	1,10
MDP (kg Fe-Eq)	12,61	9,05	9,31	8,15	6,05	5,24	6,32
NLTP (m ²)	0,37	0,25	0,25	0,23	0,14	0,12	0,14
ODP (kg CFC-11-Eq)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PMFP (kg PM10-Eq)	1,39	1,21	1,18	1,06	1,19	0,84	1,01
POFP (kg NMVOC)	4,76	3,94	3,88	3,48	3,61	2,61	3,13
TAP (kg SO ₂ -Eq)	3,07	3,36	3,15	2,84	4,27	2,83	3,37
TETP (kg 1,4-DCB-Eq)	3,14	2,09	2,14	1,92	1,13	0,98	1,18
ULOP (m ² a)	4,04	2,74	2,80	2,50	1,56	1,35	1,63
WDP (m ³)	133,11	88,59	90,64	81,44	47,95	41,55	50,10

ANEXOS

ANEXO A – CATEGORIAS MIDPOINT E ENDPOINT PELO MÉTODO ReCiPe 2016.



Fonte: GOEDKOOPE, M. et al. (2009)