

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

Caroline Peyrot

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DO ETANOL
COMBUSTÍVEL COM ELEVADOS TEORES DE ÁGUA**

Santa Maria, RS

2018

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DO ETANOL COMBUSTÍVEL COM
ELEVADOS TEORES DE ÁGUA**

por

Caroline Peyrot
Engenheira Ambiental e Sanitarista

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da
Universidade Federal de Santa Maria, como parte dos requisitos necessários para a obtenção
do Título de

Mestra em Engenharia Química

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Ambientais e Industriais

Linha de Pesquisa: Engenharia de Processos de Separação e Valorização de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Hoffmann
Coorientador: Prof. Dr. Flávio Dias Mayer

Santa Maria, 20 de Março de 2018.

Peyrot, Caroline

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do etanol combustível
com elevados teores de água / Caroline Peyrot.- 2018.
113 p.; 30 cm

Orientador: Ronaldo Hoffmann

Coorientador: Flávio Dias Mayer

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química, RS, 2018

1. Avaliação do Ciclo de Vida 2. Etanol superhidratado
3. Eficiência Energética 4. Motor de combustão interna
5. Microdestilaria I. Hoffmann, Ronaldo II. Mayer,
Flávio Dias III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química**

A comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DO ETANOL COMBUSTÍVEL COM
ELEVADOS TEORES DE ÁGUA**

elaborada por
Caroline Peyrot

como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestra em Engenharia Química

COMISSÃO EXAMINADORA:

Ronaldo Hoffmann, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Flávio Dias Mayer, Dr. (UFSM)
(Coorientador)

Ênio Leandro Machado, Dr. (UNISC)

Nina Paula Gonçalves Salau, Dr^a. (UFSM)

Santa Maria, 20 de Março de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, meus pais Auri e Izete e meu irmão Marcos, pela dedicação, apoio, amor, conselhos e acima de tudo por me proporcionar a oportunidade de ascender ao conhecimento;

Ao meu orientador, professor Ronaldo Hoffmann, pela oportunidade e pelo auxílio nas atividades desenvolvidas;

Ao professor Flávio Dias Mayer pelas contribuições no desenvolvimento desse estudo;

Aos meus amigos e colegas Rosemar de Queiroz, Caroline Torres de Oliveira, Natana Schamchtenberg e Joceane Azolim pelo companheirismo, as conversas e momentos de distração, que serviram de estímulo no período de realização desse estudo;

À bolsista de Iniciação Científica, Paula Brondani Mucellini, pelo auxílio durante a pesquisa;

À ACV Brasil, pela autorização do uso do software SimaPro[®] 8;

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Ministério da Educação) pelo auxílio financeiro à pesquisa

A todos vocês, **MUITO OBRIGADA.**

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Universidade Federal de Santa Maria

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DO ETANOL COMBUSTÍVEL COM ELEVADOS TEORES DE ÁGUA

AUTORA: CAROLINE PEYROT
ORIENTADOR: PROF. DR. RONALDO HOFFMANN
SANTA MARIA, 20 DE MARÇO DE 2018

A produção em pequena escala de etanol combustível apresenta sérios problemas de eficiência energética ligados ao processo. No entanto, aumentar o teor de hidratação do etanol combustível propõe uma alternativa para melhorar o equilíbrio energético do processo de produção, e também reduzir emissões de GEE na queima do biocombustível sem comprometer o sistema operacional em máquinas térmicas. Uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e uma Análise de Eficiência Energética (AEE) foram realizadas para comparar e avaliar as etapas de produção industrial e uso final estacionário para o etanol combustível com teores de hidratação de 5%, 10%, 20% e 30% em composição volumétrica. O desempenho ambiental apontou delineamento de minimização de impacto ambiental superior a 25% nas categorias *respiratory organics* (-27%), *climate change* (-41%), *radiation* (-26%) e *land use* (-110%) do método de avaliação Eco-indicador 99. As métricas de eficiência NER (*Net Energy Ratio*) e NEB (*Net Energy Balance*) apresentaram excedente na razão de 1,3 e saldo 424,26 GJ, respectivamente, para o cenário de produção de etanol com 30% de hidratação e a utilização do bagaço (coproduto) na cogeração de energia térmica. A matéria-prima e a energia elétrica, nessa ordem, foram os fluxos responsáveis pela redução de impacto ambiental e melhor eficiência energética com o aumento da hidratação do etanol combustível. A comparação entre os combustíveis, nas duas avaliações realizadas, indicou que o melhor cenário para a produção em pequena escala e uso final em fonte fixa para a geração de energia elétrica foi observado para o combustível com 70% v/v de etanol e a utilização do bagaço na cogeração de energia térmica.

Palavras-chave: Impacto Ambiental; Eficiência energética; Etanol superhidratado; Pequena escala; Motor de combustão interna.

ABSTRACT

Master Thesis
Postgraduate Program in Chemical Engineering
Universidade Federal de Santa Maria

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF FUEL ETHANOL WITH HIGH WATER CONTENTS

AUTHORA: CAROLINE PEYROT
ADVISOR: PROF. DR. RONALDO HOFFMANN
SANTA MARIA, 20 DE MARÇO DE 2018

The small-scale production of fuel ethanol has serious process-related energy efficiency problems. However, increasing the hydration content of fuel ethanol proposes an alternative to improve the energy balance of the production process, and also reduce GHG emissions in the burning of biofuel without compromising the operating system in thermal machines. A Life Cycle Assessment (LCA) and Energy Efficiency Analysis (EEA) were performed to compare and evaluate the stages of industrial production and stationary end use for fuel ethanol with hydration levels of 5%, 10%, 20% and 30% in volumetric composition. The environmental performance indicated a design of environmental impact minimization of over 25% in the categories respiratory organics (-27%), climate change (-41%), radiation (-26%) and land use (-110%) Eco-indicator 99. NER (Net Energy Ratio) and NEB (Net Energy Balance) efficiency metrics showed a surplus of 1.3 and a balance of 424.26 GJ, respectively, for the ethanol production scenario with 30% of hydration and the use of bagasse (co-product) in thermal energy cogeneration. The raw material and the electric energy, in this order, were the flows responsible for the reduction of environmental impact and better energy efficiency with the increase of the hydration of the fuel ethanol. The comparison of fuels in the two evaluations carried out indicated that the best scenario for small-scale production and fixed-source final use for electric power generation was observed for 70% v / v ethanol fuel and the use of the bagasse in thermal energy cogeneration.

Keywords: Environmental impact; Energy Efficiency; Wet ethanol; Small-scale; Internal combustion engine.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Rotas tecnológicas para a produção de etanol de diferentes biomassas. | 18 |
| Figura 2.2– Esquema simplificado de uma coluna de destilação operando em regime de alimentação descontínuo (a) e uma coluna de destilação (A) e de retificação (B) em regime de alimentação contínuo (b)..... | 22 |
| Figura 2.3 – Fluxograma do sistema de produção de etanol de cana-de-açúcar..... | 22 |
| Figura 2.4 – Esquema simplificado de classificação de fronteira de sistema. | 32 |
| Figura 2.5 – Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida. | 34 |
| Figura 2.6 – Exemplo de processos elementares dentro de um sistema de produto. | 37 |
| Figura 2.7 – Procedimentos simplificados para análise de inventário..... | 37 |
| Figura 2.8 – Elementos obrigatórios e opcionais no desenvolvimento de uma ACV. | 38 |
| Figura 2.9 – Exemplo de abordagem <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> (<i>Damage categories</i>) do método de avaliação <i>Impact 2002+</i> | 40 |
| Figura 2.10 – Níveis de regressão em um sistema de produção de biocombustíveis. | 43 |
| Figura 3.1 – Regressão linear para o calor latente de vaporização do álcool. | 50 |
| Figura 4.1 – Fronteira de sistema..... | 61 |
| Figura 4.2 – Método: Eco-indicador 99 (H) V. 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E95W5... | 66 |
| Figura 4.3 – Método: Eco-indicador 99 (H) V 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E90W10.. | 67 |
| Figura 4.4 – Método: Eco-indicador 99 (H) V 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E80W20.. | 68 |
| Figura 4.5 – Método: Eco-indicador 99 (H) V 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E70W30.. | 69 |
| Figura 4.6 – Método: Eco-indicador 99 (H) V 2.10/ Europe H/A/ Caracterização/ Comparação entre os teores de hidratação de 5% a 30% v/v de água. | 71 |
| Figura 5.1– Operações unitárias desenvolvidas na PPE. | 82 |
| Figura 5.2 – Curvas de dispersão dos resultados para NER (a) e NEB (b) nos Cenários 2 e 3. | 87 |
| Figura 5.3 – Relação nos cenários avaliados entre a energia de entrada e saída com maior representação..... | 89 |
| Figura 5.4 – GWP de 1 MJ de energia gerada de acordo com o teor de hidratação do etanol combustível. | 90 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1– Propriedades do etanol anidro e hidratado para comercialização..... | 23 |
| Tabela 2.2– Dados de eficiência por operação unitária em pequena e larga escala de produção de etanol combustível. | 26 |
| Tabela 3.1 – Dados de estrutura física, insumos e rendimento das operações unitárias da microdestilaria da UFSM. | 47 |
| Tabela 3.2 – Resultados da destilação para as cinco misturas de etanol combustível. | 48 |
| Tabela 3.3 – Percentual de consumo de energia elétrica. | 49 |
| Tabela 3.4 – Calor latente de vaporização do etanol combustível. | 50 |
| Tabela 3.5 – Percentual de rendimento da destilação para o etanol combustível com hidratação de 5% v/v a 30% v/v de água. | 51 |
| Tabela 3.6 – Características do motor SI..... | 52 |
| Tabela 3.7 – Informações de operação, eficiência e emissões de GEE para o etanol combustível com hidratação de 5% v/v a 30% v/v de água. | 52 |
| Tabela 3.8 – Categorias de impacto ambiental do Eco-indicador 99. | 53 |
| Tabela 3.9 – Nomenclatura dos fluxos adaptados ao SimaPro [®] 8.3.0.0 <i>Faculty</i> | 54 |
| Tabela 4.1 – Inventário de ciclo de vida para cada teor de hidratação do etanol combustível. | 62 |
| Tabela 5.1 – Inventário de emissões específicas do conjunto motor + gerador para 1000 horas de operação. | 81 |
| Tabela 5.2 – Descrição das entradas e saídas do processo industrial da PPE para cada teor de hidratação do etanol combustível. | 83 |
| Tabela 5.3 – Coeficientes energéticos utilizados na AEE. | 84 |
| Tabela 5.4 – Análise de eficiência energética do processo industrial da PPE..... | 86 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|---|----|
| Equação 4.1 – Água de diluição..... | 63 |
| Equação 4.2 – Calor sensível do vinho..... | 63 |
| Equação 4.3 – Calor de vaporização do etanol..... | 64 |
| Equação 4.4 – Calor total..... | 64 |
| Equação 4.5 – Massa de vapor total..... | 64 |
| Equação 5.1 – <i>Net Energy Ratio</i> | 80 |
| Equação 5.2 – <i>Net Energy Balance</i> | 81 |
| Equação 5.3 – Água de diluição..... | 84 |
| Equação 5.4 – Massa de vapor total..... | 85 |
| Equação 5.5 – Calor total..... | 85 |
| Equação 5.6 – Calor sensível do vinho..... | 85 |
| Equação 5.7 – Calor de vaporização do etanol..... | 85 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----------------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACV | Avaliação do Ciclo de Vida |
| ACVE | Avaliação de Ciclo de Vida Energético |
| AE | Análise Energética |
| AEE | Análise de Eficiência Energética |
| AICV | Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida |
| ANP | Agência Nacional de Óleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| BSFC | Consumo de combustível específico do freio – do inglês Brake Specific Fuel Consumption |
| CI | Ignição por compressão – do inglês <i>Compression Ignition</i> |
| CML | <i>Center of Environmental Science of Leiden University</i> |
| CO | Monóxido de Carbono |
| CO₂ | Dióxido de Carbono |
| E95W5 | Mistura de etanol superhidratado com concentração volumétrica de 95% de etanol e 5% de água |
| E90W10 | Mistura de etanol superhidratado com concentração volumétrica de 90% de etanol e 10% de água |
| E80W20 | Mistura de etanol superhidratado com concentração volumétrica de 80% de etanol e 20% de água |
| E70W30 | Mistura de etanol superhidratado com concentração volumétrica de 70% de etanol e 30% de água |
| GEE | Gases de efeito estufa |
| GL | Gay-Lussac |
| GPMOT | Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões |
| HC | Hidrocarbonetos |
| HCCI | Ignição por compressão de carga homogênea – do inglês <i>Homogeneous Charge Compression Ignition</i> |
| LHV | Poder calorífico inferior – do inglês <i>Lower Heating Value</i> |
| ICV | Inventário do Ciclo de Vida |
| IFIAS | <i>International Federation of Institutes for Advanced Study</i> |
| ISO | International Organization for Standardization |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |

| | |
|-----------------------|--|
| NEB | <i>Net Energy Balance</i> |
| NEF | <i>Net Energy Fator</i> |
| NEP | Net Energy Production |
| NER | <i>Net Energy Ratio</i> |
| NEV | <i>Net Energy Values</i> |
| NO_x | Óxidos de Nitrogênio |
| PER | <i>Petroleum Energy Ratio</i> |
| PPE | Produção em pequena escala |
| ppm | Partes por milhão |
| SI | Ignição por centelha – do inglês <i>Spark Ignition</i> |
| SSEP | Planta de produção de etanol em pequena escala |
| rpm | Rotação por minuto |
| RS | Rio Grande do Sul |
| RTE | Requisitos Totais de Energia |
| EU | União Europeia |
| UFSM | Universidade Federal de Santa Maria |
| USA | Estados Unidos da América |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 | MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO | 13 |
| 1.2 | OBJETIVO GERAL | 15 |
| 1.2.1 | Objetivos específicos | 15 |
| 1.3 | Estrutura da dissertação..... | 15 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 2.1 | PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE ETANOL COMBUSTÍVEL | 18 |
| 2.1.1 | Moagem | 19 |
| 2.1.2 | Tratamento do caldo | 19 |
| 2.1.3 | Fermentação..... | 20 |
| 2.1.4 | Destilação | 21 |
| 2.2 | USO DE ETANOL HIDRATADO E SUPERHIDRATADO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA | 26 |
| 2.3 | AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA..... | 31 |
| 2.3.1 | Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida | 34 |
| 2.3.1.1 | Definição de objetivo e escopo..... | 34 |
| 2.3.1.2 | Análise de inventário do ciclo de vida (ICV) | 36 |
| 2.3.1.3 | Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) | 38 |
| 2.3.1.4 | Interpretação | 40 |
| 2.4 | ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA | 41 |
| 3 | ESTUDO DE CASO | 45 |
| 3.1 | PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO | 45 |
| 3.1.1 | Etapa industrial | 45 |
| 3.1.1.1 | Referências bibliográficas utilizadas para o cálculo de insumos do ICV..... | 48 |
| 3.1.2 | Etapa de uso final..... | 51 |
| 3.2 | MODELO E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO..... | 53 |
| 4 | AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM ETANOL SUPERHIDRATADO | 56 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | 57 |
| 4.2 | MATERIAL E MÉTODOS | 59 |
| 4.2.1 | Definição do objetivo | 59 |
| 4.2.2 | Definição do escopo | 59 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2.3 | Inventário do ciclo de vida (ICV) | 61 |
| 4.2.3.1 | Processo industrial | 62 |
| 4.2.3.2 | Uso final | 64 |
| 4.2.4 | Avaliação e interpretação do impacto do ciclo de vida..... | 65 |
| 4.3 | RESULTADOS | 65 |
| 4.4 | CONCLUSÃO..... | 73 |
| 4.5 | Agradecimentos | 74 |
| 4.6 | Referências | 74 |
| 5 | AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL DO ETANOL HIDRATADO E SUPERHIDRATADO APLICADA A UMA DESTILARIA EM PEQUENA ESCALA | 77 |
| 5.1 | INTRODUÇÃO..... | 78 |
| 5.2 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 80 |
| 5.2.1 | Coleta de dados | 82 |
| 5.3 | RESULTADOS | 86 |
| 5.4 | CONCLUSÃO..... | 91 |
| 5.5 | AGRADECIMENTOS | 92 |
| 5.6 | REFERÊNCIAS | 92 |
| 6 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 96 |
| 7 | CONCLUSÃO | 98 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 100 |
| | APÊNDICES | 106 |
| | Apêndice A – Método: Eco-indicador 99 (H) V. 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E95W5 em unidades equivalentes. | 106 |
| | Apêndice B – Método: Eco-indicador 99 (H) V. 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E90W10 em unidades equivalentes. | 107 |
| | Apêndice C – Método: Eco-indicador 99 (H) V. 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E80W20 em unidades equivalentes. | 109 |
| | Apêndice D – Método: Eco-indicador 99 (H) V. 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E70W30 em unidades equivalentes. | 111 |
| | Apêndice E – Método: Eco-indicador 99 (H) V. 2.10/ Europe H/A/ Caracterização/ Comparação entre os teores de hidratação de 5% a 30% v/v de água em unidades equivalentes. | 113 |

1 INTRODUÇÃO

Essa seção descreve a motivação da aplicação de uma Avaliação do Ciclo de Vida ao estudo de diferentes concentrações de água no etanol combustível, os objetivos pretendidos e uma sucinta explicação da estrutura em artigos para periódicos na qual se baseia esse trabalho.

1.1 MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO

A renovação no setor energético por fontes alternativas atrativas economicamente e ambientalmente menos impactantes incentivam as pesquisas por novas fontes de energia primária e/ou meios de melhorar o balanço energético e minimizar o potencial de impacto ambiental das que compõe a matriz de oferta. Os biocombustíveis líquidos são, principalmente no setor de transportes, um exemplo de recurso energético renovável que reduz a dependência de fontes fósseis, diversifica a matriz energética, e tem menor potencial de impacto ambiental vinculado ao seu ciclo de vida.

A produção mundial de biocombustíveis líquidos, em 2016, foi estimada em 128,4 bilhões de litros, desse total o etanol combustível somou 98,3 bilhões de litros e o biodiesel 30,1 bilhões de litros (REN21, 2017). No Brasil o etanol combustível representa segurança energética como um recurso sustentável, que atua como fonte renovável substituta aos combustíveis fósseis e desenvolve a economia. Em 2016, a cadeia nacional de biocombustíveis líquidos representou 20,1% da matriz de energia no setor de transportes, onde o etanol correspondeu a 16,8% e o biodiesel a 3,3% (EPE, 2017).

A representação do etanol combustível na oferta de energia primária, concomitante com a busca por desenvolvimento na cadeia de produção dos biocombustíveis e as críticas vinculadas a real sustentabilidade em longo prazo, vem expandindo a aplicação de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e de Análises de Eficiência Energética (AEE), com o objetivo de identificar rotas de aperfeiçoamento tecnológico na produção, no beneficiamento e na aplicação do combustível, além de qualificar o impacto ambiental vinculado às áreas de proteção (saúde humana, ecossistema e recursos naturais).

Estudos realizados apontam que o consumo de energia para obtenção de etanol combustível com concentração volumétrica entre 80% e 99% cresce exponencialmente, enquanto que para composições até 80% o gasto energético é linear, e com base nesse comportamento a produção de etanol combustível com maior percentual de água na

composição resultaria em uma economia de energia nos processos finais da etapa industrial (destilação e desidratação), tornado o balanço energético mais atrativo (BREAUX et al., 2011; FLOWERS et al., 2007). Em paralelo, testes experimentais de bancada com máquinas térmicas alimentadas com etanol com maior teor de hidratação, ou etanol superhidratado, revelam aumento de parâmetros de desempenho e a redução de emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono (CO) com o aumento do teor de água na composição do etanol combustível (SAXENA et al., 2012; MACK et al., 2009; MUNISIN et al., 2013).

A possibilidade de aperfeiçoar a produção do etanol combustível, compreendendo as duas linhas de interesse principal, econômico e ambiental, a partir de otimização de processo unitário (destilação e desidratação), e a indicação de redução de emissões de GEE, apresentam a dois estágios da cadeia de produção do etanol combustível oportunidade de melhorar o desempenho energético com potencial de mitigação de impacto ambiental associado. A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida se apresenta como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, por meio do mapeamento dos aspectos ambientais e sua classificação em magnitude de impacto ambiental, que permite verificar o efeito global de uma intervenção no meio ambiente.

No Brasil, a cadeia de produção de etanol combustível baseia-se na agroindústria canavieira extensiva, centralizada na região sudeste e centro-oeste, que em conjunto somam 87% da capacidade instalada (EPE, 2017). Em contraste a esse cenário, estados como o Rio Grande do Sul que apresentam estrutura fundiária de pequenas propriedades e condições edafoclimáticas desfavoráveis a produção da principal matéria-prima, cana-de-açúcar, são insuficientes na produção do combustível para a demanda interna, e necessitam importar de outras regiões o etanol combustível (MAYER, 2010; ROCHA et al., 2014). Uma medida para solucionar o problema interno de regiões insuficientes na produção de etanol combustível é a descentralização da produção, com incentivo ao desenvolvimento em pequena escala. No entanto, as plantas de produção em pequena escala apresentam problemas relacionados à eficiência energética global do processo (MAYER et al, 2015a).

Nesse contexto, o presente estudo relacionou: a produção de um recurso energético renovável; a possibilidade de aperfeiçoamento do processo produtivo; o potencial de mitigação de impacto ambiental inerente à produção e uso final; e a oportunidade de melhorar a eficiência energética da produção em pequena escala. A partir da aplicação de uma Avaliação do Ciclo de Vida e uma Análise de Eficiência Energética compreendendo a produção industrial em pequena escala e uso final para misturas de etanol combustível com elevado teor de hidratação.

1.2 OBJETIVO GERAL

Identificar e comparar os impactos ambientais da produção e uso, em motor estacionário de combustão interna de etanol combustível com elevados teores de hidratação, no intervalo de 70% v/v a 95% v/v de etanol, visando a produção de energia elétrica.

1.2.1 Objetivos específicos

- i. Elaborar o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) do processo de produção industrial e combustão em fonte estacionária para geração de energia elétrica de quatro diferentes percentuais de hidratação do etanol de cana-de-açúcar, nas proporções: 95% v/v de etanol e 5% v/v de água (E95W5); 90% v/v de etanol e 10% v/v de água (E90W10); 80% v/v de etanol e 20 % v/v de água (E80W20); e 70% v/v de etanol e 30% v/v de água (E70W30);
- ii. Identificar os fatores responsáveis pelo impacto ambiental nas categorias selecionadas, mediante a interpretação dos resultados da classificação e caracterização realizada no software SimaPro[®] 8.3.0.0 *Faculty*;
- iii. Aplicar a AEE no processo de produção em pequena escala de etanol de cana-de-açúcar nas proporções especificadas, e avaliar diferentes cenários;
- iv. Estabelecer comparação em potencial de impacto e métricas de eficiência energética entre os combustíveis;
- v. Avaliar diferentes cenários de produção do etanol combustível, nos teores hidroalcológicos estabelecidos, e dessa forma apontar o cenário ideal, que proporciona melhor desempenho energético e, portanto, menores efeitos adversos ao meio ambiente.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo é composto por 7 capítulos, sendo os resultados mostrados no formato de estudo de caso e artigos submetidos para publicação ou em tramite de submissão.

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

O capítulo introdutório apresenta os principais dados e as questões que delinearão o desenvolvimento de uma ACV e uma AEE para a produção industrial e uso de etanol com elevado teor de hidratação, compreendendo a importância do estudo e a definição dos objetivos.

Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A segunda seção descreve os principais conceitos e referências envolvidos no tema da pesquisa. É desenvolvida uma revisão sobre o processo de produção industrial de etanol de cana-de-açúcar, com ênfase na produção em pequena escala; um breve resumo dos principais estudos sobre características de desempenho e emissões de motores de combustão interna operando com etanol acima de 5% v/v de água na composição; conceitos e estrutura de uma Avaliação do Ciclo de Vida; e por último a apresentação de conceitos e aplicações de uma Avaliação de Eficiência Energética.

Capítulo 3 – ESTUDO DE CASO

A terceira seção apresenta o modelo de fronteira (portão-túmulo) submetido à avaliação ambiental e de eficiência energética, destacando os procedimentos de cálculos realizados, os métodos de classificação e caracterização para a ACV, e os indicadores de eficiência energéticos selecionados para aplicação da AEE.

Capítulo 4 – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM ETANOL SUPERHIDRATADO

O quarto capítulo é referente à aplicação da ACV, com abordagem (portão-túmulo) para os combustíveis com 95% v/v, 90% v/v, 80% v/v e 70% v/v de etanol, com os fluxos mássicos e energéticos de entrada e saída classificados e caracterizados pelo método de avaliação Eco-indicador 99. Os resultados mostraram que o aumento da hidratação no etanol combustível reflete em mitigação de impactos ambientais, mais acentuados nas categorias de uso do solo (*land use*), alterações climáticas (*climate change*) e respiratórios orgânicos (*respiratory organic*).

Capítulo 5 – AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL DE ETANOL HIDRATADO E SUPERHIDRATADO: APLICADO A DESTILARIA EM PEQUENA ESCALA

A quinta seção apresenta a AEE da etapa industrial de produção em pequena escala de etanol combustível com 95% em composição volumétrica, e cenários de produção para combustíveis com 90% v/v, 80% v/v e 70% v/v de etanol. Os indicadores NER (*Net Energy Ratio*) e NEB (*Net Energy Balance*) foram aplicados aos fluxos energéticos de entrada e saída, referente à aplicação da AEE. Uma avaliação do potencial de aquecimento global foi realizada para a utilização das misturas combustíveis em fonte fixa, com o objetivo de gerar energia elétrica. O método de avaliação utilizado foi o CML 2 *Baseline* 2000. Os resultados demonstraram que o aumento da hidratação no produto final da planta de destilação melhora os resultados dos indicadores energéticos, além, de contribuir com a mitigação na categoria de potencial de aquecimento global.

Capítulo 6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo expõe uma breve discussão a respeito dos dois capítulos anteriores, relacionando os resultados obtidos individualmente.

Capítulo 7 – CONCLUSÃO

O último capítulo apresenta os principais resultados obtidos com a ACV e AEE realizadas para os diferentes teores de hidratação do etanol combustível, salientando a importância do uso de diferentes indicadores para compor uma interpretação final.

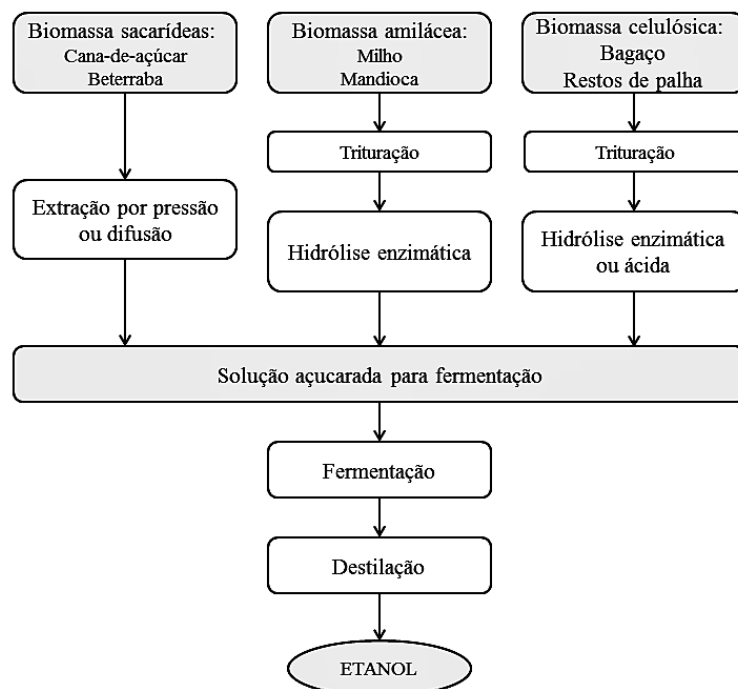
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o embasamento teórico necessário sobre os métodos e o tema abordados neste trabalho. Os seguintes tópicos estruturam essa seção: produção industrial de etanol combustível; uso de etanol hidratado e superhidratado em máquinas térmicas; conceitos e princípios para o desenvolvimento de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); e definições e orientações na aplicação de uma Análise de Eficiência Energética (AEE).

2.1 PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE ETANOL COMBUSTÍVEL

O etanol combustível pode ser produzido a partir de qualquer biomassa que contenha quantidades significativas de amido ou açúcares. A Figura 2.1 apresenta, resumidamente, as tecnologias empregadas para obtenção de etanol de acordo com a matéria-prima selecionada (BNDES, 2008).

Figura 2.1 – Rotas tecnológicas para a produção de etanol de diferentes biomassas.



Fonte: Adaptada de BNDES (BNDES, 2008, p. 71).

A base na matriz energética nacional de combustíveis líquidos renováveis procede, principalmente, da produção de etanol de primeira geração, ou seja, a partir da sacarose de cana-de-açúcar.

Molini (2010) apresenta, de modo geral, quatro operações unitárias no processo industrial de fabrico de etanol combustível de cana-de-açúcar, sendo descritas a seguir:

2.1.1 Moagem

Nessa etapa, a cana-de-açúcar passa por picadores que a trituram em colmos sem perda de caldo, uma vez que a cana-de-açúcar é apenas aberta para o processo de moagem. Os colmos de cana são então encaminhados para a moenda, onde são submetidos a uma pressão de aproximadamente 250 kg/cm², que retira o caldo do interior das células. O processo de passagem pelos rolos da moenda é repetido por algumas vezes (ternos de moenda em sequência), com o acréscimo de água no processo, com a finalidade de diluir o açúcar no interior das células da cana-de-açúcar, essa ação é conhecida como embebição e aumenta a eficiência da extração (CHIEPPE JÚNIOR, 2012).

A moagem resulta em dois produtos finais: (1) CALDO que é direcionado as etapas posteriores; e (2) BAGAÇO que pode ser usado na cogeração de energia no próprio processo (combustível para caldeira), ou usos agrícolas (alimentação e forragem de solo), ou ainda, descartados como resíduo (BNDES, 2008; CASTRO, 2012).

Em plantas de larga escala de produção de etanol e açúcar, a entrada da cana-de-açúcar, nessa etapa do processo de produção, passa por lavagem da matéria-prima (cana-de-açúcar inteira) para retirada de solo e demais impurezas, proveniente da colheita. Em sistemas de pequena escala de produção esse processo não é realizado.

2.1.2 Tratamento do caldo

O caldo extraído na etapa anterior é submetido a um processo de tratamento que inclui cinco estágios, que são descritos por Ribeiro et al. (1999), com o objetivo de remover impurezas grosseiras e coloidais:

- i. Peneiramento: Esse processo de tratamento físico tem como objetivo remover impurezas grosseiras presentes no caldo, como restos de colmos de bagaço, areia e solo oriundos da etapa de colheita e moagem, evitando possíveis entupimentos e desgaste em equipamentos subsequentes;

- ii. Caleagem: Essa etapa consiste em submeter o caldo a um tratamento químico para ajuste do pH, que favorece o processo de floculação e decantação em sequência. A faixa ótima de pH do caldo para operação varia entre 5,5 a 5,8, sendo essa ordem descrita como responsável por menor remoção de nutrientes, reduzir o potencial corrosivo e de microrganismos, além de favorecer a floculação de partícula coloidais;
- iii. Aquecimento: Esse processo tem como finalidade o aquecimento do caldo, até 105 °C, para eliminação de gases presentes por ebulição e auxiliar na esterilização de microrganismos presentes no líquido, que retardariam a etapa de fermentação;
- iv. Decantação: Esse processo de separação gravimétrico tem o intuito de clarificar o caldo, removendo microrganismos e demais materiais floculados;
- v. Concentração do caldo: Essa etapa tem o propósito de elevar a concentração de açúcares, por meio de aquecimento do caldo a 115 °C, o que contribui para a evaporação da água, além de beneficiar a eliminação de bactérias concorrentes com as adicionadas na fermentação (CHIEPPE JÚNIOR, 2012).

Uma vez terminado o tratamento, ocorre o preparo do mosto, que é a mistura de caldo tratado (clarificado), melão e água. Essa etapa consiste em preparar as condições para a fermentação, como regular a vazão (ou batelada), grau Brix (teor de açúcar) e resfriar o mosto a temperatura de 30 °C aproximadamente, que é a condição de operação nas dornas de fermentação (BNDES, 2008; CHIEPPE JÚNIOR, 2012; MOLINI, 2010; CASTRO, 2012).

2.1.3 Fermentação

O caldo tratado ou mosto encaminhado às dornas de fermentação passa por reações químicas, realizadas através de enzimas produzidas por microrganismos, que transformam a glicose (açúcar) em álcool e CO₂, dando origem ao vinho (com concentração entre 7%–10% de álcool) (BNDES, 2008; MOLINI, 2010; CASTRO, 2012).

No início desta etapa do processo é adicionado o inóculo que auxilia no processo fermentativo, também chamado de pé de cuba, que consiste na adição leveduras, geralmente da espécie *Saccharomyces cerevisiae*, que realizam a transformação do mosto em vinho (RIBEIRO, 1999; CASTRO, 2012).

A maioria das destilarias emprega o processo de recuperação de leveduras adicionadas na fermentação, sendo conhecida como fermentação Melle-Boinot, que recupera as leveduras

presentes no vinho por meio de centrifugação e, desse modo, podem ser tratadas e reutilizadas no processo (BNDES, 2008).

2.1.4 Destilação

O vinho, formado na etapa anterior, é encaminhado para as colunas de destilação e desidratação para separação, concentração e retificação (CHIEPPE JÚNIOR, 2012). De acordo com Ribeiro (1999), o vinho resultante da fermentação apresenta composição com componentes líquidos, sólidos e gasosos, agrupados em substâncias voláteis (álcoois, água, aldeídos, ácido acético) e fixas (extrato do mosto, células de leveduras e bactérias).

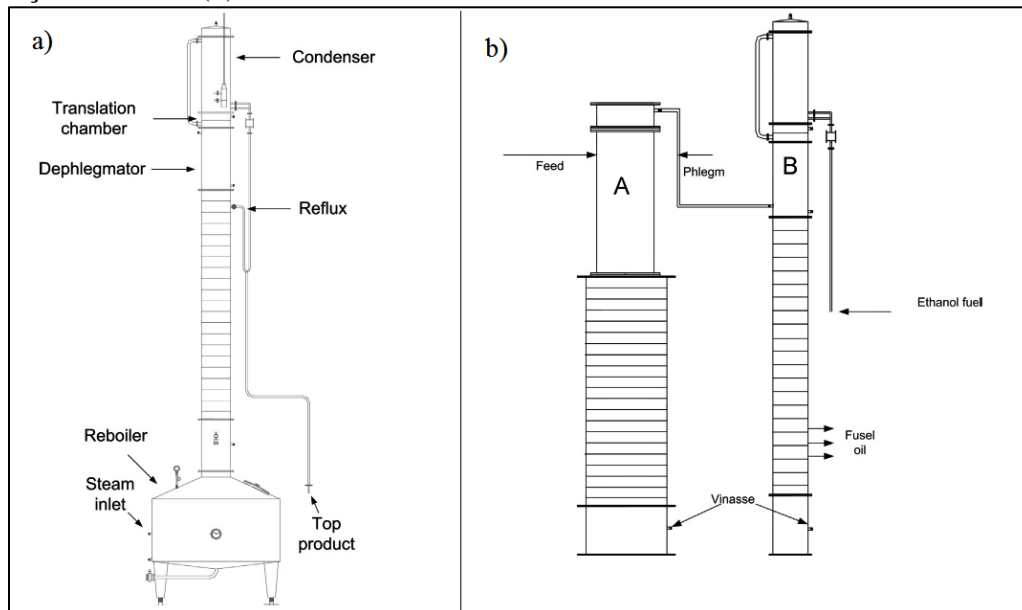
A coluna de destilação tem o objetivo de retirar a maior quantidade de álcool do seu produto de fundo (vinhaça ou vinhoto), com base na diferença entre os pontos de ebulição das substâncias (MOLINI, 2010; CASTRO, 2012). Na destilação, uma fase vapor entra em contato com uma fase líquida, e ocorre a transferência de massa do líquido para o vapor e vice e versa e, desse modo, consegue-se concentrar os componentes voláteis de interesse (álcool) no vapor, que são condensados no topo da coluna, enquanto os menos voláteis e fixos se concentram no líquido de fundo da coluna (FOUST et al., 1982; RIBEIRO, 1999). O produto de topo recuperado na coluna de destilação é a forma hidratada do etanol combustível, que corresponde a aproximadamente 96° GL (Gay-Lussac) em composição de volume (BNDES, 2008).

O processo de destilação é classificado em dois regimes operacionais de alimentação:

- i. Contínuo: Operação classificada como permanente, ou seja, as condições de vazão de entrada e saída não tem variação no tempo, apenas nos estágios de equilíbrio internos (pratos) da coluna (FOUST et al., 1982);
- ii. Descontínuo (ou batelada): Operação classificada como transiente, ou seja, as condições de vazão sofrem alteração no tempo. Uma vez que a carga de entrada é injetada na coluna o produto de interesse é recolhido no topo, e a remoção do produto de fundo da coluna só ocorre após o término do processo de fracionamento (FOUST et al., 1982).

A Figura 2.2 apresenta um esquema simplificado de um sistema de destilação em regime descontínuo e outro sistema contínuo.

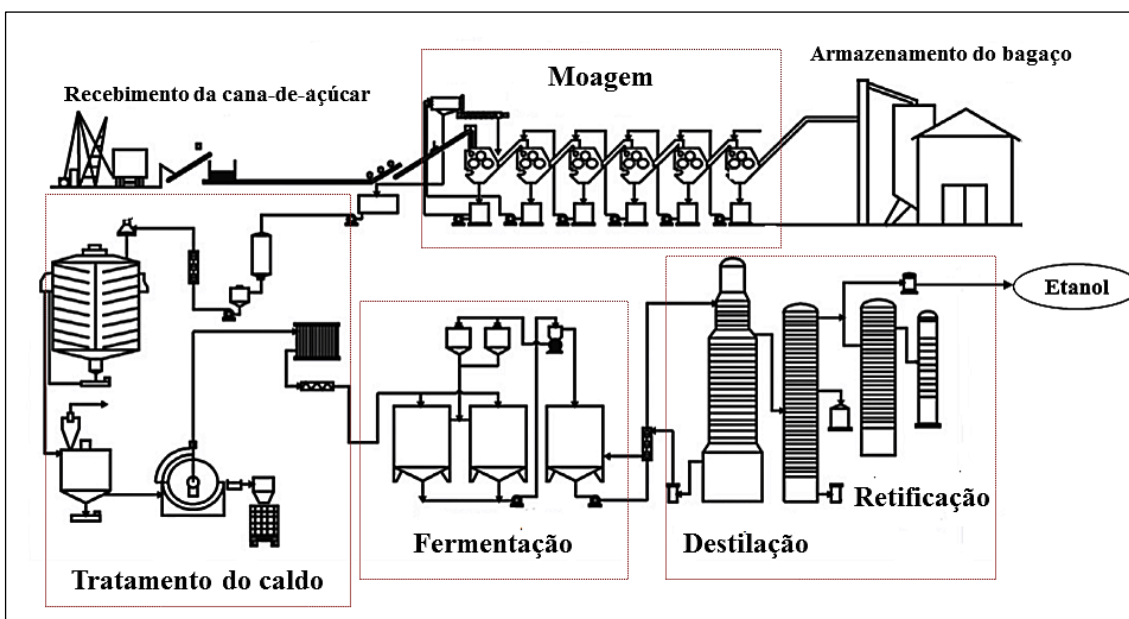
Figura 2.2– Esquema simplificado de uma coluna de destilação operando em regime de alimentação descontínuo (a) e uma coluna de destilação (A) e de retificação (B) em regime de alimentação contínuo (b).



Fonte: (MAYER et al., 2015a, p. 692).

A sequência de operações unitárias, resumidamente descritas acima, é representada no fluxograma interativo da Figura 2.3, que representa uma planta de produção de etanol combustível a partir de cana-de-açúcar com regime de operação contínuo.

Figura 2.3 – Fluxograma do sistema de produção de etanol de cana-de-açúcar.



Fonte: Adaptada de Rocha et al. (ROCHA et al., 2014, p. 440).

O processo de beneficiamento da cana-de-açúcar a etanol combustível gera subprodutos com valor agregado, como: bagaço na etapa de moagem; torta de filtro na etapa de tratamento do caldo; e a vinhaça nas etapas de destilação. Esses subprodutos apresentam potencial de reutilização na própria planta de produção para a cogeração de energia elétrica ou térmica (bagaço), e como fertilizante substituto ou auxiliar nos tratos agrícolas da matéria-prima (torta de filtro e vinhaça) (BNDES, 2008; MOLINI, 2010; CASTRO, 2012; MAYER et al., 2015a).

A Agência Nacional de Óleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por meio da Resolução nº 19 de 15 de abril de 2015 (ANP, 2015), determina as propriedades que o etanol combustível precisa atender para ser comercializado no país, sendo apresentadas na Tabela 2.1. A regulamentação vigente apenas estabelece padrões de qualidade para o etanol anidro e hidratado, no entanto para produções de autoconsumo não são estabelecidos parâmetros legais.

Tabela 2.1– Propriedades do etanol anidro e hidratado para comercialização.

| Propriedade | Etanol Anidro | Etanol hidratado |
|--|----------------------|-------------------------|
| Acidez total (mg/L) | 30 | 30 |
| Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{m}$) | 300 | 300 |
| Massa específica a 20°C (kg/m^3) | 791,5 máx. | 805,2 a 811,2 |
| Teor alcoólico (% massa) | 99,3 mín. | 92,5 a 94,6 |
| Teor de etanol, mín. (% volume) | 98,0 | 94,5 |
| Teor de água, máx. (% massa) | 0,7 | 7,5 |
| Teor de metanol, máx. (% volume) | 0,5 | 0,5 |
| Resíduos por evaporação, máx. (mg/100 mL) | 5 | 5 |
| Teor de hidrocarbonetos, máx. (% volume) | 3 | 3 |
| Teor de cloreto, máx. (mg/kg) | 1 | 1 |
| Teor de sulfato, máx. (mg/kg) | 4 | 4 |
| Teor de ferro, máx. (mg/kg) | 5 | 5 |
| Teor de sódio, máx. (mg/kg) | 2 | 2 |
| Teor de cobre, máx. (mg/kg) | 0,07 | - |

Fonte: Adaptada de ANP (ANP, 2015).

Como apresentado no Capítulo 1, a produção nacional que abastece o mercado de etanol combustível se concentra em alguns estados do país em usinas com produção

individual ou concomitante dos dois produtos da cana-de-açúcar: etanol (anidro e hidratado) e açúcar.

A centralização da produção de um recurso energético, com aplicação e consumo em todo o território nacional, ocasiona aos estados não suficientes em atender a sua demanda interna a necessidade de importar de outras regiões o combustível, para suprir o mercado. Essa logística de mercado acarreta em altos custos econômicos, sendo que a descentralização, por meio de produção de etanol em pequena escala, vem ao encontro do objetivo de abastecer a demanda interna, como também estimular a economia local, através inclusão do pequeno proprietário rural na cadeia de produção (ELBEHRI et al., 2013; DUFEY et al., 2011; MAYER et al., 2015a; MAYER et al., 2015; FORE et al., 2011; DHILLON et al., 2012).

A produção de etanol em pequena escala, segundo Mayer et al. (2015a) ganhou impulso com a criação, em 1975, do programa governamental PROÁLCOOL, que apresentou esse sistema de produção como um meio de suprir a demanda interna do combustível e garantir a suficiência energética para o agricultor. De acordo com Maroun e Rovere (2014), a inserção do pequeno produtor na cadeia de produção de biocombustíveis também está previsto como um objetivo do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), criado em 2004.

No Brasil não existe delimitação específica para classificar uma planta de produção de etanol, no entanto, Hoffmann (1985) propôs uma classificação relacionada apenas à produção diária do combustível em destilarias, dividindo-as em três escalas: MACRO com produção superior a 60.000 litros por dia ($L.d^{-1}$); MINI com produção entre 5.000 e 60.000 $L.d^{-1}$; e MICRO com produção inferior a 5.000 $L.d^{-1}$.

Fore et al. (2011), Bruins e Sanders (2012), Maroun e Rovere (2014), Mayer (2015 a), Mayer et al. (2015) e Elbehri et al. (2013) listam e classificam as vantagens do processamento em pequena escala de etanol combustível em três eixos principais, sucintamente descritos a seguir:

- **Econômico:** O processamento descentralizado de etanol ajuda a reduzir custos inerentes a logística de transporte da matéria-prima até o beneficiamento e até o distribuidor do produto (etanol), o que colabora na manutenção da política de preços exercida sobre o produto final. O processo de produção em plantas de pequena escala exigem equipamentos com menor tecnologia e menor capacidade de operação, o que reduz o investimento na construção da estrutura física necessária. Os coprodutos gerados no processo, bagaço e vinhaça, possuem valor agregado e podem se reutilizados na propriedade como fertilizantes e na alimentação animal. Além de que,

a inserção da cana-de-açúcar como cultivar na propriedade e a tecnologia inserida em uma pequena planta de produção de etanol, também permite que agricultor produza e comercialize outros produtos diretos da matéria-prima, como açúcar mascavo, xarope de cana-de-açúcar e aguardente;

- Social: A produção de etanol em micro destilarias atua como um vetor de inclusão social de agricultores em novos empreendimentos no campo (SANTOS et al., 2016), auxiliando no desenvolvimento socioeconômico de pequenos proprietários rurais, na segurança alimentar, na geração de renda e emprego no campo;
- Ambiental: A produção de combustível líquido a partir de biomassa tem grande discussão a cerca da minimização de impactos ambientais, vinculados, principalmente: ao manejo da colheita da cana-de-açúcar (mecanizada ou queima); desmatamento e mudança do uso do solo para expandir a produção de biocombustíveis; e as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em todo o ciclo de vida do combustível (agrícola, transporte, uso). No entanto os autores discorrem que a descentralização da produção de etanol em pequenas destilarias contribui para a: reduzir emissões de GEE na logística de transporte (comentada no item econômico); os coprodutos diminuem a utilização de fertilizantes químicos e madeira (lenha) na etapa agrícola e industrial do processo, minimizando emissões de GEE; redução na geração de efluentes líquidos; e o plantio da cana-de-açúcar em conjunto com outras culturas na propriedade rural (sistema agroecológico) favorece a preservação da biodiversidade e a minimização de impactos negativos no manejo do solo.

A pequena escala de produção de etanol combustível apresenta um grande problema técnico de eficiência quando comparada aos valores observados para a larga escala de produção de etanol comercial. Mayer et al. (2015a) discorre que a produtividade de uma pequena planta de produção de etanol está relacionada às eficiências dos estágios de moagem, fermentação e destilação, sendo na última etapa registrado elevado consumo de energia para se obter o produto final no teor alcoólico especificado pela ANP para etanol hidratado, em função da tecnologia empregada, o que vincula significativo impacto na viabilidade econômica do processo.

A Tabela 2.2 apresenta a comparação dos dados de eficiência para as três principais etapas do processamento industrial de etanol combustível relatada por Mayer et al. (2015a) para pequena e larga escala de produção.

Tabela 2.2– Dados de eficiência por operação unitária em pequena e larga escala de produção de etanol combustível.

| Estágio | Pequena escala de produção | Larga escala de produção |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|
| | Eficiência (%) | Eficiência (%) |
| Moagem | 53 – 79 | 95,7 |
| Fermentação | 80 – 85 | 92 |
| Destilação | 85 | 99,7 |

Fonte: (MAYER et al., 2015a, p. 6705).

2.2 USO DE ETANOL HIDRATADO E SUPERHIDRATADO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Reduzir o gasto de energia no processo de produção de etanol é um meio de melhorar o balanço energético final do ciclo de vida do biocombustível. Essa alternativa de otimização de processo vem sendo investigada no nível de aspectos técnicos de produção e utilização em máquinas térmicas, especialmente em motores de combustão interna, de um combustível com maior hidratação.

As características de desempenho e operação de motores de combustão interna submetidos a testes com etanol superhidratado envolvem, principalmente, dois sistemas de ignição distintos, ignição por compressão (CI do inglês - *Compression Ignition*) ou por centelha (SI do inglês - *Spark Ignition*), ou ainda a combinação destes como o sistema de ignição por compressão de carga homogênea (HCCI do inglês - *Homogeneous Charge Compression Ignition*).

A combustão em motores que operam em modo SI ocorre através da propagação de uma chama que inicia na vela de ignição e se espalha através da câmara de combustão com reagentes pré-misturados (ar / combustível – ciclo Otto), já em motores CI o ar admitido no cilindro é comprimido, atingindo uma temperatura de 500 a 700 °C, e o combustível injetado inflama espontaneamente, em função do calor resultante da compressão do ar (ciclo Diesel) (TILLMANN, 2013).

Os motores HCCI combinam características de motores de ignição por centelha e motores a compressão. Da mesma forma que os motores de ignição por centelha, o HCCI usa uma carga pré-misturada de combustível em ar, e similar aos motores a diesel, a mistura é inflamada por meio de compressão. A carga pré-misturada diluída facilita um evento de auto inflamação relativamente uniforme, em vez de uma chama não pré-misturada que seria

encontrada em motores a diesel e, assim, os motores HCCI conseguem atingir menores emissões de partículas (SAXENA et al., 2014).

Breaux e Acharya (2011) destacam que o aumento do teor de água no etanol combustível diminuirá a temperatura da chama adiabática da reação de combustão, e como consequência reduzirá a formação de óxidos de nitrogênio (NO_x) térmicos, no entanto a concentração de água em níveis elevados na mistura combustível pode provocar efeitos adversos sobre a vaporização do combustível e a eficiência da combustão. Saxena et al. (2014) descreve que maiores frações de água no combustível demandam maiores quantidades de entrada de energia para obter ignição por três motivos: (1) mais água no etanol combustível requer mais energia para vaporizar; (2) são necessárias temperaturas mais elevadas para neutralizar o efeito de diluição química da água; (3) e a taxa de calor específico é reduzida pela presença de água.

Martínez-Frías et al. (2007) estudou o balanço energético da produção de etanol e o uso de etanol superhidratado em um motor HCCI. Os resultados mostram que um motor HCCI com recuperação de calor pode operar com uma mistura de etanol de 35% a 65% de água por volume, apresentando alta eficiência térmica de freio (38,7%) e NO_x muito baixo (1,6 ppm). A utilização direta do etanol em uma fração de volume de 35% reduziu o custo da separação da água para apenas 3% da energia do etanol e dos coprodutos (contra 37% para a produção de etanol anidro) e melhora o ganho líquido de energia de 21% para 55% da energia de etanol e coprodutos.

Saxena et al. (2012) e Saxena et al. (2014) exploraram o uso de etanol nas concentrações volumétricas de 100%, 95%, 90%, 85% e 80% em um motor HCCI adaptado para recuperação do calor de exaustão como fonte extra de energia de entrada para inflamar (pré-aquecer o ar de admissão) o etanol com elevado percentual de água na composição. Os resultados sugeriram que as melhores condições de operação do motor HCCI e do sistema permutador de calor em termos de alta potência de saída, baixo torque e baixas emissões de óxidos de nitrogênio ocorrem com altas pressões de admissão, altos índices de equivalência e tempos de combustão altamente atrasados.

Mack et al. (2009) investigou o efeito da fração etanol-água nos limites operacionais de motor, temperaturas de admissão, taxas de liberação de calor e emissões de escape para um motor de 4 cilindros de 1,9 litros, funcionando em modo HCCI, alimentado com misturas de 100%, 90%, 80%, 60% e 40% de etanol. Os resultados dos aspectos operacionais do motor indicam operação estável para o combustível com até 40% de água na composição. O aumento da concentração de água no combustível demandou maior temperatura de admissão

para a combustão, a taxa de liberação de calor foi constante em todas as misturas, e as emissões de escape de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) registraram aumento com a elevação da hidratação no combustível, enquanto os níveis de óxidos de nitrogênio reduziram.

Munsin et al. (2013) analisou os efeitos do uso de etanol hidratado com 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de água na composição volumétrica sobre o desempenho e as emissões de 100 horas de operação de um conjunto motor e gerador SI. Os resultados indicaram que o aumento da carga de operação do motor diminuiu a eficiência geral, enquanto o consumo específico do combustível de freio (BSFC do inglês – *Brake Specific Fuel Consumption*), as emissões de HC, formaldeído e acetaldeído aumentaram. A elevação da concentração de água em carga constante de operação (72% da potência nominal) diminuiu a eficiência geral e a emissão de NO_x, às custas do aumento do BSFC e das emissões de HC, CO, formaldeído e acetaldeído. Os autores ainda relatam que o etanol superhidratado (até 40% de água em volume) pode ser usado em um gerador de motor SI, especialmente em áreas remotas e rurais onde o etanol pode ser produzido para uso local.

López-Plaza et al. (2014) estudou a destilação convencional de etanol. Os resultados mostraram que o etanol superhidratado pode ser produzido usando uma coluna de destilação com um pequeno número de estádios e baixos índices de refluxo. Os dados experimentais indicam que destilar etanol com 80% em volume de composição requer uma entrada de energia igual a 10% (2,28 MJ.L⁻¹) do poder calorífico inferior (PCI do inglês LHV – *Lower Heating Value*) do etanol versus 27% (6,15 MJ.L⁻¹) para a destilação completa próximo à concentração azeotrópica (etanol 95,6% v/v), identificando que a desidratação leva 16% (3,64 MJ.L⁻¹) do LHV para produzir etanol hidratado.

Bilhão (2015) avaliou a influência da concentração de água no etanol sobre o comportamento de motores ciclo Otto (motores SI), e a energia gasta para a destilação de quatro misturas do combustível com 95%, 90%, 85% e 80% em concentração volumétrica. Os resultados da viabilidade técnica de operação do motor SI demonstraram que a elevação da concentração de água no combustível proporciona melhores valores de potência e torque, redução da temperatura na câmara de combustão, e maior consumo do combustível. Os cálculos da energia gasta na destilação apontaram uma redução de 54%, 73% e 82% para as concentrações volumétricas de 90%, 85% e 80%, respectivamente, em relação à energia gasta para a produção do combustível com 95% v/v de etanol.

Saffy et al. (2015) estudou a produção de etanol de milho em uma planta de produção a gás natural, produzindo o combustível com concentrações de 58% em peso a 100% em peso,

para determinar o efeito sobre o consumo de energia, o consumo de água e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no estágio de refinação. Os resultados indicaram que a produção de etanol 86% em peso (89% v/v de etanol e 11% v/v de água) apresentou o melhor desempenho, com redução de consumo na ordem de 10% em energia térmica, de 3 a 6% em água, de 8% em energia e 8% em emissões de GEE.

Ambrós et al. (2015) propôs o desenvolvimento de um modelo matemático para avaliar o efeito que o uso de etanol superhidratado tem no desempenho de motores SI considerando duas condições de operação do motor, uma com cronometragem de ignição fixa, e outra com o tempo de ignição ajustado para o torque máximo do motor. As misturas testadas foram de 95%, 90%, 80%, 70% e 60% em composição volumétrica de etanol. Os resultados mostraram que o modelo mostrou boa capacidade de prever desempenho do motor com base nas variações de gradiente de pressão, gradiente de temperatura no cilindro, potência, torque, eficiência de conversão e consumo específico de combustível. Entre os combustíveis testados, E70W30 apresentou o melhor desempenho, seguido da mistura E80W20.

Lanzanova et al. (2016) investigou os impactos do aumento do teor de água em etanol na operação, combustão e nas emissões em um motor SI, com injeção direta de etanol anidro e as composições de etanol-água com 5%, 10% e 20% de água em conteúdo volumétrico sob proporções estequiométricas e magra de ar / combustível, condicionada a duas cargas parciais de 3.1 bar e 6.1 bar, pressão efetiva média em 1500 rpm. A elevação da concentração de água afetou a taxa de liberação de calor, o que aumentou a duração da combustão e a fase inicial de desenvolvimento da inflamação. Os resultados de emissões demonstrou que o maior teor de etanol em água ocasionou redução de óxidos de nitrogênio, à custa de uma maior emissão de hidrocarbonetos não queimados. A análise dos custos de produção de energia de etanol superhidratado e das condições de operação do motor, apontou que a operação do motor enxuto com 10% v/v de água em etanol combustível apresentou economia de energia global em torno de 31% em comparação com o etanol anidro em condições estequiométricas.

Fagundez et al. (2017) investigou parâmetros de eficiência de um motor SI e sugeriu uma nova métrica de eficiência energética, denominada fator de energia líquida (NEF do inglês - *Net Energy Fator*), para avaliar cinco misturas de etanol-água com faixa de 60% a 95% de composição volumétrica. O cálculo do NEF envolveu a proporção de LHV do etanol combustível, a energia utilizada na destilação (em lote) e a energia total de entrada e saída. O cálculo da energia consumida no processo de destilação de 1 kg de etanol apontou uma redução de aproximadamente 61,3%, 71,3%, 80,3% e 83,6% para os combustíveis com 90%,

80%, 70% e 60% v/v de etanol na composição, respectivamente, quando comparados ao etanol com 95% de composição volumétrica. Os resultados indicaram que o motor SI apresentou operação estável para todas as misturas etanol-água. O BSFC, único parâmetro com significativa alteração, aumentando proporcionalmente com a elevação de concentração de água no combustível. Os resultados do NEF mostram vantagem dos combustíveis com maior hidratação e a eficiência ideal foi identificada para o combustível com 70% v/v de etanol.

Kun-Balog et al. (2017) analisou e comparou a energia consumida no processo de destilação e as emissões de GEE para etanol combustível com 95%, 90%, 80%, 70%, 60%, 50% de composição volumétrica. Os resultados da modelagem da destilação mostraram que a produção do etanol com 90% v/v e 50% v/v representam uma economia de energia de 154% e 169%, nessa ordem, quando comparados à energia consumida para produção de etanol com 95% de composição volumétrica. As emissões de escape apontaram que a combustão do combustível com 50% v/v de etanol resultou em redução de 90% das emissões de NO_x quando comparado com o etanol com 95% em volume. Baixas concentrações de emissões de CO e HC totais foram verificadas, sendo os maiores valores observados para os teores de 60% e 50% em volume de etanol, indicando alta eficiência de combustão.

Sari (2017) avaliou o impacto no desempenho e emissões de um motor HCCI adaptado a SI operando com misturas de etanol com 96%, 90%, 80% e 70% em composição volumétrica. Foram exploradas as características antidetonantes da água através do aumento da razão de compressão visando ao aumento de eficiência indicada do motor, e o efeito da concentração de água sobre os valores de velocidade de chama e temperatura adiabática. Os resultados dos parâmetros de desempenho mostraram que o aumento da concentração de água causou maior duração da combustão e a diminuição nos valores de eficiência indicada. O aumento da razão de compressão deslocou os pontos de máxima eficiência em direção às misturas com maior percentual de hidratação. O aumento de água causou uma diminuição na velocidade de queima e na temperatura adiabática de chama. Em relação às emissões, a elevação da concentração de hidratação no etanol ocasiona redução nos níveis de emissões de NO_x ao custo do aumento de emissões de HC não queimados. As emissões de monóxido de carbono (CO) apresentaram um comportamento decrescente com a elevação do teor de água no combustível. O aumento da razão de compressão ocasionou o aumento nas emissões de NO_x e um decréscimo nas emissões de HC não queimados.

De modo geral, os principais estudos realizados com etanol superhidratado apontam resultados em comum em três aspectos:

- i. Técnicos: Motores de combustão interna operam com o combustível com percentual de hidratação superior ao comercializado. No entanto, alguns estudos experimentais relatam problemas da utilização do etanol superhidratado, como contaminação do óleo lubrificante, desgaste e corrosão em componentes internos, dificuldade em ignição durante partida a frio (BILHÃO, 2015; MUNSIN et al., 2013; LI et al., 2013);
- ii. Energéticos: O aumento da concentração de água no combustível resulta em um menor consumo de energia no processo industrial, uma vez que misturas etanol-água até 95% v/v de etanol dispensam a etapa de retificação, o que reflete no balanço energético do ciclo de vida do etanol positivamente;
- iii. Ambientais: As emissões de GEE, especialmente as controladas CO, CO₂, NO_x e HC, são menores que as registradas para combustíveis fósseis. Em consequência de aspectos técnicos, as emissões de NO_x térmicos e CO₂ são reduzidas ao custo de maiores emissões de CO e HC não queimados.

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica que permite identificar todos os impactos associados a um determinado produto ou a uma atividade, de modo que sua aplicação, como uma ferramenta de gestão, apresente oportunidades de evitar e/ou minimizar efeitos adversos.

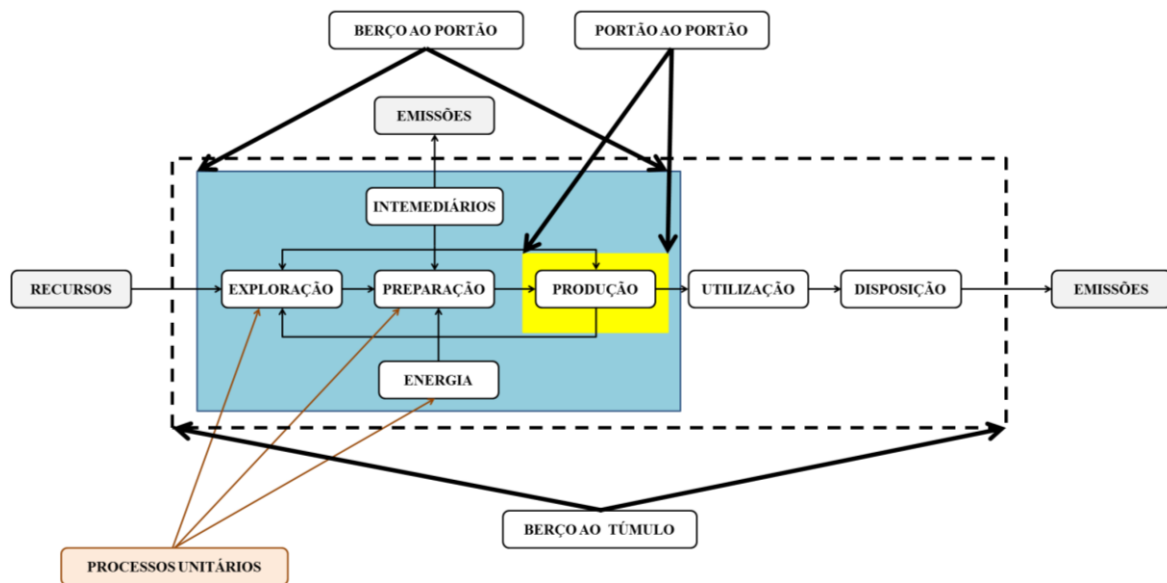
Chehebe (1998) e Gnansounou et al. (2009) definiram a ACV como uma técnica para avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um produto ou processo produtivo conhecida como “berço ao túmulo”, compreendendo etapas que vão desde a extração de recursos naturais elementares que entram no sistema produtivo (berço) à disposição do produto final (túmulo).

Narayanaswamy et al. (2004) fundamentaram a ACV como uma análise ambiental, a partir da representação do potencial de impacto ambiental dos aspectos relevantes incluídos em um sistema de produção, que envolve a quantificação de entradas como água, energia e matérias-primas e de saídas como produto, coprodutos, resíduos e emissões.

A Figura 2.4 expõe um esquema estrutural de uma ACV, apresentando as três abordagens mais usuais de delineamento de uma fronteira de avaliação, de acordo com a ACV BRASIL (2015). A delimitação “do berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*) envolve desde a extração da matéria-prima até a disposição final; a classificação “do berço ao portão” (*cradle-*

to-gate) abrange desde a extração da matéria-prima até o beneficiamento na etapa industrial; e a fronteira de sistema “do portão ao portão” (*gate-to-gate*) considera somente a etapa industrial do ciclo de vida.

Figura 2.4 – Esquema simplificado de classificação de fronteira de sistema.



Fonte: Adaptada de Pires (PIRES, 2013).

A ACV é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, através do levantamento de informações e aspectos técnicos que auxiliam na identificação de oportunidades de melhoria no produto ou processo em análise (LEVAN, 1995; VALT, 2004; MENDONÇA, 2007; COLTRO, 2007; JÚNIOR, 2008; SANTOS, 2009). Chehebe (1998) e Ometto (2005) destacaram alguns benefícios da aplicação de uma ACV:

- Auxilia na identificação e no entendimento dos aspectos ambientais ligados às várias fases do processo produtivo (matéria-prima, insumos, fabricação, distribuição, uso, reuso, reciclagem e disposição);
- Subsidiar ações de aperfeiçoar o produto e otimizar o processo, através da comparação entre insumos, rotas tecnológicas e recursos alternativos;
- Ajuda no desenvolvimento de políticas públicas e estratégias empresariais para a conservação de recursos e a redução de impactos ambientais;

- Fornece informações para a formação de banco de dados, na definição de critérios de avaliação, de desempenho e de rotulagem ambiental, e consequentemente no *marketing*.

A *International Organization for Standardization (ISO)*, por meio da série de normas ISO 14000, estabelecem diretrizes e instrumentos voltados para a gestão ambiental de empresas, com o objetivo de reduzir impactos ambientais, e a ACV é um dos instrumentos de análise. A padronização da ACV segue as normas pertencentes à família ISO 14040 que regulamentam a condução de uma ACV, dividindo-se em:

- ISO 14040:2009 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura;
- ISO 14041:2004 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Definição de objetivo e escopo e análise de inventário;
- ISO 14042:2004 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Avaliação do impacto do ciclo de vida;
- ISO 14043:2005 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Interpretação do ciclo de vida;
- ISO 14044:2009 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Requisitos e orientações.
- ISO TR 14047:2003 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Exemplos de aplicação da ISO 14042;
- ISO TS 14048:2002 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Formato dos dados e documentação;
- ISO TR 14049:2000 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Exemplos de aplicação da ISO 14041.

No Brasil, as normas relacionadas à ACV são formuladas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), condensadas na ABNT NBR ISO14040 e na ABNT NBR ISO14044 (MDIC, 2010).

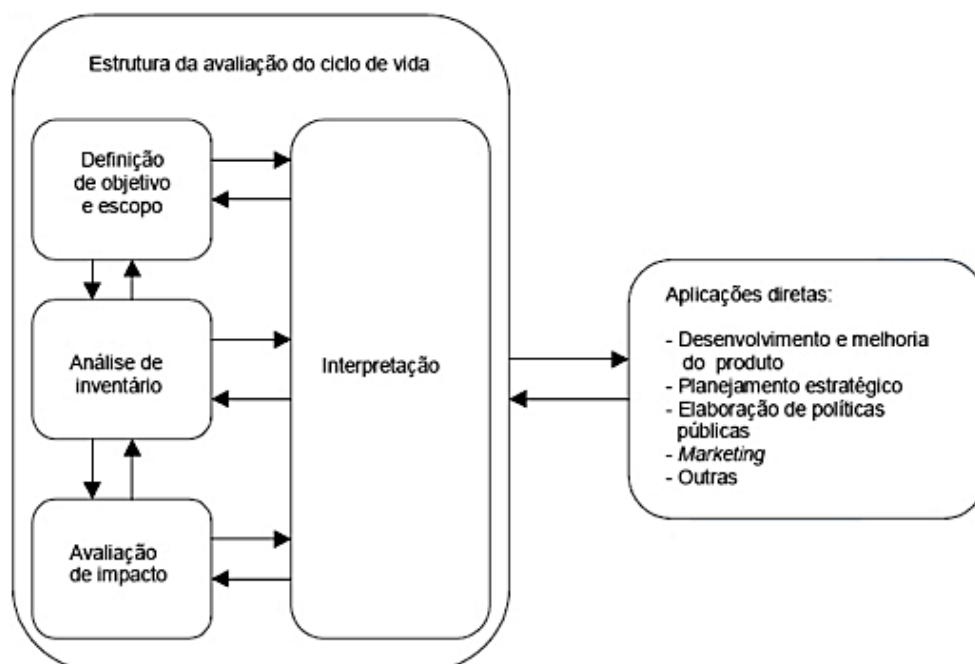
Estas normas especificam etapas e instruções para que um estudo de ACV obtenha sucesso na compreensão ambiental de um produto ou atividade, e para manter a credibilidade técnica, a ACV segue determinados passos (ABNT, 2009):

- Compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes ao sistema em análise;
- Avaliação dos impactos ambientais potenciais associados às entradas e saídas;

- Interpretação dos resultados das fases de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos e escopo do estudo.

Esses passos são retratados na Figura 2.5, que apresenta a interação entre as fases que estruturam o desenvolvimento de uma ACV, de acordo com a NBR ISO 14.040 (ABNT, 2009), que a divide em: definição de objetivo e escopo; análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV); avaliação de impacto; e interpretação.

Figura 2.5 – Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida.



Fonte: Adaptada de NBR ISO 14.040 (ABNT, 2009, p. 08).

Os itens a seguir descrevem, de forma sucinta, os princípios e a estrutura de cada uma das etapas de uma ACV.

2.3.1 Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida

2.3.1.1 Definição de objetivo e escopo

Na primeira fase de uma ACV são delineados os propósitos e as condições de realização do estudo. O objetivo e escopo precisam ser consistentes com a aplicação pretendida e claramente definidos, incluindo as razões para conduzir o estudo e o público-alvo (ABNT, 2009).

Finnveden et al. (2009) e Sousa et al. (2010) apontaram que o escopo de uma ACV está diretamente relacionado ao objetivo que se pretende o estudo, uma vez que a finalidade de uma ACV determina os limites do sistema e o nível de detalhamento das informações necessárias.

Segundo as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009) o escopo de uma ACV precisa definir e delimitar os seguintes itens:

- **Função e unidade funcional:** A função do sistema define a finalidade do estudo, que pode ser um produto ou atividade. Na medida em que a unidade funcional é um fluxo de referência quantificável (área, mássico, energético, volumétrico...) em relação aos dados de entrada e saída da função do sistema definido para avaliação;
- **Fronteira do sistema:** Nesse item se determina quais processos elementares (estágios do ciclo de vida) serão incluídos na ACV, ou seja, o tipo de abordagem analisada: “do berço ao túmulo”; “do berço ao portão”; ou “do portão ao portão”. A inclusão ou exclusão de um fluxo de entrada ou saída, pertinente à fronteira de sistema delimitada, deve considerar a conexão entre o início do processo elementar, a natureza das transformações e operações que ocorrem no processo elementar e onde termina o processo elementar (um produto, um serviço, uma atividade, uma emissão ou resíduo);
- **Procedimentos de alocação:** A alocação consiste na divisão de potencial de impacto entre as saídas de um sistema multifuncional (produto e coproduto), por meio de grandezas físicas (energia ou massa) ou socioeconômicas (valor de mercado). Essa divisão em fatores de peso, por ser subjetiva, não é aconselhada pela regulamentação, sendo que pode interferir na conclusão da ACV;
- **Metodologias de avaliação e interpretação da ACV:** Essa etapa abrange a definição das categorias de impacto, dos indicadores de categorias de impacto e o modelo de apresentação da relação entre os fluxos de entrada e saída com as categorias de impacto escolhidas, de modo consistente com o objetivo definido;
- **Requisitos e qualidade dos dados:** Os dados necessários para o desenvolvimento da ACV precisam atender o objetivo definido abrangendo a fonte das informações, a cobertura temporal, a cobertura geográfica, a cobertura tecnológica, a representatividade, a precisão, as limitações, a reprodutibilidade e a consistência dos dados exigidos pelo estudo;
- **Revisão crítica:** A revisão crítica pode ser realizada por especialista interno ou externo, ou ainda pelas partes interessadas. Tem como objetivo assegurar a

confiabilidade e a transparência na realização e nas conclusões obtidas em uma ACV, sendo realizada somente quando necessária;

- Relatório: Os resultados e conclusões de uma ACV devem ser reportados de acordo com o público-alvo e adequadamente, de modo preciso e imparcial, com linguagem de fácil compreensão.

De forma simplificada, Chehebe (1998) estabeleceu que o conteúdo mínimo do escopo de uma ACV precisa compreender três dimensões: a extensão do estudo (onde começa e termina); a largura da ACV (quantos subsistemas inclusos); e a profundidade da ACV (o nível de detalhes do estudo).

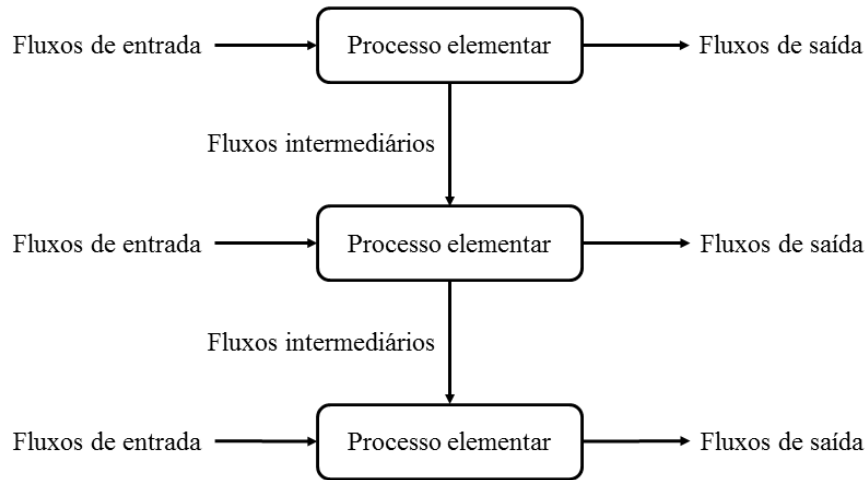
2.3.1.2 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

A segunda fase de uma ACV é responsável pelo levantamento de dados pertinentes ao objetivo e escopo traçados, sendo conhecida como a etapa de elaboração do Inventário de Ciclo de Vida.

A análise de inventário corresponde à coleta e aos modelos de quantificação de todas as variáveis de um processo elementar ao longo do ciclo de vida (ABNT, 2009). A condução do inventário é um processo iterativo, em que a sequência de coleta de dados continuamente envolve a checagem de procedimentos, de modo a assegurar que os requisitos e qualidade dos dados, definidos no escopo, estejam sendo satisfeitos (CHEHEBE, 1998).

A NBR 14040 (ABNT, 2009) organiza o processo de coleta de dados por processos elementares dentro da fronteira de sistema, e a identificação e quantificação dos fluxos de entrada e saída são realizados em termos de conservação de massa e energia. A Figura 2.6 exemplifica o levantamento de dados de processos elementares em um sistema de ACV.

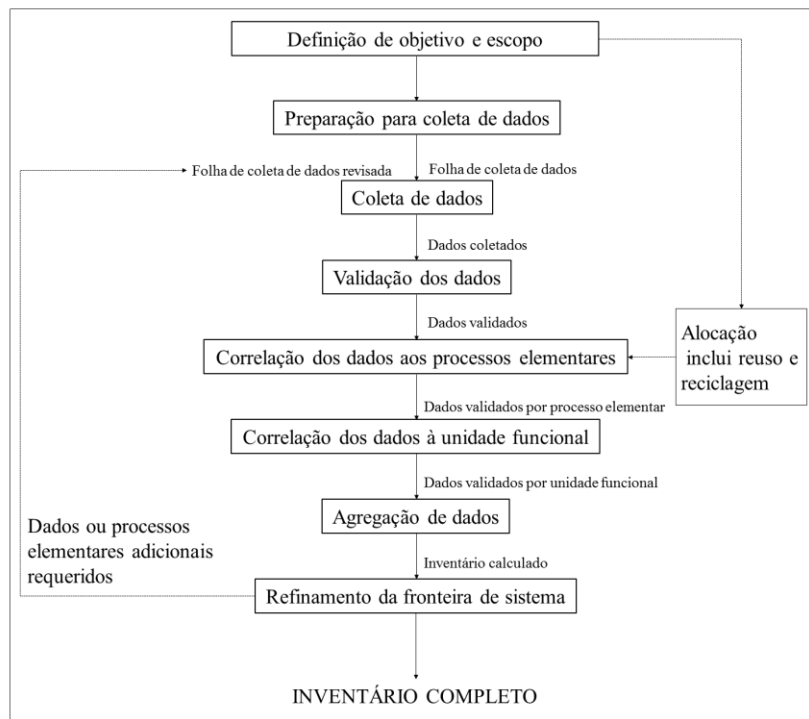
Figura 2.6 – Exemplo de processos elementares dentro de um sistema de produto.



Fonte: Adaptada de NBR ISO 14.040 (ABNT, 2009, p. 11).

A norma ainda propõe um esquema simplificado de procedimentos para a análise de inventários, representada na Figura 2.7, demonstrando a interatividade dentro da segunda fase de uma ACV, para a confiabilidade e representatividade das informações com o objetivo e escopo definidos na primeira fase.

Figura 2.7 – Procedimentos simplificados para análise de inventário.



Fonte: Adaptada de NBR ISO 14.044 (ABNT, 2009b, p. 15) e Alvarenga (2012, p. 57).

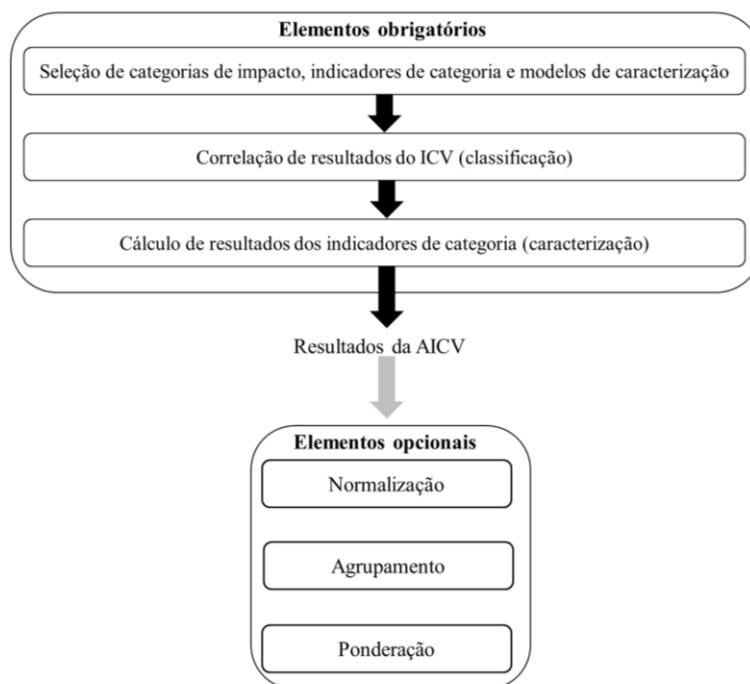
2.3.1.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

Na terceira fase de uma ACV os dados e as informações obtidas na etapa anterior são convertidos em potencial de impacto ambiental vinculado ao processo elementar em análise.

Conforme Chehebe (1998), a AICV representa um processo qualitativo e quantitativo de compreensão e avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais baseados nos resultados da análise de inventário. A AICV permite interpretar o consumo de recursos e as emissões de um processo elementar em termos de indicadores para as Áreas de Proteção: Saúde Humana, Meio Ambiente e Recursos Naturais (IES, 2010).

A NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009) dividem a AICV em elementos obrigatórios e opcionais. A Figura 2.8 demonstra essa divisão.

Figura 2.8 – Elementos obrigatórios e opcionais no desenvolvimento de uma ACV.



Fonte: Adaptada de NBR ISO 14.040 (ABNT, 2009, p. 16).

Os elementos mínimos de uma AICV incluem:

- i. Seleção das categorias de impacto: Etapa onde ocorre a identificação dos grandes focos de preocupação ambiental, e a partir desta definição é selecionado o(s) método(s) de avaliação de impacto e as categorias de impacto ambiental que o estudo utilizará (ABNT, 2009);

- ii. Classificação: Etapa em que os fluxos elementares da AICV são classificados e agrupados dentro das categorias de impacto selecionadas, de acordo com a capacidade do fluxo elementar de contribuir para um ou mais problemas ambientais (ABNT, 2009);
- iii. Caracterização: Os fluxos elementares da AICV que foram atribuídos a uma ou mais categorias de impacto são modelados, de modo que os resultados sejam expressos na forma de um indicador numérico para a(s) categoria(s) de impacto que foram vinculadas (ABNT, 2009).

As opções adicionais de AICV envolvem:

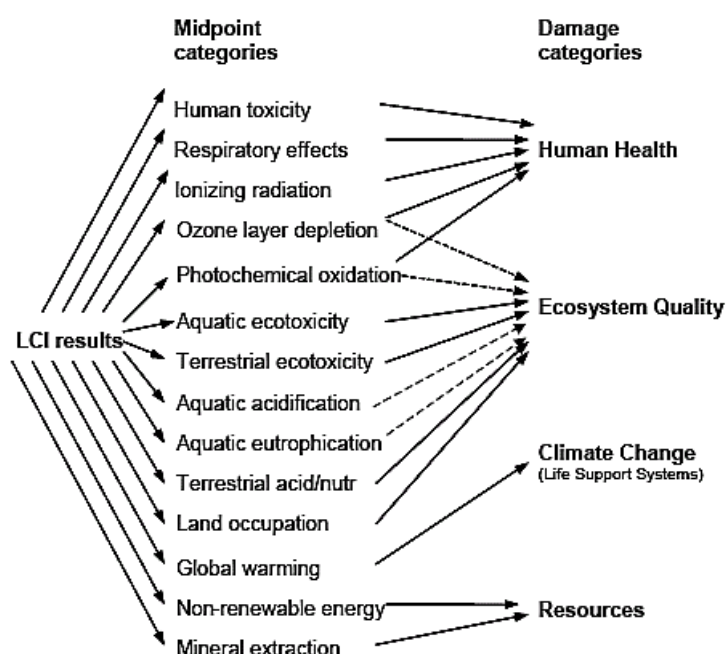
- i. Normalização: Etapa que mostra a magnitude em que uma determinada categoria de impacto é significativa para um problema ambiental global, a partir da divisão dos resultados da caracterização por um valor de referência selecionado. O valor de referência pode considerar as entradas e saídas totais: para uma determinada cobertura geográfica (global, nacional, regional ou local); considerando uma base per capita ou similar; ou um cenário de linha de base (como um sistema alternativo ou futuro) (ABNT b, 2009);
- ii. Agrupamento: Etapa que consiste na reunião de categorias de impacto ambiental em um ou mais conjuntos com base nominal como características de estradas e saídas, ou cobertura geográfica, ou de modo hierárquico com atribuição de prioridade (baixa, média ou alta) (ABNT b, 2009);
- iii. Ponderação: Etapa que atribui pesos as categorias de impacto, por meio da conversão dos resultados da caracterização ou da normalização com base em fatores de ponderação selecionados (multiplicação por um fator de ponderação), ou ainda, a agregação dos resultados da caracterização ou da normalização entre as diferentes categorias de impacto. Indicado para estudos individuais (ABNT b, 2009).

Os modelos de AICV, em geral, são divididos em modelos clássicos (*Midpoint*) ou modelos de danos (*Endpoint*). O primeiro correlaciona diretamente os resultados da AICV (fase dois) para categorias de potencial de impacto ambiental (categorias de impacto intermediárias), e o segundo modelo relaciona os resultados da AICV com as categorias de impacto intermediárias e expressa como resultado o efeito ambiental global, ou seja, em danos ambientais (causa *versus* efeito) (BRONDANI, 2014).

A distinção entre o modelo *midpoint* e *endpoint* é o processo elementar e a sua consequência. Em um sistema contínuo, o processo elementar (com suas entradas e saídas) é o

ponto de partida, o ponto intermediário caracteriza o impacto, e o ponto final o dano, que engloba o efeito no ambiente e no homem (JOLLIET et al., 2004; SALLABERRY, 2009; ALMEIDA, 2017). A Figura 2.9 apresenta um exemplo de modelo de AICV para as abordagens de impacto e dano ambiental.

Figura 2.9 – Exemplo de abordagem *midpoint* e *endpoint* (*Damage categories*) do método de avaliação *Impact 2002+*.



Fonte: (PRÉ CONSULTANTS, 2010, p. 16).

2.3.1.4 Interpretação

A última fase de uma ACV consiste na identificação, quantificação, verificação e avaliação dos resultados obtidos nas etapas anteriores, os resultados podem tomar a forma de conclusões e recomendações aos tomadores de decisão (CHEHEBE, 1998; SAIC, 2006).

De acordo com a NBR ISO 14044 (ABNT b, 2009), a fase de interpretação deve incluir os seguintes elementos:

- Identificação das questões significativas baseados nos resultados das fases de ICV e AICV;
- Avaliação do estudo, considerando verificações de integridade, sensibilidade e consistência;

- Conclusões, limitações e recomendações.

2.4 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A Análise de Eficiência Energética (AEE) é um método que permite estimar as energias produzidas e as energias consumidas em um determinado sistema (LENG et al., 2008), além de possibilitar a identificação de pontos de desperdício e alternativas com maior eficiência a partir da compreensão dos fluxos energéticos envolvidos (SÓRIA e FILIPINI, 2010).

Bueno (2002), Tavares (2006) e Santos e Simon (2010) definem a Análise Energética (AE) como um processo de avaliação das “entradas” (*inputs*) e “saídas” (*outputs*) de energia de sistemas, para posterior e concomitante interação como subsídio para outras análises e campos do conhecimento.

Capaz (2009) evidencia que uma AE de sistemas (processos) pode determinar a energia “embutida” em um produto, ou seja, a energia utilizada para produzi-lo, bem como comparar a quantidade de energia entregue pelo produto frente seu custo energético.

Yu e Tao (2009) apontam que se o somatório da energia investida (*inputs*) no sistema é menor que o valor energético presente nos produtos de saída (*outputs*), então o sistema tem produção de energia líquida, o que o caracteriza como energeticamente viável.

Os indicadores de eficiência energética se dividem em quatro grupos de abrangência (PATTERSON, 1996 apud ABREU e AZEVEDO, 2009):

- i. Termodinâmico: Análises segundo as leis da termodinâmica, da eficiência da transformação de uma forma de energia em outra (1ª e 2ª Lei da Termodinâmica);
- ii. Físico-termodinâmico: Avalia os insumos energéticos necessários para produzir um determinado bem ou serviço, e nesse caso, a energia que entra no sistema é mensurada em unidades termodinâmicas convencionais e a energia que sai do sistema em unidades físicas (p.ex.: consumo específico de energia MJ/ton_{produto});
- iii. Econômico-termodinâmico: Caracteriza-se por ser um indicador híbrido no qual o produto do processo é mensurado a preço de mercado, e a energia que entra em unidades termodinâmicas convencionais (p.ex.: intensidade energética Energia/PNB);
- iv. Econômico: Mede as mudanças na eficiência energética somente em valores monetários, tanto da energia que entra, quanto da que sai do sistema.

Abreu et al. (2010) relata que os indicadores energéticos na indústria tem o objetivo de promover uma maior compreensão técnico-econômica do consumo de energia setorial e final, porém os resultados de uma AEE também podem ser utilizados para:

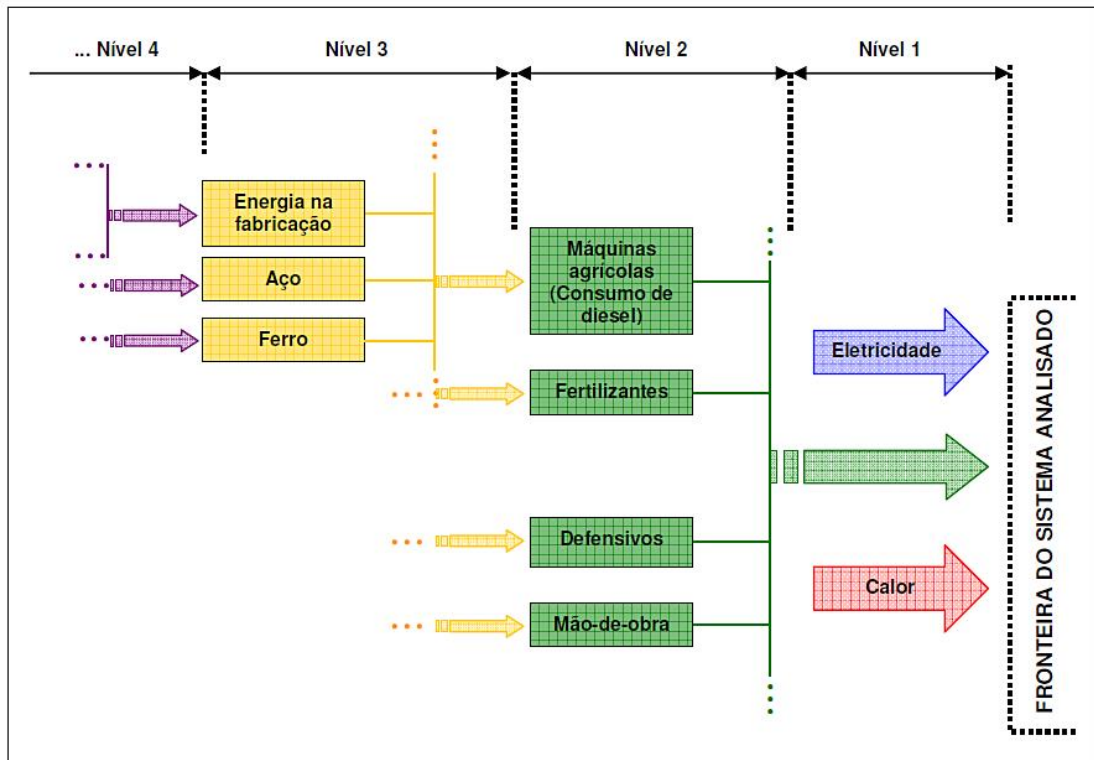
- Direcionar as mudanças no consumo energético;
- Estabelecer políticas públicas de eficiência energética;
- Orientar o estabelecimento do preço da energia;
- Indicar os impactos estruturais para melhorar a eficiência energética, a partir de alterações ou substituição tecnológicas;
- Estabelecer políticas ambientais e servir de instrumento de comando e controle para mensurar o sucesso da política de negociação das reduções das emissões de CO₂.

Uma AE requer, assim como uma ACV, a definição de limites de fronteira do sistema em avaliação, para contabilizar os fluxos energéticos de entrada e saída envolvidos. Capaz (2009) e Tavares (2006) relatam os quatro níveis de regressão definidos pela *International Federation of Institutes for Advanced Study (IFIAS)* para elaboração de uma AE:

- i. Nível 1: Esse nível contabiliza o total de energia gasto diretamente para a produção de um produto ou serviço. Os RTE são expressos em termos de energia primária (do modo como é obtida na natureza) e as conversões de energia primária para secundária (energia disponível para uso), sendo diferenciadas em fontes não renováveis e renováveis;
- ii. Nível 2: Esse nível considera, em adição ao nível 1, a energia embutida nos insumos indiretos para a produção de um produto ou serviço, isto é, agrega a energia direta para extração e obtenção de matérias-primas e os requisitos de energia primária da energia direta do primeiro nível;
- iii. Nível 3: Esse nível inclui os requisitos de energia vinculados aos bens de capital envolvidos na produção de um produto ou serviço, ou seja, a energia usada na produção de equipamentos e maquinários utilizados na operações unitárias desenvolvidas;
- iv. Nível 4: Esse nível compreende os requisitos energéticos para os equipamentos e as máquinas que produziram os bens de capital do terceiro nível, são de difícil obtenção e raramente considerados na elaboração de uma AE.

A Figura 2.10 apresenta um modelo de AE aplicado para biocombustíveis, demonstrando os níveis de regressão acima descritos.

Figura 2.10 – Níveis de regressão em um sistema de produção de biocombustíveis.



Fonte: (Capaz, 2009, p. 59).

Farrell et al. (2006) ressalta que os indicadores de energia líquida são extremamente sensíveis às especificações e pressupostos do sistema em estudo, principalmente ligados a unidade, alocação de coprodutos e limites estabelecidos, podendo apresentar diversos resultados para um mesmo sistema.

Os balanços de energia e as métricas de eficiência energética são importantes instrumentos de monitoramento, comando e controle de sustentabilidade (CAMPOS e CAMPOS, 2004; ABREU et al. 2010). No entanto, Capaz (2009) destaca que grande parte dos estudos energéticos é concomitantemente desenvolvida com análises econômicas, logo, no levantamento de indicadores de sustentabilidade a AE é empregada como um dos indicadores que compõem os resultados finais.

A produção de energia líquida tem sido utilizada para avaliar a eficiência energética de biocombustíveis derivados de grãos e biomassa celulósica. Tipicamente, os estudos usam métricas de eficiência, como valores de energia líquida (*net energy values* – NEV), taxas de energia líquida (*net energy ratio* – NER), taxa de produção de energia líquida (*net energy production* – NEP), balanço energético líquido (*net energy balance* – NEB) e rendimento de energia líquida (*net energy yield* – NEY), e compararam a produção de biocombustíveis com

a taxa de energia de petróleo investida (*petroleum energy ratio* – PER) para medir a sustentabilidade de um biocombustível (HAMMERSCHLAG et al., 2006; SCHMER et al., 2007; PAPONG e MALAKUL, 2010; ROCHA et al., 2014; MAYER et al., 2015).

Os resultados das métricas de eficiência energética para biocombustíveis quando associados a uma avaliação ambiental demonstram cenários que auxiliam na tomada de decisão sobre: a escolha de matérias-primas com melhor retorno energético; a seleção de rotas tecnológicas com menor custo energético e maior eficiência de conversão; e os dados dessas avaliações em conjunto fornecem embasamento para programas de energias renováveis; (HU et al., 2004; CAPAZ, 2009; ROCHA et al., 2014)

3 ESTUDO DE CASO

A destilaria da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) foi o modelo de processo industrial em pequena escala de produção de etanol combustível utilizado para a realização desse estudo. À medida que o Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões – GPMOT (UFSM), da mesma instituição, forneceu as informações sobre características de motor SI operando com etanol superhidratado.

Para a execução dos objetivos propostos para a ACV e a AEE dos quatro teores de hidratação do etanol combustível, no intervalo de 95% v/v a 70% v/v de etanol na mistura hidroalcolica, o delineamento e a construção do banco de dados e dos modelos de análise foram divididos em dois estágios:

- Procedimentos de cálculo para o processo industrial e uso final em motor SI;
- Seleção dos métodos de avaliação de impacto ambiental e das métricas de eficiência energética.

3.1 PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO

3.1.1 Etapa industrial

A planta de produção é classificada como microdestilaria, de acordo com Hoffmann (1985), com capacidade de produção diária estimada entre 320 e 360 litros de etanol, e utiliza a cana-de-açúcar como matéria-prima para produzir etanol hidratado com 96°GL (ou 96% v/v de etanol).

A microdestilaria realiza as operações unitárias de preparo e processamento da cana-de-açúcar, fermentação e destilação. Dagnese et al. (2012) apresenta e descreve as operações realizadas na microdestilaria da UFSM, como de:

1. Preparo da cana-de-açúcar: os feixes de colmos que dão entrada na microdestilaria são pesados manualmente, em balança de plataforma, sendo que 2000 kg de matéria-prima levam, aproximadamente, 1h para pesar;
2. Moagem: os colmos são inseridos pelos operadores na moenda (acionada à energia elétrica) para extração do caldo. O caldo é direcionado aos tanques de decantação, enquanto que o bagaço é armazenado para posterior utilização como cobertura de

solo. No período de 1 hora e 30 min o equipamento processa 2000 kg de cana-de-açúcar;

3. Decantação do caldo: o caldo passa por 5 estágios de separação gravimétricos para a remoção de impurezas;
4. Preparo do pé de cuba: a levedura da espécie *Saccharomyces cerevisiae*, adquirida no formato de tabletes, é preparada paralelamente ao processo de decantação para adição na primeira dorna de fermentação. O procedimento de preparo leva aproximadamente 1 h em água a 35 °C;
5. Transporte e tratamento do caldo: uma bomba elétrica realiza o transporte do caldo dos decantadores para a dorna de fermentação. São verificados o teor de açúcar (valor ideal é de 14°Brix) e o pH (valor ideal é de 5,5). Caso o valor do °Brix se encontre acima do ideal, é realizada a diluição com adição de água (manualmente). O pH é corrigido conforme a necessidade de elevá-lo (adiciona-se substância alcalina) ou reduzi-lo (adiciona-se substância ácida);
6. Fermentação: no início do processo é adicionado o pé de cuba preparado, para que as enzimas produzidas pelos microrganismos realizem a quebra da molécula da glicose em álcool e CO₂. Essa etapa do processo dura entre 18 e 24h, de acordo a temperatura ambiente;
7. Geração de vapor: o vapor necessário durante todo o processo de operação da microdestilaria é produzido por meio da queima de biomassa (lenha) na caldeira, e por painéis solares que geram energia para o aquecimento do sistema de destilação;
8. Destilação do vinho: o vinho resultante da fermentação é transferido para o destilador em regime de alimentação descontínuo, que realiza a separação e a concentração do álcool presente em produto de topo da coluna (etanol hidratado), e, como produto de fundo a vinhaça. A vinhaça é utilizada como fertilizante em pomares e na etapa de produção agrícola da matéria-prima. O processo de separação para um lote de 600 litros de vinho leva aproximadamente 3h;
9. Armazenamento: o etanol hidratado é acondicionado em tanques ou recipientes semelhantes.

Brondani (2014) mapeou e quantificou os fluxos de entrada e saída da microdestilaria da UFSM, considerando um ano de produção de etanol hidratado. A Tabela 3.1 lista os dados relacionados à estrutura física, insumos e rendimentos das operações unitárias coletadas pelo autor.

Tabela 3.1 – Dados de estrutura física, insumos e rendimento das operações unitárias da microdestilaria da UFSM.

| | Quantidade total |
|---|-------------------------|
| Estrutura física¹ | |
| Construção predial (m ²) | 102,84 |
| Moenda (kg) | 2500 |
| Tanque de decantação (kg) | 30 |
| Bomba (2 unidades) (kg) | 30 |
| Tanque de fermentação (3 unidades) (kg) | 135 |
| Destilador (kg) | 280 |
| Tanque de armazenamento (2 unidades) (kg) | 6 |
| Tanque de armazenamento (2 unidades) (kg) | 60 |
| Tanque de armazenamento (2 unidades) (kg) | 240 |
| Caldeira (kg) | 2000 |
| Insumos¹ | |
| Cana-de-açúcar (kg . kg _{etanol} ⁻¹) | 21,87 |
| Levedura (g . L _{caldo} ⁻¹) | 1,2 |
| Energia elétrica (kWh . min. ⁻¹) | 1,568 |
| Água (Diluição, GV e limpeza) (kg . L _{etanol} ⁻¹) | 4,3 |
| Lenha (kg . L _{etanol} ⁻¹) ² | 0,722 |
| Saídas¹ | |
| Etanol (kg . kg ⁻¹ _{cana-de-açúcar processada}) | 0,046 |
| Bagaço (kg . kg ⁻¹ _{cana-de-açúcar processada}) | 0,435 |
| Vinhaça (L . L ⁻¹ _{etanol}) | 13 |
| Características de operação da microdestilaria¹ | |
| Rendimento destilação (%) | 10 |
| Rendimento extração do caldo (%) ³ | 56,5 |
| Produção (L.dia ⁻¹) | 320 |

¹ Dados obtidos em coletas ou manuais *in loco*;

² Dado estimado a partir de manual de equipamento (caldeira) similar;

³ Dados de referências bibliográficas de estudos anteriormente realizados na microdestilaria da UFSM; Fonte: (BRONDANI, 2014, p. 63–83).

Para a construção do ICV da etapa industrial de cada teor de hidratação do etanol combustível analisado, foram considerados seis pressupostos:

1. A base para classificar (quais) os fluxos de entrada, de todos os ICVs, seguiram os dados de estrutura física e insumos apresentados na Tabela 3.1;
2. O combustível com 95% v/v de etanol apresenta todos os fluxos de entrada e saída quantificados de acordo com os observados *in loco* e a unidade funcional;
3. A construção dos ICVs para os demais teores de etanol – 90% v/v, 80% v/v e 70% v/v – foram realizados em comparação ao ICV do etanol com 95% v/v;

4. Os dados de insumos e fluxos de saída, para os combustíveis com teor acima de 5% v/v de hidratação, foram estimados considerando informações de comportamento percentual ou de regressão obtidos em bibliografias pertinentes (apresentadas a seguir), e correlacionados aos valores observados *in loco*;
5. A determinação dos pressupostos 2, 3 e 4 ocasionou a quantificação de excedente de insumos para os combustíveis com 90% v/v, 80% v/v e 70% v/v de etanol, quando comparados ao com 95% v/v de etanol. Esse excedente de insumos a ACV denomina de produtos evitados;
6. A mão de obra, empregada na operação da microdestilaria, não foi quantificada como uma entrada em nenhuma das avaliações, em função da difícil alocação no software SimaPro[®] como uma entrada, das divergências de contabilização e a discussão de que a mão de obra apresenta maior impacto socioeconômico do que ambiental associado (CAPAZ, 2009).

3.1.1.1 Referências bibliográficas utilizadas para o cálculo de insumos do ICV

Os dados de insumos estimados, conforme a limitação descrita no pressuposto 4, foram: energia elétrica; calor latente de vaporização do etanol (para o cálculos da água para vapor); e rendimento da destilação.

A seguir as referências bibliográficas e o modelo de quantificação aplicado são descritos por insumo.

ENERGIA ELÉTRICA

Fagundez et al. (2017), em testes de bancada com uma coluna de destilação em regime de alimentação descontínuo, quantificou parâmetros de eficiência do processo de separação para cinco hidratações do etanol combustível – 95% v/v, 90% v/v, 80% v/v, 70% v/v e 60% v/v de etanol –. A Tabela 3.2 apresenta os resultados obtidos pelos autores.

Tabela 3.2 – Resultados da destilação para as cinco misturas de etanol combustível.

| Etanol | Volume destilado (mL) ¹ | Composição do etanol (% v/v) | Relação de refluxo | Tempo do lote (min.) | Total de energia requerida (MJ) | ED (MJ/kg) ² |
|--------|------------------------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|
| E95W5 | 89,5 | 93,72 | 6 | 220 | 6,45 | 89,83 |
| E90W10 | 245 | 90,41 | 2 | 235 | 6,89 | 34,75 |

| | | | | | | |
|--------|-----|-------|------|-----|------|-------|
| E80W20 | 330 | 81,53 | 0,5 | 240 | 7,04 | 25,77 |
| E70W30 | 390 | 70,60 | 0,25 | 200 | 5,86 | 17,66 |
| E60W40 | 560 | 61,68 | 0,1 | 245 | 7,18 | 14,74 |

¹ Em cada teste o reboiler foi carregado com 5 litros de vinho (aproximadamente 8% v/v de etanol);

² Razão da energia gasta na destilação em lote para a quantidade de etanol combustível destilado;

Fonte: (FAGUNDEZ et al., 2017, p. 232).

A partir dos resultados de Fagundez et al. (2017), o consumo de energia elétrica para os combustíveis com 90% v/v, 80% v/v e 70% v/v de etanol seguiu os cálculos descritos na Tabela 3.3, e de acordo com o pressuposto 3. O percentual final obtido foi relacionado ao valor observado *in loco* na microdestilaria por Brondani (2014) (Tabela 3.1).

Tabela 3.3 – Percentual de consumo de energia elétrica.

| | E95W5 | E90W0 | E80W20 | E70W30 |
|---|-----------|----------|----------|----------|
| Fagundez et al. (2017) | | | | |
| Volume destilado (%) | 100 | 273,743 | 368,715 | 435,754 |
| Tempo de destilação (%) | 100 | 106,818 | 109,091 | 90,909 |
| Brondani (2014) | | | | |
| Volume destilado (L) | 60 | - | - | - |
| Tempo de destilação (min.) | 180 | - | - | - |
| Energia elétrica – EE (kWh) | 282,22 | - | - | - |
| Lote | 1 | - | - | - |
| Consumo de EE (kWh.min. ⁻¹) | 1,568 | - | - | - |
| Procedimento de cálculo | | | | |
| Volume destilado (L.Lote ⁻¹) | 60 | 164,246 | 221,229 | 261,453 |
| Volume destilado (kg.Lote ⁻¹) | 48,674 | 136,554 | 190,154 | 231,614 |
| Tempo de destilação (min.) | 180 | 192,273 | 196,364 | 163,636 |
| Consumo de EE (kWh.Lote ⁻¹) | 282,22 | 301,465 | 307,879 | 256,566 |
| Total de combustível (kg) | 3697 | 3984 | 4564 | 5790 |
| Número de lotes | 75,954 | 29,175 | 24,002 | 24,998 |
| Consumo de EE final (kWh) | 21435,818 | 8795,315 | 7389,579 | 6413,747 |
| Redução de EE final (%) ¹ | 0 | - 58,969 | - 65,527 | - 70,079 |

¹ Pressuposto 3;

Fonte: Autor.

CALOR LATENTE DE VAPORIZAÇÃO DO ETANOL

A água para vapor é utilizada para dois fins na microdestilaria da UFSM: na destilação; e na manutenção e lavagem de equipamentos.

A quantificação da água para geração de vapor na destilação considerou o consumo (a entrada de vapor) na coluna, que compreende o calor necessário para aquecer o vinho e o calor para vaporizar o álcool.

O cálculo para quantificar o calor de mudança de estado do álcool envolve a variável calor latente de vaporização do álcool, dada em $\text{MJ.kg}^\circ\text{C}^{-1}$. Essa variável foi estimada por regressão linear para todos os combustíveis avaliados, a partir de valores relatados por Perry e Green (2007). A Tabela 3.4 apresenta os valores utilizados de Perry e Green (2007) e a Figura 3.1 a regressão dos dados, elaborada com base nos dados da Tabela 3.4. .

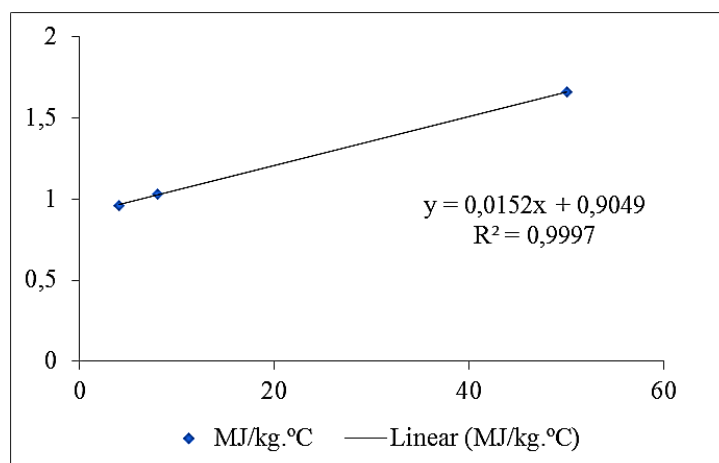
A escolha pela regressão linear baseou-se na premissa de que na proporção que aumenta a concentração de água na mistura combustível, aumenta igualmente o calor latente de vaporização. Uma vez que, o calor latente de vaporização da água como substância é de $2,2609 \text{ MJ/kg}$, ao passo que do etanol etílico é de $0,8374 \text{ MJ/kg}$ (BRENTANO, 2007), logo, se a concentração de água aumenta na mistura (etanol + água) mais calor é necessário para vaporizá-la.

Tabela 3.4 – Calor latente de vaporização do etanol combustível.

| Etanol (°GL ou % v/v) | Calor de vaporização (MJ.kg°C⁻¹) |
|----------------------------------|--|
| Etanol 50 °GL | 1,66321 |
| Etanol 92 °GL | 1,03347 |
| Etanol 95,92 °GL | 0,96033 |

Fonte: (PERRY & GREEN, 2007).

Figura 3.1 – Regressão linear para o calor latente de vaporização do álcool.



Fonte: Autor.

RENDIMENTO DA DESTILAÇÃO

O rendimento da destilação, para os combustíveis com 90% v/v, 80% v/v e 70% v/v de etanol, foi calculado relacionando o volume de saída de produto de topo da coluna de destilação, quantificado na Tabela 3.3, com o valor observado *in loco* por Brondani (2014). A Tabela 3.5 demonstra o procedimento de cálculo realizado.

Tabela 3.5 – Percentual de rendimento da destilação para o etanol combustível com hidratação de 5% v/v a 30% v/v de água.

| | E95W5 | E90W0 | E80W20 | E70W30 |
|--|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Brondani (2014) | | | | |
| Rendimento da destilação (%) | 10 | - | - | - |
| Fagundez et al. (2017) | | | | |
| Volume destilado (%) | 100 | 273,743 | 368,715 | 435,754 |
| Procedimento de cálculo | | | | |
| Volume destilado (L.Lote ⁻¹) | 60 | 164,246 | 221,229 | 261,453 |
| Rendimento da destilação (%) | 10 | 27,374 | 36,374 | 43,575 |

Fonte: Autor.

3.1.2 Etapa de uso final

Os dados de emissões de GEE, parâmetros de operação, de consumo de combustível e de desempenho repassados pelo GPMOT (UFSM), para um motor SI operando com os quatro percentuais de etanol combustível, são em partes resultados divulgados no trabalho de Sari (2017).

O motor utilizado na análise experimental desenvolvida por Sari (2017), originalmente ciclo Diesel (ou IC), foi adaptado para ciclo Otto (ou SI), uma vez que essa conversão possibilita a vantagem de variar a razão de compressão, o que permite maiores condições de operação, em especial de detonação (SARI, 2017).

As Tabelas 3.6 e 3.7 apresentam as características do motor SI utilizado e os dados relacionados ao desenvolvimento desse trabalho, respectivamente.

Tabela 3.6 – Características do motor SI.

| Parâmetro | Descrição |
|--------------------------------------|------------------|
| Número de cilindros | 1 |
| Diâmetro x curso (mm) | 90,0 x 105,0 |
| Volume deslocado (cm ³) | 668 |
| Razão de compressão original | 19:1 |
| Diâmetro da válvula de admissão (mm) | 41,0 |
| Diâmetro da válvula de exaustão (mm) | 35,0 |
| Aspiração | Natural |
| Marcha lenta (rpm) | 1200 - 1300 |

Fonte: (SARI, 2017, p. 39).

Tabela 3.7 – Informações de operação, eficiência e emissões de GEE para o etanol combustível com hidratação de 5% v/v a 30% v/v de água.

| Dados | E95W5 | E90W0 | E80W20 | E70W30 |
|--|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Razão de compressão | | 13,5:1 | | |
| Marcha lenta (rpm) | | 2000 | | |
| Potência (kW) | | 8,105309 | | |
| Consumo (kg.h ⁻¹) ¹ | 3,70 | 3,98 | 4,56 | 5,79 |
| Emissões (g.kWh⁻¹) | | | | |
| Hidrocarbonetos (HC) | 2,579 | 2,271 | 4,702 | 12,555 |
| Monóxido de carbono (CO) | 17,018 | 15,357 | 7,354 | 5,758 |
| Óxidos de nitrogênio (NO _x) | 8,094 | 9,184 | 6,540 | 4,447 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 583,233 | 576,068 | 529,424 | 522,363 |

Fonte: GPMOT (UFSM).

A definição da unidade funcional desse estudo foi, principalmente, em relação às informações disponíveis e condições de operação de um motor SI com etanol superhidratado. Os pressupostos que influenciaram na escolha de 1000 horas de funcionamento do motor SI, alimentado com as misturas de etanol e água, basearam-se em:

- Nenhum estudo desenvolvido até o momento avaliou, de modo eficiente e conclusivo, as condições físicas de uma máquina térmica submetida à operação com etanol superhidratado. Bilhão (2015), em teste de bancada com motor SI operando com etanol superhidratado, relata a identificação de contaminação do óleo lubrificante e problemas corrosivos no motor, no entanto, esses parâmetros não foram avaliados na execução dos testes;

- O GPMOT não dispõe de dados sobre o efeito corrosivo ou de contaminação do óleo lubrificante no motor operando com etanol superhidratado;
- A depreciação da vida útil de um motor SI acoplado a gerador de energia elétrica, é estimada em 10% ao ano (MF, 2017). Logo, 1000 horas de operação do conjunto motor gerador em um ano corresponde a 3 horas ao dia, aproximadamente;
- A condição estacionária de operação de uma máquina térmica fornece condições de operação fixas ao motor, como rotação constante, temperatura e pressão controlada, de modo que a máquina é submetida a um padrão de operação, facilitando os cálculos de consumo de combustível e emissões específicas presentes no ICV.

3.2 MODELO E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

A avaliação do impacto ambiental do ciclo de vida e a interpretação, fases 3 e 4 da ACV, foram realizadas por meio do *software* de apoio SimaPro[®] 8.3.0.0 *Faculty*.

O *software* SimaPro[®] proporciona aos usuários uma ferramenta com possibilidade de criar, modelar e avaliar fronteiras de abordagem para ACV de produtos ou sistemas, a partir de recursos de dados vinculados à base *Ecoinvent 3.3*. Todos os elementos obrigatórios e opcionais, regulamentados na NBR ISO 14.040 (ABNT, 2009), estão inclusos no programa para uma avaliação de impacto ambiental e interpretação concisa. Além de dispor de diversos métodos para avaliação de impacto (PRÉ-CONSULTANTS, 2013).

O método de avaliação de impacto ambiental selecionado para a realização desse estudo foi o método Eco-Indicador 99, composto por 11 categorias de impacto ambiental. A Tabela 3.8 apresenta um resumo das categorias de impacto do método de avaliação Eco-indicador 99.

Tabela 3.8 – Categorias de impacto ambiental do Eco-indicador 99.

| Categoria | Descrição |
|--|---|
| <i>Carcinogens</i> (Carcinogênicos) | O aparecimento e desenvolvimento de doenças cancerosas são favorecidos por diversas intervenções ambientais, como a radioatividade, o amianto, o fumo de tabaco, a radiação ultravioleta, certos compostos químicos, etc. Esta categoria indica a probabilidade que um indivíduo, exposto a 1 µg/m ³ de uma determinada substância (por exemplo, arsénio) tem de desenvolver cancro. |
| <i>Respiratory organics</i> (Respiratórios orgânicos) | Categoria de saúde humana relacionada com a respiração de compostos orgânicos. |
| <i>Respiratory inorganics</i> | Categoria de saúde humana relacionada com a respiração de compostos |

| | |
|--|--|
| (Respiratórios inorgânicos) | inorgânicos. |
| <i>Climate change</i> (Alterações climáticas) | Avalia o aumento da temperatura global do planeta devido à emissão de GEE para a atmosfera. |
| <i>Radiation</i> (Radiação) | Avalia as diferentes formas de radiação, e expressa os resultados em anos de vida ajustados por inaptidão (deficiência) (<i>DALY</i> do inglês – <i>Disability adjusted Life Years</i>) por kg de emissões radioativas. |
| <i>Ozone layer</i> (Camada de ozônio) | Avalia a diminuição do ozônio na estratosfera, o que provoca uma menor absorção da radiação ultravioleta, aumentando a sua incidência na superfície e provocando o aumento de doenças humanas (melanomas, por exemplo) e desequilíbrios no ecossistema. |
| <i>Ecotoxicity</i> (Ecotoxicidade) | Avalia os impactos à qualidade do ecossistema, como resultado da emissão de substâncias eco tóxicas para o ar, água e solo. |
| <i>Acidification / Eutrophication</i> (Acidificação / Eutrofização) | Avalia os efeitos da acidificação das chuvas devido à presença na atmosfera de compostos que reduzem o pH da chuva. A acidificação provoca o aumento da acidez no meio, com efeitos na flora e fauna. A eutrofização, por sua vez, resulta de uma excessiva concentração de nutrientes, e origina o aparecimento de algas em grande quantidade. A sua morte e decomposição consome grande parte do oxigênio dissolvido na água, tornando-a um meio anaeróbico. |
| <i>Land use</i> (Uso do solo) | Avalia o uso da terra (manejo) tem no impacto da diversidade de espécies. Com base em observações de campo, desenvolve-se uma escala expressando a diversidade de espécies por tipo de uso da terra. A diversidade de espécies depende do tipo de uso da terra e do tamanho da área. Tanto os efeitos regionais como os efeitos locais são tidos em conta na categoria de impacto. |
| <i>Minerals</i> (Minerías) | São utilizados modelos estatísticos que relacionam a disponibilidade de um minério com a sua concentração. A qualidade dos recursos minerais diminui com a extração. |
| <i>Fossil fuels</i> (Combustíveis fósseis) | A categoria considera o excedente de energia por energia de fonte fóssil extraída, envolvendo a descoberta e extração de petróleo, sendo expressa em MJ ou m ³ de energia fóssil. |

Fonte: Adaptada de (FERREIRA, 2007, p. 27) e (PRÉ-CONSULTANTS, 2013, p. 6-9).

A classificação de alguns fluxos de entrada nas etapas industrial e uso final precisaram ser adaptados ao banco de dados do SimaPro[®], de modo que foram alocados em função do material de fabricação. A Tabela 3.8 apresenta os fluxos de entrada adaptados.

Tabela 3.9 – Nomenclatura dos fluxos adaptados ao SimaPro[®] 8.3.0.0 *Faculty*.

| Fluxo de entrada | Entrada no SimaPro [®] |
|---------------------------|--|
| Prédio | Building, hall {CH} construction Alloc Rec, U |
| Moenda | Iron and steel, production mix., U S |
| Caldeira, motor e gerador | Cast iron, RER, production, Alloc. Rec., U |
| Coluna de destilação | Steel, stainless 304, flat rolled coil/kg/RNA |
| Tanques, bombas e dornas | Polypropylene resin, at plant, RNA |
| Leveduras | Chemical, organic, GLO, market for, Alloc. Rec., U |
| Lenha | Wood chips, dry, measured as dry mass {RER} market for Alloc Rec, U |

| | |
|---|--|
| Energia elétrica | Electricity, low voltage {BR} market for Alloc Rec, U |
| Cana-de-açúcar | Sugar cane, at farm/BR Mass |
| Água | Tap water {CH} market for Alloc Rec, U |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | Carbon dioxide |
| Monóxido de carbono (CO) | Carbon monoxide |
| Óxidos de nitrogênio (NO _x) | Nitrogen oxides |
| Hidrocarbonetos (HC) | Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified |

Fonte: Autor.

A AEE da microdestilaria da UFSM, para produção de combustível com 95% v/v e os cenários de produção de combustível com 90% v/v, 80% v/v, 70% v/v e 60% v/v de etanol, foi composta pelos indicadores de eficiência energética NER e NEB.

A transformação dos fluxos de entrada e saída, compilados no ICV na avaliação ambiental, em fluxos energéticos considerou os coeficientes energéticos apresentados nos estudos de Brondani (2014) e Mayer (2015).

4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM ETANOL SUPERHIDRATADO

C. Peyrot¹, R. Hoffmann², F. D. Mayer², J. Azolim¹, P. B. Mucellini¹, M. Brondani¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria

² Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria

Resumo

Aumentar o teor de hidratação do etanol combustível já se mostrou como uma alternativa de melhorar o equilíbrio energético do produto e reduzir emissões de gases de efeito estufa, sem comprometer o sistema operacional em motores *Spark Ignition* (SI) e *Homogeneous Charge Compression Ignition* (HCCI). No entanto, o efeito ambiental de misturas contendo mais de 5% v/v de água não foi discutido. E esse estudo procurou analisar, através de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a possibilidade de mitigação de impacto ambiental do etanol combustível comparando as composições de E95W5 (95% v/v de etanol e 5% v/v de água), E90W10 (90% v/v de etanol e 10% v/v de água), E80W20 (80% v/v de etanol e 20% v/v de água) e E70W30 (70% v/v de etanol e 30% v/v de água), compreendendo as etapas de produção industrial e uso final estacionário para a geração de 8105,309 kWh de energia elétrica como unidade funcional. O Eco-Indicador 99 foi o método de avaliação, e os resultados da caracterização demonstraram o maior potencial mitigador de impacto ambiental para o combustível com 30% v/v de água (E70W30), seguido pelo etanol com 20% de hidratação (E80W20). A matéria-prima e a energia do processo (elétrica e vapor), nessa ordem, foram os fluxos responsáveis pela redução de impacto ambiental, em função da menor demanda desses insumos para os teores acima de 5% v/v de água na composição. Assim, o aumento da hidratação do etanol combustível acima da composição comercial revela uma oportunidade de melhorar a sustentabilidade da cadeia produtiva do biocombustível.

Palavras-chaves: Impacto Ambiental; Biomassa; Cana-de-açúcar; Bioetanol de primeira geração; Destilação; Motor de combustão interna.

4.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do mercado de energia renovável vem demonstrando ao longo dos anos a expansão da produção de biocombustíveis, principalmente etanol e biodiesel [1–2]. A alteração progressiva da matriz de energia primária de combustíveis provém de incentivos públicos à diversificação de recursos no setor energético, à mitigação de impactos ambientais e ao desenvolvimento da agricultura [3–7].

A produção mundial de etanol para o ano de 2015 foi estimada em 98,3 bilhões de litros [2], sendo 30,249 bilhões de litros produzidos no Brasil [8]. Essa representação do Brasil no mercado mundial é uma consequência do programa federal Proálcool criado em 1975, com o objetivo de reduzir a dependência externa de derivados de petróleo frente à crise global dos anos 70, bem como expandir em larga escala a substituição ou o uso correlato com os combustíveis fósseis [9–10].

As principais matérias-primas utilizadas para produção de etanol de primeira geração são plantas agrícolas com elevado teor de açúcares ou amido, destacando-se em escala produtiva comercial o milho (Estados Unidos da América), a cana-de-açúcar (Brasil) e a beterraba açucarada (União Europeia) [4,7]. As pesquisas usualmente se dedicam a verificar a sustentabilidade da cadeia produtiva do biocombustível, evidenciando a mitigação de impactos ambientais vinculados ao aquecimento global e os avanços no balanço energético líquido (NEB), a partir de metodologias com esse propósito, como as de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) [11–13]. A discussão acerca de balanços energéticos, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e fatores econômicos a curto e longo prazo mostram uma diversidade de resultados para uma mesma espécie de matéria-prima. As discrepâncias são observadas principalmente em razão de diversas abordagens de fronteiras de sistema e alocação de fluxos de materiais e energéticos de entrada e de saída. De modo geral, a cana-de-açúcar apresenta superioridade em relação ao milho e a beterraba, com o melhor desempenho na redução de insumos fósseis no ciclo de vida e nas emissões de gases de efeito estufa provenientes de seu uso [4–6,14].

O ciclo de vida do etanol de biomassa compreende cinco estágios, que são: etapa agrícola; transporte da colheita; processamento industrial; distribuição do produto; e uso final. O gasto de energia em cada etapa é relativo aos insumos e operações unitárias realizadas. A maior fração de energia é consumida nas etapas finais do processo industrial, que se destinam a remoção de água - destilação e desidratação -, com comportamento de aumento exponencial quando o destilado se aproxima da composição azeotrópica [15–18]. Martinez-Frias [19]

estudou o balanço energético do etanol de milho, onde 37% da energia de saída do etanol puro e coprodutos eram utilizadas na separação da água do etanol, com 23% na destilação e 14% na desidratação, mas essa demanda se reduz a 3% da energia de saída (etanol e coprodutos) para um produto final com teor de 35% de água na composição, aumentando o balanço líquido final de energia.

Aperfeiçoar o equilíbrio energético do etanol, independente da matéria-prima, através do aumento da hidratação do produto, é uma possibilidade para se elevar o ganho de energia líquida de saída por meio da redução de gastos energéticos durante o processo de conversão do produto [15,20–23]. Misturas com composição de 10% v/v e 30% v/v de água no etanol demonstram um ganho de energia global em torno de 31% a 34%, quando comparadas com o biocombustível na composição azeotrópica [22,23]. Fagundez [17] quantifica uma redução de aproximadamente 84% da energia necessária na etapa de destilação para obter 1 kg de combustível, comparando as composições de 5% v/v e 40% v/v de água no etanol.

Em decorrência do aumento do balanço líquido final de energia com a elevação do percentual de água no etanol, a aplicação desse biocombustível com elevada hidratação vem sendo amplamente discutida em relação a emissões gasosas e desempenho operacional, principalmente em motores *Spark Ignition* (SI) e *Homogeneous Charge Compression Ignition* (HCCI) para transporte ou com funções estacionárias [19]. Teores mais elevados de hidratação do etanol revelam redução de emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e, por outro lado, as emissões de hidrocarbonetos (HC) aumentam, o que influencia nas emissões de monóxido de carbono (CO) [20,22–25]. Características de eficiência de motor são classificadas como aperfeiçoadas para algumas composições de etanol acima de 5% v/v de água, são exemplos: a potência; a menor temperatura dos gases de escape; e o consumo específico [26].

Os trabalhos desenvolvidos anteriormente para etanol com alto teor de hidratação buscam, individualmente, esclarecer e validar parâmetros energéticos e/ou operacionais direcionados ao aprimoramento do processo produtivo do biocombustível, diretamente relacionados a custo de mercado e o efeito nas concentrações de emissões de GEE. As relações globais entre a melhoria do balanço final de energia do produto associado aos efeitos da aplicação do etanol superhidratado, com percentual de água superior ao comercial (acima de 5% v/v), não foram discutidas com abrangência de potencial de impacto ambiental. O objetivo desse estudo foi identificar o potencial de impacto ambiental, por meio de uma Avaliação do Ciclo de Vida do processo industrial e de uso final, para quatro misturas de etanol combustível com composição entre 95% v/v e 70% v/v de etanol.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

A elaboração da Avaliação do Ciclo de Vida para as quatro misturas de etanol combustível compreendeu os princípios regulamentados pela Organização Internacional de Normalização (ISO) por meio da ISO 14040. A partir da estrutura padrão, o delineamento da ACV foi organizado em fases com o propósito de definição de objetivo, escopo e inventário (ISO 14.041/2004), avaliação do impacto do ciclo de vida (ISO 14042/2004), e interpretação do ciclo de vida (14043/2005).

Para o tratamento, análise do inventário e a avaliação do impacto do ciclo de vida foi utilizado o software SimaPro[®] 8.4.0.0 *Faculty*, um sistema operacional empregado em estudos de desempenho ambiental de acordo com as recomendações da série ISO 14.040 [27].

4.2.1 Definição do objetivo

O objetivo do estudo foi comparar a distribuição e o potencial de impacto ambiental relativo às etapas de produção industrial e aplicação estacionária do etanol combustível. Foram avaliadas as misturas na composição E95W5 (95% v/v de etanol e 5% v/v de água), E90W10 (90% v/v de etanol e 10% v/v de água), E80W20 (80% v/v de etanol e 20% v/v de água) e E70W30 (70% v/v de etanol e 30% v/v de água), a fim de verificar a possibilidade de potencial mitigador de impacto ambiental com a elevação da concentração de água no combustível.

A análise crítica do estudo realizado e a divulgação dos resultados obtidos são exclusivamente para fins educacionais.

4.2.2 Definição do escopo

As etapas do ciclo de vida das quatro misturas de etanol e água (E95W5, E90W10, E80W20 e E70W30) abrangeram o processo industrial e a aplicação final em motor SI, caracterizando uma fronteira de sistema "*gate to wheel*" [3]. De acordo com os objetivos definidos, a etapa de transporte que corresponde à distribuição do produto (etanol) não foi considerada, devido à aplicação final do combustível ser interna ao local de produção.

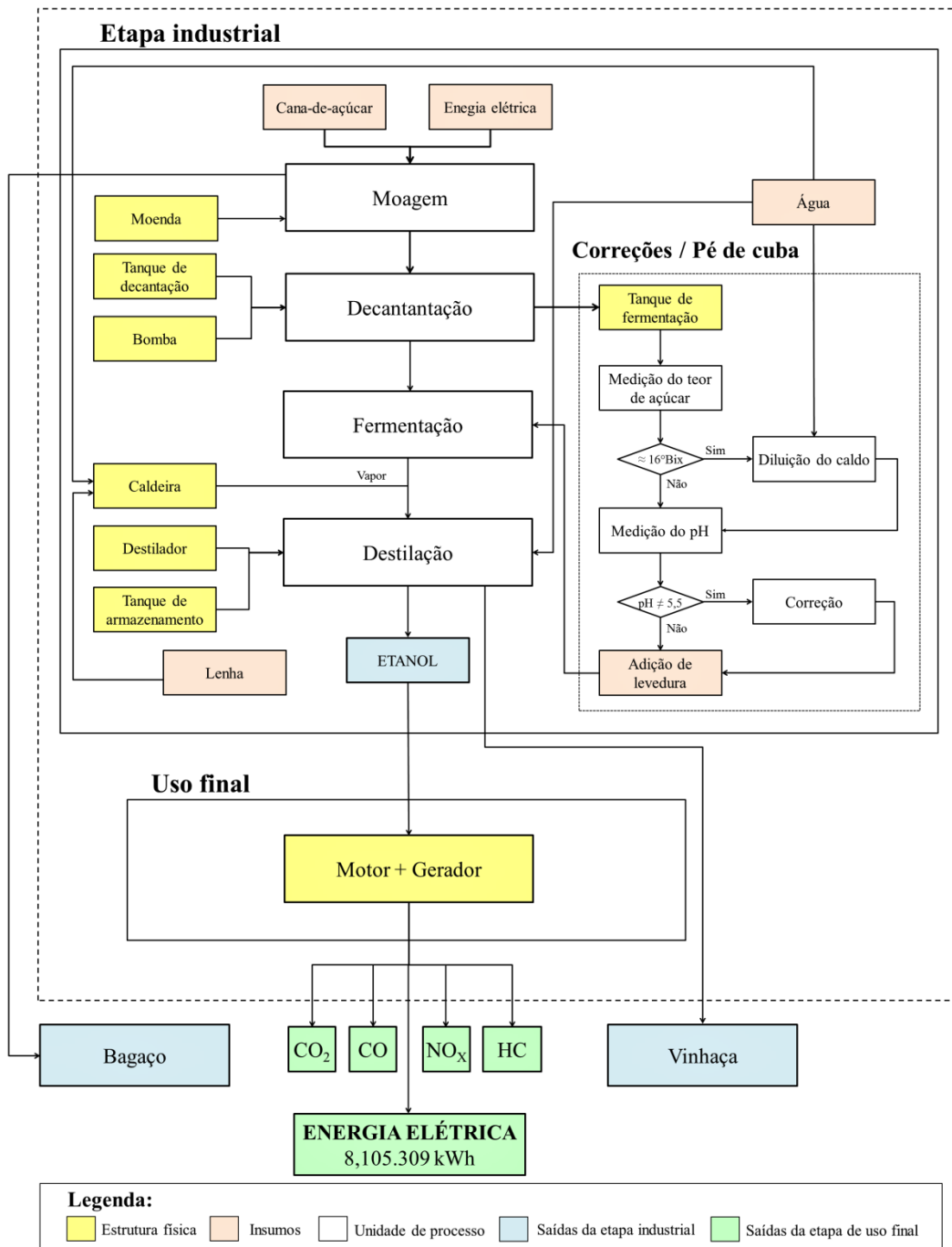
As operações unitárias e processos envolvidos no ciclo do tratamento da matéria-prima até o destilado final nas concentrações desejadas seguiram a planta de produção de etanol em pequena escala (SSEP) da Universidade Federal de Santa Maria (Brasil), que opera em regime de alimentação descontínuo e produção de etanol na composição de 95% v/v de etanol. O uso final dos combustíveis em motor SI foi de caráter estacionário com o acoplamento de gerador de energia elétrica, o destino final da energia gerada não foi especificado.

A unidade funcional adotada para todos os teores de hidratação do etanol combustível foi a geração de energia elétrica de 8.105,309 kWh, que considera o período de 1.000 horas ininterruptas de operação do motor SI com razão de compressão de 13,5:1 e potência de 8,105 kW. Os inventários de ciclo de vida (ICV) para os combustíveis E90W10, E80W20 e E70W30 foram conduzidos de modo comparativo ao inventário do combustível E95W5, resultando em produtos evitados para essas composições de etanol e água.

A Figura 4.1 demonstra a delimitação da fronteira física das etapas em avaliação e os fluxos de entrada e saída pertinentes a cada uma individualmente. Os fluxos de resíduos de bagaço (moagem) e de vinhaça (destilação) do processo industrial não foram considerados na avaliação, uma vez que atuam como coproduto no manejo da SSEP. A mão de obra de operação na SSEP não foi classificada como fluxo de entrada na ACV.

Para conduzir a caracterização dos fluxos de entrada e saída da fronteira de sistema e a avaliação do potencial de impacto ambiental como indicador numérico, foi utilizado o método de avaliação Eco-indicador 99 – perspectiva hierárquica (versão 2.10) incluso no pacote do software SimaPro[®] 8.3.0.0 *Faculty*, que dispõe de onze categorias de impacto ambiental [27].

Figura 4.1 – Fronteira de sistema.



Fonte: Autor.

4.2.3 Inventário do ciclo de vida (ICV)

Conforme a fronteira de sistema e considerações da ACV, a condução de elaboração do ICV exigiu a coleta de dados específicos de entrada e saída de cada etapa em avaliação, totalizando quatro ICV, em razão das quatro misturas de etanol e água analisadas. Para cada

etapa os dados foram quantificados em índices mássicos (kg), área (m²) e energia elétrica (kWh). O cálculo dos dados incluiu duas etapas: processo industrial e uso final.

4.2.3.1 Processo industrial

A quantificação dos dados necessários seguiu as etapas do processo (Figura 4.1). As entradas na fronteira de sistema, as características de operação da SSEP e os insumos evitados são detalhados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Inventário de ciclo de vida para cada teor de hidratação do etanol combustível.

| Unidade | Combustíveis | | | | |
|---|----------------|---------|---------|---------|---------|
| | E95W5 | E90W10 | E80W20 | E70W30 | |
| Etapa industrial | | | | | |
| Estrutura física | | | | | |
| Construção | m ² | 102,84 | 102,84 | 102,84 | 102,84 |
| Moenda | kg | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| Tanque de decantação (uma unidade) | kg | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Bomba (duas unidades) | kg | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Tanque de fermentação (três unidades) | kg | 135 | 135 | 135 | 135 |
| Destilador | kg | 280 | 280 | 280 | 280 |
| Tanque de armazenamento (duas unidades) | kg | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Tanque de armazenamento (duas unidades) | kg | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Tanque de armazenamento (duas unidades) | kg | 240 | 240 | 240 | 240 |
| Caldeira | kg | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Insumos | | | | | |
| Cana-de-açúcar | kg | 80659 | 30983 | 25488 | 26547 |
| Levedura | kg | 54,69 | 21,01 | 17,28 | 17,99 |
| Energia elétrica | kWh | 21436 | 8795 | 7390 | 6414 |
| Água | kg | 19609 | 10558 | 7208 | 7902 |
| Lenha | kg | 3511 | 1775 | 1176 | 1373 |
| Saída etapa industrial | | | | | |
| Etanol | kg | 3697 | 3984 | 4564 | 5790 |
| Vinhaça | L | 41015 | 12713 | 9091 | 8463 |
| Bagaço | kg | 35087 | 13477 | 11087 | 11548 |
| Produtos evitados | | | | | |
| Cana-de-açúcar | kg | - | 49676 | 55170 | 54112 |
| Levedura | kg | - | 33,68 | 37,41 | 36,69 |
| Lenha | kg | - | 1737 | 2336 | 2139 |
| Água | kg | - | 9051 | 12401 | 11707 |
| Energia elétrica | kWh | - | 12641 | 14046 | 15022 |
| Etapa de uso final | | | | | |
| Motor + Gerador | kg | 152 | 152 | 152 | 152 |
| CO | kg | 137,93 | 124,48 | 59,60 | 46,67 |
| CO ₂ | kg | 4727,28 | 4669,21 | 4291,15 | 4233,91 |
| NOx | kg | 65,60 | 74,44 | 53,01 | 36,05 |

| | | | | | |
|--|----------------------|-------------------|---------|----------|----------|
| HC | kg | 20,90 | 18,41 | 38,12 | 101,76 |
| Características de operação da SSEP | | | | | |
| Rendimento destilação | % | 10.0 ¹ | 27.37 | 36.87 | 43.58 |
| Rendimento extração do caldo | % | 56.5 ¹ | 56.5 | 56.5 | 56.5 |
| Carga do reboiler (lote) | L | 600 ¹ | 600 | 600 | 600 |
| Produção de etanol | L.lote ⁻¹ | 60 ¹ | 164,246 | 221,229 | 261,453 |
| Duração do lote | min. | 180 ¹ | 192,273 | 196,364 | 163,636 |
| Densidade etanol | kg.L ⁻¹ | 0.81124 | 0,8314 | 0,859535 | 0,885875 |
| Consumo de mistura total ² | kg.h ⁻¹ | 3,70 | 3,98 | 4,56 | 5,79 |

¹ Valores reais de operação na SSEP para produto de saída com 95% v/v de etanol (28); ² Consumo de mistura total do combustível (combustível + água) (29).

A energia elétrica consumida nessa etapa foi quantificada considerando o estudo de Fagundez [17], que estabelece a relação de volume (mL) e tempo (min.) necessários para destilar o etanol combustível E95W5 e quatro misturas, E90W10, E80W20, E70W30 e E60W40. A partir da relação percentual estimada, de cada mistura para volume e tempo (E90W10, E80W20 e E70W30) em relação ao etanol hidratado (E95W5), foi relacionado com o valor real observado *in loco* de 282,22 kWh para a produção de 60 litros de etanol hidratado (E95W5), em 180 min., na SSEP [28].

O consumo de água foi estimado através do somatório de seu uso na EPP: água de diluição, água de limpeza e vapor. A água de diluição foi calculada por meio da Equação 4.1. O caldo da planta piloto apresenta em média 16 ° Brix, sendo 14 ° Brix o valor ótimo de operação [30].

$$\text{Água de diluição} = \left(\frac{c \times gb_{caldo}}{gb_{desejado}} \right) - c \quad (4.1)$$

A demanda de limpeza e manutenção das operações foi baseada no consumo de vapor total no processo e a energia de fabricação dos equipamentos, onde o valor dessas entradas corresponde a 5% e 4%, respectivamente [28].

O consumo de vapor por mistura de etanol e água foi estimado por meio da soma da quantidade de calor necessária para aquecer o vinho e para vaporizar o álcool, para isso utilizou-se as Equações 4.2 a 4.5. No cálculo do calor para aquecer o vinho a variável de calor latente de vaporização (λ_{etanol}) para E95W5, E90W10, E80W20 e E70W30 foi estimado por regressão linear a partir dos valores apresentados por Perry e Green [31].

$$Q_{sensivel\ vinho} = m_{vinho} \times Cp \times \Delta t \quad (4.2)$$

$$Q_{\text{vaporização etanol}} = m_{\text{etanol}} \times \lambda_{\text{etanol}} \times (R + 1) \quad (4.3)$$

Onde, m é a massa total (kg), C_p o calor específico da mistura etanol-água ($\text{MJ.kg}^\circ\text{C}^{-1}$), Δt a variação de temperatura final e inicial na coluna de destilação ($^\circ\text{C}$), o λ_{etanol} o calor de vaporização do etanol (MJ.Kg^{-1}), e R a taxa de refluxo observada por Fagundez [17] .

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{sensível vinho}} + Q_{\text{vaporização etanol}} \quad (4.4)$$

Onde, o calor total fornecido à coluna de destilação (Q_{total}) em MJ é o somatório do: calor de aquecimento do vinho até a temperatura de ebulição ($Q_{\text{sensível vinho}}$); e o calor de vaporização do etanol ($Q_{\text{vaporização etanol}}$).

$$m_{\text{vapor}} = \frac{Q_{\text{total}}}{\lambda_{\text{vapor}}} \quad (4.5)$$

Sendo, a massa de vapor (m_{vapor}) a razão entre o calor total fornecido à coluna de destilação (Q_{total}) e o calor latente de vaporização (λ_{vapor} de $2,2215 \text{ MJ.kg}^{-1}$).

Os dados de lenha e levedura utilizados foram de acordo com capacidade de geração de vapor da caldeira, à pressão de operação de $0,7845 \text{ MPa}$, com consumo na ordem de $90 \text{ kg}_{\text{lenha}} \cdot \text{h}^{-1}$, e a utilização de $1,2 \text{ g}_{\text{levedura}} \cdot \text{L}_{\text{caldo}}^{-1}$ [28].

A produção diária de etanol e o rendimento do processo de destilação foram determinados através da relação do valor real de operação da SSEP (Tabela 4.1) para o produto azeotrópico com 5% v/v de água, e o comportamento percentual do volume destilado observado por Fagundez [17] para E90W10, E80W20 e E70W30 em relação ao E95W5.

4.2.3.2 *Uso final*

Na avaliação da aplicação final do combustível, os dados de características de motor foram retirados de outro trabalho [23]. As emissões específicas para o motor considerado, de óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2), foram fornecidas pelo Grupo de pesquisa em motores, combustíveis e emissões (GPMOT) em caráter privado.

4.2.4 Avaliação e interpretação do impacto do ciclo de vida

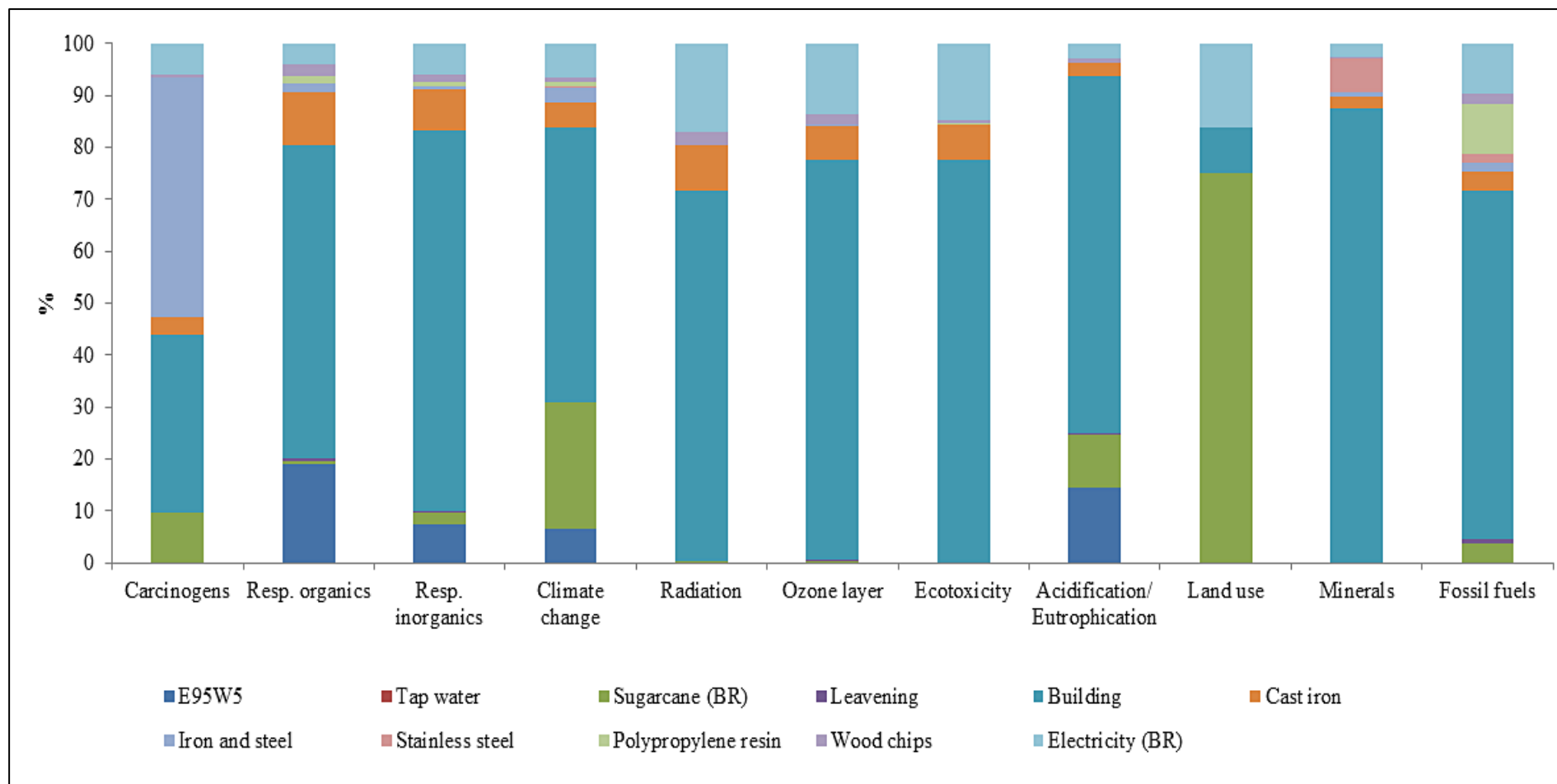
Para a comparação de impactos ambientais do ciclo de vida entre as quatro misturas de etanol, cada ICV foi analisado individualmente em nível de indicadores de categorias de impacto ambiental (*midpoint*), aplicado ao modelo do Eco-indicador 99, para observação do comportamento característico de cada fluxo considerado de cada teor de hidratação do combustível.

Em seguida, realizou-se a comparação entre os ICVs em indicadores de potencial de impacto, com o objetivo de relacionar quantitativamente o potencial de interferência vinculado ao teor de concentração de água de cada combustível, e em cada categoria ambiental.

4.3 RESULTADOS

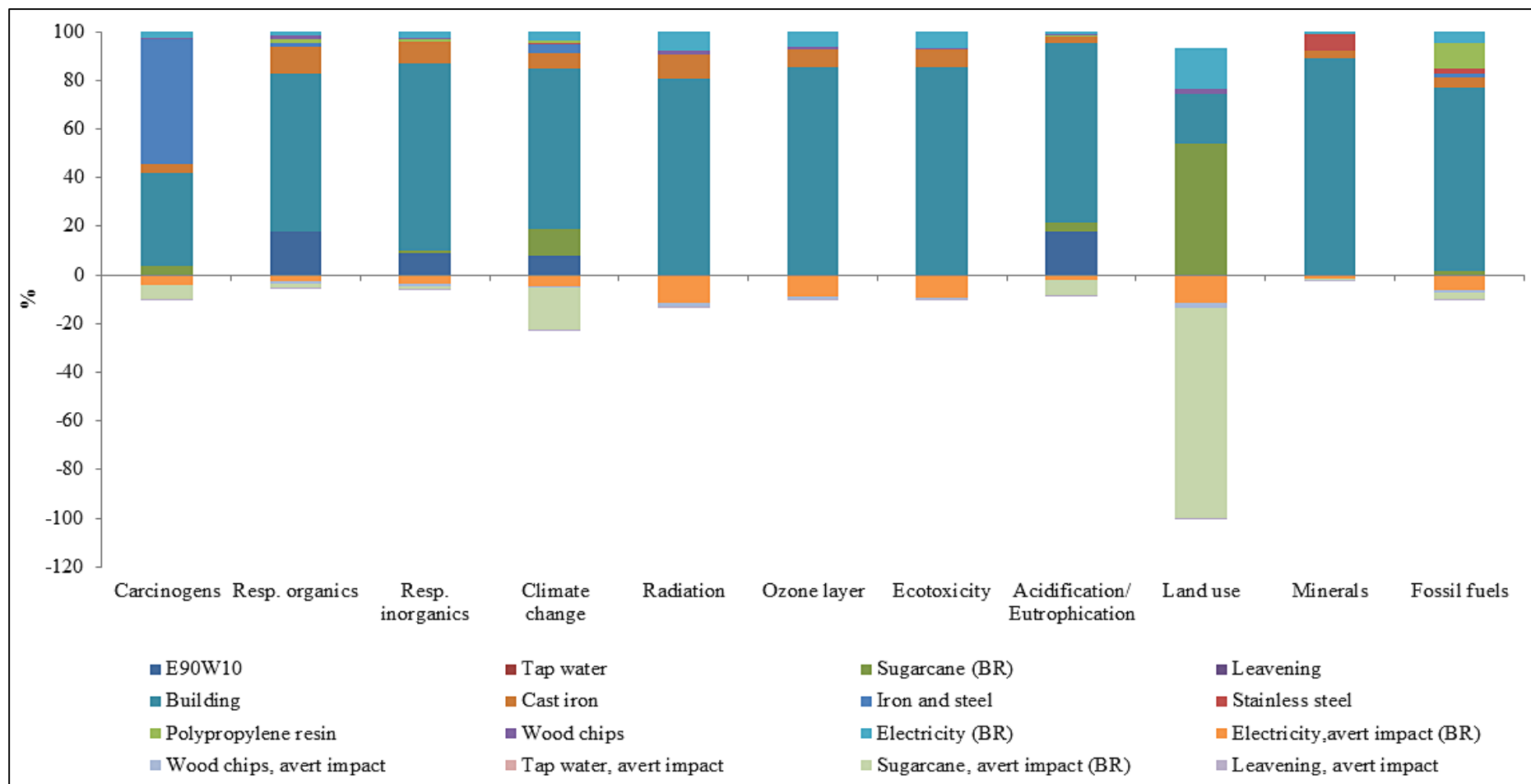
A análise entre os biocombustíveis E95W5, E90W10, E80W20 e E70W30, considerando o delineamento de fronteira de sistema, expressou o comportamento de cada mistura etanol e água, a partir da classificação dos fluxos de entrada e saída às onze categorias ambientais. As Figuras 4.2 a 4.5 apresentam os resultados individuais para os quatro teores de hidratação do etanol e os Apêndices A, B, C e D listam os valores em unidades equivalentes da caracterização de cada mistura hidroalcolica em cada categoria de potencial de impacto ambiental. As variações dos percentuais de potencial de impacto em cada categoria ambiental foram em decorrência das considerações nos ICVs, de produtos evitados, com fluxos materiais e energéticos em menores ou maiores proporções.

Figura 4.2 – Método: Eco-indicador 99 (H) V. 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E95W5.



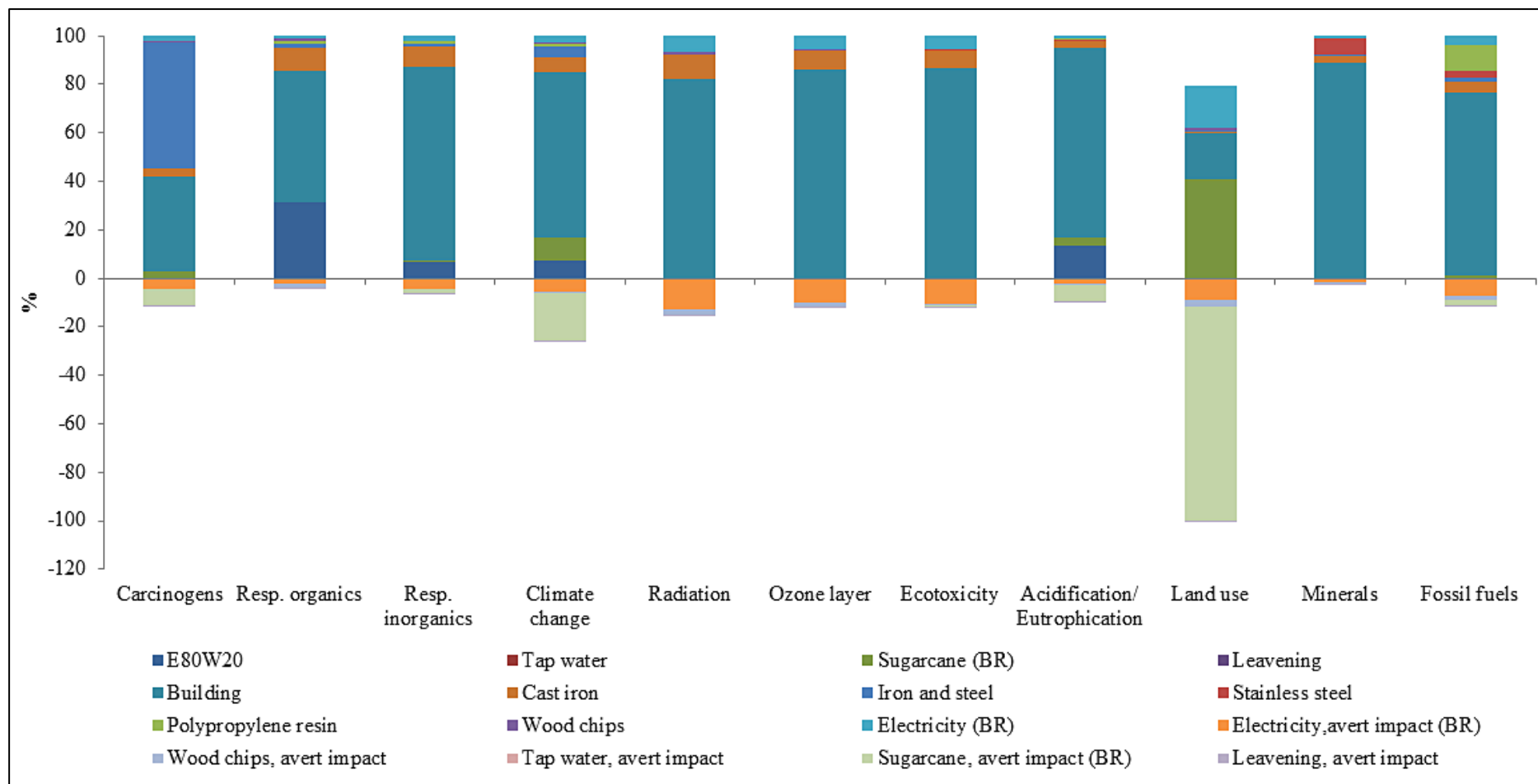
Fonte: Autor. Obtida em SimaPro® 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

Figura 4.3 – Método: Eco-indicador 99 (H) V 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E90W10.



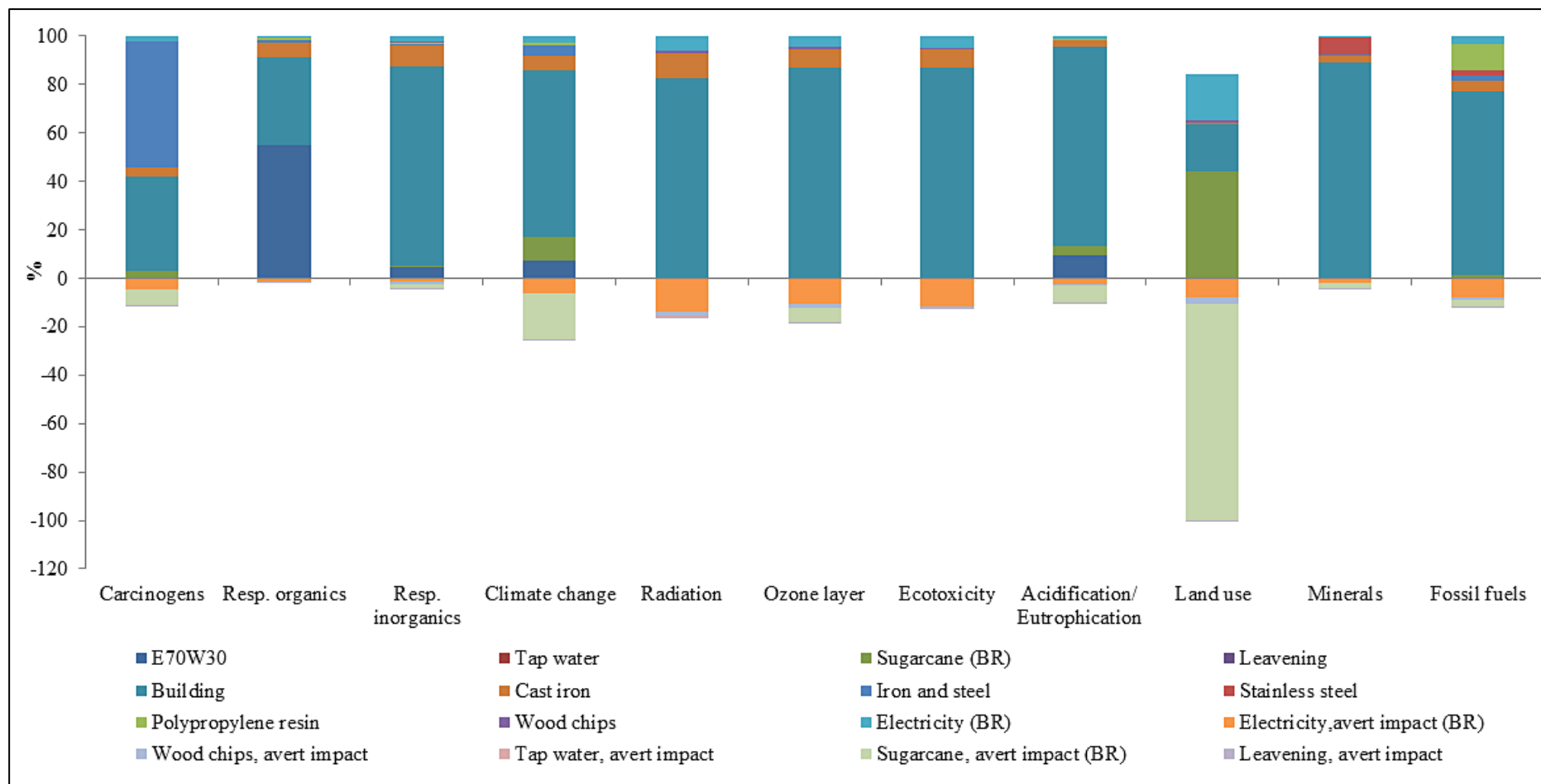
Fonte: Autor. Obtida em SimaPro® 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

Figura 4.4 – Método: Eco-indicador 99 (H) V 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E80W20.



Fonte: Autor. Obtida em SimaPro[®] 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

Figura 4.5 – Método: Eco-indicador 99 (H) V 2.10/ Europe H/A/ Caracterização E70W30.



Fonte: Autor. Obtida em SimaPro® 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

O biocombustível E95W5 apresentou os fluxos de estrutura física com representação de 73,76% do impacto ambiental no ciclo de vida, à medida que os insumos e a energia de saída do sistema aportam 21,92% e 4,33%, respectivamente.

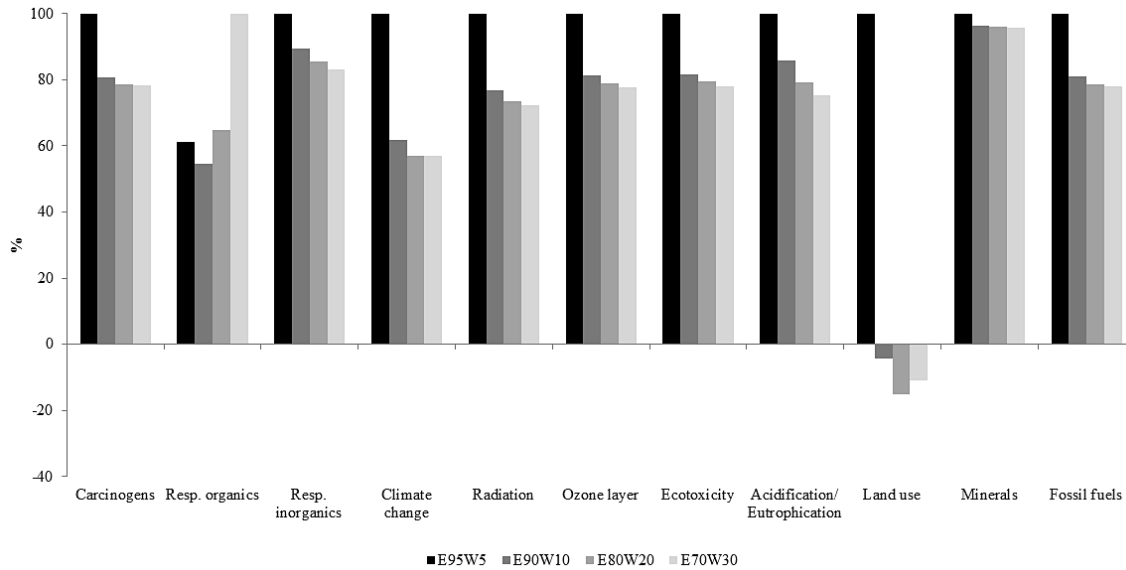
Para os teores de hidratação de 10% v/v, 20% v/v e 30% v/v de água ocorre uma redistribuição do percentual de impacto ambiental entre os fluxos considerados do sistema quando comparados ao etanol com 5% v/v de água. A avaliação indicou um acréscimo de impacto ao fluxo de saída da fronteira (kWh) com a elevação da concentração de água na composição do combustível, à medida que para as entradas de insumos o potencial de impacto decresce com o aumento da hidratação.

Os resultados das categorias do Eco-indicador 99 apresentaram, na ordem E90W10, E80W20 e E70W30, as proporções de 4,83%, 5,44% e 7,04% para a representação de impacto do produto de saída do ciclo de vida. Para insumos, computou os valores de 12,58%, 10,42% e 10,55%, e para estrutura física as taxas de 82,6%, 84,14% e 82,40%. A alteração dos percentuais de impacto ambiental nas três entradas do ciclo de vida decorre da redução de demanda de insumos na etapa industrial com a elevação da hidratação no etanol, ocorrendo uma maior designação de impacto aos demais fluxos de entrada da fronteira de sistema.

O desempenho ambiental para os teores de hidratação acima de 5% de v/v de água apontaram um delineamento de minimização de impacto ambiental superior a 25% nas categorias *respiratory organics* (-27%), *climate change* (-41%), *radiation* (-26%) e *land use* (-110%), em decorrência da redução de demanda na etapa industrial de matéria-prima e energia elétrica. E a contribuição de impacto ambiental da queima dos biocombustíveis em motor SI no ciclo de vida, contabilizaram 34,65% em *respiratory organics*, 6,68% em *respiratory inorganics*, 7,72% em *climate change*, e de 13,57% em *acidification and eutrophication*, devido a fração mássica dos gases de escape (CO, CO₂, NO_x e HC) nos ICVs.

A Figura 4.6 expõe os resultados da comparação entre os quatro teores de hidratação avaliados, demonstrando a redução de impacto ambiental observado com o aumento da concentração acima de 5% v/v de água no combustível. O Apêndice E apresenta os resultados da comparação em unidades equivalentes de cada categoria de potencial de impacto ambiental.

Figura 4.6 – Método: Eco-indicador 99 (H) V 2.10/ Europe H/A/ Caracterização/ Comparação entre os teores de hidratação de 5% a 30% v/v de água.



Fonte: Autor. Obtida em SimaPro[®] 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

A cana-de-açúcar foi a principal entrada do ciclo de vida responsável pela redução de impacto ambiental para os combustíveis E90W10, E80W20 e E70W30 nas categorias de *carcinogens* (58,82%), *climate change* (75,82%) e *land use* (88,16%). A concentração de água no biocombustível, acima de 5% em composição volumétrica, aumenta o rendimento de produto final da destilação e reduz o tempo de duração do lote de destilação [17]. Considerando a unidade funcional desse estudo e a quantificação dos fluxos mássicos e energéticos de entrada, a demanda por matéria-prima no processo diminuiu com o aumento da hidratação do etanol combustível, quando comparados com o etanol hidratado (E95W5). Logo, uma menor fração mássica de cana-de-açúcar, para atender a demanda final de cada combustível, diretamente reduz a área de solo que produz a matéria-prima, e indiretamente os insumos dessa etapa.

Os fluxos de entrada ligados à estrutura física predominaram com média de 80% de representação de potencial de impacto ambiental em 10 categorias de avaliação do método Eco-indicador 99. Sendo superada apenas na categoria *land use* pelo fluxo de matéria-prima, que apresentou média de 59,1% do impacto total vinculado a categoria.

A categoria *minerals*, que quantifica a disponibilidade de um minério em relação a sua extração [27], e o resultado da avaliação do ciclo de vida não apresentou alteração significativa de potencial de impacto ambiental para os combustíveis analisados. A estrutura

física nessa categoria representou 98% do potencial de impacto, identificando que a edificação e os equipamentos da fronteira de sistema em estudo englobam carga ambiental específica, que não apresenta modificação com o teor de hidratação do etanol combustível.

As categorias ambientais de *radiation*, *ozone layer*, *ecotoxicity* e *fossil fuel* demonstraram redução de impacto ambiental de 25,77%, 20,70%, 20,30% 20,73%, respectivamente. A atenuação de impacto ambiental observada decorre dos insumos evitados na etapa industrial, principalmente de energia elétrica. O insumo foi responsável por 85,8% da redução de impacto em *radiation*, de 74,43% em *ozone layer*, de 94,93% em *ecotoxicity* e de 64,97 % em *fossil fuel*. A energia elétrica apresenta redução de demanda na etapa industrial conforme a concentração de água aumenta na composição do combustível, por efeito da redução de duração e da quantidade de lotes necessários para destilar a massa de combustível de cada mistura etanol e água. Estudos identificaram que o gasto energético para destilar o etanol apresenta comportamento de aumento linear entre as misturas com 30% e 10% v/v de água, e exponencial para elevar a composição de 90% v/v a 95% v/v de etanol no combustível [15,17–18,20].

A comparação das quatro misturas de etanol-água, na categoria de *carcinogens* revela que a elevação do teor de hidratação no etanol combustível atua positivamente na minimização de impacto ambiental relacionado aos efeitos das alterações da qualidade na saúde humana frente às intervenções da fronteira de sistema. A entrada de cana-de-açúcar representa 59% do impacto ambiental evitado, enquanto que a energia elétrica 40,87%, para os combustíveis E90W10, E80W20 e E70W30.

Os gases emitidos na queima dos combustíveis no motor SI, – CO, CO₂, NO_x, e HC –, variaram de acordo com o percentual de água presente. A categoria ambiental *respiratory organics* foi a única que caracterizou maior impacto ambiental ao etanol com teor de hidratação mais elevado (E70W30), comportamento que resulta da interferência da água no processo de inflamação inicial do combustível e a taxa de liberação de calor no motor, onde atrasa a primeira e reduz a segunda, ocasionando uma conversão incompleta do combustível em produtos de combustão, influenciando em uma maior emissão de hidrocarbonetos (HC) não queimados [22–23,29]. No entanto, a redução da temperatura no cilindro com a elevação do percentual de água no etanol diminui as emissões de NO_x térmicos [22–23,29], por isso, na categoria ambiental de *respiratory inorganics* o melhor desempenho ambiental foi observado para as misturas com concentração superior a 5% v/v de água.

A menor taxa de emissões de NO_x durante a queima dos combustíveis (uso final) e a menor demanda de matéria-prima (etapa industrial) foram os principais fatores de redução de

impacto ambiental para os combustíveis com teor acima de 5% v/v de água na categoria de *acidification and eutrophication*, por efeito de uma menor área de solo e tratamentos agrícolas embutidos a cana-de-açúcar para a produção de uma mesma saída de energia final no ciclo de vida em avaliação.

As emissões de GEE durante a queima do combustível, apontam que o aumento da concentração de água no etanol combustível reduz as emissões de CO, CO₂ e NO_x e, conseqüentemente o aporte do potencial de substâncias que intensificam o aquecimento global, incluso na categoria *climate change*.

4.4 CONCLUSÃO

A comparação da avaliação do ciclo de vida do etanol, para os teores de hidratação analisados, resultou em um perfil ambiental no qual o melhor desempenho na caracterização foi observado para o combustível com 30% v/v de água (E70W30), seguido pelo etanol com 20% de hidratação (E80W20). Esse resultado demonstrou que a elevação do teor de hidratação do etanol combustível, na fronteira do sistema "portão ao túmulo" delineado, contribui para a redução de impactos ambientais em 10 das 11 categorias de avaliação do método indicador selecionado.

A estrutura física, a cana-de-açúcar e energia elétrica são, nessa ordem, os fluxos que detêm a maior representatividade de impacto ambiental na avaliação do ciclo de vida dos combustíveis analisados. A redução da carga ambiental para teores acima de 10% de hidratação identificam a cana-de-açúcar e a energia elétrica como os fluxos com potencial minimizador de impacto ambiental, em função da menor demanda desses insumos com a elevação da concentração de água na composição do combustível.

Assim, a concentração acima de 5% v/v de água no combustível representa um aspecto mitigador de impacto ambiental, apresentando uma oportunidade de otimização de produto e de processo, além de cenários potencialmente mais atrativos economicamente devido à redução de demanda de insumos, convergindo para o desenvolvimento sustentável.

4.5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ACV Brasil e ao Grupo de Pesquisa em motores, combustíveis e emissões (GPMOT) da Universidade Federal de Santa Maria, pelo apoio e suporte no desenvolvimento do estudo. E a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

4.6 REFERÊNCIAS

- [1] TESKE, Sven et al. **Renewables Global Futures Report: Great debates towards 100% renewable energy**. Paris: REN21 Secretariat, 98 p., 2017.
- [2] REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Global Futures Report: Great debates towards 100% renewable energy** REN21 Secretariat, Paris, 98 p., 2017.
- [3] CAPAZ, Rafael Silva. **Estudo do desempenho energético da produção de Biocombustíveis: Aspectos Metodológicos e Estudos de Caso**. 2009. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.
- [4] MANOCHIO, C. et al. **Ethanol from biomass: A comparative overview**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 80, p. 743-755, 2017.
- [5] LEAL, Manoel Regis Lima Verde; WALTER, Arnaldo da Silva. **Sustainability of the production of ethanol from sugarcane: the Brazilian experience**. In: Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol, vol. 27, 2010.
- [6] WANG, Michael et al. **Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use**. Environmental research letters, v. 7, n. 4, p. 045905, 2012.
- [7] SHAPOURI, Hosein; DUFFIELD, James A.; WANG, Michael Q. **The energy balance of corn ethanol: an update**. United States Department of Agriculture, Economic Research Service, nº 34075, 2002.
- [8] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- [9] DE PAUL, Nilson Maciel; FUCK, Marcos Paulo; DALCIN, Rafael Barreto. **Trajetórias Tecnológicas do Etanol: do Proálcool à Alcoolquímica**. Espacios, v. 33, n. 9, 2012.
- [10] ANDERSEN, Allan Dahl. **A functions approach to innovation system building in the South: the pre-Proálcool evolution of the sugarcane and biofuel sector in Brazil**. Innovation and Development, v. 5, n. 1, p. 1-21, 2015.

- [11] BALAT, Mustafa; BALAT, Havva; ÖZ, Cahide. **Progress in bioethanol processing**. Progress in energy and combustion science, v. 34, n. 5, p. 551-573, 2008.
- [12] VON BLOTTNITZ, Harro; CURRAN, Mary Ann. **A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective**. Journal of cleaner production, v. 15, n. 7, p. 607-619, 2007.
- [13] MORALES, Marjorie et al. **Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: environmental impacts and energy balance**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 42, p. 1349-1361, 2015.
- [14] BONIN, Catherine; LAL, Rattan. **Bioethanol potentials and life-cycle assessments of biofuel feedstocks**. Critical reviews in plant sciences, v. 31, n. 4, p. 271-289, 2012.
- [15] SAXENA, Samveg et al. **Wet ethanol in HCCI engines with exhaust heat recovery to improve the energy balance of ethanol fuels**. Applied energy, v. 98, p. 448-457, 2012.
- [16] MUNSIN, R. et al. **An experimental study on performance and emissions of a small SI engine generator set fuelled by hydrous ethanol with high water contents up to 40%**. Fuel, v. 106, p. 586-592, 2013.
- [17] FAGUNDEZ, J. L. S. et al. **Determination of optimal wet ethanol composition as a fuel in spark ignition engine**. Applied thermal engineering, v. 112, p. 317-325, 2017.
- [18] MAYER, Flávio Dias et al. **Why small-scale fuel ethanol production in Brazil does not take off?**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 43, p. 687-701, 2015.
- [19] MARTINEZ-FRIAS, Joel; ACEVES, Salvador M.; FLOWERS, Daniel L. **Improving ethanol life cycle energy efficiency by direct utilization of wet ethanol in HCCI engines**. Journal of Energy Resources Technology, v. 129, n. 4, p. 332-337, 2007.
- [20] BREAUX, Baine B.; ACHARYA, Sumanta. **The effect of elevated water content on ethanol combustion: a feasibility study**. In: ASME 2011 Power Conference collocated with JSME ICOPE 2011. American Society of Mechanical Engineers, p. 51-58, 2011.
- [21] SAFFY, Howard A. et al. **Energy, carbon dioxide and water use implications of hydrous ethanol production**. Energy Conversion and Management, v. 105, p. 900-907, 2015.
- [22] MACK, J. Hunter; ACEVES, Salvador M.; DIBBLE, Robert W. **Demonstrating direct use of wet ethanol in a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine**. Energy, v. 34, n. 6, p. 782-787, 2009.
- [23] LANZANOVA, Thompson Diórdinis Metzka; DALLA NORA, Macklini; ZHAO, Hua. **Performance and economic analysis of a direct injection spark ignition engine fueled with wet ethanol**. Applied energy, v. 169, p. 230-239, 2016.

- [24] KUN-BALOG, Attila; SZTANKÓ, Krisztián; JÓZSA, Viktor. **Pollutant emission of gaseous and liquid aqueous bioethanol combustion in swirl burners**. Energy Conversion and Management, v. 149, p. 896-903, 2017.
- [25] KIM, J. K. et al. **Cold performance of various biodiesel fuel blends at low temperature**. International journal of automotive technology, v. 13, n. 2, p. 293-300, 2012.
- [26] AMBRÓS, W. M. et al. **Experimental analysis and modeling of internal combustion engine operating with wet ethanol**. Fuel, v. 158, p. 270-278, 2015.
- [27] PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Database Manual: Methods library**. PRé Consultants: p. 57, 2010.
- [28] MAYER, Flávio D. et al. **Environmental and energy assessment of small scale ethanol fuel production**. Energy & Fuels, v. 29, n. 10, p. 6704-6716, 2015.
- [29] SARI, Rafael Lago. **Avaliação da utilização de etanol com elevados teores de água em motores de combustão interna com ignição por centelha**. 2017. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- [30] DAGNESE, Felipe. et al. **Mapeamento do Processo Produtivo do Etanol de Cana-de-açúcar: Estudo de Caso da Microdestilaria do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS**. In: Jornada Acadêmica Integrada (JAI), 2012, Santa Maria. Anais eletrônicos da Jornada Acadêmica Integrada (JAI).
- [31] PERRY, R. H.; GREEN, D. W.. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 8th. ed., New York, McGraw-Hill Book Co., 2007.

5 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL DO ETANOL HIDRATADO E SUPERHIDRATADO APLICADA A UMA DESTILARIA EM PEQUENA ESCALA

C. Peyrot¹, R. Hoffmann², F. D. Mayer², J. Azolim¹, M. Brondani¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria

² Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria

Resumo

A produção em pequena escala de etanol combustível (PPE) apresenta sérios problemas de eficiência energética do processo. A produção de etanol superhidratado apresenta uma alternativa de melhorar o equilíbrio energético no ciclo produtivo e também reduzir emissões de GEE na queima do biocombustível. O estudo buscou avaliar o melhor cenário de produção em uma PPE e o uso em máquina térmica do etanol combustível nas composições de E95W5 (95% v/v de etanol e 5% v/v de água), E90W10 (90% v/v de etanol e 10% v/v de água), E80W20 (80% v/v de etanol e 20% v/v de água) e E70W30 (70% v/v de etanol e 30% v/v de água), através de uma Análise de Eficiência Energética (AEE) aliada a uma avaliação de potencial de aquecimento global. Os resultados da AEE foram expressos em *NER (Net Energy Ratio)* e *NEB (Net Energy Balance)* e demonstraram maior excedente de energia para o cenário de produção de etanol com 30% de hidratação (E70W30) e a utilização do bagaço (coproduto) na cogeração de energia térmica. A categoria de impacto ambiental *GWP (Global Warming Potential)*, do método de avaliação *CML 2 Baseline 2000*, apontou o maior potencial mitigador de impacto ambiental ao combustível com 30% v/v de água (E70W30). Portanto, o aumento da hidratação do etanol combustível indica uma oportunidade de melhorar o equilíbrio energético em pequena escala de produção.

Palavras-chaves: Cana-de-açúcar; Etanol de primeira geração; Destilação; Taxa de energia líquida; Balanço de energia líquida; Potencial de aquecimento global.

5.1 INTRODUÇÃO

A busca por desenvolvimento e segurança no setor energético aumentou os incentivos públicos em energias renováveis, sustentáveis e menos poluentes [1–2]. A expansão da produção de biocombustíveis vem ao encontro desse objetivo, como uma alternativa energética para os setores de transporte, o que fomenta a economia rural e atua como fonte substituta aos combustíveis fósseis, atenuando impactos ambientais [3–7].

Em 2015, a oferta mundial de energias renováveis correspondeu a 13,4% da energia primária produzida, sendo que os biocombustíveis líquidos representaram 4,3% do total da energia renovável [8]. No Brasil, os biocombustíveis líquidos, são responsáveis por 20,1% da matriz interna de energia no setor de transportes, onde o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar representa 16,8% dessa energia [9].

A sustentabilidade da cadeia produtiva de bioenergia, a partir de biocombustíveis, é intensamente discutida em aspectos de balanços energéticos, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e fatores econômicos [10–12]. Um biocombustível para ser uma alternativa viável precisa proporcionar ganho de energia líquido superior às fontes de energia usadas para sua produção, ter benefícios ambientais, apresentar produção significativa para ser competitivo economicamente e ter impacto mínimo no fornecimento de alimento [3].

As matérias-primas mais utilizadas para produção de biocombustíveis de primeira geração são plantas agrícolas com elevado teor de óleo, açúcares ou amido [4,7]. Porém, algumas matérias-primas exigem altos subsídios do governo para subsistir, sendo consideradas como moderadamente eficientes, como no caso do biodiesel de colza na EU e o etanol de milho nos EUA [1,13]. No entanto, o etanol de cana-de-açúcar no Brasil é reconhecido como uma fonte de energia sustentável pela *Environmental Protection Agency of US* (EPA), pelos baixos custos e subsídios para a produção e redução de emissões de CO₂ [10,14–17].

O Brasil teve a produção de etanol (anidro e hidratado) estimada em 28,276 bilhões de litros no ano de 2016, sendo a região sudeste e centro-oeste responsáveis por 59,2% e 29,5% da produção, respectivamente [9]. Essa centralização da produção ocasiona a alguns Estados a necessidade de importar de outras regiões o combustível para suprir a demanda interna, como no Rio Grande do Sul (RS) onde a produção não supera 2% do etanol consumido, ocasionando altos custos econômicos e ambientais, este último vinculado às emissões do transporte do combustível importado e o maior consumo de combustíveis fósseis [18]. À vista que a descentralização da produção do etanol em grande escala para as em pequena escala,

com o objetivo de atender demanda interna, é discutida como uma alternativa de desenvolvimento e estabilidade energética local, além de estimular o mercado com o aumento da produtividade agrícola, mitigar emissões de poluentes e favorecer a inclusão de pequenos proprietários na cadeia de produção [1,14,19–21].

Maroun et al. [13] aponta que a produção de etanol, devidamente planejada, em unidades de pequena escala favorece a mitigação de diversos impactos ambientais observados na produção em larga escala. De acordo com Leal et al. [6], a produção de etanol, em concomitância com as demais culturas e manejos realizados na pequena propriedade, causa a redução de alteração na estrutura (compactação e erosão) e biodiversidade do solo, a diminuição no consumo de água no processo produtivo, a minimização das emissões de CO₂ em função do aumento do uso local de etanol, do transporte evitado na importação do biocombustível de outras regiões, e no manejo da colheita da cultivar sem o emprego da prática de queima na pré colheita da matéria-prima.

Mayer et al. [18], descreve que um dos maiores problemas enfrentados em destilarias de etanol em pequena escala é a baixa eficiência do processo, quando comparada com a eficiência global de um sistema em grande escala. Ainda assim, a menor eficiência energética pode ser contornada com o aproveitamento da energia embutida nos coprodutos do processamento agrícola e industrial direto na propriedade [13]. No caso do etanol de cana-de-açúcar, o bagaço pode ser aplicado como fonte de alimento para animais, na cogeração de energia (vapor) ou como cobertura vegetal para o solo, enquanto a vinhaça tem elevado potencial como fertilizante [18,22]. Outro fator relevante nos saldos energéticos de uma destilaria em pequena escala é o uso final do combustível produzido. Sendo o destino à comercialização, é necessário que o etanol atenda os critérios estabelecidos e regulamentados pela Agência Nacional de Óleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), mas se o combustível for para autoconsumo, o produto final pode apresentar padrão distinto, como maior teor de hidratação, o que principalmente reduz o consumo de energia na etapa de destilação [18,23].

O aumento da hidratação do etanol combustível é uma alternativa de aperfeiçoar o equilíbrio energético no ciclo produtivo e também reduzir emissões de GEE na queima do biocombustível em motores *Spark Ignition* (SI) e *Homogeneous Charge Compression Ignition* (HCCI) [24–30]. Valores de ganho em energia global na ordem de até 34% são relatados para etanol com composição entre 10% a 30% v/v de água, em relação ao etanol anidro [27,28]. Fagundez [23] relata que a energia gasta para destilar 1kg de etanol combustível com 40% v/v de água na composição é, aproximadamente, seis vezes inferior à energia empregada para destilar o etanol com 5% v/v de água. Teores mais elevados de hidratação do etanol alteram

características de operação do motor, sendo que para motores SI são relatados aumentos de eficiência ligados a potência, a menor temperatura dos gases de escape e ao consumo específico para composições de etanol acima de 5% v/v de água. As emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) são reduzidas em função da menor temperatura dos gases de escape, ao passo que as emissões de hidrocarbonetos (HC) aumentam, devido a conversão incompleta do combustível em produtos de combustão pelo atraso na chama inicial e a menor taxa de liberação de calor no cilindro [26,27,29,31–34].

O desenvolvimento de uma análise energética direcionada a métricas de eficiência, e associada a uma avaliação ambiental de contribuição ao aquecimento global, passa a ser um estudo pertinente à produção industrial de etanol em pequena escala com hidratação nas composições de 5% v/v a 30% v/v de água, como uma alternativa de melhorar o saldo de energia da cadeia produtiva local, além de apresentar aspectos passíveis de minimizar impactos ambientais.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

A Análise de Eficiência Energética (AEE) considerou a etapa de produção industrial de etanol combustível para E95W5 (95% v/v de etanol e 5% v/v de água) e três teores de hidratação na composição de E90W10 (90% v/v de etanol e 10% v/v de água), E80W20 (80% v/v de etanol e 20% v/v de água) e E70W30 (70% v/v de etanol e 30% v/v de água). Os dados foram obtidos na planta de produção de etanol hidratado em pequena escala, designada nesse manuscrito como (PPE), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no estado do Rio Grande do Sul (BR). A PPE opera em regime de alimentação descontínuo e com produto final na composição de 95% v/v de etanol.

A AEE abrangeu os níveis de regressão: (1) que engloba a energia usada diretamente no processo; (2) que compreendendo a energia indireta ligada aos insumos; e o (3) que considera a energia vinculada aos equipamentos e edificação [5,18,35]. Os indicadores usados no estudo são a taxa de energia líquida (NER do inglês – *Net Energy Ratio*) e o balanço líquido de energia (NEB do inglês – *Net Energy Balance*), por meio das equações 5.1 e 5.2, respectivamente.

$$NER = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (5.1)$$

$$NEB = E_{out} - E_{in} \quad (5.2)$$

Onde, E_{out} é a energia de saída do sistema (MJ) e E_{in} a energia de entrada (MJ).

A avaliação do sistema verificou 4 cenários de distribuição de energia:

- Cenário 1: análise individual para cada teor de hidratação do etanol combustível considerando todos os níveis de regressão e a energia de saída embutida nos coprodutos do processo, vinhaça e bagaço ("*business as usual*");
- Cenário 2: análise individual para cada teor de hidratação do etanol combustível incluindo todos os níveis de regressão, sem considerar no fluxo de saída a energia embutida nos coprodutos do processo (vinhaça e bagaço);
- Cenário 3: análise individual para cada teor de hidratação do etanol combustível compreendendo os níveis de regressão 1 e 2, sem considerar a energia embutida nos coprodutos do processo (vinhaça e bagaço);
- Cenário 4: análise individual para cada teor de hidratação do etanol combustível analisando nos níveis de regressão 1 e 2, considerando o bagaço como fonte térmica de energia na etapa industrial, e a energia embutida nos coprodutos (vinhaça e o excedente de energia do bagaço).

A avaliação ambiental do potencial de aquecimento global (GWP do inglês - *Global Warming Potential*) foi aplicada ao uso estacionário dos quatro teores de hidratação do etanol combustível, com o objetivo de gerar excedente de energia elétrica para consumo interno da UFSM. As informações de emissões específicas e de operação do motor, descritos na Tabela 1, foram fornecidas pelo Grupo de pesquisa em motores, combustíveis e emissões (GPMOT) da UFSM, e avaliados pelo método CML 2 *Baseline* 2000, desenvolvido e publicado pelo Instituto de Ciências Ambientais (CML) da Universidade de Leiden [36].

Tabela 5.1 – Inventário de emissões específicas do conjunto motor + gerador para 1000 horas de operação.

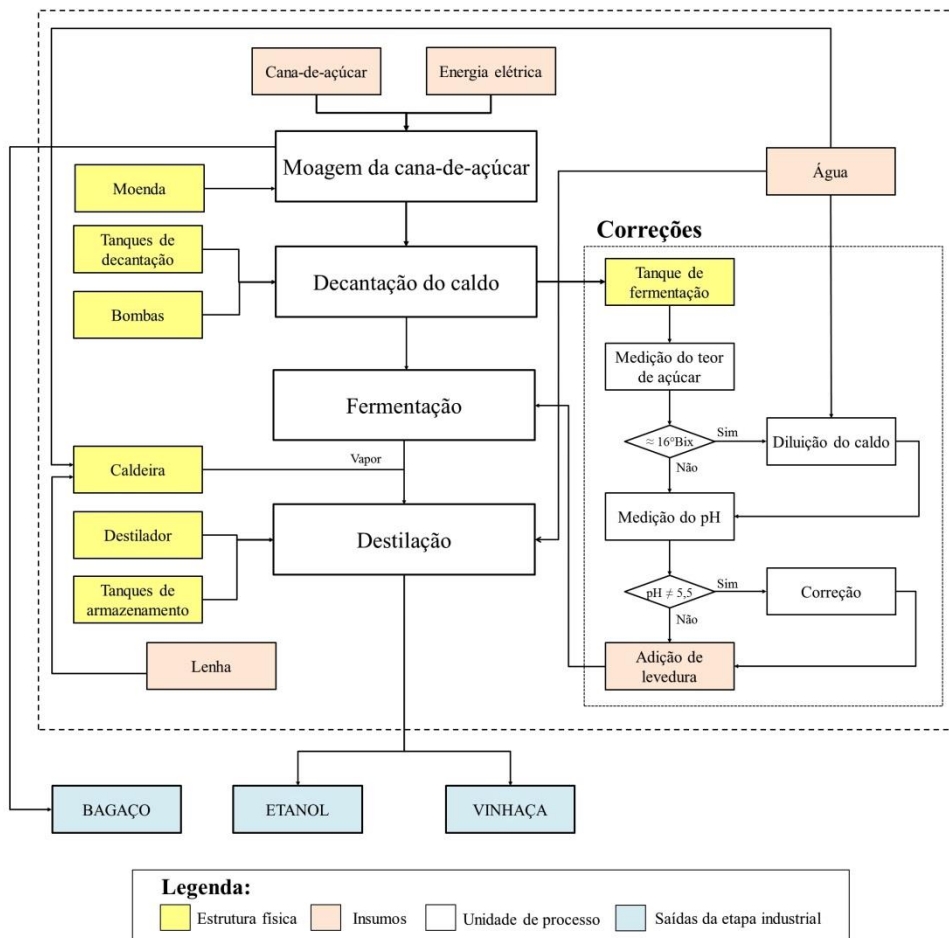
| | Unidade | Combustíveis | | | |
|---------------------------------------|--------------------|--------------|---------|---------|---------|
| | | E95W5 | E90W10 | E80W20 | E70W30 |
| CO ₂ | kg | 137,93 | 124,48 | 59,60 | 46,67 |
| CO | kg | 4727,28 | 4669,21 | 4291,15 | 4233,91 |
| NO _x | kg | 65,60 | 74,44 | 53,01 | 36,05 |
| HC | kg | 20,90 | 18,41 | 38,12 | 101,76 |
| Motor + Gerador | kg | 152,0 | 152,0 | 152,0 | 152,0 |
| Consumo de mistura total ¹ | kg.h ⁻¹ | 3,70 | 3,98 | 4,56 | 5,79 |

¹ Consumo de mistura total do combustível (combustível + água).

A unidade funcional para a AEE compreendeu dados de produção da PPE para a geração de 8105,309 kWh (aproximadamente 29179,0 MJ) na etapa de uso dos combustíveis.

A Figura 5.1 descreve as operações unitárias e os fluxos essenciais para operação da PPE para produção de etanol hidratado (E95W5) em regime de alimentação descontínuo. Os dados de entradas e saídas para os combustíveis E90W10, E80W20 e E70W30 foram conduzidos de modo comparativo ao etanol hidratado.

Figura 5.1– Operações unitárias desenvolvidas na PPE.



Fonte: Autor.

5.2.1 Coleta de dados

A construção dos bancos de dados para a AEE foi dividida em duas fases. A primeira destinada à coleta de dados específicos da etapa industrial em avaliação com a quantificação de índices mássicos (kg), de área (m²) e energia elétrica (kWh). Na segunda fase foi

estabelecida a relação entre os fluxos de entrada e saída com seus respectivos coeficientes energéticos.

A Tabela 5.2 e Tabela 5.3 apresentam informações de características de operação PPE com os dados estimados para a etapa e os coeficientes energéticos utilizados, respectivamente. Os fluxos de energia elétrica, vinhaça e produção de etanol, para as misturas de etanol e água, foram calculados a partir da relação percentual de volume destilado (mL) e tempo de destilação (min), observados por Fagundez [23], e o valor obtido *in loco* na PPE de 282,22 kWh_{elétrica} para a produção de 60 litros de etanol hidratado (E95W5), em 180 min., observados por Brondani [37].

Tabela 5.2 – Descrição das entradas e saídas do processo industrial da PPE para cada teor de hidratação do etanol combustível.

| | Unidade | Combustíveis | | | |
|--|----------------------|-------------------|---------|----------|----------|
| | | E95W5 | E90W10 | E80W20 | E70W30 |
| Estrutura física | | | | | |
| Construção | m ² | 102,84 | 102,84 | 102,84 | 102,84 |
| Moenda | kg | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| Tanque de decantação (uma unidade) | kg | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Bomba (duas unidades) | kg | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Tanque de fermentação (três unidades) | kg | 135 | 135 | 135 | 135 |
| Destilador | kg | 280 | 280 | 280 | 280 |
| Tanque de armazenamento (duas unidades) | kg | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Tanque de armazenamento (duas unidades) | kg | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Tanque de armazenamento (duas unidades) | kg | 240 | 240 | 240 | 240 |
| Caldeira | kg | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Insumos | | | | | |
| Cana-de-açúcar | kg | 80659 | 30983 | 25488 | 26547 |
| Levedura | kg | 54,69 | 21,01 | 17,28 | 17,99 |
| Energia elétrica | kWh | 21436 | 8795 | 7390 | 6414 |
| Água | kg | 19609 | 10558 | 7208 | 7902 |
| Lenha | kg | 3511 | 1775 | 1176 | 1373 |
| Saída etapa industrial | | | | | |
| Etanol | kg | 3697 | 3984 | 4564 | 5790 |
| Vinhaça | L | 41015 | 12713 | 9091 | 8463 |
| Bagaço | kg | 35087 | 13477 | 11087 | 11548 |
| Características de operação da PPE | | | | | |
| Rendimento destilação | % | 10.0 ¹ | 27,374 | 36,872 | 43,575 |
| Rendimento extração do caldo | % | 56.5 ¹ | 56.5 | 56.5 | 56.5 |
| Densidade do etanol | kg.L ⁻¹ | 0.81124 | 0,8314 | 0,859535 | 0,885875 |
| Carga do reboiler (lote) | L | 600 ¹ | 600 | 600 | 600 |
| Produção de etanol | L.lote ⁻¹ | 60 ¹ | 164,246 | 221,229 | 261,453 |
| Duração do lote | min. | 180 ¹ | 192,273 | 196,364 | 163,636 |

¹ Valores reais de operação na PPE para produto de saída com 95% v/v de etanol;

Fonte: Autor.

Tabela 5.3 – Coeficientes energéticos utilizados na AEE.

| Dados | Coefficiente energético | Unidade |
|---|-------------------------|------------------------|
| Entradas | | |
| Construção | 6548.40 | MJ . m ⁻² |
| Moenda | 108.37 | MJ . kg ⁻¹ |
| Tanque de decantação (uma unidade) | 73.40 | MJ . kg ⁻¹ |
| Bomba (duas unidades) | 108.37 | MJ . kg ⁻¹ |
| Tanque de fermentação (três unidades) | 73.40 | MJ . kg ⁻¹ |
| Destilador | 104.91 | MJ . kg ⁻¹ |
| Tanque de armazenamento (duas unidades) | 73.40 | MJ . kg ⁻¹ |
| Tanque de armazenamento (duas unidades) | 73.40 | MJ . kg ⁻¹ |
| Tanque de armazenamento (duas unidades) | 73.40 | MJ . kg ⁻¹ |
| Caldeira | 135.20 | MJ . kg ⁻¹ |
| Insumos | | |
| Cana-de-açúcar | 4.437 | MJ . kg ⁻¹ |
| Levedura | 1.39 | MJ . kg ⁻¹ |
| Energia elétrica | 3.6 | MJ . kWh ⁻¹ |
| Água | 0.00494 | MJ . kg ⁻¹ |
| Lenha | 12.98 | MJ . kg ⁻¹ |
| Saídas | | |
| Etanol (E95W5) ¹ | 24.48 | MJ . kg ⁻¹ |
| Etanol (E90W10) ¹ | 22.64 | MJ . kg ⁻¹ |
| Etanol (E80W20) ¹ | 19.23 | MJ . kg ⁻¹ |
| Etanol (E70W30) ¹ | 17.61 | MJ . kg ⁻¹ |
| Vinhaça | 0.0238 | MJ . kg ⁻¹ |
| Bagaço | 8.92 | MJ . kg ⁻¹ |

¹ Dados de BILHÃO (2015, p.78) [38].

Fonte: Adaptada de [18].

O consumo de água na PPE foi quantificado com base na demanda para diluição do caldo, geração de vapor, limpeza e de manutenção dos equipamentos.

O caldo da PPE apresenta em média 16 ° Brix, sendo 14 ° Brix o valor ótimo de operação, com água de diluição estimada por meio da Equação (5.3).

$$\text{Água de diluição} = \left(\frac{c \times gb_{caldo}}{gb_{desejado}} \right) - c \quad (5.3)$$

Onde, c é o volume de caldo a ser diluído (L), gb_{caldo} o ° Brix do caldo a ser diluído, e $gb_{desejado}$ o ° Brix do caldo corrigido.

A água de limpeza e de manutenção dos equipamentos foi calculada no valor de 5% do consumo de vapor total na PPE [18]. A energia de fabricação dos equipamentos foi estimada em 4% da energia dessas entradas na PPE [18].

O consumo de vapor total por mistura combustível foi estimado através da soma da quantidade de calor necessária para aquecer o vinho e para vaporizar o etanol, as Equações 5.4 a 5.7 apresentam os cálculos desenvolvidos. No cálculo do calor para aquecer o vinho a

variável de calor latente de vaporização (λ_{etanol}) para E95W5, E90W10, E80W20 e E70W30 foi estimado por regressão linear a partir dos valores apresentados por Perry e Green [39].

$$m_{vapor} = \frac{Q_T}{\lambda_{vapor}} \quad (5.4)$$

Sendo, a massa total de vapor (m_{vapor}), em kg, a razão entre o calor total fornecido à coluna de destilação (Q_T) e o calor latente de vaporização (λ_{vapor} de 2,2215 MJ.kg⁻¹).

$$Q_T = Q_{S. Vinho} + Q_{Vap. Etanol} \quad (5.5)$$

Onde, o calor total fornecido à coluna de destilação (Q_T) em MJ o somatório: do calor de aquecimento do vinho até a temperatura de ebulição ($Q_{S. Vinho}$), em MJ; e o calor de vaporização do etanol ($Q_{Vap. Etanol}$), em MJ.

$$Q_{S.Vinho} = m_{vinho} \times Cp \times \Delta t \quad (5.6)$$

$$Q_{Vap. Etanol} = m_{etanol} \times \lambda_{etanol} \times (R + 1) \quad (5.7)$$

Onde, m é a massa total (kg), Cp o calor específico da mistura etanol-água (MJ. kg^{oC}⁻¹), Δt a variação de temperatura final e inicial na coluna de destilação (°C), o λ_{etanol} o calor de vaporização do etanol (MJ.kg⁻¹), e R a taxa de refluxo observada por Fagundez [23].

A produção de vinhaça de cada mistura combustível avaliada foi estimada a partir da subtração do volume destilado (L) da carga do reboiler (L).

As entradas de lenha e levedura foram calculadas de acordo com capacidade de geração de vapor da caldeira, à pressão de operação de 0,7845 MPa, com consumo na ordem de 90 kg_{lenha}.h⁻¹, e a aplicação de 1,2 g_{levedura}.L_{caldo}⁻¹ [18].

A energia embutida na estrutura física da PPE foi contabilizada de acordo com a vida útil, sendo esse período para equipamentos pesados (moenda e caldeira) de 25 anos, coluna de destilação de 15 anos, demais equipamentos 10 anos e construção predial de 50 anos. À energia relacionada aos equipamentos e a construção predial foi adicionado mais 4% da energia total para as ações de manutenção [18].

O potencial de impacto ambiental GWP, da queima dos quatro teores de hidratação do etanol combustíveis, foi caracterizado e quantificado no software SimaPro[®] 8.3.0.0 Faculty

por meio da categoria de potencial de impacto ambiental do método de avaliação CML 2 *Baseline* 2000 [36].

5.3 RESULTADOS

Os resultados da análise energética de cada teor de hidratação do etanol combustível, através do cálculo do NER e NEB da etapa industrial para os cenários estabelecidos, são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Análise de eficiência energética do processo industrial da PPE.

| | NER | | | | NEB (GJ) | | | |
|------------------|-------|--------|--------|--------|-----------|----------|----------|---------|
| | E95W5 | E90W10 | E80W20 | E70W30 | E95W5 | E90W10 | E80W20 | E70W30 |
| Cenário 1 | 0,84 | 1,09 | 1,19 | 1,19 | - 780,69 | 168,27 | 302,27 | 447,73 |
| Cenário 2 | 0,19 | 0,47 | 0,56 | 0,56 | - 3918,82 | -1036,37 | -688,409 | -583,90 |
| Cenário 3 | 0,19 | 0,47 | 0,57 | 0,64 | -3902,88 | -1020,43 | -672,46 | -567,96 |
| Cenário 4 | 0,80 | 1,08 | 1,20 | 1,30 | -865,59 | 133,31 | 284,50 | 424,26 |

Fonte: Autor.

Valor de NER, igual ou superior a 1, foram observados para os teores de hidratação de 10% v/v, 20% v/v e 30% v/v de água no etanol combustível, nos cenários 1 e 4. As taxas e os saldos positivos no cenário 1 são, principalmente, em resultado da redução da energia de entrada na ordem de 59,82% para o E90W10, de 67,53% para o E80W20 e de 66,76% para o E70W30, quando comparado com a energia de entrada do combustível com 95% v/v de etanol (E95W5). Para o cenário 4, a redução da energia de entrada aumenta para a grandeza de 61,12% para o E90W10, de 67,62% para o E80W20 e de 67,89% para o E70W30 em comparação com o E95W5.

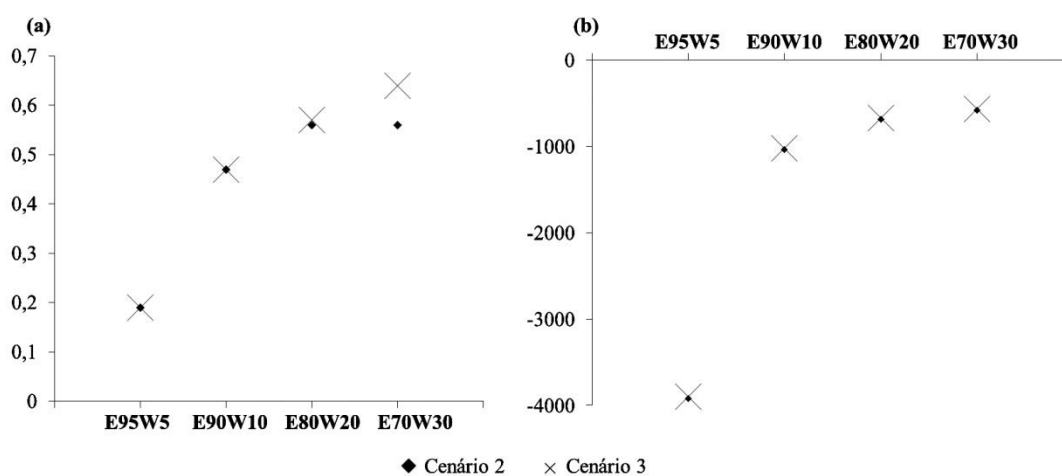
A avaliação a partir do NEB revelou resultados de desempenho semelhantes ao NER, onde o etanol com hidratação de 10% a 30% v/v de água na composição apresentaram balanços positivos para os cenários 1 e 4. No cenário 1 a energia de saída supera a energia de entrada no processo em 8,68% para o E90W10, de 19,30% para o E80W20 e de 27,92% para o E70W30, o E95W5 registrou déficit de -16,18%. No cenário 4 os resultados são análogos, onde o excedente de energia foi de 7,88% para o E90W10, de 30,10% para o E80W20 e de 20,36% para o E70W30, enquanto que o E95W5 o déficit foi de -19,89%.

As duas avaliações da PPE indicaram que a energia de saída do sistema, para os três teores de hidratação acima de 5% v/v de água na composição do etanol combustível, supera a energia investida nos cenários 1 e 4 que consideraram a energia embutida nos coprodutos do processo de produção (bagaço e vinhaça).

Nos cenários 2 e 3, os resultados configuram insuficiência energética do processo industrial, o que retrata um dos problemas encontrados em destilarias em pequena escala, onde a eficiência global do processo atinge um máximo de 65% de uma destilaria de grande escala [18]. A redução de eficiência global em um sistema de produção de etanol em pequena escala advém, principalmente, da maior entrada de matéria-prima para produzir a mesma quantidade de etanol quando comparado com um sistema em grande escala, e também do regime de operação descontínuo praticado, o que ocasiona maior consumo de energia e perda de etanol na vinhaça (baixa eficiência de destilação) [20].

No entanto, a Figura 5.2 revela que as métricas de eficiência indicam tendência positiva de ganho de energia útil com a elevação da concentração de água no combustível nos cenários 2 e 3 avaliados. O aumento do grau de hidratação no combustível delineou um comportamento de redução gradativa de energia de entrada no sistema, determinado pela diminuição de demanda de matéria-prima e insumos (água, luz, leveduras e lenha) calculados para os combustíveis E90W10 a E70W30 em relação ao E95W5. Uma vez que os teores de hidratação acima de 5% v/v de água no etanol necessitam de menos lotes de destilação para produzir a quantidade de etanol requerida, devido ao aumento de volume destilado conforme eleva a concentração de água no produto final.

Figura 5.2 – Curvas de dispersão dos resultados para NER (a) e NEB (b) nos Cenários 2 e 3.



Fonte: Autor.

Os cenários 2 e 3, que não consideram a energia embutida nos coprodutos (bagaço e vinhaça) do processo industrial, apresentaram relação de energia de entrada e saída menores que as observadas para os cenários 1 e 4, indicando que os subprodutos melhoram o equilíbrio energético apontado pelos indicadores NER e NEB.

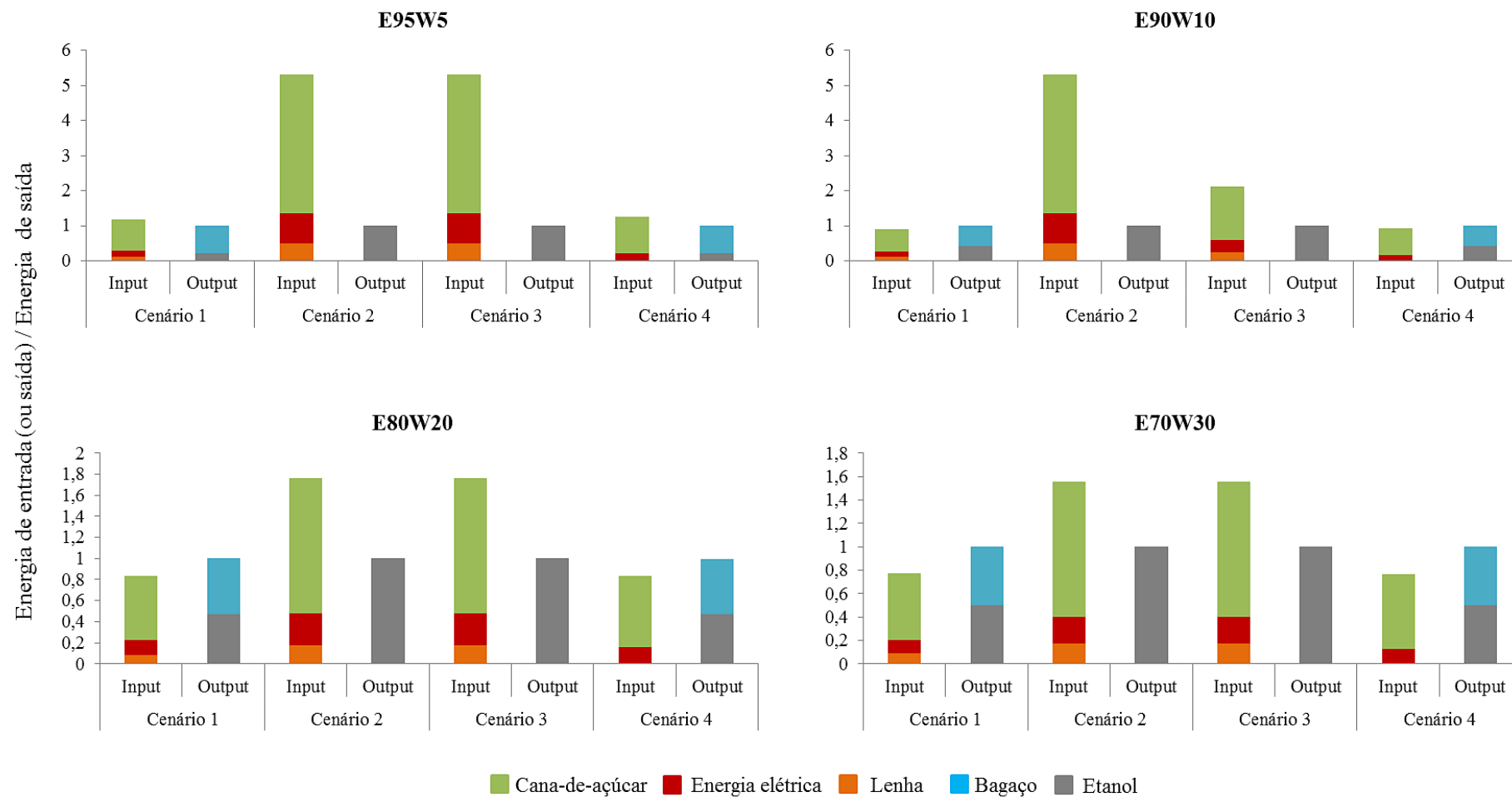
O cenário 4, em que a lenha, usada para geração de vapor na PPE, é substituída pelo bagaço produzido no processo, aponta um excedente energético para o coproduto nas grandezas de 2571,73 GJ, 920,37 GJ, 802,16 GJ e 812 GJ para os combustíveis E95W5, E90W10, E80W20 e E70W30, respectivamente. Essa substituição reduziu a energia de entrada, no processo convencional (com lenha), em 455,79 GJ para o E95W5, em 230,71 GJ para o E90W10, em 140,89 GJ para o E80W20 e em 190,06 GJ para o E70W30.

O bagaço é considerado um subproduto, com baixo valor econômico agregado, porém com poder calorífico inferior (PCI) no valor de $8,9179 \text{ MJ.kg}^{-1}$, quando com 50% de umidade, enquanto que o etanol hidratado contém $21,3527 \text{ MJ.kg}^{-1}$ [9]. Balanços energéticos de etanol de cana-de-açúcar no Brasil demonstram diversos resultados em função das considerações de delineamento de pesquisa, no entanto, os valores obtidos em métricas de eficiência são aumentados com a inserção do bagaço no processo industrial, principalmente a partir da incineração em caldeiras para geração de vapor ou na cogeração de energia elétrica [4,16,18,40].

O nível de regressão 3 na AEE, que considera a energia vinculada a equipamentos e edificação, apresentou baixa influência sobre as métricas de eficiência para os cenários 1 e 2, correspondendo a 0,24%, 0,58%, 0,70% e 0,71% para os combustíveis E95W5, E90W10, E80W20 e E70W30, respectivamente.

A Figura 5.3 expõe a representação dos fluxos de entrada em relação à energia de saída de cada cenário. Nos quatro cenários a matéria-prima (cana-de-açúcar) é a entrada do sistema com maior porcentagem embutida de energia, seguida pelos insumos de energia elétrica e lenha nos cenários 1, 2 e 3. No cenário 4, a entrada de matéria-prima é seguida apenas pelo insumo de energia elétrica.

Figura 5.3 – Relação nos cenários avaliados entre a energia de entrada e saída com maior representação.

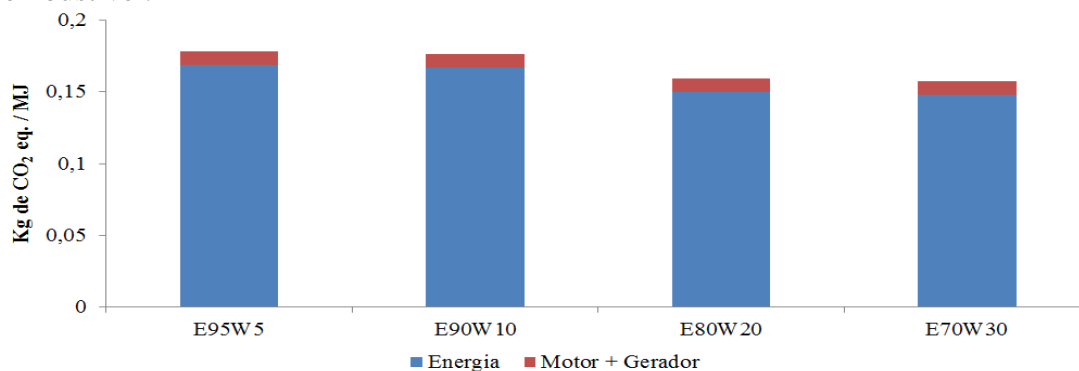


Fonte: Autor.

Comparando o aumento no ganho de energia útil com a elevação da concentração de água no etanol, os melhores desempenhos de NER são observados para os cenários 2 e 3, que não consideram os coprodutos do processo na relação de eficiência energética, quando comparados com os resultados para o etanol com 5% v/v de água na composição. Foi calculado para o combustível E90W10 o aumento na proporção de 2,47:1 em ambos os cenários, o E80W20 apresentou as razões de 2,95:1 no cenário 2 e 3,0:1 para o cenário 3, e o E70W30 os valores de 2,95:1 e de 3,37:1 nos cenários 2 e 3, respectivamente, demonstrando que a maior concentração de água na composição do produto de saída (etanol) passa a ser, individualmente, uma alternativa de minimizar o déficit energético.

A Figura 5.4 expõe a contribuição em emissões de CO₂ equivalentes na geração de 1 MJ de energia para os quatro combustíveis. Os resultados observados demonstram minimização no GWP em 1,68%, 10,61% e 12,29% para os combustíveis E90W10, E80W20 e E70W30, nessa ordem, quando comparados com o E95W5.

Figura 5.4 – GWP de 1 MJ de energia gerada de acordo com o teor de hidratação do etanol combustível.



Fonte: Autor.

A redução de GWP, observada principalmente para os combustíveis com 20% v/v e 30% v/v de água na composição, decorre dos menores valores de emissões de NO_x na ordem de 19,20% e 45,05%, e de CO de 56,79% e 66,16%, respectivamente, quando comparados com as emissões do etanol com 5% de hidratação.

O maior teor de água no etanol combustível interfere no desempenho operacional de motores SI, influenciando na taxa de liberação de calor, o que aumenta a duração da combustão e retarda a inflamação inicial. A água funciona como um diluente não reativo que reduz a temperatura máxima no cilindro, logo, as emissões de NO_x térmicos são reduzidas,

por outro lado, emissões de HC aumentam, por efeito de uma diminuição de eficiência na combustão [27,29].

Musin et al. [30] avaliou o desempenho e as emissões de um pequeno grupo gerador (SI) operando com etanol hidratado com até 40% v/v de água, os resultados demonstraram que as emissões de NO_x foram reduzidas com a elevação da hidratação do etanol para operação em carga constante do grupo gerador. No entanto, as emissões de CO e HC foram elevadas com o aumento do teor de hidratação no etanol combustível.

Saxena et al. [2012 e 2014] explorou o uso de etanol hidratado com recuperação do calor de exaustão para aumentar a energia de entrada necessária para inflamação do combustível em motor HCCI. Os resultados apontaram que o uso de um permutador de calor, para aquecer a carga de admissão usando o excesso de entalpia de exaustão, permitiu a operação de etanol hidratado sem qualquer adição externa de calor, o que melhora o balanço de energia para a produção de etanol e o uso como combustível. As emissões de NO_x são reduzidas em frações maiores de água no combustível. As emissões de CO e HC não queimados são mais elevadas com menores frações de etanol.

A partir da análise conjunta, englobando a avaliação ambiental e a AEE, a mitigação em emissões de GEE e a redução do déficit energético com a produção e o uso do etanol com frações mais elevadas de água na composição, identificam alternativas de melhorar o impacto negativo no balanço energético da PPE.

5.4 CONCLUSÃO

A produção em pequena escala de etanol com 5% v/v, 10% v/v, 20% v/v e 30% v/v de água na composição do combustível, analisada como uma proposta de melhorar o equilíbrio energético na PPE, demonstrou nas duas métricas de eficiência, NER e NEB, a possibilidade de elevar o retorno da energia investida no processo, quando a energia embutida nos coprodutos é considerada na avaliação.

Os resultados, da AEE e do GWP, apresentaram que o maior teor de água no etanol combustível, individualmente, sugere uma perspectiva de operação mais eficiente na PPE e a mitigação de impacto ambiental, reduzindo o déficit energético na operação da microdestilaria constatado nas condições normais de operação (produção de E95W5).

O melhor desempenho foi observado para o combustível com 70% v/v de etanol, onde a menor entrada de insumos em relação ao etanol hidratado (95% v/v de etanol) resultou em um maior retorno da energia associada aos produtos e coprodutos do processo de produção.

A utilização do bagaço na cogeração de energia térmica (Cenário 4) demonstrou a possibilidade de reduzir a energia investida no processo, a partir da utilização da energia embutida no coproduto e, dessa forma, melhorar a eficiência geral do processo e minimizar impactos ambientais vinculados a extração e beneficiamento da lenha.

Para minimizar o gargalo energético, presente na produção de etanol em pequena escala, são necessárias mudanças no manejo dos coprodutos, destinando-os a aplicações que levam a um melhor equilíbrio entre a energia de saída e entrada, como o bagaço na cogeração e a vinhaça como fertilizante. Desse modo, desenvolvendo um combustível que contribui com a mitigação ambiental, favorece a descentralização da produção que auxilia no desenvolvimento socioeconômico, relacionado à inserção e autossuficiência de pequenos produtores agrícolas.

5.5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ACV Brasil e ao Grupo de Pesquisa em motores, combustíveis e emissões (GPMOT) da Universidade Federal de Santa Maria, pelo apoio e suporte técnico no desenvolvimento do estudo. E a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

5.6 REFERÊNCIAS

[1] ELBEHRI, Aziz et al. **Biofuels and the sustainability challenge: a global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks**. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013.

[2] SATHRE, Roger et al. **Life-cycle net energy assessment of large-scale hydrogen production via photoelectrochemical water splitting**. Energy & Environmental Science, v. 7, n. 10, p. 3264-3278, 2014.

[3] HILL, Jason et al. **Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels**. Proceedings of the National Academy of sciences, v. 103, n. 30, p. 11206-11210, 2006.

- [4] MANOCHIO, C. et al. **Ethanol from biomass: A comparative overview**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 80, p. 743-755, 2017.
- [5] CAPAZ, Rafael Silva. **Estudo do desempenho energético da produção de Biocombustíveis: Aspectos Metodológicos e Estudos de Caso**. 2009. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.
- [6] LEAL, Manoel Regis Lima Verde; WALTER, Arnaldo da Silva. **Sustainability of the production of ethanol from sugarcane: the Brazilian experience**. In: Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol, vol. 27, 2010.
- [7] SHAPOURI, Hosein; DUFFIELD, James A.; WANG, Michael Q. **The energy balance of corn ethanol: an update**. United States Department of Agriculture, Economic Research Service, nº 34075, 2002.
- [8] IEA - International Energy Agency. **Renewables information: Overview 2017**. IEA Stat, 11 p., 2017.
- [9] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- [10] ELZINGA, David et al. **Advantage energy: Emerging Economies, Developing Countries and the Private-Public Sector Interface**. International Energy Agency (IEA), 2011.
- [11] GASPARATOS, Alexandros; STROMBERG, Per; TAKEUCHI, Kazuhiko. **Biofuels, ecosystem services and human wellbeing: Putting biofuels in the ecosystem services narrative**. Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 142, n. 3-4, p. 111-128, 2011.
- [12] DORNBURG, Veronika et al. **Bioenergy revisited: key factors in global potentials of bioenergy**. Energy & Environmental Science, v. 3, n. 3, p. 258-267, 2010.
- [13] MAROUN, Maria Regina; LA ROVERE, Emilio Lèbre. **Ethanol and food production by family smallholdings in rural Brazil: Economic and socio-environmental analysis of micro distilleries in the State of Rio Grande do Sul**. Biomass and Bioenergy, v. 63, p. 140-155, 2014.
- [14] DUFEY, Annie; STANGE, Daniela. **Estudio regional sobre la economía de los biocombustibles en 2010: temas clave para los países de América Latina y el Caribe**. 2011.
- [15] CGEE – Center for Strategic Studies and Management. **Sustainability of sugarcane bioenergy: Updated edition**. CGEE, 360 p., 2012.
- [16] TRIANA, Carlos Ariel Ramírez. **Energetics of Brazilian ethanol: Comparison between assessment approaches**. Energy Policy, v. 39, n. 8, p. 4605-4613, 2011.
- [17] CHERUBINI, Francesco; STRØMMAN, Anders Hammer. **Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges**. Bioresource Technology, v. 102, n. 2, p. 437-451, 2011.

- [18] MAYER, Flávio D. et al. **Environmental and energy assessment of small scale ethanol fuel production**. *Energy & Fuels*, v. 29, n. 10, p. 6704-6716, 2015.
- [19] FORE, Seth R.; PORTER, Paul; LAZARUS, William. **Net energy balance of small-scale on-farm biodiesel production from canola and soybean**. *Biomass and bioenergy*, v. 35, n. 5, p. 2234-2244, 2011.
- [20] MAYER, Flávio Dias et al. **Why small-scale fuel ethanol production in Brazil does not take off?**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 687-701, 2015.
- [21] DHILLON, R. S.; VON WUEHLISCH, George. **Mitigation of global warming through renewable biomass**. *Biomass and bioenergy*, v. 48, p. 75-89, 2013.
- [22] CAVALETT, O.; LEAL, M.; RYDBERG, T. **Avaliação emergética de sistema camponês de produção de álcool, alimentos e serviços ambientais**. LEAL, M, 2010.
- [23] FAGUNDEZ, J. L. S. et al. **Determination of optimal wet ethanol composition as a fuel in spark ignition engine**. *Applied thermal engineering*, v. 112, p. 317-325, 2017.
- [24] SAXENA, Samveg et al. **Wet ethanol in HCCI engines with exhaust heat recovery to improve the energy balance of ethanol fuels**. *Applied energy*, v. 98, p. 448-457, 2012.
- [25] BREAUX, Baine B.; ACHARYA, Sumanta. **The effect of elevated water content on ethanol combustion: a feasibility study**. In: ASME 2011 Power Conference collocated with JSME ICOPE 2011. American Society of Mechanical Engineers, p. 51-58, 2011.
- [26] MARTINEZ-FRIAS, Joel; ACEVES, Salvador M.; FLOWERS, Daniel L. **Improving ethanol life cycle energy efficiency by direct utilization of wet ethanol in HCCI engines**. *Journal of Energy Resources Technology*, v. 129, n. 4, p. 332-337, 2007.
- [27] LANZANOVA, Thompson Diórdinis Metzka; DALLA NORA, Macklini; ZHAO, Hua. **Performance and economic analysis of a direct injection spark ignition engine fueled with wet ethanol**. *Applied energy*, v. 169, p. 230-239, 2016.
- [28] SAFFY, Howard A. et al. **Energy, carbon dioxide and water use implications of hydrous ethanol production**. *Energy Conversion and Management*, v. 105, p. 900-907, 2015.
- [29] MACK, J. Hunter; ACEVES, Salvador M.; DIBBLE, Robert W. **Demonstrating direct use of wet ethanol in a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine**. *Energy*, v. 34, n. 6, p. 782-787, 2009.
- [30] MUNSIN, R. et al. **An experimental study on performance and emissions of a small SI engine generator set fuelled by hydrous ethanol with high water contents up to 40%**. *Fuel*, v. 106, p. 586-592, 2013.
- [31] AMBRÓS, W. M. et al. **Experimental analysis and modeling of internal combustion engine operating with wet ethanol**. *Fuel*, v. 158, p. 270-278, 2015.

- [32] KIM, J.-K. et al. **Cold performance of various biodiesel fuel blends at low temperature**. International journal of automotive technology, v. 13, n. 2, p. 293-300, 2012.
- [33] SARI, Rafael Lago. **Avaliação da utilização de etanol com elevados teores de água em motores de combustão interna com ignição por centelha**. 2017. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- [34] KUN-BALOG, Attila; SZTANKÓ, Krisztián; JÓZSA, Viktor. **Pollutant emission of gaseous and liquid aqueous bioethanol combustion in swirl burners**. Energy Conversion and Management, v. 149, p. 896-903, 2017.
- [35] BAIRD, George et al. **The energy embodied in building materials—updated New Zealand coefficients and their significance**. Transactions of the Institution of Professional Engineers New Zealand: Civil Engineering Section, v. 24, n. 1, p. 46, 1997.
- [36] PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Database Manual: Methods library**. PRÉ Consultants: p. 57, 2010.
- [37] BRONDANI, Michel. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de bioetanol hidratado em pequena escala: abrangência agrícola e industrial**. 2014. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.
- [38] BILHÃO, Joelson Almeida. **Viabilidade técnico-econômica do uso do etanol super-hidratado em motores de ciclo Otto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Maria, 96 p., 2015.
- [39] PERRY, R. H.; GREEN, D. W.. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 8th. ed., New York, McGraw-Hill Book Co., 2007.
- [40] SANTOS, Rodolfo E. R. dos. **Análise da viabilidade energética e econômica da produção de etanol em microdestilarias**. 2011. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais, Itaúba, 2011.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da avaliação do ciclo de vida (ACV) e análise de eficiência energética (AEE) para as quatro misturas de etanol e água – E95W5, E90W10, E80W20 e E70W30 –, demonstrados individualmente nos dois artigos que compõem esse estudo, apresentaram um panorama de desempenho ambiental e energético para quatro cenários de produto final de uma microdestilaria e a aplicação do combustível em máquina térmica estacionária para a geração de energia elétrica.

O primeiro artigo, que aborda a avaliação ambiental da operação de uma planta de produção em pequena escala de etanol combustível e o uso final deste produto, teve como foco principal quantificar e qualificar as diferentes alterações no meio ambiente que a atividade da microdestilaria e a queima em motor SI podem desenvolver.

Os resultados da classificação e caracterização dos fluxos mássicos e energéticos, compreendidos na fronteira do sistema delineado, de modo geral, vinculou à estrutura física o maior potencial de impacto nas categorias ambientais do método de avaliação Eco-indicador 99. A comparação entre os teores de hidratação do etanol combustível indicaram potencial mitigador de impacto ambiental conforme a concentração de água aumenta na mistura, em função dos insumos especificados nos ICVs como produtos evitados, principalmente a cana-de-açúcar e a energia elétrica, com média de redução estimada em -127,62% e -68,99%, respectivamente.

Na sequência uma análise de eficiência energética da etapa de produção do combustível em microdestilaria, e a avaliação do potencial de aquecimento global do uso do produto em motor SI, foi desenvolvida para as quatro composições de hidratação do etanol, com a finalidade de identificar a relação entre o teor de hidratação e o equilíbrio energético envolvido na produção do etanol em pequena escala, além de auxiliar na interpretação final dos resultados de minimização de impacto ambiental observados anteriormente.

Os resultados dos indicadores energéticos, NER e NEB, apontaram que a maior quantidade de energia se concentra nos fluxos de insumos (*input*) e produtos de saída (*outputs*), enquanto que os requisitos de energia correspondentes ao nível de regressão 3 (infraestrutura) não apresentaram influência significativa. Os cenários propostos no estudo apresentaram um quadro de melhor equilíbrio energético para a produção de etanol combustível com hidratação superior a 5% em composição volumétrica, à medida que a avaliação ambiental demonstrou a minimização do potencial de aquecimento global vinculado às emissões de GEE durante a operação de uma máquina térmica com etanol superhidratado.

As interpretações das avaliações ambientais realizadas nesse estudo confirmam que o etanol superhidratado tem o potencial de minimizar o impacto ambiental vinculado ao seu processo de produção industrial e uso final. Além de identificar que a mitigação não envolve somente a redução de emissões de GEE, principalmente CO e NO_x, mas também de outros recursos. Uma vez que os dados apresentados nesse estudo, de acordo com a abordagem, unidade funcional e método de avaliação, revelam também a redução na demanda de matéria-prima, energia elétrica, lenha e água para produzir etanol com elevado teor de hidratação.

No âmbito da análise energética, o melhor retorno da energia investida no processo de produção com o aumento da hidratação do etanol combustível, sugere uma possibilidade de melhorar a viabilidade do processo produtivo, o que juntamente com a utilização do bagaço na cogeração de energia térmica, favorece a diminuição dos efeitos de insuficiência energética de uma microdestilaria. Isto torna a produção do biocombustível mais atrativa economicamente ao pequeno produtor, que pode conciliar a produção do combustível com as demais atividades e culturas agrícolas desenvolvidas na propriedade, e usufruir de uma fonte de autossuficiência energética, que gera no processo industrial coprodutos e subprodutos com valor agregado energético (bagaço) e econômico (vinhaça, açúcar mascavo, bagaço).

Em relação ao etanol superhidratado ser um substituto viável ao etanol hidratado como combustível comercial ou em microdestilarias com a finalidade de autossuficiência energética, apesar dos melhores indicadores ambientais e energéticos observados nesse estudo, as limitações impostas à abordagem de fronteira do sistema fronteira necessitam de estudos complementares para auxiliar a tomada de decisão.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se:

- A realização de testes ininterruptos de motores operando com etanol superhidratado com o objetivo de quantificar efeitos corrosivos e a contaminação do óleo lubrificante, e assim estimar a vida útil da tecnologia atual de motores de combustão interna;
- Aplicação de uma ACV com abordagem berço-túmulo com o objetivo de identificar o potencial mitigador de impacto ambiental vinculado ao ciclo completo;
- Avaliar diferentes cenários de aplicação dos coprodutos com o objetivo de definir as rotas ambientais e energeticamente mais eficientes no contexto global de atividades desenvolvidas na propriedade rural.

7 CONCLUSÃO

O aumento do teor de hidratação no etanol combustível sugere uma oportunidade de melhorar o desempenho da produção em pequena escala de etanol combustível e minimizar impactos ambientais vinculados ao processo industrial e de aplicação final.

Nesse contexto, avaliou-se, em termos ambientais e energéticos, a produção em microdestilaria e uso final em fonte fixa para geração de energia elétrica de quatro percentuais de hidratação do etanol, produzido a partir da cana-de-açúcar, com 5% v/v, 10% v/v, 20% v/v e 30% v/v de água na composição do combustível.

Os resultados obtidos a partir da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida nas limitações impostas nesse estudo identificaram que o aumento do teor de hidratação do etanol combustível configura mitigação de impacto ambiental no conjunto das três áreas de proteção, – saúde humana, ecossistema e recursos naturais –, que o método Eco-indicador 99 divide as categorias de potencial de impacto ambiental e realiza a classificação dos fluxos mássicos e energéticos de entrada e saída, pertinente à abordagem portão-túmulo estabelecida.

A estrutura física, a cana-de-açúcar e a energia elétrica, nessa ordem, foram os fluxos que implicam em maior impacto ambiental na avaliação individual dos inventários de ciclo de vida. Em paralelo, a cana-de-açúcar e a energia elétrica, lotados como excedente de insumos (produtos evitados), foram os fluxos com o maior potencial minimizador de impacto ambiental atribuído às misturas combustíveis com teor de hidratação acima de 10%.

Os resultados das métricas de eficiência aplicados na avaliação energética corroboraram com a hipótese de que o aumento do teor de hidratação no produto final de uma microdestilaria pode melhorar o equilíbrio energético. A redução da energia imputada aos insumos de entrada foi o principal agente de redução do déficit energético na operação da microdestilaria constatado nas condições normais de operação, com etanol hidratado (E95W5) como produto final. A utilização do bagaço na cogeração de energia térmica demonstrou a possibilidade de melhorar a eficiência geral do processo, a partir da reinserção do coproduto com valor energético térmico agregado.

A comparação entre os teores de hidratação do etanol combustível, nas duas avaliações realizadas indicaram que o melhor cenário, para a produção em pequena escala e uso final em fonte fixa para a geração de energia elétrica foi observado para o combustível com 70% v/v de etanol e a utilização do bagaço na cogeração de energia térmica.

Essa conclusão fundamenta-se em que o combustível com maior hidratação demanda menores quantidades de insumos de entrada no processo produtivo, como matéria-prima,

energia elétrica, água, lenha, leveduras para elaboração do pé de cuba, e rende maiores quantidade de produto final, mesmo que com menor poder calorífico. Esse cenário identifica que, além da minimização de impacto ambiental atribuído as emissões de queima do combustível, a redução da demanda por insumos no processo contribui significativamente na mitigação de impacto ambiental no ciclo de vida avaliado.

A condução da Avaliação do Ciclo de Vida em conjunto a uma Análise de Eficiência Energética mostrou correlação positiva e eficiente em identificar detalhadamente os aspectos ambientais mais relevantes em magnitude de impacto ambiental e ganho energético com a mudança de aplicação na produção em pequena escala e aplicação do etanol superhidratado para geração de energia elétrica. Por fim, este estudo apresentou resultados relevantes para a condução de trabalhos futuros de potencial de impacto ambiental com etanol superhidratado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.040. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura.** Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT b – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.044. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro. 2009.
- ABREU, Yolanda Vieira de; AZEVEDO, Marcelo Romão Manhães de. **Racionamento de energia elétrica de 2001: o estado do Tocantins.** Yolanda Vieira de Abreu, 2009.
- ABREU, Yolanda V. de, et al. **Energia, sociedade e meio ambiente.** Málaga, Espanha: Eumed.Net, Universidad de Málaga, ISBN – 13:978-64-693—37745, 2010.
- ACV BRASIL. **Avaliação do Ciclo de Vida com SimaPro®.** Apostila de treinamento. 2015. 84 p. Rio de Janeiro, 2015.
- ALMEIDA, Cássio Florisbal de. **Avaliação do ciclo de vida: estudo de caso em uma usina termelétrica biocombustível na Amazônia.** 2017. 139 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- AMBRÓS, W. M. et al. **Experimental analysis and modeling of internal combustion engine operating with wet ethanol.** Fuel, v. 158, p. 270-278, 2015.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. **Resolução nº 19/ 2015: Especificações do Etanol Anidro Combustível e do Etanol Hidratado Combustível.** Ministério de Minas e Energia, 2015.
- BILHÃO, Joelson Almeida. **Viabilidade técnico-econômica do uso do etanol super-hidratado em motores de ciclo Otto.** 2015. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- BNDE/CGEE. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável.** BNDES, 316 p., Rio de Janeiro. 2008. 1ª ed. Biblioteca digital.
- BREAUX, Baine B.; ACHARYA, Sumanta. **The effect of elevated water content on ethanol combustion: a feasibility study.** In: ASME 2011 Power Conference collocated with JSME ICOPE 2011. American Society of Mechanical Engineers, 2011. p. 51-58.
- BRENTANO, Telmo. **Instalações hidráulicas de combate a incêndios nas edificações.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 3 ed., 450p, .2007.
- BRONDANI, Michel. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de bioetanol hidratado em pequena escala: abrangência agrícola e industrial.** 2014. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

BRUINS, Marieke E.; SANDERS, Johan PM. **Small-scale processing of biomass for biorefinery**. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 6, n. 2, p. 135-145, 2012.

BUENO, Osmar de Carvalho. **Análise energética e eficiência cultural do milho em assentamento rural, Itaberá/SP**. 2002. 157 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista, Botucatu, São Paulo, 2002.

CAMPOS, Alessandro Torres; CAMPOS, Aloísio Torres de. **Balances energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agro ecossistemas**. *Ciência Rural*, v. 34, n. 6, p. 1977-1985, 2004.

CASTRO, Heizir F. **Processos Químicos Industriais II: INDÚSTRIA ALCOOLEIRA**. Apostila escola de Engenharia de Lorena (EEL). Universidade de São Paulo. 2013.

CAPAZ, Rafael Silva. **Estudo do desempenho energético da produção de Biocombustíveis: Aspectos Metodológicos e Estudos de Caso**. 2009. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de Vida de produtos – ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 105 p., 1998.

CHIEPPE JÚNIOR, João B. **Tecnologia e fabricação do álcool. Inhumas: IFG**; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012, 74 p., Apostila do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás e Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

COLTRO, Leda et al. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. *Campinas: Cetea/Ital*, v. 75, 2007.

DAGNESE, F.; VON ENDE, M.; FERREIRA, G. M. V.; NOGUEIRA, C. U.; NOGUEIRA, H. M. C. M.; ROSSÉS, G. F. **Mapeamento do Processo Produtivo do Etanol de Cana-de-açúcar: Estudo de Caso da Microdestilaria do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria**, Santa Maria, RS. In: Jornada Acadêmica Integrada (JAI), 2012, Santa Maria. Anais eletrônicos da Jornada Acadêmica Integrada (JAI). Disponível em: <<http://portal.ufsm.br/jai/trabalho/arquivo.html?arquivo=5743>>. Acesso em: 15 janeiro. 2018.

DHILLON, R. S.; VON WUEHLISCH, George. **Mitigation of global warming through renewable biomass**. *Biomass and bioenergy*, v. 48, p. 75-89, 2013.

DUFÉY, Annie; STANGE, Daniela. **Estudio regional sobre la economía de los biocombustibles en 2010: temas clave para los países de América Latina y el Caribe**. 2011.

ELBEHRI, Aziz et al. **Biofuels and the sustainability challenge: a global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks**. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017.

- FAGUNDEZ, J. L. S. et al. **Determination of optimal wet ethanol composition as a fuel in spark ignition engine**. Applied thermal engineering, v. 112, p. 317-325, 2017.
- FARRELL, Alexander E. et al. **Ethanol can contribute to energy and environmental goals**. Science, v. 311, n. 5760, p. 506-508, 2006.
- FERREIRA, M. M. B. **Avaliação de Ciclo de Vida de uma Central Hidroelétrica**. 2007. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.
- FINNVEDEN, G. et al. **Recent developments in Life Cycle Assessment**. Journal of Environmental Management. v. 91, n.1, p. 1-21, 2009.
- FLOWERS, D. L., ACEVES, S. M.; **Improving ethanol life cycle energy efficiency by direct utilization of wet ethanol in HCCI engines**. SAE International, SAE 2007-01-1867, 2007.
- FORE, Seth R.; PORTER, Paul; LAZARUS, William. **Net energy balance of small-scale on-farm biodiesel production from canola and soybean**. Biomass and bioenergy, v. 35, n. 5, p. 2234-2244, 2011.
- FOUST, Alan. S. et al. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 2. ed., 670 p., 1982.
- GNANSOUNOU, Edgard et al. **Life cycle assessment of biofuels: energy and greenhouse gas balances**. Bioresource technology, v. 100, n. 21, p. 4919-4930, 2009.
- HOFFMANN, Ronaldo. **Análise do desempenho de uma micro-destilaria anexa para a Região das Encostas Basálticas do Rio Grande do Sul**. 1985. 118 p. Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1985.
- HAMMERSCHLAG, Roel. **Ethanol's energy return on investment: a survey of the literature 1990– present**. Environ. Sci. Technol. 2006, 40, 1744-1750.
- JOINT RESEARCH CENTRE – INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment** First edition. European Union, 2010.
- JOLLIET, O.; et al. **The LCIA Midpoint damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 9, n. 6, p. 394, 2004.
- JÚNIOR, Afonso F. B. et al. **Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo Vida (ACV) no Brasil**. Revista Ibero Americana de Estratégia, v. 7, n. 1, 2008.
- KUN-BALOG, Attila; SZTANKÓ, Krisztián; JÓZSA, Viktor. **Pollutant emission of gaseous and liquid aqueous bioethanol combustion in swirl burners**. Energy Conversion and Management, v. 149, p. 896-903, 2017.

LANZANOVA, Thompson Diórdinis Metzka; DALLA NORA, Macklini; ZHAO, Hua. **Performance and economic analysis of a direct injection spark ignition engine fueled with wet ethanol**. Applied energy, v. 169, p. 230-239, 2016.

LEVAN, Susan L. **Life cycle assessment: measuring environmental impact. Life cycle environmental impact analysis for forest products**. Forest Products Society, Madison, WI, p. 7-16, 1995.

LENG, Rubo et al. **Life cycle inventory and energy analysis of cassava-based fuel ethanol in China**. Journal of Cleaner Production, v. 16, n. 3, p. 374-384, 2008.

LÓPEZ-PLAZA, Emilio Luis et al. **Experimental and theoretical study of the energy savings from wet ethanol production and utilization**. Energy technology, v. 2, n. 5, p. 440-445, 2014.

MACK, J. Hunter; ACEVES, Salvador M.; DIBBLE, Robert W. **Demonstrating direct use of wet ethanol in a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine**. Energy, v. 34, n. 6, p. 782-787, 2009.

MAROUN, Maria Regina; LA ROVERE, Emilio Lèbre. **Ethanol and food production by family smallholdings in rural Brazil: Economic and socio-environmental analysis of micro distilleries in the State of Rio Grande do Sul**. Biomass and Bioenergy, v. 63, p. 140-155, 2014.

MARTINEZ-FRIAS, Joel; ACEVES, Salvador M.; FLOWERS, Daniel L. **Improving ethanol life cycle energy efficiency by direct utilization of wet ethanol in HCCI engines**. Journal of Energy Resources Technology, v. 129, n. 4, p. 332-337, 2007.

MAYER, Flávio Dias. **Desenvolvimento da tecnologia de destilação apropriada à produção de álcool combustível em pequena escala**. 2010. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MAYER, Flávio D. et al. **Why small-scale fuel ethanol production in Brazil does not take off?**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 43, p. 687-701, 2015a.

MAYER, Flávio D. et al. **Environmental and energy assessment of small scale ethanol fuel production**. Energy & Fuels, v. 29, n. 10, p. 6704-6716, 2015.

MDIC - MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. **Resolução no 04, de 15 de dezembro de 2010: Dispõe sobre a Aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências**. CONMETRO, 2010.

MENDONÇA, Renata Maéry de Lima. **Avaliação de ciclo de vida do carbono na queima de biodiesel à base de óleo de soja**. 2007. 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas). Universidade de Brasília. Brasília, 2007.

MF – MINISTÉRIO DA FAZENDA. **Tabelas de depreciação**. Disponível em:<file:///C:/Documents%20and%20Settings/Administrador/Meus%20documentos/Downloads/A_nexo_I%20(1).pdf>. Acesso: 15 janeiro 2018.

MOLINI, Ana Maria. **Etanol: álcool multifuncional: um estudo investigativo através da experimentação**. Cadernos, P. D. E. O professor PDE e os desafios da escola pública paranaense. 2009, 2 vol. Secretária do Estado de Educação. Universidade Estadual de Londrina, Paraná.

MUNSIN, R. et al. **An experimental study on performance and emissions of a small SI engine generator set fuelled by hydrous ethanol with high water contents up to 40%**. Fuel, v. 106, p. 586-592, 2013.

NARAYANASWAMY, Venky et al. **Environmental life cycle assessment (LCA) case studies for Western Australian grain products**. Grains Research and Development Corporation. Curtin University of Technology: Perth, 2004

OMETTO, A.R. **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia**. 2005. 200p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, USP, 2005.

PAPONG, Seksan; MALAKUL, Pomthong. **Life-cycle energy and environmental analysis of bioethanol production from cassava in Thailand**. Bioresource technology, v. 101, n. 1, p. S112-S118, 2010. PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Database Manual: Methods library**. PRÉ Consultants: p. 57, 2010.

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Global Futures Report: Great debates towards 100% renewable energy**. REN21 Secretariat, Paris, 98 p., 2017.

RIBEIRO, Carlos A. F.; BLUMER, Solange A. G.; HORII, Jorge. **Fundamentos de tecnologia sucroalcooleira: tecnologia do álcool**. Universidade de São Paulo–Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”–Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição, Piracicaba, 2ª ed., 1999.

ROCHA, Mateus Henrique et al. **Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: a meta-analysis**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 37, p. 435-459, 2014.

SAFFY, Howard A. et al. **Energy, carbon dioxide and water use implications of hydrous ethanol production**. Energy Conversion and Management, v. 105, p. 900-907, 2015.

SAIC – SCIENCE APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION; CURRAN, Mary Ann. **Life-cycle assessment: principles and practice**. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2006. Cincinnati, 2006, 80p.

SALLABERRY, Rogério Rodrigues. **Emprego da avaliação do ciclo de vida para levantamento dos desempenhos ambientais do biodiesel de girassol e do óleo diesel**. 2009.

SANTOS, D. T. **Análise do ciclo de vida dos produtos açúcar & álcool em usinas sucroalcooleiras no estado de Mato Grosso do Sul**. 2009. 115p. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, Campo Grande, 2009.

SANTOS, Ricardo Rodrigues dos; SIMON, Elias José. **Análise energética do milho em sistema de plantio direto, no assentamento rural da fazenda Pirituba, Itaberá/SP.** Energia na Agricultura, v. 25, n. 1, p. 121-137, 2010.

SARI, Rafael Lago. **Avaliação da utilização de etanol com elevados teores de água em motores de combustão interna com ignição por centelha.** 2017. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SAXENA, Samveg et al. **Optimal operating conditions for wet ethanol in a HCCI engine using exhaust gas heat recovery.** Applied energy, v. 116, p. 269-277, 2014.

SAXENA, Samveg et al. **Wet ethanol in HCCI engines with exhaust heat recovery to improve the energy balance of ethanol fuels.** Applied energy, v. 98, p. 448-457, 2012.

SCHMER, Marty R. et al. **Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass.** Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 105, n. 2, p. 464-469, 2008.

SÓRIA, Ayres F. S.; FILIPINI, Fábio A. **Eficiência energética.** Paraná: Base, 272 p., 2010.

SOUSA, S.R. et al. **A utilização da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gestão ambiental: Modelos de aplicação.** INGEPRO Inovação, Gestão e Produção. v. 2, p. 90 - 98, 2010.

TAVARES, Sérgio Fernando. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras.** 2006. 225 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2006.

TILLMANN, Carlos Antônio da Costa. **Motores de combustão interna e seus sistemas.** Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Rede e-Tec Brasil, 165 p., 2013.

VALT, R. B. G. **Análise do ciclo de vida de embalagens de PET, de alumínio e de vidro para refrigerantes no Brasil variando a taxa de reciclagem dos materiais.** 2004. 193 p. Dissertação (mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

YU, Suiran; TAO, Jing. **Simulation-based life cycle assessment of energy efficiency of biomass-based ethanol fuel from different feedstocks in China.** Energy, v. 34, n. 4, p. 476-484, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – MÉTODO: ECO-INDICADOR 99 (H) V. 2.10/ EUROPE H/A/ CARACTERIZAÇÃO E95W5 EM UNIDADES EQUIVALENTES.

| Categoria de impacte | Unidade | Totalt | E95W5 | Leavening | Building | Tap water | Iron and steel | Stainless steel | Cast iron | Polypropylene resin | Wood chips | Sugarcane (BR) | Electricity (BR) |
|-------------------------------|------------------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------------|-----------------|-----------|---------------------|------------|----------------|------------------|
| Carcinogens | DALY | 0,039496 | 0 | 1,89E-05 | 0,013584 | 1,53E-06 | 0,018213 | 1,35E-05 | 0,001253 | 1,23E-05 | 0,000217 | 0,003785 | 0,002397 |
| Resp. organics | DALY | 8,26E-05 | 1,57E-05 | 2,58E-07 | 4,98E-05 | 5,17E-09 | 1,34E-06 | 2,86E-08 | 8,44E-06 | 1,29E-06 | 1,94E-06 | 5,86E-07 | 3,22E-06 |
| Resp. inorganics | DALY | 0,07797 | 0,005819 | 8,22E-05 | 0,057252 | 5,01E-06 | 0,000322 | 2,28E-06 | 0,006226 | 0,000594 | 0,001068 | 0,001857 | 0,004743 |
| Climate change | DALY | 0,015856 | 0,001037 | 2,23E-05 | 0,00836 | 7,39E-07 | 0,00048 | 5,25E-09 | 0,000758 | 0,000175 | 0,00011 | 0,003869 | 0,001044 |
| Radiation | DALY | 7,5E-05 | 0 | 8,85E-08 | 5,33E-05 | 8,88E-08 | 0 | 3,47E-08 | 6,49E-06 | 0 | 2E-06 | 1,98E-07 | 1,27E-05 |
| Ozone layer | DALY | 3,5E-06 | 0 | 8,79E-09 | 2,69E-06 | 8,05E-10 | 7,37E-09 | 2,11E-16 | 2,3E-07 | 4,67E-09 | 6,56E-08 | 8,46E-09 | 4,8E-07 |
| Ecotoxicity | PAF* m ² yr | 47067,51 | 0 | 29,44538 | 36462,83 | 2,626985 | 9,659942 | 57,99926 | 3134,313 | 9,682825 | 298,8044 | 89,80623 | 6972,345 |
| Acidification/ Eutrophication | PDF* m ² yr | 2581,61 | 374,7831 | 1,569153 | 1771,722 | 0,063501 | 14,86428 | 0,058326 | 56,11896 | 11,97767 | 17,1512 | 259,741 | 73,56068 |
| Land use | PDF*m ² yr | 27869,86 | 0 | 0,680503 | 2748,789 | 0,049077 | 0 | 0 | 42,08319 | 0 | 527,2884 | 20767,37 | 3783,59 |
| Minerals | MJ surplus | 4761,109 | 0 | 1,474134 | 4151,795 | 0,199591 | 39,1732 | 306,3377 | 119,573 | 0 | 12,71183 | 0,110537 | 129,7345 |
| Fossil fuels | MJ surplus | 50898,81 | 0 | 409,5052 | 34192,49 | 2,962688 | 819,9197 | 931,1496 | 1897,697 | 4813,063 | 996,2508 | 1885,823 | 4949,944 |

*DALY = *Disability adjusted life years* (Anos de vida ajustados por incapacidade); PAF = *Potentially Affected Fraction* (Fração Potencialmente Afetada); PDF = *Potentially Disappeared Fraction of plant species* (Fração potencialmente desaparecida de espécies vegetais); MJ surplus = *Additional energy requirement to compensate lower future ore grade* (Requisito adicional de energia para compensar o baixo teor de minério futuro); m²yr = metro quadrado ano.

Fonte: Autor. Obtida em SimaPro® 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

APÊNDICE B – MÉTODO: ECO-INDICADOR 99 (H) V. 2.10/ EUROPE H/A/ CARACTERIZAÇÃO E90W10 EM UNIDADES EQUIVALENTES.

| Categoria de impacto | Unidade | Total | E90W10 | Leavening | Building | Tap water | Iron and steel | Stainless steel | Cast iron | Polypropylene resin | Wood chips | Sugarcane (BR) | Electricity (BR) |
|----------------------------------|------------------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------------|-----------------|-----------|---------------------|------------|----------------|------------------|
| Carcinogens | DALY | 0,031855 | 0 | 7,27E-06 | 0,013584 | 8,21E-07 | 0,018213 | 1,35E-05 | 0,001253 | 1,23E-05 | 0,00011 | 0,001308 | 0,000983 |
| Resp. organics | DALY | 7,4E-05 | 1,38E-05 | 9,9E-08 | 4,98E-05 | 2,79E-09 | 1,34E-06 | 2,86E-08 | 8,44E-06 | 1,29E-06 | 9,79E-07 | 2,03E-07 | 1,32E-06 |
| Resp. inorganics | DALY | 0,069752 | 0,006602 | 3,16E-05 | 0,057252 | 2,7E-06 | 0,000322 | 2,28E-06 | 0,006226 | 0,000594 | 0,00054 | 0,000642 | 0,001946 |
| Climate change | DALY | 0,009795 | 0,001021 | 8,59E-06 | 0,00836 | 3,98E-07 | 0,00048 | 5,25E-09 | 0,000758 | 0,000175 | 5,55E-05 | 0,001337 | 0,000428 |
| Radiation | DALY | 5,76E-05 | 0 | 3,4E-08 | 5,33E-05 | 4,78E-08 | 0 | 3,47E-08 | 6,49E-06 | 0 | 1,01E-06 | 6,84E-08 | 5,21E-06 |
| Ozone layer | DALY | 2,85E-06 | 0 | 3,38E-09 | 2,69E-06 | 4,33E-10 | 7,37E-09 | 2,11E-16 | 2,3E-07 | 4,67E-09 | 3,32E-08 | 2,92E-09 | 1,97E-07 |
| Ecotoxicity | PAF* m ² yr | 38401,41 | 0 | 11,31189 | 36462,83 | 1,414438 | 9,659942 | 57,9992 | 3134,313 | 9,682825 | 151,0617 | 31,03388 | 2860,691 |
| Acidification/ Eutrophication | PDF* m ² yr | 2212,47 | 425,2532 | 0,602814 | 1771,722 | 0,03419 | 14,86428 | 0,05832 | 56,11896 | 11,97767 | 8,670855 | 89,75735 | 30,18129 |
| Land use | PDF* m ² yr | -2212,21 | 0 | 0,261426 | 2748,789 | 0,026424 | 0 | 0 | 42,08319 | 0 | 266,5727 | 7176,474 | 1552,37 |
| Minerals | MJ surplus | 4593,39 | 0 | 0,566311 | 4151,795 | 0,107465 | 39,1732 | 306,337 | 119,573 | 0 | 6,426515 | 0,038198 | 53,22891 |
| Fossil fuels | MJ surplus | 41289,18 | 0 | 157,3177 | 34192,49 | 1,595189 | 819,9197 | 931,149 | 1897,697 | 4813,063 | 503,6586 | 651,6743 | 2030,918 |

*DALY = *Disability adjusted life years* (Anos de vida ajustados por incapacidade); PAF = *Potentially Affected Fraction* (Fração Potencialmente Afetada); PDF = *Potentially Disappeared Fraction of plant species* (Fração potencialmente desaparecida de espécies vegetais); MJ surplus = *Additional energy requirement to compensate lower future ore grade* (Requisito adicional de energia para compensar o baixo teor de minério futuro); m²yr = metro quadrado ano.

Fonte: Autor. Obtida em SimaPro® 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

APÊNDICE B – CONTINUAÇÃO/ MÉTODO: ECO-INDICADOR 99 (H) V. 2.10/ EUROPE H/A/ CARACTERIZAÇÃO E90W10 EM UNIDADES EQUIVALENTES.

| Categoria de impacte | Unidade | Wood chips, avert impact | Leavening, avert impact | Tap water, avert impact | Electricity, avert impact (BR) | Sugarcane, avert impact (BR) |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Carcinogens | DALY | -0,00011 | -1,2E-05 | -7E-07 | -0,00141 | -0,0021 |
| Resp. organics | DALY | -9,6E-07 | -1,6E-07 | -2,4E-09 | -1,9E-06 | -3,2E-07 |
| Resp. inorganics | DALY | -0,00053 | -5,1E-05 | -2,3E-06 | -0,0028 | -0,00103 |
| Climate change | DALY | -5,4E-05 | -1,4E-05 | -3,4E-07 | -0,00062 | -0,00214 |
| Radiation | DALY | -9,9E-07 | -5,4E-08 | -4,1E-08 | -7,5E-06 | -1,1E-07 |
| Ozone layer | DALY | -3,2E-08 | -5,4E-09 | -3,7E-10 | -2,8E-07 | -4,7E-09 |
| Ecotoxicity | PAF* m ² yr | -147,828 | -18,1335 | -1,21255 | -4111,65 | -49,7576 |
| Acidification/ Eutrophication | PDF* m ² yr | -8,48523 | -0,96634 | -0,02931 | -43,3794 | -143,911 |
| Land use | PDF* m ² yr | -260,866 | -0,41908 | -0,02265 | -2231,219 | -11506,3 |
| Minerals | MJ surplus | -6,28893 | -0,90782 | -0,09213 | -76,5056 | -0,06124 |
| Fossil fuels | MJ surplus | -492,876 | -252,187 | -1,3675 | -2919,03 | -1044,85 |

*DALY = *Disability adjusted life years* (Anos de vida ajustados por incapacidade); PAF = *Potentially Affected Fraction* (Fração Potencialmente Afetada); PDF = *Potentially Disappeared Fraction of plant species* (Fração potencialmente desaparecida de espécies vegetais); MJ surplus = *Additional energy requirement to compensate lower future ore grade* (Requisito adicional de energia para compensar o baixo teor de minério futuro); m²yr = metro quadrado ano.

Fonte: Autor. Obtida em SimaPro® 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

APÊNDICE C – MÉTODO: ECO-INDICADOR 99 (H) V. 2.10/ EUROPE H/A/ CARACTERIZAÇÃO E80W20 EM UNIDADES EQUIVALENTES.

| Categoria de impacto | Unidade | Total | E80W20 | Leavening | Building | Tap water | Iron and steel | Stainless steel | Cast iron | Polypropylene resin | Wood chips | Sugarcane (BR) | Electricity (BR) |
|-------------------------------|------------------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------------|-----------------|-----------|---------------------|------------|----------------|------------------|
| Carcinogens | DALY | 0,031 | 0 | 5,98E-06 | 0,01358 | 5,61E-07 | 0,01821 | 1,35E-05 | 0,00125 | 1,23E-05 | 7,27E-05 | 0,001076 | 0,000826 |
| Resp. organics | DALY | 8,76E-05 | 2,86E-05 | 8,14E-08 | 4,98E-05 | 1,9E-09 | 1,34E-06 | 2,86E-08 | 8,44E-06 | 1,29E-06 | 6,49E-07 | 1,67E-07 | 1,11E-06 |
| Resp. inorganics | DALY | 0,066625 | 0,004702 | 2,6E-05 | 0,05725 | 1,84E-06 | 0,00032 | 2,28E-06 | 0,00623 | 0,000594 | 0,000358 | 0,000528 | 0,001635 |
| Climate change | DALY | 0,009043 | 0,00092 | 7,06E-06 | 0,00836 | 2,72E-07 | 0,00048 | 5,25E-09 | 0,00076 | 0,000175 | 3,68E-05 | 0,0011 | 0,00036 |
| Radiation | DALY | 5,51E-05 | 0 | 2,79E-08 | 5,33E-05 | 3,26E-08 | 0 | 3,47E-08 | 6,49E-06 | 0 | 6,71E-07 | 5,62E-08 | 4,38E-06 |
| Ozone layer | DALY | 2,76E-06 | 0 | 2,78E-09 | 2,69E-06 | 2,96E-10 | 7,37E-09 | 2,11E-16 | 2,3E-07 | 4,67E-09 | 2,2E-08 | 2,4E-09 | 1,65E-07 |
| Ecotoxicity | PAF* m ² yr | 37369,54 | 0 | 9,303642 | 36462,8 | 0,96564 | 9,65994 | 57,9993 | 3134,313 | 9,682825 | 100,0837 | 25,52986 | 2403,696 |
| Acidification/ Eutrophication | PDF* m ² yr | 2042,483 | 302,8321 | 0,495794 | 1771,72 | 0,02334 | 14,8643 | 0,05833 | 56,11896 | 11,97767 | 5,744747 | 73,83841 | 25,35984 |
| Land use | PDF* m ² yr | -5433,56 | 0 | 0,215013 | 2748,79 | 0,01804 | 0 | 0 | 42,08319 | 0 | 176,6138 | 5903,688 | 1304,38 |
| Minerals | MJ surplus | 4571,763 | 0 | 0,465771 | 4151,79 | 0,07336 | 39,1732 | 306,338 | 119,573 | 0 | 4,257793 | 0,031423 | 44,7256 |
| Fossil fuels | MJ surplus | 40012,36 | 0 | 129,3884 | 34192,5 | 1,08904 | 819,919 | 931,149 | 1897,697 | 4813,063 | 333,6915 | 536,0964 | 1706,479 |

*DALY = *Disability adjusted life years* (Anos de vida ajustados por incapacidade); PAF = *Potentially Affected Fraction* (Fração Potencialmente Afetada); PDF = *Potentially Disappeared Fraction of plant species* (Fração potencialmente desaparecida de espécies vegetais); MJ surplus = *Additional energy requirement to compensate lower future ore grade* (Requisito adicional de energia para compensar o baixo teor de minério futuro); m²yr = metro quadrado ano.

Fonte: Autor. Obtida em SimaPro® 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

APÊNDICE C – CONTINUAÇÃO/ MÉTODO: ECO-INDICADOR 99 (H) V. 2.10/ EUROPE H/A/ CARACTERIZAÇÃO E80W20 EM UNIDADES EQUIVALENTES.

| Categoria de impacte | Unidade | Wood chips, avert impact | Leavening, avert impact | Tap water, avert impact | Electricity, avert impact (BR) | Sugarcane, avert impact (BR) |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Carcinogens | DALY | -0,00014 | -1,3E-05 | -9,6E-07 | -0,00157 | -0,00233 |
| Resp. organics | DALY | -1,3E-06 | -1,8E-07 | -3,3E-09 | -2,1E-06 | -3,6E-07 |
| Resp. inorganics | DALY | -0,00071 | -5,6E-05 | -3,2E-06 | -0,00311 | -0,00114 |
| Climate change | DALY | -7,3E-05 | -1,5E-05 | -4,7E-07 | -0,00068 | -0,00238 |
| Radiation | DALY | -1,3E-06 | -6,1E-08 | -5,6E-08 | -8,3E-06 | -1,2E-07 |
| Ozone layer | DALY | -4,4E-08 | -6E-09 | -5,1E-10 | -3,1E-07 | -5,2E-09 |
| Ecotoxicity | PAF* m ² yr | -198,806 | -20,1417 | -1,66134 | -4568,65 | -55,2606 |
| Acidification/ Eutrophication | PDF* m ² yr | -11,4113 | -1,07336 | -0,04016 | -48,2008 | -159,827 |
| Land use | PDF* m ² yr | -350,825 | -0,46549 | -0,03104 | -2479,21 | -12778,8 |
| Minerals | MJ surplus | -8,45766 | -1,00836 | -0,12622 | -85,0089 | -0,06802 |
| Fossil fuels | MJ surplus | -662,843 | -280,117 | -1,87364 | -3243,46 | -1160,41 |

*DALY = *Disability adjusted life years* (Anos de vida ajustados por incapacidade); PAF = *Potentially Affected Fraction* (Fração Potencialmente Afetada); PDF = *Potentially Disappeared Fraction of plant species* (Fração potencialmente desaparecida de espécies vegetais); MJ surplus = *Additional energy requirement to compensate lower future ore grade* (Requisito adicional de energia para compensar o baixo teor de minério futuro); m²yr = metro quadrado ano.

Fonte: Autor. Obtida em SimaPro[®] 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

APÊNDICE D – MÉTODO: ECO-INDICADOR 99 (H) V. 2.10/ EUROPE H/A/ CARACTERIZAÇÃO E70W30 EM UNIDADES EQUIVALENTES.

| Categoria de impacto | Unidade | Total | E70W30 | Leavening | Building | Tap water | Iron and steel | Stainless steel | Cast iron | Polypropylene resin | Wood chips | Sugarcane (BR) | Electricity (BR) |
|----------------------------------|------------------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------------|-----------------|-----------|---------------------|------------|----------------|------------------|
| Carcinogens | DALY | 0,030896 | 0 | 6,23E-06 | 0,013584 | 6,15E-07 | 0,018213 | 1,35E-05 | 0,00125 | 1,23E-05 | 8,49E-05 | 0,001121 | 0,000717 |
| Resp. organics | DALY | 0,000135 | 7,63E-05 | 8,47E-08 | 4,98E-05 | 2,08E-09 | 1,34E-06 | 2,86E-08 | 8,44E-06 | 1,29E-06 | 7,57E-07 | 1,74E-07 | 9,63E-07 |
| Resp. inorganics | DALY | 0,064855 | 0,00319 | 2,7E-05 | 0,057252 | 2,02E-06 | 0,000322 | 2,28E-06 | 0,00623 | 0,000594 | 0,00042 | 0,00055 | 0,001419 |
| Climate change | DALY | 0,009036 | 0,00090 | 7,35E-06 | 0,00836 | 2,98E-07 | 0,00048 | 5,25E-09 | 0,00076 | 0,000175 | 4,3E-05 | 0,001146 | 0,000312 |
| Radiation | DALY | 5,42E-05 | 0 | 2,91E-08 | 5,33E-05 | 3,58E-08 | 0 | 3,47E-08 | 6,49E-06 | 0 | 7,84E-07 | 5,86E-08 | 3,8E-06 |
| Ozone layer | DALY | 2,72E-06 | 0 | 2,89E-09 | 2,69E-06 | 3,24E-10 | 7,37E-09 | 2,11E-16 | 2,3E-07 | 4,67E-09 | 2,57E-08 | 2,5E-09 | 1,44E-07 |
| Ecotoxicity | PAF* m ² yr | 36771,17 | 0 | 9,68591 | 36462,83 | 1,058556 | 9,659942 | 57,9993 | 3134,31 | 9,682825 | 116,849 | 26,59059 | 2086,239 |
| Acidification/ Eutrophication | PDF* m ² yr | 1946,987 | 205,930 | 0,516165 | 1771,722 | 0,025588 | 14,86428 | 0,05833 | 56,1189 | 11,97767 | 6,70709 | 76,90632 | 22,01055 |
| Land use | PDF* m ² yr | -5228,45 | 0 | 0,223848 | 2748,789 | 0,019776 | 0 | 0 | 42,0832 | 0 | 206,199 | 6148,98 | 1132,113 |
| Minerals | MJ surplus | 4561,422 | 0 | 0,484909 | 4151,795 | 0,080426 | 39,1732 | 306,338 | 119,573 | 0 | 4,97105 | 0,032729 | 38,81867 |
| Fossil fuels | MJ surplus | 39728,81 | 0 | 134,7047 | 34192,49 | 1,193829 | 819,9197 | 931,149 | 1897,69 | 4813,063 | 389,591 | 558,3706 | 1481,104 |

*DALY = *Disability adjusted life years* (Anos de vida ajustados por incapacidade); PAF = *Potentially Affected Fraction* (Fração Potencialmente Afetada); PDF = *Potentially Disappeared Fraction of plant species* (Fração potencialmente desaparecida de espécies vegetais); MJ surplus = *Additional energy requirement to compensate lower future ore grade* (Requisito adicional de energia para compensar o baixo teor de minério futuro); m²yr = metro quadrado ano.

Fonte: Autor. Obtida em SimaPro[®] 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

APÊNDICE D – CONTINUAÇÃO/ MÉTODO: ECO-INDICADOR 99 (H) V. 2.10/ EUROPE H/A/ CARACTERIZAÇÃO E70W30 EM UNIDADES EQUIVALENTES.

| Categoria de impacte | Unidade | Wood chips, avert impact | Leavening, avert impact | Tap water, avert impact | Electricity, avert impact (BR) | Sugarcane, avert impact (BR) |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Carcinogens | DALY | -0,00013 | -1,3E-05 | -9,5E-07 | -0,00168 | -0,00228 |
| Resp. organics | DALY | -1,2E-06 | -1,7E-07 | -2,5E-09 | -2,3E-06 | -3,5E-07 |
| Resp. inorganics | DALY | -0,00065 | -5,5E-05 | -2,9E-06 | -0,00332 | -0,00112 |
| Climate change | DALY | -6,7E-05 | -1,5E-05 | -4,4E-07 | -0,00073 | -0,00234 |
| Radiation | DALY | -1,2E-06 | -5,9E-08 | -5,3E-08 | -8,9E-06 | -1,2E-07 |
| Ozone layer | DALY | -4E-08 | -5,9E-09 | -5,3E-10 | -3,4E-07 | -5,1E-09 |
| Ecotoxicity | PAF* m ² yr | -182,04 | -19,7541 | -1,63305 | -4886,11 | -54,2006 |
| Acidification/ Eutrophication | PDF* m ² yr | -10,449 | -1,0527 | -0,03818 | -51,5501 | -156,761 |
| Land use | PDF* m ² yr | -321,239 | -0,45653 | 0,013108 | -2651,48 | -12533,7 |
| Minerals | MJ surplus | -7,7444 | -0,98896 | -0,12806 | -90,9158 | -0,06671 |
| Fossil fuels | MJ surplus | -606,944 | -274,726 | -1,82399 | -3468,84 | -1138,15 |

*DALY = *Disability adjusted life years* (Anos de vida ajustados por incapacidade); PAF = *Potentially Affected Fraction* (Fração Potencialmente Afetada); PDF = *Potentially Disappeared Fraction of plant species* (Fração potencialmente desaparecida de espécies vegetais); MJ surplus = *Additional energy requirement to compensate lower future ore grade* (Requisito adicional de energia para compensar o baixo teor de minério futuro); m²yr = metro quadrado ano.

Fonte: Autor. Obtida em SimaPro® 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.

APÊNDICE E – MÉTODO: ECO-INDICADOR 99 (H) V. 2.10/ EUROPE H/A/ CARACTERIZAÇÃO/ COMPARAÇÃO ENTRE OS TEORES DE HIDRATAÇÃO DE 5% A 30% V/V DE ÁGUA EM UNIDADES EQUIVALENTES.

| Categoria de impacte | Unidade | E95W5 | E90W10 | E80W20 | E70W30 |
|-------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Carcinogens | DALY | 0,039496 | 0,031855 | 0,031 | 0,030896 |
| Resp. organics | DALY | 8,26E-05 | 7,4E-05 | 8,76E-05 | 0,000135 |
| Resp. inorganics | DALY | 0,07797 | 0,069752 | 0,066625 | 0,064855 |
| Climate change | DALY | 0,015856 | 0,009795 | 0,009043 | 0,009036 |
| Radiation | DALY | 7,5E-05 | 5,76E-05 | 5,51E-05 | 5,42E-05 |
| Ozone layer | DALY | 3,5E-06 | 2,85E-06 | 2,76E-06 | 2,72E-06 |
| Ecotoxicity | PAF* m ² yr | 47067,51 | 38401,41 | 37369,54 | 36771,17 |
| Acidification/ Eutrophication | PDF* m ² yr | 2581,61 | 2212,47 | 2042,483 | 1946,987 |
| Land use | PDF* m ² yr | 27869,86 | -2212,21 | -5433,56 | -5228,45 |
| Minerals | MJ surplus | 4761,109 | 4593,39 | 4571,763 | 4561,422 |
| Fossil fuels | MJ surplus | 50898,81 | 41289,18 | 40012,36 | 39728,81 |

*DALY = *Disability adjusted life years* (Anos de vida ajustados por incapacidade); PAF = *Potentially Affected Fraction* (Fração Potencialmente Afetada); PDF = *Potentially Disappeared Fraction of plant species* (Fração potencialmente desaparecida de espécies vegetais); MJ surplus = *Additional energy requirement to compensate lower future ore grade* (Requisito adicional de energia para compensar o baixo teor de minério futuro); m²yr = metro quadrado ano.

Fonte: Autor. Obtida em SimaPro[®] 8.3.0.0 Faculty/ Ecoinvent 3.3.