**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO**

PAULO HENRIQUE DA SILVA PEREIRA

**DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO
DE BIODIESEL POR MICROALGAS CULTIVADAS EM VINHAÇA EM UMA USINA
SUCROALCOOLEIRA**

**VERSÃO CORRIGIDA
SÃO CARLOS
2017**

PAULO HENRIQUE DA SILVA PEREIRA

**DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO
DE BIODIESEL POR MICROALGAS CULTIVADAS EM VINHAÇA EM UMA USINA
SUCROALCOOLEIRA**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientadora: Prof^a. Titular Maria do Carmo Calijuri

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Pd Pereira, Paulo Henrique da Silva
 Dimensionamento e avaliação do ciclo de vida (ACV)
da produção de biodiesel por microalgas cultivadas em
vinhaça em uma usina sucroalcooleira / Paulo Henrique
da Silva Pereira; orientadora Maria do Carmo Calijuri.
São Carlos, 2017.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de
Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2017.

 1. Bioenergia. 2. Energia renovável. 3. gestão do
ciclo de vida. 4. etanol. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PAULO HENRIQUE DA SILVA PEREIRA.**

Título da dissertação: "Avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de biodiesel por microalgas cultivadas em vinhaça em uma usina sucroalcooleira".

Data da defesa: 20/04/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Titular **Maria do Carmo Calijuri (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Aldo Roberto Ometto**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **André Cordeiro Alves dos Santos**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

**Dedico aos meus pais,
e a toda minha família, pelo apoio,
amor e ensinamento prestados ao longo da minha vida**

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, por me abençoar a cada dia com o dom da vida e saúde, ao qual sou totalmente grato.

Ao meus pais e familiares por toda a ajuda prestada, pela minha formação ética e moral, e não menos importante, pelo incentivo a ir atrás dos seus objetivos.

À professora Maria do Carmo Calijuri, primeiramente pela confiança depositada a mim para a execução do presente estudo. Pelas orientações acadêmicas mais diversas, pelos ensinamentos de vida, e não seria possível o resultado final deste trabalho sem sua participação.

Ao professor Aldo Roberto Ometto, um dos profissionais e pesquisadores mais qualificado no campo de engenharia do ciclo de vida do país. Suas orientações, desde a disciplina até como co-orientador, foram fundamentais e exclusivas para a formulação do principal objetivo desse estudo.

Às agências de financiamento Capes e CNPq, pela concessão da bolsa e recursos para a realização dessa pesquisa.

Ao departamento de Hidráulica e Saneamento, pela estrutura laboratorial e administrativa oferecida.

Aos profissionais do programa de pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, PPG-SHS, por todo o serviço e suporte prestado, sendo fundamentais para o funcionamento da programa.

Ao departamento de Engenharia de Produção, pelo fornecimento da estrutura laboratorial, com a qual foi realizado os estudos de ACV. Também pelos profissionais, como o Ícaro, que prestou assistência técnica quando necessária.

Agradeço a todos os professores do SHS, sendo os mais renomados nomes em suas respectivas áreas, contribuindo para a construção da fonte de conhecimento.

À técnica do laboratório Biotace, Adriana, por todo auxílio prestado. Assim como, os demais colegas durante esses dois anos de mestrado, contribuindo com discussões, ideias e por construir um ambiente totalmente agradável de trabalho, em especial a Flávia Bottino pela ajuda na parte textual.

Ao Dr. Paulo Vagner pela concepção e andamento inicial do trabalho.

À Ana Laura, professor Murilo Innocentini e Juliana Argente, por terem contribuído diretamente na elaboração deste estudo, em seus respectivos campos de saberes.

E por fim, mas de total importância, aos amigos criados em São Carlos durante o período de mestrado, que foram fundamentais para o implemento da qualidade de vida, com o lazer, com os estudos, com incentivos nas horas difíceis.

RESUMO

PEREIRA, P.H.S. **Dimensionamento e avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de biodiesel por microalgas cultivadas em vinhaça integrada em uma usina sucroalcooleira**. 2017. 228f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2017.

As microalgas, nos últimos anos, veem sendo utilizadas em pesquisas para produção de energias renováveis, entre elas, o biodiesel. Esse é um biocombustível formado através de reação química entre um mol de triglicerídeo e três mols de um álcool, sendo metanol ou etanol os mais utilizados. As tecnologias de produção são as mais diversas, porém, algumas etapas são essenciais, como o sistema de cultivo, colheita, secagem, extração do óleo e o processo de conversão química. A presente pesquisa consiste no desenvolvimento de um sistema produtivo para o biodiesel, utilizando dados literários, com óleo de microalgas do gênero *Chlorella* cultivadas em vinhaça, em um processo posterior a produção de etanol. Para isso, foram desenvolvidos dois sistemas de produção, onde alterou-se o sistema de cultivo (lagoas de alta taxa e fotobiorreator), e foram dimensionados um sistema de tratamento preliminar na vinhaça, a unidade de extração do óleo por liquefação hidrotérmica e a unidade de conversão. Os dados necessários para o dimensionamento foram obtidos em literatura, seguindo as orientações de normas e manuais técnicos. Com os insumos de entrada e saída em cada processo, foram realizados estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV), para determinar os potenciais impactos ambientais, e assim, comparar os dois sistemas de produção e avaliar sua viabilidade para produzir biodiesel em grande escala. Os estudos de ACV foram realizados de acordo com as normas técnicas da série ISO 14.040, com as representantes nacionais ABNT NBR ISO 14.040 e ABNT NBR ISO 14.044. Como unidade funcional, foi adotado 1 kg de biodiesel, analisado a influência dos critérios de alocação (massa, econômico, *cut-off* e massa, *cut-off* e econômico), utilizando o EDIP 1997 e USEtox para a quantificação dos potenciais de impactos. Os resultados indicam que o sistema com fotobiorreator apresentou maior produtividade de biomassa, e consequentemente, maior produção de biodiesel (foram produzidos 50,76 kg/h de óleo em fotobiorreator e 27,57 kg/h de óleo em lagoas de alta taxa). No entanto, o tratamento utilizado para a vinhaça não foi adequado, consumindo grande quantidade de coagulante com um gasto de R\$ 11.067.840,00 por dia. Do ponto de vista energético, ocorreu maior consumo de energia para produção da unidade funcional, em relação a energia fornecida pela mesma, sendo até 60 vezes maior. Do ponto de vista ambiental, o sistema que utilizou o fotobiorreator para o cultivo, apresentou redução em todas as categorias de potenciais impactos ambientais, em média 45%, em relação ao sistema de lagoas de alta taxa.

Contudo, os valores emitidos, comparado com outros sistemas pesquisados, obteve maiores contribuições de impacto para a unidade funcional, com amplitude de até 1632 vezes, na categoria de aquecimento global. Os critérios de alocação apresentaram grande influência nos resultados, contudo recomendações estabelecem que processos de alocação sejam realizados, primeiramente, através de relações físicas.

Palavras-chave: Bioenergia, Energia renovável, gestão do ciclo de vida, etanol

ABSTRACT

PEREIRA, P.H.S. **Sizing and Life Cycle Assessment (LCA) and of the biodiesel production from macroalgae growing in vinasse in a sugar-alcohol plant.** 2017. 228f. MSc dissertation. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2017.

Microalgae, in recent years, have been used in researches for the production of renewable energy, such as, biodiesel. Biodiesel is a product of the chemical reaction between one mole of triglyceride and three moles of an alcohol, e.g. methanol or ethanol. The biodiesel production technologies are diverse, however, some steps are essential, such as cropping system, harvesting, drying, oil extraction and the chemical conversion process. The present research aimed the development of a production system of biodiesel, using the oil derived from microalgae growing in vinasse, in a process after ethanol production. Two production systems were developed, where the cultivation system (raceways ponds and photobioreactors) was altered, and a preliminary treatment system was designed for the vinasse, oil extraction unit (hydrothermal liquefaction), and conversion unit. The necessary data for the scaling were obtained in literature, following the guidelines of standards and technical manuals. Considering the inputs and outputs of each processes, life cycle assessment (LCA) studies were conducted to determine potential environmental impacts, compared two production systems and evaluated their characteristics to produce biodiesel on a large scale. The LCA studies were carried out according to the technical standards of the ISO 14.040 series, with the national representatives ABNT NBR ISO 14,040 and ABNT NBR ISO 14,044. As a functional unit, 1 kg of biodiesel was used, analyzing the influence of the allocation criteria (mass, economic, cut-off and mass, cut-off and economic) using EDIP 1997 and USEtox for the quantification of impact potentials. From the results, the photobioreactor system showed higher biomass productivity and, consequently, higher biodiesel production than raceways ponds (50.76 kg / h of oil in photobioreactor and 27.57 kg/h of oil were produced in raceways). However, the treatment used for vinasse was not adequate, consuming a large amount of coagulant costing R\$ 11,067,840.00 per day. From the energetic point view, there was higher energy consumption for the production of the functional unit, in relation to the energy supplied by the unit (up to 60 times greater). From the environmental point view, the system with photobioreactor for cultivation, presented a reduction in all categories of potential environmental impacts, on average 45%, in relation to the raceways system. However, the pollutant loads emitted, compared to other systems surveyed, showed greater impact contributions to the functional unit reaching up to 1632 times, in the global warming category. The allocation criteria had great influence on the

results, however, the recommendations that establish that allocation processes are carried out, mainly, through physical relations.

Keywords: Bioenergy, Renewable energy, Life cycle management, Ethanol

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO	15
2. INTRODUÇÃO GERAL	17
3. OBJETIVOS	21
3.1. <i>Objetivo geral.....</i>	<i>21</i>
3.2. <i>Objetivos específicos</i>	<i>21</i>
4. INTEGRAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL COM USINA SUCROALCOOLEIRA E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: CONTEXTUALIZAÇÃO E ASPECTOS RELACIONADOS AO TEMA	23
<i>Resumo</i>	<i>23</i>
4.1. <i>Introdução.....</i>	<i>23</i>
4.2. <i>Biodiesel</i>	<i>24</i>
4.3. <i>Uso de microalgas para produção de biodiesel.....</i>	<i>26</i>
4.4. <i>Nutrição e meios de cultivos para microalgas</i>	<i>28</i>
4.5. <i>Sistemas de cultivo</i>	<i>30</i>
4.5.1. <i>Lagoas de Alta taxa</i>	<i>30</i>
4.5.2. <i>Fotobiorreatores</i>	<i>33</i>
4.6. <i>Etapas da produção de biodiesel utilizando microalgas</i>	<i>33</i>
4.6.1. <i>Colheita</i>	<i>33</i>
4.6.2. <i>Secagem</i>	<i>34</i>
4.6.3. <i>Extração de lipídios</i>	<i>34</i>
4.6.4. <i>Conversão do óleo em biodiesel.....</i>	<i>35</i>
4.7. <i>Liquefação hidrotérmica.....</i>	<i>36</i>
4.8. <i>Avaliação do ciclo de vida</i>	<i>38</i>
4.8.1. <i>Definição dos Objetivos e Escopo</i>	<i>41</i>
4.8.2. <i>Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)</i>	<i>43</i>
4.8.3. <i>Avaliação de Impacto de ciclo de vida</i>	<i>45</i>
4.8.4. <i>Interpretação</i>	<i>47</i>
4.8.5. <i>Métodos de AICV: EDIP 1997 e USEtox</i>	<i>48</i>
4.9. <i>Estudos de avaliação do ciclo de vida de biodiesel por microalgas.....</i>	<i>49</i>

4.10. Considerações finais	58
4.11. Referências bibliográficas	59

5. DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO A VINHAÇA DA PRODUÇÃO DE ETANOL E MICROALGAS: CULTIVO POR FOTOBIOREATOR E LAGOA DE ALTA TAXA..... 67

<i>Resumo</i>	67
5.1. Introdução	67
5.2. Materiais e Método.....	70
5.2.1. Tratamento preliminar da vinhaça.....	70
5.2.1.1. Dimensionamento da calha Parshall e mistura rápida	70
5.2.1.2. Dimensionamento dos floculadores hidráulicos	76
5.2.1.3. Dimensionamento da unidade de sedimentação	77
5.2.2. Lagoa de alta taxa	79
5.2.3. Fotobiorreator	80
5.2.4. Extração do óleo (Liquefação Hidrotérmica)	80
5.2.5. Conversão	80
5.3. Resultados	83
5.3.1. Memorial Descritivo	83
5.3.1.1. Unidade de tratamento preliminar	84
5.3.1.2. Área de cultivo de microalgas em lagoas de alta taxa	85
5.3.1.3. Área do cultivo de microalgas em fotobiorreatores	86
5.3.1.4. Unidade de extração por Liquefação hidrotérmica	87
5.3.1.5. Unidade de conversão do óleo em biodiesel	88
5.3.2. Memorial de cálculo	89
5.3.2.1. Dimensionamento calha Parshall e mistura rápida.....	89
5.3.2.2. Dimensionamento dos floculadores hidráulicos	94
5.3.2.3. Dimensionamento das unidades de sedimentação.....	95
5.3.2.4. Dimensionamento da lagoa de alta taxa.....	97
5.3.2.5. Dimensionamento do fotobiorreator	98
5.3.2.6. Dimensionamento da unidade de extração	98
5.3.2.7. Dimensionamento da unidade de conversão do óleo em biodiesel ...	99
5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
5.5. Referências bibliográficas	104

6. ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO VINHAÇA E MICROALGAS: CULTIVO POR FOTOBIORREATOR E LAGOA DE ALTA TAXA, COM ALOCAÇÕES DE MASSA, ECONÔMICA E CUT-OFF	109
<i>Resumo</i>	109
6.1. Introdução	110
6.2. MÉTODOS	110
6.2.1. Definição do objetivo e Escopo	110
6.2.2. Análise do inventário do ciclo de vida (ICV)	114
6.2.2.1. Procedimentos de alocação	116
6.2.3.1. Métodos de AICV	118
6.2.3.2. Software e Base de dados	120
6.3. Resultados	120
6.3.1. Objetivo e escopo	120
6.3.1.1. Objetivo	120
6.3.1.2. Funções dos sistemas de produto	121
6.3.1.3. Unidades funcionais	122
6.3.1.4. Fluxo de referência	122
6.3.1.5. Sistemas de produto	122
6.3.1.6. Fronteira dos sistemas de produto	125
6.3.1.7. Procedimento de Alocação	126
6.3.1.8. Tipos de impacto e método de avaliação de impacto e interpretação	126
6.3.1.9. Requisitos dos dados	126
6.3.1.10. Pressupostos	127
6.3.1.11. Limitações	135
6.3.2. Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	136
6.3.2.1. Inventário do ciclo de vida do sistemas A - Cultivo em lagoas de alta taxa	137
6.3.2.2. – Inventários do ciclo de vida do sistema B: Cultivo em fotobiorreatores	155
6.3.3. Avaliação de Impacto do ciclo de vida	175
6.3.3.1. Resultados AICV do sistema de Lagoas de alta taxa: Sistema A	176
6.3.3.2. Resultados AICV do sistema de Fotobiorreatores: Sistema B	195
6.3.4. Interpretação	214

6.3.4.1. Comparação entre os sistemas de produção com LAT e fotobiorreatores	214
6.3.4.2. Identificação dos pontos críticos dos sistemas de produção	219
6.3.4.3. Comparação entre os critérios de alocação	220
6.3.4.4. Limitações do estudo de ACV	222
6.4. <i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	222
6.5. <i>Referências bibliográficas</i>	224
7. CONCLUSÃO GERAL.....	227

1. APRESENTAÇÃO

A presente pesquisa foi desenvolvida para complementar estudos realizados no Laboratório de Biotoxicologia em Água Continentais e Efluentes (BIOTACE) do Departamento de Hidráulica e Saneamento, da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos.

Santos (2013) realizou uma pesquisa cujo objetivo principais foram: isolar e selecionar cepas que apresentam potencial para a obtenção de óleo; investigar e selecionar fatores químicos, físicos e tróficos para otimizar a produção de biomassa e lipídios das cepas selecionadas e; adequar a vinhaça para o cultivo de microalgas e produção de lipídios. Os resultados comprovaram que a vinhaça favorece o cultivo mixotrófico de microalgas do gênero *Chlorella sp.*, com a remoção de matéria orgânica e minerais do efluente, além da produção de biomassa com potencial de uso à cadeia produtiva de biodiesel.

A pesquisa atual teve o intuito simular em escala real, com dados obtidos em diversos trabalhos da área, a produção de biodiesel utilizando como matéria-prima o óleo de microalgas cultivadas em vinhaça. A ideia fundamenta-se no conceito de biorrefinarias, onde ocorre a utilização de todos os resíduos possíveis para a produção de novos produtos. Para avaliar os dados, foi utilizado a ferramenta da avaliação do ciclo de vida (ACV) para analisar os impactos ambientais da nova cadeia produtiva.

Para apresentação dos resultados, a presente dissertação foi dividida em três capítulos principais, além da introdução geral, objetivos e conclusão geral. O primeiro capítulo diz respeito a uma revisão de literatura sobre os biodiesel, o uso de microalgas, e as fases de produção, e também, sobre a estrutura metodológica da ACV. O segundo trata-se do dimensionamento dos sistemas produtivos, com as fases: tratamento preliminar da vinhaça, cultivo das microalgas (lagoas de alta taxa e fotobiorreatores), extração do óleo e conversão em biodiesel.

O último capítulo apresenta os resultados do estudo de ACV, para quatro tipos de alocações diferentes (massa, econômico, *cut-off* e massa, *cut-off* e econômico) em dois sistemas de produção: o primeiro, com o uso de lagoas de alta taxa para o cultivo; o segundo, com o uso de fotobiorreatores.

2. INTRODUÇÃO GERAL

A demanda de energia no mundo cresce de forma exponencial em função do aumento populacional. A maior parte desta energia é suprida pela utilização de combustíveis fósseis, que são originados da decomposição de animais e vegetais durante milhares de anos. No entanto, os combustíveis fósseis apresentam limitações: a primeira, quanto a sua origem sendo uma fonte não renovável, causa uma incerteza em sua oferta no futuro; e a segunda, são as tensões geopolíticas que ocorrem entre as zonas produtoras e as consumidoras.

Por esses fatores e pressões para diminuir as emissões de gases que causam o aquecimento global inserido em políticas públicas de diversos países, a produção de biocombustíveis como fontes renováveis de energia tem ganhado destaque nas pesquisas e espaço nas matrizes energéticas.

O Brasil encontra-se entre os maiores produtores de biocombustíveis no mundo, justificado ao fato que o país apresenta uma considerável extensão territorial onde a agricultura voltada à produção de energia pode ser conduzida com a demanda por alimentos sem comprometer a e as condições de clima e incidência solar (PARRELLA et al., 2012).

Um dos biocombustíveis mais produzidos no Brasil é o etanol, a partir de processo de fermentação da cana-de-açúcar. Segundo dados levantados pela Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2015) o Brasil produziu 634,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra de 2014/2015 que resultou em uma produção de etanol total de 28,66 bilhões de litros.

Atualmente no Brasil, as usinas de produção de etanol funcionam como uma biorrefinaria, onde ocorre as produções do etanol e açúcar. Nessas unidades ocorre também a produção de energia elétrica a partir de processo de queima do bagaço da cana-de-açúcar de forma a suprir suas necessidades, onde não necessita de fontes externas de oferta dessa forma de energia. No entanto, depende de outras energias como o diesel, que é utilizado principalmente nos processos agrícolas do ciclo de vida do produto.

De acordo com Seabra et al. (2011) o diesel é responsável por 2/3 do uso de energia de origem fóssil em toda cadeia da produção do etanol. Para substituir a demanda por diesel e criar condições da usina sucroalcooleira atingir cada vez mais a sustentabilidade e ao mesmo tempo ser autossuficiente, uma alternativa é a produção e o uso de biodiesel em seus processos.

A substituição seria positiva tanto para o aspecto da dependência pelo combustível fóssil quanto para o aspecto ambiental, onde o etanol e o açúcar apresentariam menores taxas de emissões de gases de efeito estufa no ciclo vida dos produtos.

Souza, Gopal e Seabra (2015) realizaram uma análise da produção de biodiesel que substituisse o diesel fóssil durante os processos agrícolas e obtiveram uma redução de 10% na emissão de gases de efeito estufa e 50% do uso de energia fóssil no ciclo de vida do etanol.

O biodiesel é obtido através de reações químicas e sua principal matéria-prima são os óleos, gorduras vegetais ou animais. Os óleos mais utilizados para a produção do biodiesel são os originados dos vegetais como a soja, palma, girassol e outros, porém outras fontes vêm sendo estudadas, como os lipídios da célula de seres vivos como algumas espécies de fungos e microalgas.

As microalgas são consideradas por muitos autores como sendo a forma mais viável de produzir biodiesel para atender a demanda energética sem competir com os alimentos. Segundo Rawat et al. (2013) as microalgas apresentam uma produtividade de lipídios vinte vezes maior que lipídios de outros tipos de alimentos por hectare. Outras vantagens é que as microalgas apresentarem um rápido crescimento e poderem se desenvolver em qualquer ambiente, podendo apresentar cerca de 50% de óleo em seu peso celular.

As microalgas necessitam de um meio de cultivo com dióxido de carbono e nutrientes para o seu desenvolvimento. De acordo com Lardon et al. (2009) e Clarens et al. (2010) o uso de fertilizantes representa um aspecto negativo e limitante para a produção de biodiesel por microalgas, em aspectos econômicos e ambientais.

Para substituir o uso dos fertilizantes, alguns estudos sugerem o uso de águas residuais que podem diminuir ou eliminar o uso de fertilizantes químicos, pois elas apresentam concentrações de nutrientes essenciais para o crescimento das microalgas.

Uma água residual que apresenta potencial para o uso é a vinhaça, que é o resíduo da destilação de etanol. Santos (2013) realizou um estudo utilizando-a como meio de cultivo para uma espécie de microalga, concluindo que as quantidades de nitrogênio e fósforo presente em sua composição asseguraram uma quantidade maior que o necessário ao crescimento celular adequado. A vinhaça também representa fonte de impacto ao meio ambiente, pois é um resíduo de difícil tratamento utilizado para a fertirrigação da lavoura de cana-de-açúcar. Em excesso, ela pode causar contaminação do solo e dos lençóis freáticos.

De acordo com Souza, Gopal e Seabra (2015), as usinas sucroalcooleiras no Brasil apresentam um cenário ideal para a produção de biodiesel utilizando as microalgas. Com o processo de destilação do etanol se produz vinhaça, e a queima do bagaço da cana-de-açúcar para a produção de energia elétrica gera o dióxido de carbono. Esses subprodutos podem ser reutilizados para o processo de cultivo das microalgas e, posteriormente, produção do biodiesel.

A vantagem de introduzir a produção do biodiesel na usina sucroalcooleira é a busca pela sustentabilidade, com redução de matéria prima de origem fóssil e com isso a

diminuição de emissões de gases de efeito estufa. Transforma-se assim, o etanol em um produto mais renovável e aproveita-se o potencial nutritivo da vinhaça, que mesmo após o uso poderá ser utilizado na fertirrigação com uma concentração menor de nutrientes, reduzindo o risco de contaminação do meio ambiente por excessos.

Porém, outras categorias de impactos ambientais devem ser consideradas em todo o ciclo de vida do etanol e do biodiesel de microalgas para se obter informações para uma tomada de decisão adequada. Para isso é necessário à aplicação da metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV) para verificar o potencial ambiental da implantação da tecnologia e verificar quais são os pontos críticos para investimento em melhorias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CLARENS, A. F.; RESURRECCION, E. P.; WHITE, M. A.; COLOSI, L. M. Environmental Life Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks. *Environmental Science & Technology*, v. 44, n. 5, p. 1813–1819, mar. 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. CONAB: Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar – Quarto Levantamento da safra 2014/15 e Primeiro Levantamento da safra 2015/16. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_14-15.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2015.

LARDON, L.; HÉLIAS, A.; SIALVE, B.; STEYER, J.-P.; BERNARD, O. Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 17, p. 6475–6481, set. 2009.

PARRELLA, R. A. D. C.; MENEGUCI, J. L. P.; RIBEIRO, A.; SILVA, A. R.; PARRELLA, N. N. L. D.; RODRIGUES, J. a D. S.; TARDIN, F. D.; SCHAFFERT, R. E. Desempenho de cultivares de sorgo sacarino em diferentes ambientes visando a produção de etanolXXVIII Congresso nacional de milho e sorgo. [s.l: s.n.].

RAWAT, I.; RANJITH KUMAR, R.; MUTANDA, T.; BUX, F. Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy*, v. 103, p. 444–467, mar. 2013.

SANTOS, P. V.. Seleção de cepas oleaginosas de microalga *Chlorella* spp. e otimização do seu cultivo em meio sintético e vinhaça visando à produção sustentável de biodiesel. 2013. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C.; CHUM, H. L.; FARONI, C. E.; SARTO, C. A. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 5, n. 5, p. 519–532, set. 2011.

SOUZA, S. P.; GOPAL, A. R.; SEABRA, J. E. A. Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery. *Energy*, v. 81, p. 373–381, mar. 2015.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

A pesquisa possui como objetivo geral avaliar os impactos ambientais potenciais do ciclo de vida do biodiesel produzida por óleo de microalgas cultivadas em vinhaça, em dois sistemas de produção desenvolvido com dois sistemas de cultivo diferentes e comparando-os.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral do trabalho, listam-se os objetivos específicos a seguir:

- i. Dimensionar o sistema de produção de biodiesel com lagoas de alta taxa para o cultivo de microalgas utilizando a vinhaça total produzida em uma usina.
- ii. Dimensionar o sistema de produção de biodiesel com fotobiorreatores para o cultivo de microalgas utilizando a vinhaça total produzida em uma usina.
- iii. Identificar os impactos ambientais potenciais do ciclo de vida do biodiesel por microalgas em uma lagoa aberta de alta produtividade em critérios de alocações diferentes;
- iv. Identificar os impactos ambientais potenciais do ciclo de vida do biodiesel por microalgas em um fotobiorreator em critérios de alocações diferentes;
- v. Comparar as categorias de impactos ambientais potenciais do ciclo de vida do biodiesel por dois sistemas de produção.
- vi. Analisar a influência dos critérios de alocação nos resultados das cargas de impacto.

4. INTEGRAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL COM USINA SUCROALCOOLEIRA E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: CONTEXTUALIZAÇÃO E ASPECTOS RELACIONADOS AO TEMA

RESUMO

O biodiesel é um biocombustível formado através de uma reação química entre um mol de triglicerídeo e três mols de um álcool, sendo metanol ou etanol os mais utilizados. O triglicerídeo é uma matéria-prima que pode-se originar de várias fontes, como óleo de vegetais, animais e de microrganismos. No último grupo encontram-se as microalgas, que são seres unicelulares, encontradas em ambientes aquáticos podendo seu crescimento ser autotrófico, heterotrófico ou mixotrófico. As fases da produção de biodiesel por microalgas começam com o sistema de cultivo, geralmente empregando o uso de lagoas abertas ou fotobiorreatores, colheita, secagem, extração do óleo e o processo de conversão química. A avaliação do ciclo de vida é uma metodologia de quantificação dos potenciais impactos ambientais no ciclo de vida de produtos, que compreende quatro fases: objetivo e escopo, análise do inventário do ciclo de vida, avaliação de impacto do ciclo de vida e interpretação.

Palavras chave: Biodiesel, microalgas, Avaliação do ciclo de vida.

4.1. INTRODUÇÃO

A primeira parte deste capítulo aborda conceitos básicos sobre produção de biodiesel e as etapas de sua produção através da utilização de microalgas. A importância de entender o processo é fundamental para as escolhas das vias de produção e seu dimensionamento. Sendo assim, é importante conhecer a nutrição das microalgas, sistemas de cultivo, extração do óleo e como ocorre o processo químico de conversão.

Nos últimos anos as microalgas tornaram-se foco de pesquisas para o desenvolvimento de biocombustíveis, entre eles biodiesel, pois comparados com outras culturas vegetais apresentam rápido crescimento e colheita com alto teor de lipídio celular. No entanto, a cadeia de produção à escala industrial ainda não é viável do ponto de vista econômico e energético.

A segunda parte aborda a avaliação do ciclo de vida. Essa metodologia é muito utilizada em pesquisas de energias renováveis, que geralmente apresentam um perfil que

agride menos o meio ambiente se comparada aos combustíveis fósseis, onde os resultados são utilizados para o *marketing* do produto e identificação de pontos possíveis de melhorias.

4.2. BIODIESEL

Globalmente, com o aumento de problemas ambientais e recursos energéticos relacionados com a queima de combustíveis fósseis, muitas pesquisas se voltaram para a produção e consumo de biodiesel. Isso justifica-se pela sua alta biodegradabilidade, toxicidade baixa, e substitui o diesel fóssil em muitas aplicações, como em caldeiras e motores de combustão interna, sem grandes modificações e com baixa perda de rendimento (ATABANI et al., 2012). O biodiesel ainda apresenta zero emissão de sulfatos, compostos aromáticos e outras substâncias químicas que afetam o meio ambiente. Quando o seu ciclo de vida é considerado, o biodiesel apresenta baixa contribuição na emissão de dióxido de carbono (ATABANI et al., 2012; TRAN; CHANG; LEE, 2017).

O biodiesel é um combustível renovável líquido, obtido através de reação química entre óleos vegetais ou gordura animal com um álcool, sendo utilizado na combustão de motores de ciclo diesel ou em misturas com óleo diesel (ROMANO; SORICHETTI, 2010). Essa reação é a transesterificação, onde os principais álcoois utilizados são o metanol e o etanol, na presença de um catalizador, formando assim o biodiesel e o glicerol (YUSUF; KAMARUDIN; YAAKUB, 2011).

O metanol é o álcool mais utilizado nas reações de transesterificação, devido ao menor custo, maior rendimento e aos ésteres metílicos de ácidos graxos (EMAG) serem mais voláteis que os de ésteres etílicos de ácidos graxos (EEAG). Porém, o uso do etanol é promissor, devido ser um álcool menos tóxico e um produto renovável, sendo que o metanol provém principalmente de fontes fósseis, como o gás natural (YUSUF; KAMARUDIN; YAAKUB, 2011).

Lin et al. (2011) descrevem a evolução do biodiesel, que começou na Alemanha no ano de 1893. Nesse ano, Rudolf Diesel funcionou um motor, inventado por ele e que leva o seu nome, com óleo de amendoim. Passado 44 anos, em 1937, um cientista belga desenvolveu e patenteou um processo que transforma os óleos vegetais para uso como combustível, trazendo pela primeira vez o conceito do biodiesel. Com o passar do tempo, plantas de produção em escala industrial foram construídas na Europa, mas apenas na década de 90 as primeiras normas estabelecendo critérios para o biodiesel foram criadas, ganhando força após o ano 2000.

De acordo com Lin et al. (2011), no ano de 2004 o governo filipino tornou obrigatório o uso de 1% de biodiesel misturado com o diesel fóssil para uso nos veículos. Em 2005, o estado de Minnesota, Estados Unidos da América, determinou que todo o combustível diesel vendido, deveria possuir um teor de até 2% de biodiesel.

No Brasil não foi diferente, no ano de 2004 o governo federal lançou o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). Nos primeiros anos em vigor, o objetivo do plano foi introduzir o biodiesel na matriz energética brasileira, visando à inclusão social e o desenvolvimento regional, com a criação de um arcabouço legal e que regulamenta o setor.

A partir do ano de 2004 iniciou-se o processo de mistura do biodiesel com o diesel, mas só em 2008 tornou-se obrigatória a mistura com um teor de 2%, representado pelo símbolo B2. A meta estipulada pela Lei nº 11.097 de 13 de janeiro de 2005, era que até o ano de 2013 o percentual aumentasse para 5%, porém o mercado brasileiro de biodiesel expandiu-se consideravelmente dando suporte a uma antecipação do cronograma em três anos, em janeiro de 2010.

Diversas matérias-primas podem ser utilizadas para fornecer triglicerídeos para a produção de biodiesel. De acordo com Atabani et al. (2012), existem mais de 350 culturas oleaginosas identificadas ao redor do mundo com potencial para a produção de biodiesel. Entre elas estão os vegetais comestíveis (soja, canola, colza, palma), os vegetais não comestíveis (mamona, jatropha, algodão, etc.), gorduras animais e de outras fontes, como bactérias, algas, microalgas e fungos (LIN et al., 2011; YUSUF; KAMARUDIN; YAAKUB, 2011; ATABANI et al., 2012).

De acordo com Lin et al. (2011) essa grande variedade de matérias-primas que podem ser utilizadas, recebem esforços diferentes em cada região ao redor do mundo, justificado pelas diferentes características climáticas, condições e disponibilidades de solo. A figura 4.1 ilustra a distribuição das principais fontes de óleo para produção de biodiesel no mundo.

Figura 4.1: Principais matérias-primas para a produção de biodiesel ao redor do mundo.

Fonte: Lin et al. (2011).

4.3. USO DE MICROALGAS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Com o aumento das pressões para reduzir a emissão de CO₂ e os esforços para produzir energia e combustíveis renováveis, varias opções se mostram atraentes, como o uso de energia solar, eólica e os biocombustíveis (BAICHA et al., 2016). Entre esses últimos, o biodiesel ganhou destaque nas pesquisas, concentrando esforços em aperfeiçoar os processos, a estequiometria da reação, escolha de catalizadores eficientes, tempo de reação e principalmente a matéria-prima a ser utilizada.

Microrganismos, como as microalgas, apresentam potencial para a produção de biodiesel, pois elas possuem óleos com características físico-químicas semelhantes daqueles encontrados nos vegetais e com a vantagem de crescerem muito mais rapidamente, possibilitando colheitas diárias, o que torna essas culturas economicamente promissoras. Além disso, o biodiesel de microalgas não contém enxofre, reduz a emissão de partículas no ar, dióxido de carbono, hidrocarbonetos e SO_x (TEIXEIRA; MORALES, 2006; MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; AZEREDO, 2012). A tabela 4.1 compara produtividade das microalgas com outros vegetais.

Tabela 4.1 – Comparação da produtividade de óleo das principais fontes de matéria-prima de origens vegetais e de microalgas

Matéria-prima	Teor de óleo (%)	Produtividade (L/ha/ano)
Mamona	53	1.413
Jatropha	35-60	1.892
Soja	15-20	446
Girassol	25-35	952
Colza	38-46	1.190
Palma	30-60	5.950
Amendoim	45-55	1.059
Oliva	45-70	1.212
Milho	48	172
Côco	63-65	2.689
Algodão	18-25	325
Microalga (teor de óleo baixo)	30	58.700
Microalga (teor de óleo médio)	50	97.800
Microalga (teor de óleo alto)	70	136.900

Fonte: Atabanl et al. (2012)

Os valores de apresentados na Tabela 4.1 indicam que mesmo uma espécie de microalga que apresenta baixo teor de óleo produz uma quantidade de óleo, no mesmo espaço e tempo, praticamente 10 vezes maior que a palma e 136 à soja.

Segundo Mata, Martins e Caetano (2010) o sucesso das microalgas como fontes de óleo para produção de biodiesel é justificada por uma série de fatores. O primeiro é devido a características desses microrganismos, que possuem capacidade de se adaptar em qualquer meio, podendo ser cultivadas em águas impróprias para o consumo humano. Outras vantagens consistem em menores quantidades de áreas destinados ao seu cultivo em relação às outras culturas, podendo ser realizadas em solos não destinada à agricultura, não existindo uma competição direta com a demanda alimentícia (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; GHOSH et al., 2016; SALAM; VELASQUEZ-ORTA; HARVEY, 2016).

Baicha et al. (2016) descreveram um fator interessante que destaca o potencial do uso de microalgas para a geração de biocombustíveis, onde através de sua biomassa, pode-se obter lipídios, proteínas e hidrocarbonetos, compostos utilizados para produção de diferentes tipos de biocombustíveis, como biodiesel, metano, hidrogênio e etanol.

O interesse no cultivo de microalgas para fins energéticos surgiu ao mesmo tempo em que as primeiras plantas de produção industrial de biodiesel começaram a funcionar na Europa. De acordo com Mata, Martins e Caetano (2010) pesquisas começaram a ser desenvolvidas na década de 70 durante a primeira crise de petróleo. No ano de 1978 o governo dos Estados Unidos através do Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL) lançou o Programa de espécies aquáticas, que o objetivo principal era a produção de biodiesel utilizando microalgas com alto teor lipídico cultivadas em lagoas de alta taxa, utilizando CO₂ residual de usinas de carvão. O programa também contribuiu para avanços referentes ao metabolismo dos organismos e o sistema de engenharia envolvido na produção (SHEEHAN et. al., 1998)¹. O programa funcionou até o ano de 1996, quando encerrou-se o financiamento para o programa, que segundo Bravo-Fritz et al. (2015) foi resultado da baixa no preço do petróleo da época.

A partir do ano 2000, com um aumento no preço do petróleo, acordos políticos e esforços para reduzir a emissão de poluentes responsáveis pelo efeito estufa, novas iniciativas para pesquisa e desenvolvimento de biodiesel de microalgas surgiram. Muitas empresas começaram a vender processos ou equipamentos fundamentais, como fotobiorreatores, projetos de otimização e outros (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

Atualmente, o biodiesel produzido por microalgas são classificados como sendo de terceira geração, onde são utilizados microrganismos com alto crescimento de biomassa e não competindo com alimentos. Existem muitos investimentos, tanto do setor privado quanto do público, com o intuito de melhorar a eficácia e baratear os custos para a produção de grandes quantidades de óleo. A maior parte da tecnologia para produção em larga escala apresenta alto custo para competir com o diesel fóssil, sendo um fator limitante para sua real implementação (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; GHOSH et al., 2016).

4.4. NUTRIÇÃO E MEIOS DE CULTIVOS PARA MICROALGAS

Para o desenvolvimento e crescimento as microalgas precisam de um local adequado, nutrientes inorgânicos e uma fonte de carbono. A maior parte das espécies utiliza-se da energia luminosa e CO₂ como fonte de carbono para o seu crescimento, chamado de crescimento autotrófico. Outras espécies utilizam compostos orgânicos como glicose e acetado para obter fontes de carbono, são as chamadas espécies de crescimento heterotrófico. Um terceiro meio de nutrição acontece, em determinados casos, com a junção

¹ Nesse livro encontram-se todos os resultados obtidos pelo Programa de Espécies Aquáticas.

de energia luminosa com os compostos orgânicos, chamado de crescimento mixotrófico (AZEREDO, 2012; FRANCO et al., 2013; ABOMOHRA et al., 2016).

O crescimento autotrófico necessita, além da energia luminosa e do CO₂, de nutrientes como o nitrogênio, fósforo, potássio e em certos casos vitaminas. Os aspectos positivos do cultivo autotrófico são verificados pelo baixo custo do sistema em comparação aos outros meios de cultivos e pelo consumo de CO₂, que representa uma técnica de mitigação dos gases de efeito estufa lançado à atmosfera. Contudo, a produção em grande escala pode ser desfavorável devido às condições de disponibilidade de luz, apresentando crescimento lento da biomassa (FRANCO et al., 2013).

De acordo com Huang et al. (2010) os meios de cultivos heterotróficos de microalgas, pode ser a melhor opção para a produção em grande escala, considerando um rendimento maior do teor lipídico celular. Estudos demonstram que em meios de cultivo heterotrófico ocorre maior rendimento do que em meios autotróficos. No estudo de Miao e Wu (2006), a *Chlorella protothecoides* apresentou teores celulares de 55,20% de lipídios e a *Chlorella zofingiensis* com teores de 51,10% do peso seco em crescimento heterotrófico, contra 25,8% de lipídio do peso seco em crescimento autotrófico (LIU et al., 2011). No entanto, Miao e Wu (2006) advertem que mesmo com o aumento da produtividade o sistema de cultivo heterotrófico apresenta grandes custos de produção e operação em relação ao sistema autotrófico, tornando a produção do biodiesel inviável economicamente.

Os meios de cultivos podem ser sintéticos, apresentando concentrações adequadas de compostos necessários para o crescimento celular das microalgas. Porém, esses meios têm a desvantagens do uso de fertilizantes, que são adicionados no meio de cultivo, tais como, nitrogênio, fósforo e potássio, essenciais para o crescimento celular (ANDERSEN, 2005; LARDON et al., 2009; HANDLER et al., 2012). Um estudo de avaliação do ciclo de vida realizada por Clarens et al. (2010) mostrou que a utilização dos fertilizantes, nitrogênio e fósforo, contribuem significativamente para o uso energético e de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida, e aponta que este é um fator importante para melhoria da sustentabilidade global do cultivo de microalgas em grande escala.

Segundo Lam e Lee (2012) uma solução do ponto de vista ambiental e econômico para superar a utilização de fertilizantes é a utilização de meios alternativos de cultivos, como por exemplo, águas residuais. Um dos desafios dessa solução é que o meio de cultivo estará sujeito à contaminação por bactérias e vírus, o que afeta o crescimento da biomassa de microalgas. Outra variável problemática é a incerteza da quantidade e controle dos nutrientes presentes no meio, que por sua vez pode limitar e interferir a taxa de crescimento da biomassa. Porém, a utilização de meios alternativos diminui o uso dos

fertilizantes químicos além de remover os nutrientes das águas residuais, contribuindo para o tratamento do mesmo e diminuindo os efeitos da eutrofização (CLARENS et al., 2010).

4.5. SISTEMAS DE CULTIVO

Naturalmente as microalgas foram observadas em corpos aquáticos naturais, desde ambientes de água doce e marinha, até os mais extremos, como geleiras, águas ácidas e de altas temperaturas. Assim como na agricultura, quando surgiu a necessidade de cultivar microalgas para interesses comerciais, foram necessárias técnicas e sistemas de cultivo específicos para a espécie, que fornecessem as condições ideais para o seu desenvolvimento.

Os autores Xu et al. (2009) e Lam e Lee (2012) listaram alguns fatores que o sistema de cultivo de microalgas deve apresentar para se obter eficiência na produção do biodiesel. Segundo eles, a estrutura deve oferecer condições para uma iluminação adequada, com sistema funcional de distribuição de líquido/gás, ser de fácil operação, controle de contaminação na cultura, baixos custos de investimento/operação e área mínima de uso.

Alguns sistemas de cultivo são viáveis e utilizados para a produção de compostos de alto valor agregado a partir de microalgas, como produtos farmacêuticos, pigmentos e do ramo de alimentação. Microalgas também são utilizadas com sucesso em sistemas de tratamento de esgoto, como as lagoas facultativas. Para a produção de biodiesel, dois sistemas principais são estudados, os sistemas abertos e os sistemas fechados, conhecidos como lagoas de alta taxa e fotobiorreatores, respectivamente (ABOMOHR et al., 2016; MONTEMEZZANI et al., 2017).

4.5.1. Lagoas de Alta taxa

Lagoas de alta taxa (LAT) são estruturas construídas em formato oval para o cultivo de microalgas por sistema aberto, ou seja, o meio de cultivo possui contato com a atmosfera. Três requisitos são característicos de uma LAT: geometria que favoreça a luminosidade, controle de temperatura e circulação. Para isso, esse tipo de lagoa possui profundidades baixas (na faixa de 20-50 cm) para que a radiação chegue até o fundo; o controle de temperatura ocorre pela evaporação na interface meio de cultivo/atmosfera, e a circulação é realizada através de pedais giratórios, que também resulta na mistura ar/líquido, necessária para o crescimento das microalgas (KUMAR et al., 2015). A Figura 4.2 ilustra dois tipos de configurações de uma lagoa de alta taxa.

Figura 4.2: Configuração geométrica de lagoas de alta taxa

Legenda: A) formato com um defletor central e B) mais de um defletor central. Fonte: Abomohra et al. (2016)

De acordo com Ketheesan e Nirmalakhandan (2011) a circulação realizada por pedais giratórios é um aspecto fundamental de uma lagoa de alta taxa, influenciando diretamente no seu rendimento e necessidade de área. A circulação serve para evitar a sedimentação celular, eliminar a estratificação térmica, distribuição dos nutrientes, distribuição do dióxido de carbono, controle do oxigênio dissolvido e de pH e contribui para a eficiência do alcance dos raios solares.

A Figura 4.3 mostra a trajetória das células de microalgas em uma LAT influenciada pelo pedal giratório, que faz com que elas se desloquem alternando entre zonas mais claras e zonas mais escuras quanto à incidência de luz. Essas zonas dentro do reator são formadas pela alta capacidade das células de capturarem a luz solar para realizar a fotossíntese, sendo assim, a maior quantidade de luz é absorvida na superfície formando um sombreamento nas zonas mais profundas (LIAO et al., 2014).

Figura 4.3: Ilustração da trajetória das células de microalgas pelos canais em uma lagoa de alta taxa devido á rotação dos pedais giratórios.

Fonte: Chen et al. (2016)

Com a formação dessas zonas a rotação do pedal faz com que a trajetória das células passe em regiões com incidência luminosa maior e menor, de maneira alternada. Esse ciclo, chamado de ciclo claro/escuro, é um fator importante para o rendimento de biomassa (LIAO et al., 2014). Alguns pesquisadores como Chen et al. (2016) e Yang et al. (2016) realizaram estudos hidrodinâmicos que associam os períodos claro e escuro com a rotação dos pedais giratórios e determinaram velocidades apropriadas para um melhor rendimento da biomassa, fornecendo um parâmetro importante para a engenharia de reatores.

Segundo Chiaramonti et al. (2013) e Kumar et al. (2015), o uso de LAT para o cultivo de microalgas em escala industrial são os mais empregados no mundo. O motivo é que esse tipo de reator apresenta facilidade e baixo custo para implementação, comparado com os fotobiorreatores, baixo custo operacional e baixo consumo de energia (FERNÁNDEZ et al., 2016; HE; YANG; HU, 2016).

No entanto, as lagoas de alta taxa apresentam desvantagens devido à necessidade de maior área e alto risco de contaminação da cultura. Além disso, ela apresenta baixas concentrações de biomassa por volume, controle na mistura de gases, controle de temperatura e estão sujeitas as condições climáticas, como precipitação e baixa radiação

solar, que resulta em baixa produtividade final de biomassa (CHIARAMONTI et al., 2013; KUMAR et al., 2015; FERNÁNDEZ et al., 2016).

4.5.2. Fotobiorreatores

Fotobiorreatores são reatores fechados, onde o meio de cultivo encontra-se isolado do meio externo. Existem diversos projetos e configurações, sendo os mais comuns os fotobiorreatores tubulares e de placas planas. A vantagem que o sistema fechado apresenta é que permite um controle maior da cultura, mantendo as melhores condições de crescimento da biomassa e da produtividade de lipídios (JORQUERA et al., 2010; LAM; LEE, 2012).

Uma limitação que atualmente impede a produção em escala comercial de cultivo de microalgas para fim de bioenergia em fotobiorreatores é o alto custo e consumo energético comparado com as lagoas abertas. Estudos apontam que um fotobiorreator consome cerca de 350% mais energia, e apesar de ter controle maior da cultura e obter melhores resultados de produtividade que as lagoas abertas, essa tecnologia precisa de ajustes para reduzir o consumo global de energia, tornando-se viável economicamente (LAM; LEE, 2012).

Contudo, segundo Abomohra et al. (2016), como a produtividade em fotobiorreatores podem chegar a ser 10 vezes maior que em uma lagoa de alta taxa, os custos podem ser compensados por unidade produzida.

4.6. ETAPAS DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO MICROALGAS

Após o cultivo da microalga, existem outras etapas necessárias para a produção do biodiesel, como a colheita, secagem, extração do lipídio e a conversão do óleo em biodiesel.

4.6.1. Colheita

A colheita consiste em separar a biomassa do meio de cultivo. A etapa inicia-se com o estacionamento do crescimento da biomassa, e apresenta dificuldades do ponto de vista de engenharia, uma vez que as microalgas são de tamanhos muito pequenos e estão suspensas no meio aquoso tornando o processo uma etapa crítica da produção de biodiesel (LAM; LEE, 2012). Segundo Muradov et al. (2015) algumas tecnologias para colheita apresentam alto custo, com até 50% do custo total da produção, não sendo viável do ponto de vista econômico.

A eficiência da colheita da biomassa do meio de cultivo tem um papel essencial na produção do biodiesel. As técnicas mais aplicadas são a centrifugação, floculação, filtração, sedimentação e flotação. Há técnicas em desenvolvimento que necessitam de maiores investigações e adaptação para a produção em grande escala como a separação magnética por nanopartículas, uso de biofluculantes e ozônio-flotação (CHEN et al., 2011; XU et al., 2011b; HU et al., 2014; LEI et al., 2015).

Segundo Lam e Lee (2012) a centrifugação e a filtração não apresentam boas condições para a produção em grande escala, pois apresentam grande consumo energético e altos custos de implantação e operação. A floculação, por outro lado, consome pouca energia, porém a toxicidade deve ser levada em consideração, assim como a alta dosagem de produtos químicos coagulantes.

Segundo Lei et al. (2015) o uso de biofloculantes têm-se mostrado promissor para o processo de colheita das microalgas e para a produção de biodiesel pelo processo de floculação/flotação.

4.6.2. Secagem

A secagem é uma etapa fundamental para a produção de biodiesel de microalgas, devido à presença de água ter caráter inibidor no processo de extração dos lipídios e também na conversão do lipídio para o biodiesel (LAM; LEE, 2012).

Os processos de secagem devem garantir que as células das microalgas não sejam danificadas e deterioradas com a desidratação. Os principais métodos de secagem das microalgas são a rotativa, solar e por incinerador. A secagem rotativa consiste em um cilindro rotativo inclinado onde ocorre a secagem das microalgas pela ação da gravidade de uma extremidade a outra, utilizando energia elétrica ou vapor. A secagem solar é um método que consome pouca energia e tem baixo custo operacional, mas possui a desvantagem de limitações às condições climáticas locais. A secagem por incinerador é realizada em tanques aquecidos, utilizando-se de fontes de calor (SHOW et al., 2014).

Segundo Lam e Lee (2012) o uso de energias fósseis, como geradores de calor para a secagem da biomassa na produção de biodiesel, deve ser evitado, pois compromete a viabilidade comercial dos biocombustíveis e seu caráter renovável.

4.6.3. Extração de lipídios

A etapa de extração dos lipídios é um processo que ocorre após a colheita e secagem. Diferente das culturas terrestres, a extração de lipídios das microalgas é um processo relativamente difícil devido às características da célula, tornando o método de prensagem ineficiente. Em microalgas, os processos de extração são realizados com solventes químicos e fluídos supercríticos (LAM; LEE, 2012).

A extração com solventes geralmente é o método mais adotado para liberar os lipídios das microalgas. Contudo, é um processo trabalhoso que consome tempo e produtos químicos, limitando a taxa de produção de biodiesel em grande escala (TRAN et al., 2013). O uso de solventes possui desvantagens quanto à alta toxicidade. Os solventes como o n-hexano, metanol, etanol e outros são efetivos para a extração de lipídios das microalgas, mas sua eficiência é dependente da espécie (LAM; LEE, 2012).

Segundo Yen et al. (2015) a extração de lipídio das microalgas por fluído supercrítico, em comparação aos solventes químicos, apresenta vantagens principalmente em relação ao meio ambiente. Na fase supercrítica, o fluído tem suas propriedades termofísicas variando drasticamente conforme a pressão e a temperatura fazendo com que o fluído se transforme em um solvente forte. Alguns fluídos como o CO₂, etileno, etano, metanol, etanol, benzeno, tolueno e água são usados para este propósito, sendo que o dióxido de carbono é o mais usual, não sendo uma substância explosiva, não tóxica, barata e com fácil remoção do produto final, porém com alto custo de operação (WANG et al., 2008; LAM; LEE, 2012).

4.6.4. Conversão do óleo em biodiesel

O processo de transesterificação é o método mais usado na conversão dos lipídios em biodiesel, sendo uma reação onde um mol de triglicerídeo reage com três mols alcóolicos, metanol ou etanol, na presença de um catalizador homogêneo ou heterogêneo (RAMOS et al., 2011; LAM; LEE, 2012).

Os catalizadores básicos homogêneos são usualmente aplicados no processo de conversão para acelerar as reações. No entanto, o óleo extraído das microalgas apresenta uma quantidade de ácidos graxos livres no meio que reage com o catalizador básico formando sabão, que inibe a alcoolize e o rendimento do processo (RAMOS et al., 2011; LAM; LEE, 2012).

O uso de catalizadores ácidos homogêneos, método em que a presença dos ácidos graxos livres não irá causar interferências no processo, possibilita o uso de matérias-primas que não possuem tanto valor agregado. As desvantagens do uso da transesterificação ácida

é a necessidade de condições de trabalho mais energética, com as reações sendo conduzidas com elevadas relações molares, com temperatura próxima do ponto de ebulição do álcool utilizado e com uma cinética menos favorecida, necessitando de mais tempo de reação (RAMOS et al., 2011)

Segundo Lam e Lee (2011), os catalizadores heterogêneos têm sido explorados no processo de transesterificação para produção de biodiesel. Os catalizadores heterogêneos apresentam a vantagem de que podem ser reciclados, com reuso no final do ciclo de reação. No entanto, os autores afirmam que mais estudos são necessários para abordar a viabilidade desses tipos de catalizadores na indústria de biodiesel de microalgas.

4.7. LIQUEFAÇÃO HIDROTÉRMICA

A liquefação hidrotérmica (LHT) é um processo de conversão termoquímica da biomassa que ocorre no meio aquoso com alta temperatura e pressão, com tempo suficiente para quebrar a estrutura biopolimérica sólida das células em componentes principalmente líquidos (ELLIOTT et al., 2015).

A temperatura da água é da faixa de 200 a 350° C, com uma pressão por volta de 250 bar, necessária para manter a água em estado líquido. Nessas condições a água apresenta características diferentes do seu estado normal, com a constante dielétrica maior e a densidade menor, resultando em uma série de decomposições e reação de polimerização, resultando na formação de bio-óleo (JAZRAWI et al., 2013).

Fora a LHT existem outros processos termoquímicos que podem ser utilizados para produzir biocombustíveis de microalgas. De acordo com Barreiro et al. (2013) eles são classificadas de acordo com os produtos formados e a umidade da biomassa, podendo ser Torrefação, pirólise, gaseificação, carbonização hidrotérmica (CHT) e gaseificação hidrotérmicas (GHT).

Pode-se observar na Figura 4.4 os diferentes processos termoquímicos que são utilizados para a conversão da biomassa em produtos. A CHT e a torrefação geram um combustível sólido, a LHT e a pirólise geram o bio-óleo e a GHT e gaseificação geram o gás de síntese.

Figura 4.4: Processos de conversão termoquímica relacionado aos produtos formados, umidade e temperatura.

		MATÉRIAS PRIMA		Temperatura
		Úmida	Seca	Aumento
Produtos	Sólido	CHT	Torrefação	↓
	Líquido	LHT	Pirólise	
	Gás	GHT	Gaseificação	

Fonte: Barreiro et al. (2013).

O bio-óleo é o principal produto gerado na LHT, porém outros produtos são formados, como os produtos solúveis em água, resíduos sólidos e os gases (constituído principalmente de CO_2). Segundo Guo et al. (2015) a fase aquosa apresenta grande quantidade de nitrogênio, fósforo e potássio, e teores menores de minerais e outros micronutrientes, podendo ser reutilizado para o cultivo.

Os resíduos sólidos são uma fração pequena dos produtos gerados, e depende da espécie de microalgas e o seu meio de cultivo. Durante o crescimento a célula algal pode absorver metais do meio, que durante a reação se precipitam, juntamente com outros compostos orgânicos, sendo de fácil remoção da fase líquida (GUO et al., 2015)

Estudos que realizam experimento com LHT analisam alguns critérios de reações importantes para o melhor rendimento do processo, sendo a temperatura, tempo de reação e a razão biomassa/água. Alguns estudos como o realizado por Tian et al. (2014) mostram que o processo possui melhor rendimento quando a temperatura é aumentada até 320°C , com aumento na conversão de óleo, enquanto os produtos sólidos são diminuídos.

Segundo Guo et al. (2015) a temperatura desempenha o papel mais importante durante o processo de LHT, oferecendo segurança e economia para sua operação industrial. Sua importância está ligada com as reações, em que cada uma delas concorre e dominam em diferentes temperaturas.

O tempo de reação deve ser adequado para que ocorra a conversão máxima de bio-óleo, sendo um fator importante para a LHT. Em tempos de reações curtos o rendimento de óleo será afetado, não ocorrendo decomposição e despolimerização suficiente das células de microalgas em moléculas menores. Por outro lado, tempos elevados podem favorecer a formação de gases e produtos aquosos, diminuindo o rendimento de óleo (GUO et al., 2015).

A proporção de biomassa/água é um fator importante, uma vez que a água no meio funciona como um solvente para a reação. Contudo, quantidades maiores de água podem causar danos econômicos para o processo, necessitando de maior quantidade de energia para o aquecimento do meio e aumento na quantidade de água residuária formada (GUO et al., 2015).

De acordo com Chiaramonti et al. (2017) uma das vantagens de utilizar a liquefação hidrotérmica para a extração do óleo, é que a pasta de biomassa após a colheita apresenta grande quantidade de água, sendo assim, não é necessária a etapa de secagem economizando energia no processo global.

4.8. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Com o tempo, as indústrias se tornaram responsáveis pelo desempenho ambiental de seus produtos não apenas na linha de produção, mas também nas atividades de extração e aquisição da matéria-prima até a disposição final (ALTING; LEGARTH, 1995).

Segundo Rebitzer et al. (2004) é necessário métodos e ferramentas para medir e comparar os impactos ambientais resultantes das atividades humanas, para o desenvolvimento e fornecimento de bens e serviços para o desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto, a avaliação do ciclo de vida (ACV) apresenta-se como ferramenta que permite quantificar os impactos ambientais e o uso de recursos ao longo de todo o ciclo de vida de um produto ou serviço, ou seja, desde a aquisição da matéria-prima, fabricação, uso e destinação final (FINNVEDEN et al., 2009).

De acordo com Azapagic (1999) a ACV fornece uma imagem sobre a interação do produto com o meio ambiente, servindo como uma ferramenta de gestão ambiental. Segundo o autor, a ACV possui dois objetivos principais, o primeiro é quantificar e avaliar o desempenho ambiental de um produto ou serviço para ajudar em tomadas de decisões ou melhorias, e o segundo para modificar ou projetar de modo a diminuir os impactos ambientais.

Os resultados da aplicação da ACV podem identificar os pontos potenciais para a redução dos impactos ambientais do produto, e ajudar a evitar falsas soluções como deslocamento de cargas de impacto entre as categorias ou fases do ciclo de vida (DE BAAN et al., 2013). Um exemplo é uma alteração no uso de um equipamento que diminui a emissão de gás carbônico na atmosfera, porém aumenta a eutrofização em corpos hídricos.

Os primeiros trabalhos que apresentaram uma concepção parecida com a ACV começaram a surgir no final da década de 1960 e início da década de 1970, motivado por

um amplo interesse público de questões ambientais, como recursos, eficiência energética, controle de poluição e resíduos (GUINÉE; HEIJUNGS; HUPPES, 2011). Segundo os autores, um dos primeiros estudos com essas características foi realizado a pedido da *Coca Cola Company* no ano de 1969.

Segundo Guinée, Heijungs e Huppés (2011) entre as décadas de 1970 e 1980 houve uma clara divergência entre as abordagens e terminologias usadas para os estudos de ACV. Os estudos utilizaram métodos diferentes sem um fundamento teórico em comum entre eles, realizado em sua grande maioria para fundamentar planos de negócios. Com isso, a partir da década de 90, a *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) juntamente com *International Organization for Standardization* (ISO) criaram esforços para normalizar e harmonizar os métodos desses estudos.

Como resultado, foram criadas quatro normas da série *Environmental management – Life cycle assessment*: a ISO 14040:1997 (*Principles and framework*), ISO 14041:1998 (*Goal and scope definition and inventory analysis*), ISO 14042:2000 (*Life cycle impact assessment*) e ISO 14044:2000 (*Life cycle interpretation*). No entanto, de acordo com Finkbeiner et al. (2006) em julho de 2001 foi formado um comitê para identificar pontos a serem modificados e revisados, sendo substituídas a partir do ano de 2006 pelas ISO 14040:2006 (*Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*) e ISO 14044:2006 (*Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) foi a responsável pela transcrição das normas internacionais da ISO, sendo a NBR ISO 14040:2009 (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e estrutura) e NBR 14044:2009 (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações) as correspondentes nacionais.

Uma das mudanças apontadas por Finkbeiner et al. (2006) foi à inclusão na ISO 14040:2006 dos princípios da ACV, que na correspondente anterior não era apresentada. Segundo a ABNT (2009a) os princípios são fundamentais para orientação de decisões relacionadas ao planejamento e realização de uma ACV, sendo eles:

1. Perspectiva de ciclo de vida: a ACV deve considerar todo o ciclo de vida de um produto ou serviço, desde a extração das matérias-primas, através da produção de energia e materiais, produção, uso, tratamento de fim de vida até a sua disposição final.
2. Foco Ambiental: os estudos de ACV focam principalmente os aspectos e impactos ambientais de um sistema de produto. Foco econômico e social geralmente não está incluído no escopo.

3. Abordagem relativa e unidade funcional: os resultados da ACV estão estruturados em torno de uma unidade funcional. Todas as entradas e saídas, assim como as análises são relativas a tal unidade.

4. Abordagem iterativa: as fases da ACV utilizam resultados das outras fases, podendo voltar a etapas anteriores para adequações necessárias.

5. Transparência: uma ACV apresenta grande complexidade, portanto a transparência é um princípio fundamental para o estudo, de modo a assegurar uma interpretação adequada dos resultados e as limitações do estudo.

6. Completeza: a ACV considera todos os aspectos e características do meio ambiente, da saúde humana e dos recursos.

7. Prioridade da abordagem científica: as decisões da ACV são primordialmente determinadas pelas ciências naturais.

Além dos princípios, a (ABNT, 2009a) estabelece a estrutura da ACV, que é dividida em quatro fases iterativas, sendo:

- Fase de definição dos objetivos e escopo da ACV,
- Fase de análise do inventário do ciclo de vida (ICV),
- Fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV),
- Fase de interpretação.

A definição dos objetivos e escopo é a primeira fase do estudo e devem ser definidos de maneira clara e consistente de acordo com a aplicação pretendida. Para definir o objetivo deve estar declarada a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo e o público alvo. O escopo deve determinar de forma clara o sistema do produto, as funções do sistema ou produto, a unidade funcional, a fronteira do sistema, limitações e outros itens de acordo com a norma ABNT (2009b).

A segunda fase, ICV, é onde ocorre a coleta dos dados de entradas e saídas em cada processo do ciclo de vida do produto (HELLWEG; CANALS, 2014). Além da coleta de dados, é nessa fase que ocorre a modelagem e tratamento dos dados para a próxima fase.

A fase de AICV deve atender o objetivo e escopo de ACV, incluindo a coleta de resultados de indicadores para as diferentes categorias de impacto para o sistema de produto. A AICV inclui como elementos obrigatórios a seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização, a classificação (a correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas) e a caracterização (cálculo dos resultados dos indicadores de categoria) (ABNT, 2009b).

Os resultados das fases de AICV devem ser interpretados, de acordo com os objetivos e o escopo do estudo definido na primeira fase. Deve, também, ser feita uma avaliação e uma verificação de sensibilidade em relação às entradas, saídas e escolhas metodológicas significativas, visando entender as incertezas dos resultados (ABNT, 2009b).

4.8.1. Definição dos Objetivos e Escopo

A definição do objetivo e escopo têm grande importância, e é decisiva para todas as outras etapas de um estudo de ACV e por isso, de acordo com Roy et al. (2009) é, provavelmente, a fase mais importante. Nessa fase, são identificados os usos para os resultados, e os parâmetros para realizar o estudo, incluindo os métodos de coleta dos dados (MIETTINEN; HÄMÄLÄINEN, 1997). Ainda segundo o autor, a antecipação do uso dos resultados tem grande influência sobre o estudo, pois determina a abordagem aplicada.

Para a definição dos objetivos, alguns tópicos devem ser abordados, segundo a ABNT (2009a):

- Aplicação pretendida dos produtos/resultados.
- Razões para a realização do estudo e contexto decisório.
- Público-alvo dos produtos/resultados.
- Se será um estudo comparativo a ser divulgado ao público.

A ABNT (2009a) apresenta que o escopo deve ser suficientemente bem definido para que assegure que a abrangência, profundidade e detalhamento do estudo sejam compatíveis, para atender o objetivo determinado, e deve apresentar os seguintes itens:

- O sistema ou processo de produto a ser estudado;
- As funções do sistema de produto, ou dos sistemas em caso de estudos comparativos;
- A unidade funcional;
- A fronteira do sistema;
- Procedimentos de alocação;
- Categorias de impactos selecionadas e metodologia para avaliação de impactos e a interpretação subsequente a ser utilizada;
- Requisito dos dados;
- Pressupostos;

- Limitações;
- Requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados;
- Se for o caso, tipo da revisão crítica;
- Tipo e o formato do relatório requerido para o estudo.

De acordo com o manual do ILCD (2010), como a estrutura metodológica da ACV é iterativa, a definição do escopo inicial do estudo frequentemente necessita de ajustes e revisões, devido ao fato de surgimento de limitações ou restrições imprevistas ou como resultados de informações que surgiram posteriormente. Tais alterações e modificações necessitam ser justificadas e documentadas de acordo com a ABNT (2009b).

Alguns dos itens que compõe o escopo da ACV são detalhados pela ABNT (2009b) e o ILCD (2010), como:

- **Função e Unidade Funcional:** A função e a unidade funcional são os elementos centrais de uma ACV, o que caracteriza a abordagem relativa da estrutura metodológica e permite comparações significativas e válidas entre produtos. A função é a característica de desempenho do sistema em estudo, ou seja, para que o produto é utilizado e qual sua finalidade. Para quantificar os dados de entrada e saída do sistema é necessária uma referência, sendo esse o propósito principal da unidade funcional que deve ser claramente definida e mensurável (ABNT, 2009a).

A importância de estabelecer a função e a unidade funcional é que permite a comparação entre sistemas, que só pode ser feito se os sistemas em comparação tiverem a mesma função e quantificados na mesma unidade funcional, sendo essa uma vantagem da estrutura da ACV (MIETTINEN; HÄMÄLÄINEN, 1997).

- **Fluxo de referência:** O fluxo de referência é consequência da escolha da função e da unidade funcional, que é definida como a quantidade do produto necessário para realizar a função estabelecida exigida pela unidade funcional (ILCD, 2010).

- **Fronteira do sistema:** É com a determinação da fronteira do sistema que se determinam quais são os processos elementares incluídos na ACV e qual será o nível de detalhamento com que esses processos devem ser estudados. A exclusão de estágios do ciclo de vida, processos, entradas ou saídas, devem ser feita se não provocar mudança significativa nas conclusões do estudo, sendo registradas de forma clara, e as razões e implicações de sua omissão devem ser explicadas (ABNT, 2009a).

O sistema de produto geralmente é descrito em forma de fluxograma de processo onde os processos elementares e suas inter-relações são mostradas. Os processos elementares devem ser inicialmente descritos visando a definir qual é o início, em termos da

entrada de matérias primas ou produtos intermediários, a natureza das transformações e operações que ocorrem como parte do processo elementar e por fim o seu termino, em termos do destino dos produtos intermediários ou finais (ILCD, 2010).

Idealmente todas as entradas e saídas na fronteira deveriam estar modeladas no sistema de produto de tal maneira que sejam fluxos elementares e de produtos. Em algumas condições não tem como satisfazer tal condição ,e para, isso existem critérios de cortes para a inclusão preliminar de entradas e saídas. Diversos critérios de corte são utilizados na prática da ACV, tais como massa, energia e significância ambiental. Os critérios de massa e energia usam relações onde uma entrada deve ser incluída se superar uma porcentagem em relação à soma de todas as entradas consideradas no sistema de produto modelado. Por exemplo, serão incluídas no sistema de produtos as entradas que obtiveram quantidade de massa ou energia maior que 5%. O critério de significância ambiental leva em consideração a inclusão de entradas que possuam relevância ambiental, ou seja, entradas que possam contribuir de forma expressiva em impactos ambientais (ILCD, 2010).

- **Metodologia da AICV e tipos de impactos:** No escopo do estudo de ACV devem ser indicadas quais serão as categorias de impacto, indicadores da categoria e os modelos que serão usados para o estudo (ABNT, 2009a).
- **Tipos e fontes de dados:** Os dados a serem selecionados podem ser dados coletados nos locais de produção, os dados primários, ou podem ser obtidos ou calculados a partir de outras fontes, dados secundários (ABNT, 2009a).
- **Requisito de qualidade dos dados:** Os requisitos de qualidade dos dados devem garantir que o objetivo da ACV seja alcançado. Para isso alguns requisitos devem ser observados, tais como, as coberturas temporal, geográfica, tecnológica, precisão, completeza, representatividade, consistência e reprodutibilidade, se as fontes são confiáveis e incerteza das informações. A qualidade dos dados deve ser caracterizada tanto por aspectos qualitativos quanto quantitativos, assim como pelos métodos de coleta e tratamento (ABNT, 2009a).

4.8.2. Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

É nessa fase que as entradas e saídas que cruzam a fronteira do sistema são quantificadas. O resultado é representado por lista de materiais, energia, produtos, resíduos e liberações para o ar, água e solo (MIETTINEN; HÄMÄLÄINEN, 1997). Segundo Roy et al. (2009), a ICV é a fase mais demorada e intensa da ACV, comparada com as outras três, justificado pelo fato que muitas vezes alguns dados são de difícil acesso.

A fase de ICV possui algumas etapas a serem seguidas, conforme detalhado na ABNT (2009b) e no ILCD (2010), sendo:

- **Identificar os processos exigidos para o sistema:** Existem duas principais abordagens na modelagem da ACV: a primeira atribucional e a segunda consequencial. A abordagem atribucional tem como foco descrever os impactos ambientais relacionadas aos fluxos para cada processo do ciclo de vida, ou seja, as entradas e saídas do sistema pela tecnosfera² são atribuídas em cada processo e à unidade funcional (SOIMAKALLIO et al., 2015). Por outro lado, a ACV consequencial analisa as consequências que podem ocorrer por mudanças de decisões. Do ponto de vista conceitual, esse tipo de abordagem é complexo, pois inclui conceitos econômicos, como custo de produção, oferta e demanda, e elasticidade (CURRAN, 2013).

A identificação dos processos pela modelagem atribucional envolve uma perspectiva mais funcional e técnica. Inicia-se a modelagem com a caracterização do sistema de primeiro plano, ou seja, que fornece diretamente a unidade funcional ou o fluxo de referência do sistema. A segunda etapa é a identificação dos processos complementares que são os bens incorporados fisicamente ao produto analisado ou que integram o sistema, os bens e serviços que apenas entram em contato com o produto desempenhando uma função de apoio e por ultimo os processos que não tem contato direto com o sistema de primeiro plano, mas que são necessários para seu desenvolvimento. A exclusão de algum processo deve ser documentada e justificada levando em consideração os critérios de corte estabelecido na fase de definição de escopo (ILCD, 2010).

- **Coleta de dados:** Segundo Rebitzer et al. (2004), os dados a serem incluídos no inventário precisam ser coletados para cada processo elementar dentro da fronteira do sistema, e compreendem a tarefa que mais demanda tempo. Os dados coletados podem ser medidos, calculados ou estimados e são necessários para quantificar as entradas e saídas de cada processo elementar.

Os principais dados que são coletados em um estudo de ACV inclui as entradas de energia, matéria-prima, entradas auxiliares, produtos, co-produtos, resíduos, liberações para a atmosfera, para água e para o solo (REBITZER et al., 2004).

- **Validação dos dados:** Essa etapa serve para verificar se os requisitos de qualidade dos dados foram atendidos de acordo com o objetivo e escopo do estudo. A validação pode

² Tecnosfera: é o ambiente onde ocorrem os processos elementares dentro da ecosfera. A importância de definir o limite de fronteira entre as duas é para determinar as substâncias ou energias que entram ou saem do sistema da/para a ecosfera sem transformação humana, sendo os fluxos elementares contabilizados nos modelos de cálculo dos impactos potenciais (ILCD, 2010).

ser executada com análises comparativas entre conservação de massa ou energia de um processo elementar (ILCD, 2010).

- **Alocação:** De acordo com Finnveden et al. (2009) questões metodológicas ligadas a alocações são as mais discutidas na ACV. Segundo o autor, a alocação é utilizada quando existe um processo multifuncional, que pode ocorrer mais de um produto (usina de açúcar e etanol), mais de uma entrada (incinerador de resíduos sólidos) ou em sistemas que utilizam reciclagem.

Segundo a ABNT (2009b) a alocação é a divisão das entradas e saídas para os diferentes produtos. A norma estabelece que seja evitado esse tipo de procedimento, se não forem possíveis, os fluxos devem ser subdivididos com regras de relações físicas sobre os produtos. Em ultimo caso, podem ser usadas outras relações como valor econômico.

Para proceder com a alocação é necessário identificar quais são os processos em que ocorre compartilhamento com outros sistemas de produtos a não ser o em estudo. Para evitar o processo de alocação, pode ser realizada a divisão de um processo elementar que irá ser alocado em dois ou mais subprocessos ou expandir o sistema de produto de tal modo que inclua as funções adicionais à função inicial. Caso não seja possível realizar os mecanismos para evitar a alocação, as entradas e saídas do sistema devem ser divididas entre os diferentes produtos ou funções existentes com as relações definidas pelo escopo da ACV (ILCD, 2010).

- **Correlação de dados a processos elementares e à unidade funcional:** Nessa etapa os dados de entrada e de saída de cada processo elementar devem estar de acordo com o fluxo de referência, ou seja, a quantidade das entradas e saídas de um processo elementar deve estar caracterizada para a produção da unidade funcional estabelecida no escopo do estudo (ILCD, 2010).

- **Refinamento da fronteira do sistema:** Nessa etapa é analisado se existem dados a serem excluídos ou incluídos revisando a fronteira inicial do sistema de acordo com os critérios de cortes; os resultados da análise devem ser documentados (ILCD, 2010).

4.8.3. Avaliação de Impacto de ciclo de vida

Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a fase em uma ACV, onde as entradas e saídas de fluxos elementares que foram recolhidos e reportados no inventário são atribuídas a diferentes categorias de impacto, dentro dos objetivos e escopo do estudo (ROY et al., 2009).

É importante notar que a AICV analisa os possíveis impactos ambientais que são causados por intervenções que cruzam a fronteira entre tecnosfera e ecosfera e age sobre o

ambiente natural e os seres humanos. Os resultados do AICV devem ser vistos como indicadores de impactos potenciais para o ambiente, em vez de previsões de efeitos ambientais reais (ILCD, 2010).

A fase de AICV possui uma estrutura geral que é formada por três elementos obrigatórios. A ABNT (2009a) aborda esses elementos, que são listados como:

- Seleção (obrigatório);
- Classificação (obrigatório);
- Caracterização (obrigatório);

Na etapa de seleção ocorre à identificação das categorias de impacto, indicadores de categoria e os modelos de caracterização que serão utilizados. Essa seleção é embasada na fase anterior, a ICV, onde verifica-se os fluxos de saída e entrada, e associados com possíveis impactos, com o intuito de englobar todos os impactos do ciclo de vida em estudo (ILCD, 2010).

A classificação é onde todos os fluxos elementares do inventário devem ser atribuídos a uma ou mais categorias de impacto com a qual contribuam, em conformidade com o modelo de caracterização escolhido, com as categorias de impacto que foram selecionados para a avaliação de impacto na definição do escopo do estudo (ILCD, 2010).

O ultimo elemento obrigatório, a caracterização, é onde ocorre o cálculo dos resultados dos indicadores de categoria. A todo elemento classificado existe um fator de caracterização, que é um valor quantitativo que cada modelo de caracterização atribui, transformando os diferentes elementos em um fluxo de referência para estimar o impacto potencial. Por exemplo, transformar outros fluxos em CO₂eqv para estimar a categoria potencial de aquecimento global (ILCD, 2010).

Os cálculos são realizados para cada categoria de impacto separadamente, multiplicando a quantidade de cada fluxo elementar do inventário com seu fator de caracterização. Após a caracterização, as entradas e saídas do sistema de produto são representadas por uma compilação discreta dos resultados dos indicadores de categoria da AICV, para as diferentes categorias de impacto, que é o perfil da AICV (ABNT, 2009b).

Além dos elementos obrigatórios, a ABNT (2009a) apresenta os elementos opcionais que podem ser usados caso sejam necessários e em consistência com objetivo e escopo da ACV. São eles:

- Normalização;
- Agrupamento;

- Ponderação.

A normalização tem como objetivo fornecer um perfil onde cada indicador de impacto³ está associado a sua contribuição relativa ao sistema analisado, ou seja, é calculada a magnitude dos resultados com relação a alguma informação de referência, como por exemplo, número de pessoas atingidas pelo indicador de impacto. Ao exibir os resultados da AICV normalizado dos diferentes indicadores de impacto, podem ser observados quais impactos do sistema contribui relativamente mais ou menos em relação ao outro (ILCD, 2010; ABNT, 2009b).

De acordo com a ABNT (2009b) o agrupamento é uma seleção de categorias de impactos reunindo-as em conjuntos. Os critérios para essa reunião podem ser de duas formas: a primeira, às categorias que apresentam bases em comum e a segunda, é por ordem de hierarquização.

Por fim, a ponderação é um processo em que ocorre à utilização de fatores numéricos para a conversão dos diferentes indicadores de impacto com a junção dos resultados ponderados em um único indicador (ABNT, 2009b).

Tanto o critério de agrupamento, baseado em hierarquização, e a ponderação são baseados em escala e escolha de valores que podem ser diferentes para cada grupo social e sociedades. Uma vez que um dos princípios de uma ACV são decisões tomadas com base às ciências naturais ocorre uma desconformidade da normatização da metodologia, porém esses elementos podem ser usados para ilustrações didáticas onde talvez o público-alvo necessite dessas adaptações. Por isso as normas ISO sobre ACV abordam esses procedimentos como optativos e não obrigatórios.

Como o presente estudo tem por objetivo comparar dois sistemas, lagoa aberta de alta produtividade e fotobiorreator, a ABNT (2009b) estabelece que AICV apresente um número suficiente e abrangente de categorias de impacto e que a comparação entre eles deve ser feita em indicadores semelhantes. Os elementos que não apresentam bases científicas e técnicas não devem ser aplicados nesse tipo de estudo, como é o caso da ponderação.

4.8.4. Interpretação

A interpretação é a fase da ACV onde os resultados das outras fases são analisados de acordo com os objetivos determinados na primeira fase. Os resultados do ICV e AICV são identificados, quantificados, verificados e avaliados para uma comunicação eficaz, que

³ Indicador de impacto é a representação quantificável de uma categoria de impacto.

podem incluir medidas de melhorias no produto, no processo industrial, uso de matérias-primas, uso do consumidor e a gestão de resíduos (ROY et al., 2009).

A interpretação do ciclo de vida de um estudo de ACV possui alguns elementos básicos, como delineados pela ABNT (2009b):

- Identificação das questões significativas: O objetivo desse elemento é analisar os resultados das fases de ICV e AICV para ajudar a determinar as questões significativas. São consideradas questões significativas algum dado do inventário que chame a atenção, alguma categoria de impacto e os estágios do ciclo de vida que possuem contribuições significativas.
- Avaliação do estudo: tem como objetivo aumentar o grau de certeza e a confiabilidade dos resultados obtidos nas fases anteriores, incluindo o primeiro elemento dessa fase. Durante a avaliação são apresentadas três técnicas a serem consideradas: as verificações da completeza, sensibilidade e consistência.
- Conclusões, limitações e recomendações: As conclusões são feitas com as informações obtidas nos elementos anteriores da fase da interpretação, verificando se são consistentes com o objetivo e escopo do estudo. As recomendações devem estar baseadas nas conclusões finais do estudo refletindo em uma consequência lógica e razoável e estarem relacionadas à aplicação pretendida.

4.8.5. Métodos de AICV: EDIP 1997 e USEtox

O EDIP 97 é um método *midpoint* desenvolvido por uma parceria entre o Instituto de Desenvolvimento de Produto (IPL), a Universidade Técnica da Dinamarca (DTU) e outros interessados, como a Confederação das Indústrias Dinamarquesas, Agência de Proteção Ambiental Dinamarquesa e Ministério do Meio Ambiente (OMETTO, 2005). As categorias de impacto e os modelos de conversão em indicadores de impacto baseiam-se nos estudos de Wenzel et al. (1997), Hauschild e Wenzel (1998) Stranddorf et al. (2005) e Hauschild et al. (2007).

O USEtox é um método de AICV criado a partir de 2005 numa ação de iniciativa da *United Nations Environment Program* (UNEP) e o SETAC, com o envolvimento dos desenvolvedores dos métodos CalTOX, IMPACT 2002, USES-LCA, BETR, EDIP, WATSON e EcoSense, além de peritos de avaliação e exposição de riscos a saúde humana e ecotoxicologia (HAUSCHILD et al., 2008; ROSENBAUM et al., 2008).

De acordo com Hauschild et al. (2008) o USEtox surgiu em resposta à necessidade de criar um modelo internacional aos diversos métodos existentes para as categorias de toxicidade. Segundo o autor, devido ao número de grupos envolvidos em sua criação, foi

promovida análise comparativa entre os métodos já existentes e percebeu-se que poderia ser estabelecido um consenso sobre os elementos mais influentes para os fatores de caracterização.

Com isso, o USEtox calcula fatores de caracterização para toxicidade e ecotoxicidade de águas doces. É um método novo com base nos já existentes (HAUSCHILD et al., 2008). O detalhando do método encontra-se em Hauschild et al. (2008) e Rosenbaum et al. (2008).

4.9. ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE BIODIESEL POR MICROALGAS

A avaliação do ciclo de vida (ACV) vem sendo usada em diversos estudos para avaliar os impactos ambientais da produção de biodiesel por microalgas. Nessa sessão serão apresentados os principais trabalhos científicos publicados na área que contribuem com o presente estudo, no período de 2009 até 2016.

A tabela 4.2 apresenta as principais características de cada estudo de ACV de biodiesel por microalgas, seguidos de um resumo e considerações sobre os estudos.

Tabela 5.2 – Características dos principais trabalhos de ACV de biodiesel de microalgas

Autores/país	UF	Sistema de Cultivo	Meio de Cultivo	Fontes de dados	Categorias de impacto
Lardon et al. (2009)	1 MJ	Lagoa de alta taxa	Água doce	Extrapolção	Mudança climática, depleção abiótica, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, marinha, uso de área, emissões de radiação ionizantes, oxidação fotoquímica
Baliga e Powers (2010)	1 L de biodiesel	FBR	Água Marinha	Literatura	Mudança climática, eutrofização, uso de área, acidificação
Batan et al. (2010)	1 MJ de biodiesel	FBR	Água Marinha	Literatura	Mudança climática
Sander e Murthy (2010) EUA	1000 MJ de biodiesel	Lagoa de alta taxa	Água residuária	Literatura	Mudança climática, resíduos sólidos e líquidos
Stephenson et al. (2010) Reino Unido	1 t de biodiesel	Lagoa de alta taxa FBR tubular	Água doce	Literatura	Mudança climática
Clarens et al. (2010) EUA	317 GJ de biomassa	Lagoa de alta taxa Lagoa de alta taxa	Água doce e residuária	Literatura e banco de dados	Consumo de energia, uso de água, mudança climática, eutrofização e uso de área
Brentner, Eckelman e Zimmerman (2011) EUA	10 GJ de biodiesel	FBR cilíndrica, FBR placa plana, FBR tubular	Água doce	Literatura	Mudança climática, eutrofização e uso de área

Continua

Continuação

Autores/país	UF	Sistema de Cultivo	Meio de Cultivo	Fontes de dados	Categorias de impacto
Brentner, Eckelman e Zimmerman (2011) EUA	10 GJ de biodiesel	Lagoa de alta taxa FBR cilíndrica, FBR placa plana, FBR tubular	Água doce	Literatura	Mudança climática, eutrofização e uso de área
Campbell, Beer e Batten (2011) Austrália	Transportar 1 tkm	Lagoa de alta taxa	Água Marinha	Literatura	Mudança climática
Clarens et al. (2011) EUA	1 VKT	Lagoa de alta taxa	Água marinha	Literatura	Mudança climática e demanda de água
Collet et al. (2011) França	1 MJ de energia	Lagoa de alta taxa	Água doce	Utiliza resultados de Lardon et al. (2009)	Depleção abiótica, acidificação, eutrofização, mudança climática, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, oxidação fotoquímica, uso de área e radiação ionizante
Khoo et al. (2011)	1 MJ de biodiesel	Lagoa de alta taxa integrada com FBR	Água marinha	Dados primários	Mudança climática
Shirvani et al. (2011) Reino Unido	1 MJ de biodiesel	Lagoa de alta taxa	Água doce	Literatura	Mudança climática
Xu et al. (2011a)	1 t de biomassa seca	Lagoa de alta taxa	Água doce	Literatura	Mudança climática
					Continua

Continuação

Autores/país	UF	Sistema de Cultivo	Meio de Cultivo	Fontes de dados	Categorias de impacto
Chowdhury, Viamajala e Gerlach (2012) EUA	1 t de biodiesel	Lagoa de alta taxa	Água doce	Literatura e Banco de dados	Mudança climática e demanda de água
Frank et al. (2012) EUA	1 MM BTU de biodiesel	Lagoa de alta taxa	Água marinha	Literatura	Mudança climática
Resurreccion et al. (2012) EUA	20.000 VKT Impact	Lagoa de alta taxa FBR tubular horizontal	Água doce	Literatura	Mudança climática, eutrofização e demanda de água
Yanfen, Zehao e Xiaoqian (2012) China	1 t de biodiesel	Lagoa de alta taxa	Água marinha	Literatura	Mudança climática, acidificação, oxidação fotoquímica e eutrofização
Ajayebi, Gnansounou e Raman (2013)	1 kg de biodiesel	Lagoa de alta taxa	Água marinha	Dados primários Dados primários extrapolados	Mudança climática e depleção abiótica
Batan Quinn e Bradley (2013) EUA	1 GJ de biodiesel	FBR	Água doce	Dados primários	Pegada hídrica
Gao, Yu e Wu (2013) Austrália	1 MJ de biodiesel	Lagoa de alta taxa	Água marinha	Literatura	Mudança climática
Holma et al. (2013) Finlândia	1 MJ de biodiesel	Lagoa de alta taxa	Água doce	Literatura	Mudança climática, uso de área e uso de água
Passell et al. (2013) Israel	1 MJ de energia	Lagoa de alta taxa	Água marinha	Seambiotic, Inc	Mudança climática e oxidação fotoquímica
					Continua

Conclusão

Autores/país	UF	Sistema de Cultivo	Meio de Cultivo	Fontes de dados	Categorias de impacto
Batan, Quinn e Bradley (2013) EUA	1 MJ de biodiesel	FBR e Lagoa de alta taxa	Água Marinha	Literatura	Mudança climática
Canter et al. (2014) EUA	1 MJ de energia	Lagoa de alta taxa	-	Literatura	Mudança climática
Collet et al. (2014) França	1 MJ de biodiesel	Lagoa de alta taxa sob uma estufa	Água marinha	Dados primários	Mudança climática, depleção da camada de ozônio, Toxicidade humana, oxidação fotoquímica, radiação ionizante, eutrofização, acidificação, uso de área, depleção de metais e fóssil
Maranduba et al. (2015) Brasil	1 t de biodiesel	Lagoa de alta taxa	Água doce	Literatura	Mudança climática
Silva et al. (2015) Brasil	25 litros de biodiesel	Lagoa de alta taxa e FBR compacto	Água doce e residuária	Dados primários	Categorias do método CML 2000
Souza, Gopal e Seabra (2015) Brasil	1 MJ de biodiesel	FBR	Água marinha	Ecoinvent e banco de dados da CTBE	Mudança climática e uso de energia fóssil

Nota: MJ – Megajoule, GJ – Gigajoule, VKT – Impacto dos quilômetros transportados pelo veículo, tkm – Tonelada por quilômetro, t – tonelada, MMBTU – 1.000.000 BTU (British Thermal Unit).

O estudo realizado por Ajayebi, Gnansounou e Raman (2013), comparou dois tipos de matérias primas para a produção de biodiesel em grande escala com o diesel fóssil. Uma das biomassas utilizada para a produção de biodiesel foi microalgas do gênero *Chlorella* apresentando 25% de óleo em sua massa seca. Para o cultivo foi utilizado uma lagoa de alta taxa, com meio sintético salino e a colheita realizada através de flotação por ar dissolvido seguido de centrifugação. O processo de extração do óleo foi realizado com o hexano e a conversão do óleo em biodiesel através do processo de transesterificação com catalizador alcalino e metanol.

Os resultados dos impactos do ciclo de vida indicaram que o biodiesel por microalgas e por *jatropha* são similares nas categorias de impacto analisadas, gases de efeito estufa e depleção de energia fóssil. Comparado com o diesel fóssil, o biodiesel por microalgas mostrou redução de 36% das emissões de gases de efeito estufa e 10% da depleção de energia fóssil.

Brentner, Eckelman e Zimmerman (2011) utilizaram a avaliação do ciclo de vida para avaliar cada etapa do processo de produção de biodiesel por microalgas e indicar qual é o sistema, que coletivamente, indica a rota produtiva com maior potencial de produção em grande escala. Para realizar a ACV foram utilizados dados de produtividade da microalga *Scenedesmus dimorphus*, com unidade funcional de 10 GJ (aproximadamente 294L), e o inventário partir do Ecoinvent 2.2. As categorias de impactos analisadas foram: demanda de energia, emissão de gases de efeito estufa, uso de água, eutrofização e área utilizada. A análise de impacto foi calculada com o uso de dois métodos complementares, o Cumulative energy Demand (v1.07) e o Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES v4.02).

Os autores compararam quatro sistemas de cultivo: lagoa de alta taxa e três tipos de fotobiorreatores (cilíndrico, placas planas e tubular). Para o processo de colheita foi comparada a centrifugação, filtração e floculação. Foram analisadas quatro opções para a extração dos lipídios e a conversão em biodiesel: por fluido supercrítico e esterificação, transesterificação direta, metanol supercrítico e por fim, processo por prensagem e esterificação. O melhor cenário do ponto de vista ambiental foi obtido com o cultivo em um fotobiorreator de placas planas, colheita por floculação e a extração e conversão por metanol.

Chambell, Beer e Batten (2011) também utilizaram a ACV para comparar a produção de biodiesel por microalgas (com três cenários diferentes para suplementação de CO₂ e duas taxas de produtividades diferentes) com biodiesel de canola e o diesel ULS. O cultivo assumido foi em uma lagoa de alta taxa com água marinha, e considerou-se que a

espécie de microalga apresenta o perfil de lipídios próximo ao óleo da canola. Para colheita foi utilizado floculação seguida de flotação por ar dissolvido e centrifugação.

A categoria de impacto utilizada foi a emissão de gases de efeito estufa emitida em 1 t.km por um caminhão articulado. Os resultados obtidos mostram que o biodiesel de microalgas é mais favorável que o de canola e o diesel ULS, com -27,6 gCO₂e/tkm contra 35,9 gCO₂e/tkm de biodiesel de canola e 81,2 gCO₂e/tkm do diesel ULS.

Além de comparar o biodiesel de microalgas com biodiesel de outras biomassas, Collet et al. (2011) realizaram um estudo de ACV da produção de biogás por microalgas e comparou com o biodiesel gerado pelas mesmas utilizando a espécie *Chlorella vulgaris*.

O estudo avaliou os potenciais de impactos ambientais decorrentes do ciclo de vida da produção de metano através de microalgas cultivadas em uma lagoa de alta taxa em meio sintético. A comparação foi realizada entre o metano e o biodiesel de microalgas com a unidade funcional de 1 MJ para ambos. Para a análise dos potenciais impactos ambientais em cada sistema de produto foi utilizado o método CML 2000.

Os resultados mostraram que a produção de metano apresentou pior aspecto em relação ao biodiesel nas categorias de impactos potenciais de aquecimento global, depleção abiótica, radiação ionizante e toxicidade humana. O metano apresentou vantagens nas categorias de acidificação, eutrofização e oxidação fotoquímica.

Posteriormente, Collet et al. (2014) concluíram que as microalgas são potencialmente consideradas como uma das fontes mais promissoras para produção de biocombustíveis. Nesse trabalho, os autores abordaram o ciclo de vida do produto apontando não apenas a cadeia direta de produção como foco de melhorias mas, também, os insumos utilizados. Segundo suas análises ambientais e energética, Collet et al. (2014) indicaram que o balanço energético é de fundamental importância para aprimorar o cultivo sustentável das microalgas reduzindo as emissões de gases de efeito estufa.

Collet et al. (2014) destacaram que a maior parte dos esforços encontrados na literatura para a redução dos impactos ambientais se concentra na busca por avanços tecnológicos diretamente ligados às etapas de produção. Porém, grande parte desses impactos ocorre do uso de energia elétrica necessárias para operação nas etapas de produção.

Para comprovar sua hipótese, Collet et al. (2014) consideraram um cenário de produção de microalgas em lagoas de alta taxa e aplicaram que 45% da eletricidade utilizada provem de uma fonte renovável local. Após a geração dos resultados, foi comparada a alteração do mix energético com estudos que promovem o aumento na

produtividade de microalgas. Foi concluído que o aumento da produtividade diminui significativamente os impactos, porém devem apresentar valores sensatos e alcançáveis (em torno de 10 - 15 g/m²d) e depois investir em melhorias na matriz energética.

Outros estudos visaram à mesma estratégia para diminuir os impactos ambientais alterando alguma entrada no sistema. Como exemplo, tem-se as pesquisas realizadas por Sander e Murthy (2010), Clarens et al. (2010) e Silva et al. (2015) onde o meio sintético, com o uso de fertilizantes, é substituído por uma água residuária.

Clarens et al. (2011b) utilizaram como meio de cultivo efluente de esgoto doméstico. Os autores concluíram que os impactos do ciclo de vida da produção de biodiesel em uma lagoa de alta taxa, podem ser substancialmente reduzidos substituindo o uso dos fertilizantes químicos utilizados para o meio de cultura. Além de contribuir para a redução das emissões, a utilização de esgoto apresenta vantagens em relação ao tratamento do efluente e uso de água.

Silva et al. (2015) utilizaram o dejetos suíno como meio de cultivo e compararam com o meio sintético, além da comparação de rotas tecnológicas e o sistema de cultivo (lagoa de alta taxa e fotobiorreator compacto). Os resultados indicaram que o fotobiorreator apresenta vantagens em relação a lagoa de alta taxa em diversas categorias de impacto, fato que está associado à maior produtividade de biomassa do FBR, sendo indicados para a produção em grande escala. Quanto ao uso do efluente da suinocultura, mostrou ser uma alternativa de baixo impacto, reduzindo em 60,41% a ecotoxicidade da água doce, 79,45% a ecotoxicidade da água marinha e para o aquecimento global e a eutrofização reduziu 100% dos impactos comparado com o uso de nutrientes sintéticos.

Dois estudos brasileiros realizaram uma avaliação do ciclo de vida da produção de biodiesel por microalgas integrado a uma usina de produção de etanol. A primeira pesquisa foi realizada por Souza, Gopal e Seabra (2015) onde a produção de biodiesel tinha por objetivo substituir o diesel fóssil utilizado nas atividades agrícolas da usina sucroalcooleira. Realizou-se uma ACV da produção de etanol para verificar os impactos ambientais recorrentes dessa substituição. As categorias de impacto analisadas foram emissões de gases de efeito estufa e uso de energia fóssil.

A produção de biodiesel foi integrada à de etanol na mesma indústria de produção, onde o dióxido de carbono é capturado do processo de fermentação do etanol e destinado ao processo de cultivo das microalgas; o álcool utilizado para a transesterificação é etanol e o consumo de energia é fornecido pelo sistema de cogeração. Para o cultivo, foi considerado um fotobiorreator com crescimento mixotrófico, água salina, fertilizantes e como

fonte orgânica de carbono, a glicerina formada no processo de transesterificação do biodiesel.

Os resultados indicaram que integrando a produção de biodiesel por microalgas na usina e substituindo o diesel em 100% nas atividades agrícolas, apresentam-se melhorias para ambas as categorias de impactos analisadas. A emissão de gases de efeito estufa e consumo de energia fóssil em 10% e 50% respectivamente, comparando com uma destilaria brasileira tradicional de etanol.

No segundo estudo realizado por Maranduba et al. (2015), foi utilizado lagoa de alta taxa com a espécie *Chlorella vulgaris* cultivada em água doce com o uso de fertilizantes. Os autores realizaram uma comparação em cinco cenários diferentes, com dois deles integrando com a produção de etanol.

No estudo foi considerada que a microalga possui 46% de óleo do peso seco, colheita realizada com floculante sintético, e a secagem realizada em três etapas: Centrifugação, mecânica e térmica. No primeiro cenário que foi integrado com a produção de etanol, acontece pirólise da biomassa residual para a obtenção de óleo. No segundo cenário é utilizada digestão anaeróbia para a formação de biogás, com o reuso do efluente como fonte de nutrientes para o cultivo. Em ambos são integrados o reuso de co-produtos da destilação do etanol, como o CO₂ da combustão do bagaço e fermentação, e o uso da eletricidade do sistema de cogeração.

Os resultados para a emissão de CO₂ mostrou que integrando a produção de biodiesel por microalgas com a produção de etanol, ocorreu menores emissões que os sistemas individuais de produção de biodiesel. Quanto ao sistema com pirólise e o que apresenta digestão anaeróbica da biomassa residual, ambos apresentaram emissões próximas, porém os autores concluíram que como no segundo existe o reuso de nutrientes para o cultivo, esse sistema se torna mais promissor.

Os dois estudos apresentados por Souza, Gopal e Seabra (2015) e Maranduba et al. (2015) apresentaram grande similaridade com o presente estudo, porém a grande diferença está no meio de cultivo. Nenhum dos dois trabalhos utilizaram o potencial nutritivo da vinhaça para o cultivo das microalgas, utilizaram meios sintéticos com o uso de fertilizantes químicos, sendo um aspecto negativo para o ciclo de vida do biodiesel. Os dois trabalhos analisaram, a princípio, apenas a emissão de gases de efeito estufa, o que não fornece dimensões a outros impactos potenciais que podem ocorrer por esse processo.

A AVC apresentou um fator importante para o desenvolvimento da produção de biodiesel por microalgas, uma vez que, expõe os pontos críticos do sistema em todo o seu ciclo de vida. Com isso, muitos estudos visaram solucionar os problemas buscando

alternativas e focando em novas rotas tecnológicas. Um exemplo foi o estudo de Sanders e Murthy (2010) onde seus resultados mostraram que o processo de colheita e secagem por centrifugação utiliza grande quantidade de energia de origem fóssil, consequentemente, essas foram às etapas que emitiram maiores taxas de CO₂. Com isso, muitos estudos objetivaram a solução desse problema, como em Brentner, Eckelman e Zimmerman (2011), que avaliaram diferentes tecnologias para encontrar a melhor entre elas.

No entanto, Sills et al. (2013) e Collet et al. (2015) indicaram que a ACV vem sendo grandemente empregada para avaliar os impactos ambientais e energéticos na produção de biodiesel de microalgas, porém não apresentou um consenso quanto aos parâmetros e hipóteses utilizadas, demonstrando uma grande heterogeneidade dos trabalhos e dificultando comparações entre eles.

Collet et al. (2015) analisaram 41 estudos de ACV da produção de biocombustível por microalgas. O principal critério examinado foi à unidade funcional (UF), que na maioria do estudo apresenta-se claramente definida. Também foram analisadas as fronteiras dos sistemas, o inventário do ciclo de vida e os impactos ambientais. A partir das comparações entre os estudos e com o objetivo de propor um padrão de ACV de biodiesel por microalgas, os autores listaram as seguintes recomendações:

- Escopo da ACV: Avaliar outras categorias de impactos, realizar um balanço energético, definir claramente a unidade funcional e apresentar os principais pressupostos em massa e energia.
- Inventário do ciclo de vida: Quantificar o consumo de água e CO₂, utilizar uma produtividade média da biomassa realista com as características do local e a técnica de cultivo e utilizar rendimentos de produção a partir de estudos experimentais.
- Avaliação de Impacto do ciclo de vida: Realizar balanço energético e balanço de água.

4.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o crescente aumento na demanda de energia no mundo e políticas públicas para diminuir os impactos ambientais, principalmente a emissão de CO₂ na atmosfera, o biodiesel encontra-se como um promissor substituto para o diesel fóssil. O potencial do uso de microalgas como matéria-prima para a produção desse combustível é alto, visto que seu rendimento pode ser por volta de 130 vezes maior que o óleo produzido por soja, no mesmo espaço de cultivo e tempo.

No entanto, muitos desafios tecnológicos precisam ser superados para aproveitar esse potencial. As rotas de produção atuais utilizam de grande demanda de energia e alto custo monetário. Quanto ao sistema de cultivo, lagoas de alta taxa apresentam baixo consumo energético, e baixo custo de construção e operação comparado com os fotobiorreatores, porém sua produtividade é baixa. Não existem técnicas para as etapas de colheita, secagem e extração do óleo que sejam de baixo custo e ao mesmo tempo não apresentem limitações à escala industrial que favoreça a competição de mercado.

Contudo, muitas pesquisas estão buscando alternativas para viabilizar a produção, e a avaliação do ciclo de vida representa um papel importante na evolução das soluções. Através da ACV são quantificados todos os fluxos de saídas e entradas, e calculado os impactos ambientais que podem ser causados durante todo o ciclo de vida do produto. Com isso, etapas que representam aspectos negativos são evidenciadas, dando suporte à busca de alternativas, como uso de energias renováveis e meio de cultivo alternativos.

4.11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOMOHR, A. E.-F.; JIN, W.; TU, R.; HAN, S.-F.; EID, M.; ELADEL, H. Microalgal biomass production as a sustainable feedstock for biodiesel: Current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 596–606, out. 2016.

AJAYEBI, A.; GNANSOUNOU, E.; RAMAN, J. Comparative life cycle assessment of biodiesel from algae and jatropha: A case study of India. **Bioresource Technology**, v. 150, p. 429–437, dez. 2013.

ALTING, L.; LEGARTH, J. B. Life Cycle Engineering and Design. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 44, n. 2, p. 569–580, 1995.

ANDERSEN, R. A. (ed.). **Algal culturing techniques**. Oxford, UK: Elsevier Academic Press, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 20p. 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 46p. 2009b.

ATABANI, A. E.; SILITONGA, A. S.; BADRUDDIN, I. A.; MAHLIA, T. M. I.; MASJUKI, H. H.; MEKHILEF, S. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 2070–2093, maio 2012.

AZAPAGIC, A. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. **Chemical Engineering Journal**, v. 73, n. 1385, p. 1-21, mar. 1999.

AZEREDO, V. B. S. **Produção de biodiesel a partir do cultivo de microalgas:**

estimativas de custos e perspectiva para o brasil. 2012. 171f. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

BAAN, L. De; MUTEL, C. L.; CURRAN, M.; HELLWEG, S.; KOELLNER, T. Land Use in Life Cycle Assessment: Global Characterization Factors Based on Regional and Global Potential Species Extinction. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 16, p. 9281–9290, 20 ago. 2013.

BAICHA, Z.; SALAR-GARCÍA, M. J.; ORTIZ-MARTÍNEZ, V. M.; HERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, F. J.; DE LOS RÍOS, A. P.; LABJAR, N.; LOTFI, E.; ELMAHI, M. A critical review on microalgae as an alternative source for bioenergy production: A promising low cost substrate for microbial fuel cells. **Fuel Processing Technology**, v. 154, p. 104–116, dez. 2016.

BALIGA, R.; POWERS, S. E. Sustainable Algae Biodiesel Production in Cold Climates. **International Journal of Chemical Engineering**, v. 2010, p. 1–13, 2010.

BATAN, L.; QUINN, J. C.; BRADLEY, T. H. Analysis of water footprint of a photobioreactor microalgae biofuel production system from blue, green and lifecycle perspectives. **Algal Research**, v. 2, n. 3, p. 196–203, 2013.

BATAN, L.; QUINN, J.; WILLSON, B.; BRADLEY, T. Net Energy and Greenhouse Gas Emission Evaluation of Biodiesel Derived from Microalgae. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 20, p. 7975–7980, 15 out. 2010.

BRASIL. Lei no. 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm#art2>. Acesso em: 17 de outubro de 2015.

BRAVO-FRITZ, C. P.; SÁEZ-NAVARRETE, C. A.; HERRERA ZEPPELIN, L. A.; GINOCCHIO CEA, R. Site selection for microalgae farming on an industrial scale in Chile. **Algal Research**, v. 11, p. 343–349, set. 2015.

BRENTNER, L. B.; ECKELMAN, M. J.; ZIMMERMAN, J. B. Combinatorial life cycle assessment to inform process design of industrial production of algal biodiesel. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 16, p. 7060–7067, 2011.

CAMPBELL, P. K.; BEER, T.; BATTEN, D. Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 50–56, 2011.

CANTER, C. E.; DAVIS, R.; URGUN-DEMIRTAS, M.; FRANK, E. D. Infrastructure associated emissions for renewable diesel production from microalgae. **Algal Research**, v. 5, p. 195–203, jul. 2014.

CHEN, C.-Y.; YEH, K.-L.; AISYAH, R.; LEE, D.-J.; CHANG, J.-S. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 71–81, 2011.

CHEN, Z.; ZHANG, X.; JIANG, Z.; CHEN, X.; HE, H.; ZHANG, X. Light/dark cycle of microalgae cells in raceway ponds: Effects of paddlewheel rotational speeds and baffles installation. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 387–391, nov. 2016.

CHIARAMONTI, D.; PRUSSI, M.; BUFFI, M.; RIZZO, A. M.; PARI, L. Review and

experimental study on pyrolysis and hydrothermal liquefaction of microalgae for biofuel production. **Applied Energy**, v. 185, p. 963–972, jan. 2017.

CHIARAMONTI, D.; PRUSSI, M.; CASINI, D.; TREDICI, M. R.; RODOLFI, L.; BASSI, N.; ZITTELLI, G. C.; BONDIOLI, P. Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible. **Applied Energy**, v. 102, p. 101–111, fev. 2013.

CHOWDHURY, R.; VIAMAJALA, S.; GERLACH, R. Reduction of environmental and energy footprint of microalgal biodiesel production through material and energy integration. **Bioresource Technology**, v. 108, p. 102–111, mar. 2012.

CLARENS, A. F.; NASSAU, H.; RESURRECCION, E. P.; WHITE, M. A.; COLOSI, L. M. Environmental Impacts of Algae-Derived Biodiesel and Bioelectricity for Transportation. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 17, p. 7554–7560, set. 2011.

CLARENS, A. F.; RESURRECCION, E. P.; WHITE, M. A.; COLOSI, L. M. Environmental Life Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 5, p. 1813–1819, mar. 2010.

COLLET, P.; HÉLIAS, A.; LARDON, L.; STEYER, J. P.; BERNARD, O. Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. **Applied Energy**, v. 154, p. 1089–1102, 2015.

COLLET, P.; HÉLIAS, A.; LARDON, L.; RAS, M.; GOY, R. A.; STEYER, J. P. Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 207–214, 2011.

COLLET, P.; LARDON, L.; HÉLIAS, A.; BRICOUT, S.; LOMBAERT-VALOT, I.; PERRIER, B.; LÉPINE, O.; STEYER, J. P.; BERNARD, O. Biodiesel from microalgae - Life cycle assessment and recommendations for potential improvements. **Renewable Energy**, v. 71, p. 525–533, 2014.

CURRAN, M. A. Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 2, n. 3, p. 273–277, 2013.

ELLIOTT, D. C.; BILLER, P.; ROSS, A. B.; SCHMIDT, A. J.; JONES, S. B. Hydrothermal liquefaction of biomass: Developments from batch to continuous process. **Bioresource Technology**, v. 178, p. 147–156, fev. 2015.

FERNÁNDEZ, I.; ACIÉN, F. G.; GUZMÁN, J. L.; BERENGUEL, M.; MENDOZA, J. L. Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production. **Algal Research**, v. 17, p. 67–78, jul. 2016.

FINKBEINER, M.; INABA, A.; TAN, R. B. H.; CHRISTIANSEN, K.; KLÜPPEL, H. Commentaries The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044. **The International Journal of Life Cycle Assessment** v. 11, n. 2, p. 80–85, 2006.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVALL, T.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HELLWEG, S.; KOEHLER, A.; PENNINGTON, D.; SUH, S. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, out. 2009.

FRANCO, A. L. C.; LÔBO, I. P.; DA CRUZ, R. S.; TEIXEIRA, C. M. L. L.; DE ALMEIDA NETO, J. A.; MENEZES, R. S. Biodiesel De Microalgas: Avanços E Desafios. **Quimica Nova**, v. 36, n. 3, p. 437–448, 2013.

FRANK, E. D.; ELGOWAINY, A.; HAN, J.; WANG, Z. Life cycle comparison of hydrothermal liquefaction and lipid extraction pathways to renewable diesel from algae. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 18, n. 1, p. 137–158, 7 jan. 2012.

GAO, X.; YU, Y.; WU, H. Life Cycle Energy and Carbon Footprints of Microalgal Biodiesel Production in Western Australia: A Comparison of Byproducts Utilization Strategies. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 1, n. 11, p. 1371–1380, 4 nov. 2013.

GHOSH, A.; KHANRA, S.; MONDAL, M.; HALDER, G.; TIWARI, O. N.; SAINI, S.; BHOWMICK, T. K.; GAYEN, K. Progress toward isolation of strains and genetically engineered strains of microalgae for production of biofuel and other value added chemicals: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 113, p. 104–118, abr. 2016.

GUO, Y.; YEH, T.; SONG, W.; XU, D.; WANG, S. A review of bio-oil production from hydrothermal liquefaction of algae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 776–790, ago. 2015.

HANDLER, R. M.; CANTER, C. E.; KALNES, T. N.; LUPTON, F. S.; KHOLIQOV, O.; SHONNARD, D. R.; BLOWERS, P. Evaluation of environmental impacts from microalgae cultivation in open-air raceway ponds: Analysis of the prior literature and investigation of wide variance in predicted impacts. **Algal Research**, v. 1, n. 1, p. 83–92, maio 2012.

HAUSCHILD, M. Z.; HUIJBREGTS, M.; JOLLIET, O.; MACLEOD, M.; MARGNI, M.; VAN DE MEENT, D.; ROSENBAUM, R. K.; MCKONE, T. E. Building a Model Based on Scientific Consensus for Life Cycle Impact Assessment of Chemicals: The Search for Harmony and Parsimony. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 19, p. 7032–7037, out. 2008.

HE, Q.; YANG, H.; HU, C. Culture modes and financial evaluation of two oleaginous microalgae for biodiesel production in desert area with open raceway pond. **Bioresource Technology**, v. 218, p. 571–579, out. 2016.

HELLWEG, S.; CANALS, L. M. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1109–1114, 6 jun. 2014.

HOLMA, A.; KOPONEN, K.; ANTIKAINEN, R.; LARDON, L.; LESKINEN, P.; ROUX, P. Current limits of life cycle assessment framework in evaluating environmental sustainability – case of two evolving biofuel technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 215–228, set. 2013.

HU, Y.-R.; GUO, C.; XU, L.; WANG, F.; WANG, S.-K.; HU, Z.; LIU, C.-Z. A magnetic separator for efficient microalgae harvesting. **Bioresource Technology**, v. 158, p. 388–391, 2014.

HUANG, G.; CHEN, F.; WEI, D.; ZHANG, X.; CHEN, G. Biodiesel production by microalgal biotechnology. **Applied Energy**, v. 87, n. 1, p. 38–46, 2010.

INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM. **ILCD Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. First edition March 2010. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.

JAZRAWI, C.; BILLER, P.; ROSS, A. B.; MONTROYA, A.; MASCHMEYER, T.; HAYNES, B. S. Pilot plant testing of continuous hydrothermal liquefaction of microalgae. **Algal Research**, v. 2, n. 3, p. 268–277, jul. 2013.

JORQUERA, O.; KIPERSTOK, A.; SALES, E. a.; EMBIRUÇU, M.; GHIRARDI, M. L. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and

photobioreactors. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 4, p. 1406–1413, 2010.

KETHEESAN, B.; NIRMALAKHANDAN, N. Development of a new airlift-driven raceway reactor for algal cultivation. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3370–3376, out. 2011.

KHOO, H. H.; SHARRATT, P. N.; DAS, P.; BALASUBRAMANIAN, R. K.; NARAHARISETTI, P. K.; SHAIK, S. Life cycle energy and CO₂ analysis of microalgae-to-biodiesel: Preliminary results and comparisons. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 10, p. 5800–5807, maio 2011.

KUMAR, K.; MISHRA, S. K.; SHRIVASTAV, A.; PARK, M. S.; YANG, J.-W. Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 875–885, 2015.

LAM, M. K.; LEE, K. T. Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. **Biotechnology Advances**, v. 30, n. 3, p. 673–690, 2012.

LARDON, L.; HÉLIAS, A.; SIALVE, B.; STEYER, J.-P.; BERNARD, O. Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 17, p. 6475–6481, set. 2009.

LEI, X.; CHEN, Y.; SHAO, Z.; CHEN, Z.; LI, Y.; ZHU, H.; ZHANG, J.; ZHENG, W.; ZHENG, T. Effective harvesting of the microalgae *Chlorella vulgaris* via flocculation–flotation with bioflocculant. **Bioresource Technology**, v. 03, p. 8–11, 2015.

LIAO, Q.; LI, L.; CHEN, R.; ZHU, X. A novel photobioreactor generating the light/dark cycle to improve microalgae cultivation. **Bioresource Technology**, v. 161, p. 186–191, jun. 2014.

LIN, L.; CUNSHAN, Z.; VITTAYAPADUNG, S.; XIANGQIAN, S.; MINGDONG, D. Opportunities and challenges for biodiesel fuel. **Applied Energy**, v. 88, n. 4, p. 1020–1031, abr. 2011.

LIU, J.; HUANG, J.; SUN, Z.; ZHONG, Y.; JIANG, Y.; CHEN, F. Differential lipid and fatty acid profiles of photoautotrophic and heterotrophic *Chlorella zofingiensis*: Assessment of algal oils for biodiesel production. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 106–110, 2011.

LÓPEZ BARREIRO, D.; PRINS, W.; RONSSE, F.; BRILMAN, W. Hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae for biofuel production: State of the art review and future prospects. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, p. 113–127, jun. 2013.

MARANDUBA, H. L.; ROBRA, S.; NASCIMENTO, I. A.; DA CRUZ, R. S.; RODRIGUES, L. B.; DE ALMEIDA NETO, J. A. Reducing the life cycle GHG emissions of microalgal biodiesel through integration with ethanol production system. **Bioresource Technology**, v. 194, p. 21–27, 2015.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 217–232, jan. 2010.

MIAO, X.; WU, Q. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 6, p. 841–846, 2006.

MIETTINEN, P.; HÄMÄLÄINEN, R. P. How to benefit from decision analysis in environmental life cycle assessment (LCA). **European Journal of Operational Research**, v. 102, n. 2, p. 279–294, out. 1997.

MONTEMEZZANI, V.; DUGGAN, I. C.; HOGG, I. D.; CRAGGS, R. J. Screening of potential zooplankton control technologies for wastewater treatment High Rate Algal Ponds. **Algal Research**, v. 22, p. 1–13, mar. 2017.

MURADOV, N.; TAHA, M.; MIRANDA, A. F.; WREDE, D.; KADALI, K.; GUJAR, A.; STEVENSON, T.; BALL, A. S.; MOURADOV, A. Fungal-assisted algal flocculation: application in wastewater treatment and biofuel production. **Biotechnology for biofuels**, v. 8, n. 1, p. 24, 2015.

OMETTO, A. R. **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos edip, exergia e emergia**. 2005. 200f. Tese (doutorado). Programa de pós-graduação em hidráulica e saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

PASSELL, H.; DHALIWAL, H.; RENO, M.; WU, B.; BEN AMOTZ, A.; IVRY, E.; GAY, M.; CZARTOSKI, T.; LAURIN, L.; AYER, N. Algae biodiesel life cycle assessment using current commercial data. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 103–111, 2013.

RAMOS, L. P.; SILVA, F. R. da; MANGRICH, A. S.; CORDEIRO, C. S. Biodiesel Production Technologies. **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 5, 2011.

REBITZER, G.; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; RYDBERG, T.; SCHMIDT, W.-P.; SUH, S.; WEIDEMA, B. P.; PENNINGTON, D. W. Life cycle assessment. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701–720, jul. 2004.

RESURRECCION, E. P.; COLOSI, L. M.; WHITE, M. A.; CLARENS, A. F. Comparison of algae cultivation methods for bioenergy production using a combined life cycle assessment and life cycle costing approach. **Bioresource Technology**, v. 126, n. 1, p. 298–306, 7 dez. 2012.

ROMANO, S. D.; SORICHETTI, P. A. Introduction to Biodiesel Production. In: ROMANO, Silvia Daniela; SORICHETTI, Patricio Aníbal. **Dielectric Spectroscopy in Biodiesel Production and Characterization**. Londres: Springer Verlag, 2011. Cap. 2. p. 7-27.

ROSENBAUM, R. K.; BACHMANN, T. M.; GOLD, L. S.; HUIJBREGTS, M. A. J.; JOLLIET, O.; JURASKE, R.; KOEHLER, A.; LARSEN, H. F.; MACLEOD, M.; MARGNI, M.; MCKONE, T. E.; PAYET, J.; SCHUHMACHER, M.; VAN DE MEENT, D.; HAUSCHILD, M. Z. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 7, p. 532–546, 22 nov. 2008.

ROY, P.; NEI, D.; ORIKASA, T.; XU, Q.; OKADOME, H.; NAKAMURA, N.; SHIINA, T. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 1, p. 1–10, jan. 2009.

SALAM, K. A.; VELASQUEZ-ORTA, S. B.; HARVEY, A. P. A sustainable integrated in situ transesterification of microalgae for biodiesel production and associated co-product—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1179–1198, nov. 2016.

SANDER, K.; MURTHY, G. S. Life cycle analysis of algae biodiesel. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 7, p. 704–714, 19 ago. 2010.

SHIRVANI, T.; YAN, X.; INDERWILDI, O. R.; EDWARDS, P. P.; KING, D. A. Life cycle energy and greenhouse gas analysis for algae-derived biodiesel. **Energy & Environmental Science**, v. 4, n. 10, p. 3773, 2011.

SHOW, K.-Y.; LEE, D.-J.; TAY, J.-H.; CHANG, J.-S. Microalgal Drying and Cell Disruption – Recent Advances. **Bioresource Technology**, v. 184, p. 258–266, 2014.

SILLS, D. L.; PARAMITA, V.; FRANKE, M. J.; JOHNSON, M. C.; AKABAS, T. M.; GREENE, C. H.; TESTER, J. W. Quantitative uncertainty analysis of Life Cycle Assessment for algal biofuel production. **Environmental science & technology**, v. 47, n. 2, p. 687–94, 2013.

SILVA, A. G.; CARTER, R.; MERSS, F. L. M.; CORR??A, D. O.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B.; ORDONEZ, J. C.; SCHERER, M. D. Life cycle assessment of biomass production in microalgae compact photobioreactors. **GCB Bioenergy**, v. 7, n. 2, p. 184–194, 2015.

SOIMAKALLIO, S.; COWIE, A.; BRANDÃO, M.; FINNVEDEN, G.; EKVALL, T.; ERLANDSSON, M.; KOPONEN, K.; KARLSSON, P. Attributional life cycle assessment: is a land-use baseline necessary? **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 10, p. 1364–1375, 5 out. 2015.

SOUZA, S. P.; GOPAL, A. R.; SEABRA, J. E. A. Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery. **Energy**, v. 81, p. 373–381, mar. 2015.

STEPHENSON, A. L.; KAZAMIA, E.; DENNIS, J. S.; HOWE, C. J.; SCOTT, S. A.; SMITH, A. G. Life-cycle assessment of potential algal biodiesel production in the united kingdom: A comparison of raceways and air-lift tubular bioreactors. **Energy and Fuels**, v. 24, n. 7, p. 4062–4077, 2010.

TEIXEIRA, C. M.; MORALES, M. E. Microalga como matéria-prima para a produção de biodiesel. **Revista: Biodiesel o Novo combustível do Brasil**, p. 91–96, 2006.

TIAN, C.; LI, B.; LIU, Z.; ZHANG, Y.; LU, H. Hydrothermal liquefaction for algal biorefinery: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 933–950, out. 2014.

TRAN, D. T.; LE, B. H.; LEE, D. J.; CHEN, C. L.; WANG, H. Y.; CHANG, J. S. Microalgae harvesting and subsequent biodiesel conversion. **Bioresource Technology**, v. 140, p. 179–186, 2013.

TRAN, D.-T.; CHANG, J.-S.; LEE, D.-J. Recent insights into continuous-flow biodiesel production via catalytic and non-catalytic transesterification processes. **Applied Energy**, v. 185, p. 376–409, jan. 2017.

WANG, L.; WELLER, C. L.; SCHLEGEL, V. L.; CARR, T. P.; CUPPETT, S. L. Supercritical CO₂ extraction of lipids from grain sorghum dried distillers grains with solubles. **Bioresource technology**, v. 99, n. 5, p. 1373–82, 2008.

XU, L.; (WIM) BRILMAN, D. W. F.; WITHAG, J. A. M.; BREM, G.; KERSTEN, S. Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: Energy balance analysis. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 8, p. 5113–5122, abr. 2011a.

XU, L.; GUO, C.; WANG, F.; ZHENG, S.; LIU, C. Z. A simple and rapid harvesting method for microalgae by in situ magnetic separation. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 21, p. 10047–10051, 2011b.

XU, L.; WEATHERS, P. J.; XIONG, X.-R.; LIU, C.-Z. Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities. **Engineering in Life Sciences**, v. 9, n. 3, p. 178–189, jun. 2009.

YANFEN, L.; ZEHAO, H.; XIAOQIAN, M. Energy analysis and environmental impacts of microalgal biodiesel in China. **Energy Policy**, v. 45, p. 142–151, jun. 2012.

YANG, Z.; CHENG, J.; YE, Q.; LIU, J.; ZHOU, J.; CEN, K. Decrease in light/dark cycle of microalgal cells with computational fluid dynamics simulation to improve microalgal growth in a raceway pond. **Bioresource Technology**, v. 220, p. 352–359, nov. 2016.

YEN, H.-W.; YANG, S.-C.; CHEN, C.-H.; JESISCA; CHANG, J.-S. Supercritical fluid extraction of valuable compounds from microalgal biomass. **Bioresource Technology**, v. 184, p. 291–296, 2015.

YUSUF, N. N. A. N.; KAMARUDIN, S. K.; YAAKUB, Z. Overview on the current trends in biodiesel production. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 7, p. 2741–2751, jul. 2011.

5. DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO A VINHAÇA DA PRODUÇÃO DE ETANOL E MICROALGAS: CULTIVO POR FOTOBIORREATOR E LAGOA DE ALTA TAXA

RESUMO

As microalgas já eram utilizadas em algumas tecnologias de tratamento de águas residuais. No entanto, nos últimos anos, pesquisadores voltaram sua atenção para o cultivo visando à produção de biomassa para fins energéticos. Este capítulo realizou dois dimensionamentos preliminares com diferentes sistemas de cultivo de microalgas em vinhaça, lagoas de alta taxa e fotobiorreatores. Para isso foi necessário dimensionar, além dos sistemas de cultivos, uma unidade de tratamento preliminar, unidade de extração do óleo e unidade de conversão. A unidade de tratamento preliminar, lagoas de alta taxa, fotobiorreatores, e a unidade de conversão foram realizadas seguindo orientações de normas brasileiras e critérios técnicos. A unidade de extração do óleo foi através de liquefação hidrotérmica baseada em modelo encontrado na literatura. O sistema que utilizou fotobiorreator apresentou maior produtividade de biomassa, e consequentemente, maior produção de biodiesel (foram produzidos 50,76 kg/h de óleo em fotobiorreator e 27,57 kg/h de óleo em lagoas de alta taxa). A produção diária de biodiesel foi de 529,2 kg e 974,4 kg, para o sistema de lagoas de alta taxa e fotobiorreatores, respectivamente. No entanto, o tratamento utilizado para a vinhaça não foi adequado, consumindo grande quantidade de coagulante com um gasto de R\$ 11.067.840,00 por dia.

Palavras chave: Vinhaça, Lagoa de alta taxa, Fotobiorreator, LHT, Transesterificação.

5.1. INTRODUÇÃO

Nesse capítulo foi realizado o dimensionamento do sistema de produção de biodiesel com óleo de microalgas. O conceito central está na integração desse sistema com uma usina sucroalcooleira, aproveitando a vinhaça como meio de cultivo e a energia elétrica produzida pelo sistema de cogeração para alimentar os equipamentos.

O crescimento de microalgas em efluentes é utilizado há muito tempo em processos biológicos de tratamento de esgoto por sistemas de lagoas aeróbias (ABDEL-RAOUF; AL-HOMAIDAN; IBRAHEEM, 2012). Recentemente, com o desenvolvimento de produção de biodiesel, pesquisas foram realizadas com microalgas cultivadas em efluentes residuais com

o objetivo de utilizar sua biomassa para fins energéticos (CLARENS et al., 2010; SILVA et al., 2015). Os resultados dessas pesquisas indicaram viabilidade do processo, com vantagens na redução de custos de produção e menores indicadores em algumas categorias de impacto ambiental.

A vinhaça é um efluente industrial do processo de produção de etanol, geralmente destinada para fertirrigação da cana-de-açúcar, sendo rica em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio (RAMIREZ; FARENZENA; TRIERWEILER, 2014). Estudos realizaram ensaios e consta que a vinhaça pode ser utilizada como meio de cultivo para a produção de biomassa de microalgas, no entanto é necessário tratamento preliminar devido ao baixo pH e alta quantidade de matéria orgânica (VALDERRAMA et al., 2002; MARQUES et al., 2013).

Para o presente estudo, foi destinada a quantidade total de vinhaça produzida em uma usina sucroalcooleira para o cultivo de microalgas. De acordo com Garcia⁴ é produzido 15 m³/hora de etanol e a cada litro de etanol produz-se em média 12 litros de vinhaça, com isso a quantidade de vinhaça é de 540 m³/hora.

Para adequar os parâmetros físicos da vinhaça para cultivo das microalgas, Santos (2013) utilizou um tratamento físico com um volume de 8 litros, através de centrifugação e membranas de 0,45 e 0,2 µm com uma remoção final de 99% da turbidez. No entanto, como o volume a ser tratado no presente estudo foi superior e o fluxo contínuo, esse método tornou-se inviável tecnologicamente e economicamente.

A solução encontrada foi obtida pelo estudo de Lima (2013) onde foi utilizado um tratamento físico-químico por coagulação com dados experimentais atingindo a remoção de turbidez necessária. Para realizar esse tratamento, com uma vazão de 540 m³/h, foi adotado um sistema similar ao tratamento de água, com as seguintes etapas: Mistura rápida, floculação e decantação.

A mistura rápida é uma operação de agitação e adição de produtos químicos no líquido para a coagulação das partículas. A função da mistura rápida é de promover a dispersão do coagulante de forma rápida e homogênea (DI BERNARDO; SABOGAL-PAZ, 2008). Segundo os autores, a agitação pode ocorrer por agitadores mecânicos, hidráulicos ou especiais.

A agitação mecânica ocorre em uma câmara circular ou quadrada em planta, com um misturador mecânico instalado, em que a rotação de seu eixo confere gradiente de velocidade adequado para a mistura. Nesse tipo de processo ocorre o consumo de energia elétrica, sendo os dispositivos hidráulicos uma alternativa, já que a energia utilizada ocorre através da energia hidráulica, não apresentando custos externos ao sistema.

⁴ GARCIA, J. C. **Usina Santa Adélia**. Informação obtida por telefone (16) 3209-2230 em 25 de Ago. 2016.

A ABNT (1992) estipula que a mistura rápida pode ser realizada em ressaltos hidráulicos, que ocorre em calhas do tipo Parshall. Também chamada de medidor Parshall, a calha Parshall é um dispositivo hidráulico aplicado para a medição de vazões em canais. De acordo com Azevedo Netto et al. (1998), esse dispositivo foi idealizado pelo engenheiro americano Ralph Leroy Parshall, do Serviço de Irrigação do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Segundo o autor, sua configuração consiste em sessão de entrada convergente, sessão estrangulada e por fim, sessão de saída divergente.

Com o tempo, além de medir a vazão, ela passou a ser utilizada como dispositivo de mistura rápida, com a dispersão de coagulantes em sistemas de tratamento de água. De acordo com a ABNT (1992) a aplicação da solução de coagulante deve ser realizada antes do ponto de maior dissipação de energia com jatos separados com menos de 10 cm.

A floculação é uma operação que acontece após a mistura rápida, que consiste no agrupamento das partículas desestabilizadas pela ação do coagulante, nos chamados flocos (DI BERNANDO; SABOGAL-PAZ, 2008). O processo ocorre em floculadores, que podem ser compartimentos com misturadores hidráulicos do tipo chicanas, ou em câmaras com agitação mecânica. O tempo de detenção e gradiente de velocidade são determinantes para a realização desse processo. A ABNT (1992), determina que sejam realizados ensaios para determinar esses parâmetros, não sendo possível, o tempo de detenção pode ser adotado entre 20 min e 30 min para floculadores hidráulicos com gradiente de velocidade no primeiro compartimento que não exceda 70 s^{-1} e 10 s^{-1} no último.

Por fim, os decantadores são unidades do sistema de tratamento responsável pela sedimentação dos flocos formados no floculador pela ação da gravidade. Segundo a ABNT (1992), o número de decantadores depende da capacidade do tratamento, em uma estação com capacidade superior a $10.000 \text{ m}^3/\text{dia}$ ou com período de funcionamento maior que 18 horas/dia, deve ser projetado, pelo menos, duas unidades iguais.

Um dado importante para o projeto de decantador é a taxa de aplicação superficial, sendo um valor que representa a velocidade de sedimentação dos flocos, obtido através de ensaios de laboratório. A ABNT (1992) estabelece alguns valores para essa taxa de acordo com a capacidade da estação, quando não é possível realizar ensaios.

Nesse contexto, foi realizado o dimensionamento preliminar de dois sistemas de produção de biodiesel. No primeiro, o cultivo das microalgas foi realizado em sistema de lagoas de alta taxa, e no segundo em fotobiorreatores. Os resultados desse capítulo servem de base para realizar estudos de ACV e comparar as duas tecnologias de produção.

5.2. MATERIAIS E MÉTODO

Foi dimensionado dois sistemas de cultivo, por lagoas de alta taxa e fotobiorreatores. Com isso, os processos de extração e conversão possuem entradas diferentes de fluxos, sendo necessárias características específicas para cada sistema de produção.

5.2.1. Tratamento preliminar da vinhaça

Para o dimensionamento do tratamento preliminar foi utilizado um sistema físico-químico com mistura rápida, floculação hidráulica e decantação. A floculação, decantação e a mistura rápida foram dimensionadas de acordo com os critérios da norma ABNT (1992) e a escolha da calha Parshall pela ABNT (2008).

5.2.1.1. Dimensionamento da calha Parshall e mistura rápida

A escolha da calha Parshall a ser empregada no projeto foi realizada por meio de tabelas. Com a vazão de projeto, utilizando-se a Tabela 5.1 para determinar a dimensão da garganta da calha e suas dimensões nominais.

Tabela 5.1 - Características de vazão das calhas Parshall padrão

W		A	B	C	D	E	F	G	K	N	Q=m³/h	
Pol.	cm										Min.	Máx.
3"	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	61,0	15,2	30,5	2,5	5,7	2,9	194
6"	15,2	62,0	61,0	39,4	40,3	61,0	30,5	61,0	7,6	11,4	5,4	397
9"	22,9	88,0	86,4	38,0	57,5	76,2	30,5	45,7	7,6	11,4	9,0	902
1'	30,5	137,2	134,4	61,0	84,5	91,4	61,0	91,5	7,6	22,9	12,6	1644
1 ½'	45,7	144,9	142,0	76,2	102,6	91,4	61,0	91,5	7,6	22,9	17,3	2503
2'	61,0	152,3	149,3	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	42,1	3372
3'	91,5	167,7	164,5	122,0	157,2	91,4	61,0	91,5	7,6	22,9	61,6	5135
4'	122,0	183,0	179,5	152,5	193,8	91,4	61,0	91,5	7,6	22,9	136,1	6921
5'	152,5	198,3	194,1	183,0	230,3	91,4	61,0	91,5	7,6	22,9	167,8	8724
6'	183,0	213,5	209,0	213,5	266,7	91,4	61,0	91,5	7,6	22,9	262,4	10541
7'	213,5	228,8	224,0	244,0	303,0	91,4	61,0	91,5	7,6	22,9	303,5	12370
8'	244,0	244,0	239,2	274,4	340,0	91,4	61,0	91,5	7,6	22,9	344,2	14210
10'	305,0	274,5	247,0	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3	-	-

Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)

As medidas associadas na tabela pelas letras A, B, C, D, E, F, G, K, N e W são dimensões da calha Parshall representadas na Figura 5.1.

Após a escolha da calha Parshall é necessário verificar gradiente de velocidade atingindo na aplicação do coagulante. Para isso utiliza-se a equação 5.1 (DI BERNARDO; SABOGAL-PAZ, 2008).

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \Delta H}{\mu \cdot \theta_h}} \quad 5.1$$

Onde:

γ : Peso específico do líquido (N.m^{-3})

ΔH : Perda de carga no ressalto (m)

μ : Viscosidade dinâmica (Pa.s)

θ_h : Tempo de residência médio no trecho divergente (s)

Figura 5.1 - Configuração e dimensões de calha Parshall

Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)

De acordo com a equação 5.1, é necessário calcular a perda de carga do ressalto e o tempo de residência no trecho. As equações de 5.2 a 5.14 apresentam o roteiro para a obtenção desses valores (DI BERNARDO; SABOGAL-PAZ, 2008).

Cálculo da lâmina líquida:

A equação 5.2 é a forma geral da equação de vazão em relação à altura da lâmina líquida (h_a) medida na calha Parshall. Os coeficientes C e n são obtidos através da tabela 5.2.

$$Q = Ch_a^n \quad 5.2$$

Onde:

Q: Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)

h_a : altura da lâmina líquida (m)

Tabela 5.2 – Valores do expoente n e do coeficiente C para da equação 5.2.

W		n	C
pol.	(m)		
3"	0,076	1,547	0,176
6"	0,152	1,580	0,381
9"	0,229	1,530	0,535
1'	0,305	1,522	0,690
1 ½'	0,457	1,538	1,054
2'	0,610	1,550	1,426
3'	0,915	1,556	2,182
4'	1,220	1,578	2,935
5'	1,525	1,587	3,728
6'	1,830	1,595	4,515
7'	2,135	1,601	5,306
8'	2,440	1,606	6,101

Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)

Cálculo da largura na sessão de medida da vazão:

A vazão na calha Parshall é medida através da leitura da altura da lâmina líquida na sessão apresentada pela Figura 5.1. Determinando-se sua largura, com o valor de vazão, determina-se a velocidade do regime no trecho. Através de projeção geométrica, a largura é calculada pela equação 5.3.

$$D' = \frac{2}{3}(D - W) + W \quad 5.3$$

Onde D e W são dimensões da calha Parshall, obtida pela Tabela 5.1.

Cálculo da velocidade do líquido na sessão de medida e energia total disponível:

Com a velocidade (equação 5.4) calcula-se a energia total disponível pela equação

5.5.

$$V_a = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{D' \cdot h_a} \quad 5.4$$

$$E_a = h_a + \frac{V_a^2}{2 \cdot g} + N \quad 5.5$$

Onde:

g: aceleração da gravidade, 9,81 m/s²

N: dimensão obtida na Tabela 5.1 para a calha Parshall selecionada

Cálculo do ângulo fictício:

Com a equação 5.6 determina-se o cosseno do ângulo fictício, e aplicando a função arco cosseno no resultado, obtém-se o valor do ângulo Θ medido em graus.

$$\cos(\theta) = -\frac{g \cdot Q}{W \cdot (0,67 \cdot g \cdot E_a)^{3/2}} \quad 5.6$$

Onde: W é a dimensão da garganta da calha Parshall.

Cálculo da velocidade do líquido no início do ressalto:

Para o cálculo da altura da lâmina líquida no início do ressalto é necessário conhecer a velocidade do fluído nesse ponto, que é calculada pela equação 5.7.

$$V_1 = 2 \cdot \cos\left(\frac{\theta}{3}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot g \cdot E_a}{3}\right)^{1/2} \quad 5.7$$

Cálculo da altura do líquido no início do ressalto:

Como do ponto de medição da vazão até o ponto do início do ressalto a perda de energia é aproximadamente zero, para determinar a altura do líquido utiliza-se a lei de conservação de energia. Isolando a altura, obtém a equação 5.8.

$$y_1 = E_a - \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \quad 5.8$$

Cálculo do número de Froude:

O número adimensional de Froude é utilizado na classificação do ressalto hidráulico e para o cálculo da altura conjugada. Quando $1 < Fr < 1,7$ acontece o ressalto ondulado, $1,7 < Fr < 2,5$ ressalto fraco, $2,5 < Fr < 4,5$ ressalto oscilante, $4,5 < Fr < 9,0$ ressalto estacionário e quando $Fr > 9$ caracteriza o ressalto forte, que não é utilizado em obras hidráulicas devido a grandes efeitos colaterais.

A norma ABNT (1992) destaca que quando o ressalto é do tipo oscilante deve ser projetado algum dispositivo que anule a oscilação da velocidade a jusante do ressalto. O número de Froude é determinado pela equação 5.9.

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot y_1}} \quad 5.9$$

Cálculo da altura conjugada do ressalto:

A altura conjugada é a altura que o líquido apresenta após sofrer o ressalto hidráulico, e é calculo pela equação 5.10.

$$y_3 = \frac{y_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right) \quad 5.10$$

Cálculo da profundidade no final do trecho divergente:

Com a altura conjugada e por geometria da calha, calcula-se a profundidade da lâmina líquida pela equação 5.11 no trecho divergente, usado para o cálculo da velocidade de saída.

$$y_2 = y_3 - N + K \quad 5.11$$

Onde:

N e K são dimensões da calha Parshall selecionada, obtidas na Tabela 5.1.

Cálculo da velocidade de saída no trecho divergente:

Com a profundidade do líquido e a largura da calha na sessão divergente, calcula-se a velocidade de saída do fluido pela equação 5.12.

$$V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{y_2 \cdot C} \quad 5.12$$

Onde:

C é a dimensão da calha Parshall selecionada, obtida na Tabela 5.1.

Cálculo da perda de carga e tempo médio de residência no trecho divergente:

Com o valor da altura conjugada e altura da lâmina líquida determina-se a perda de carga pela equação 5.13.

$$\Delta H = (h_a + N) - y_3 \quad 5.13$$

O tempo médio de residência no trecho divergente é o tempo que o fluido leva para atravessar o trecho divergente e calculado a partir da equação 5.14.

$$\theta_h = \frac{G}{\left(\frac{V_1 + V_2}{2}\right)} \quad 5.14$$

Onde:

G é dimensão da calha Parshall selecionada, obtida na Tabela 5.1.

Dimensionamento do canal de vinhaça coagulada

A ABNT (1992) estabelece que após a aplicação do coagulante, o tempo máximo do percurso do líquido da zona de mistura até o floculador não pode ser superior a 1 minuto. Porém, se no canal o gradiente de velocidade for igual ou superior ao gradiente do início do floculador, essa velocidade pode ser aumentada até 3 minutos.

Com isso, após o dimensionamento do canal é necessário conferir o gradiente de velocidade. A determinação da base e altura do canal respeita a equação de conservação de massa, dada pela equação 5.15.

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow Q_1 = A_2 V_2 \quad 5.15$$

Onde

Q_1 : Vazão que sai da calha Parshall ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

A_2 : base (m) vezes a altura (m) do canal

V_2 : Velocidade admitida no canal

Para determinação do gradiente de velocidade utiliza-se a equação 5.16, que foi adaptada da equação 5.1.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot v \cdot J}{\mu}} \quad 5.16$$

Onde:

v: é a velocidade do líquido no canal ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

J: perda de carga unitária ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)

Para o cálculo da perda de carga unitária é utilizada a fórmula de Manning adaptada (equação 5.17).

$$J = \left(\frac{Q \cdot n}{A \cdot R_h^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad 5.17$$

Onde:

Q: vazão no canal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

n: coeficiente de rugosidade de Manning, que depende do material de revestimento das paredes do canal.

R_h : Raio hidráulico = área molhada/ perímetro molhado

5.2.1.2. Dimensionamento dos floculadores hidráulicos

Para o dimensionamento da unidade, adota-se o tempo de detenção, o número de câmaras e gradiente de velocidade em cada uma. O cálculo do volume é realizado pela equação 5.18.

$$V_f = Q \cdot \theta_h \quad 5.18$$

Onde:

Q: vazão (m^3/min)

θ_h : Tempo de detenção (min).

Com o volume é possível determinar a área superficial do floculador (equação 5.19), e a largura total, que será dividida pelo número de câmaras (equação 5.20)

$$A_s = \frac{V_f}{h} \quad 5.19$$

$$B_f = \frac{A_s}{B_d} \quad 5.20$$

Onde:

h: é a altura do floculador (m), valor adotado.

B_d : é a largura do decantador (determinado no respectivo dimensionamento)

Para o funcionamento do floculador hidráulico é necessário o uso de chicanas, que são paredes espaçadas e com aberturas alternadas para a passagem do líquido, podendo ser na horizontal ou vertical. A equação 5.21 determina o número de chicanas necessárias para atingir gradiente de velocidade desejado, e a equação 5.22 o espaçamento entre elas.

$$n = 0,045 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{a \cdot L \cdot G}{Q}\right)^2 \cdot \theta_h} \quad 5.21$$

$$e = \frac{L}{n} \quad 5.22$$

Sendo:

a: largura da câmara de floculação (m)

L: comprimento da câmara de floculação (m)

G: gradiente de velocidade adotado para a câmara de floculação (s^{-1})

A velocidade nos trechos retos e curvas de 180° são calculadas pelas equações 5.23 e 5.24 respectivamente.

$$V_1 = \frac{Q}{B_f \cdot e} \quad 5.23$$

$$V_2 = \frac{2}{3} V_1 \quad 5.24$$

5.2.1.3. Dimensionamento da unidade de sedimentação

Para o dimensionamento do decantador, adota-se a altura levando em consideração critérios técnicos, estruturais e construtivos. Com a altura, é possível determinar o seu volume encontrando a área superficial, que é calculado pela equação 5.25.

$$A_s = \frac{Q}{q} \quad 5.25$$

Onde:

Q: é a vazão em cada decantador (m^3/dia)

q: é a taxa de aplicação superficial ($m^3/m^2/\text{dia}$)

Com o volume, é possível determinar o tempo de detenção hidráulica, através da razão do volume pela vazão. A orientação da geometria do decantador é para que o seu

comprimento seja quatro vezes maior que sua largura, devido à trajetória dos flocos que apresenta deslocamento vertical e horizontal.

Após dimensionar o decantador, é necessário a verificação da velocidade horizontal do escoamento (equação 5.26) e o número de Reynolds (equação 5.27) que deve ser menor que 20.000. A ABNT (1992) recomenda que em estações com capacidade superior a 10.000 m³/dia a velocidade horizontal seja menor que 0,75 cm/s.

$$V_h = \frac{Q}{A_h} \quad 5.26$$

$$Re = \frac{V_h \cdot R_h}{\vartheta} \quad 5.27$$

Onde:

A_h : área da largura do decantador vezes a altura (m)

R_h : Raio hidráulico do decantador (m)

ϑ : Viscosidade cinemática do líquido (m²/s)

Por fim, calculam-se as calhas do líquido decantado, que são os dispositivos que irão recolher a vinhaça do decantador e destinar para o reservatório que terá capacidade de armazenamento de 5 horas. Para calcular a vazão por metro na calha, utiliza-se a equação 5.28.

$$q_l \leq 0,018 \cdot H \cdot q \quad 5.28$$

Sendo:

q_l : vazão por metro na calha (l/m/s)

H: altura do decantador (m)

q: taxa de aplicação superficial (m³/m²/dia)

O comprimento da calha é calculado pela equação 5.29. O comprimento recomendado máximo não deve ser maior que 20% do comprimento do decantador. Sendo assim, o resultado obtido pela equação 5.27 pode ser distribuído em mais de uma calha respeitando esse limite e considerando que existe fluxo de vinhaça em seus dois lados.

$$L_v = \frac{Q}{q_l} \quad 5.29$$

5.2.2. Lagoa de alta taxa

Para o dimensionamento da lagoa de alta taxa foi utilizado os critérios de dimensionamento de lagoas facultativas. O tempo de detenção e altura foram definidos de acordo com dados em literatura para o melhor rendimento.

O critério do tempo de detenção é utilizado para a verificação do projeto e se relaciona com o tempo necessário para a estabilização da matéria orgânica, ou seja, corresponde às atividades das bactérias no reator (VON SPERLING, 1996).

A equação 5.30 relaciona o tempo de detenção com o volume da lagoa de alta taxa, e com a altura definida é possível obter as dimensões da lagoa, respeitando suas configurações características e formatos.

$$\theta_l = \frac{V_l}{Q_{\text{médio}}} \quad 5.30$$

Onde:

θ_l : tempo de detenção da lagoa (dias)

$Q_{\text{médio}}$: Vazão média entre a vazão afluente e efluente (m^3/dia)

V_l : Volume da lagoa (m^3)

A vazão média é um valor obtido pela diferença da vazão de entrada pela de saída da lagoa. Na vazão de saída é considerado o efeito da precipitação, evaporação e infiltração.

- Cálculo da potência dos pedais giratórios

O pedal giratório é uma estrutura que possui um eixo com lâminas no sentido perpendicular ao fluxo de água na LAT, cujo objetivo é movimentação e mistura da coluna líquida. Para o seu funcionamento é necessário um motor elétrico, que é responsável pelo movimento do eixo de pás. Para a escolha do motor Borowitzka (2005) desenvolveu a fórmula 5.31, que determina sua potência.

$$Pot = \frac{Q\rho\Delta h}{102E} \quad 5.31$$

Onde:

P: Potência necessária (kW)

Q: Vazão que passa pelo canal ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)

ρ : Massa específica do líquido ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$)

Δh : Perda de carga no canal (m)

E: eficiência do pedal

5.2.3. Fotobiorreator

O critério utilizado para calcular o volume do fotobiorreator foi o tempo de detenção, equação 5.28, sendo este valor obtido em literatura. Determinado o volume, foi realizado um arranjo com tubos de acrílico com volume conhecido.

Para a alimentação de cada fotobiorreator, foram utilizadas bombas hidráulicas, escolhidas por catálogo, e com a perda de carga calculada pela fórmula de Hazen-Williams, equação 5.32.

$$\Delta h = \frac{L \cdot 10,641 \cdot Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,85}} \quad 5.32$$

Onde:

L: comprimento do tubo (m)

Q: vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

C: coeficiente que depende do material de fabricação do tubo e das condições de sua parede interna

D: diâmetro do tubo (m)

5.2.4. Extração do óleo (Liquefação Hidrotérmica)

No dimensionamento da unidade de extração do óleo foi utilizado um catálogo para a escolha de centrífuga industrial mais apropriada para a secagem da biomassa/líquido, necessário para atender a condição desejável de concentração de sólidos durante o processo de liquefação hidrotérmica.

As técnicas utilizadas para a LHT, em sua maioria consistem em reatores em bateladas, porém o sistema em estudo produz uma vazão elevada necessitando de um sistema industrial contínuo. O dimensionamento do sistema de LHT foi adaptado do estudo de Jazrawi et al. (2013).

5.2.5. Conversão

Para o processo de conversão do óleo em biodiesel foi utilizado processo de transesterificação em duas etapas (TDSP). Para o cálculo dos reatores químicos foi utilizado o método de dimensionamento de Fogler (2009).

A reação de transesterificação se enquadra no tipo de reações químicas não isotérmicas, ou seja, durante o processo reativo a temperatura não se mantém constante, ocorrendo troca de calor com o ambiente. Sendo assim, duas leis são aplicadas para o projeto dos reatores químicos, a lei do balanço molar e a lei do balanço de energia.

Para o cálculo do volume do reator químico utiliza-se a lei para do balanço molar. O reator utilizado no presente estudo é do tipo contínuo de tanque agitado (CSTR), e seu balanço molar é representado pela equação 5.33.

$$V = \frac{F_{J0} - F_J}{-r_J} \quad 5.33$$

Onde:

V: Volume do reator (dm³)

F_{J0}: vazão molar do reagente J que entra no sistema (mol. h⁻¹)

F_J: vazão molar de J após a conversão (mol.h⁻¹)

r_J: Velocidade de reação de J (mol J. dm⁻³.s⁻¹)

Pela equação 5.31 o volume de projeto de um CSTR é inversamente proporcional à velocidade de reação, que é o número de mols de J reagindo por unidade de tempo e de volume. A lei da velocidade depende da ordem da reação, que para reação de transesterificação é descrita pela equação 5.34.

$$-r_J = K_J C_J \quad 5.34$$

Sendo K_J a constante de velocidade da reação, que é um termo independente da concentração dos reagentes e C_J a concentração do reagente J.

A constante K_J depende principalmente da temperatura, e seu valor pode ser calculado pela equação de Arrhenius, verificada experimentalmente e considerada satisfatória para caracterizar a dependência da constante em uma ampla faixa de temperatura (FOGLER, 2009).

Com a equação 5.35 determina-se o tempo espacial, sendo uma razão do volume do reator com a vazão volumétrica de entrada.

$$\tau = \frac{V}{v_0} \quad 5.35$$

Onde:

V: Volume do reator (L)

τ: tempo espacial (h)

v_0 : vazão volumétrica de entrada ($L.h^{-1}$)

Determinado o volume do reator e suas dimensões, o próximo passo consiste em calcular o balanço de energia para determinar a taxa de energia transferida para o interior do reator e assim, qual a temperatura que o fluido na camisa de aquecimento deve possuir para manter a reação na temperatura ideal. A lei do balanço de energia está representada pela equação 5.34.

$$\dot{Q} - F_{A0}X [\Delta H_R(T_R) + \Delta \hat{C}_p(T - T_R)] = F_{A0}\sum \Theta_i \hat{C}_{pi}(T - T_{i0}) \quad 5.36$$

Onde:

$\dot{Q}$: Calor adicionado ao reator ($kJ.h^{-1}$)

F_{A0} : vazão molar do reagente A que entra no sistema ($mol.h^{-1}$)

X : conversão do reagente A

$\Delta H_R(T_R)$: Calor de reação na temperatura de referência ($kJ.Mol^{-1}$ de A) (obtido pela fórmula 5.35)

ΔC_p : Variação global do calor específico por mol de A reagido ($kJ.mol^{-1}$ de A $.K^{-1}$) (obtido pela fórmula 5.36)

Θ_i : Razão entre a vazão molar da espécie i que entra pela vazão molar de A que entra (obtido pela fórmula 5.37)

C_{pi} : Calor específico da espécie química i ($kJ.mol^{-1}K^{-1}$)

T : temperatura de reação (K)

$$\Delta H_R(T_R) = \frac{D}{A} H_D^0(T_R) + \frac{C}{A} H_C^0(T_R) - \frac{B}{A} H_B^0(T_R) - H_A^0(T_R) \quad 5.37$$

Onde:

A: Número de mols do primeiro reagente

B: Número de mols do segundo reagente

C: Número de mols do primeiro produto

D: Número de mols do segundo produto

$H_i^0(T_R)$: entalpia de formação da espécie química i ($kJ.mol^{-1}$)

$$\Delta C_p = \frac{D}{A} C_{pD} + \frac{C}{A} C_{pC} - \frac{B}{A} C_{pB} - C_{pA} \quad 5.38$$

Onde:

C_{pi} : Calor específico da espécie química i ($kJ.mol^{-1}K^{-1}$)

$$\theta_i = \frac{F_{i0}}{F_{A0}} \quad 5.39$$

Com o valor calor adicionado ao reator durante a reação, e utilizando leis da transferência de calor, utiliza-se a equação 5.40 para calcular temperatura do fluido de aquecimento.

$$\dot{Q} = UA(T_A - T) \quad 5.40$$

Onde:

U: Coeficiente global de transferência de calor ($\text{W.m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

T_a : Temperatura do líquido de aquecimento (K)

T: Temperatura de reação (K)

5.3. RESULTADOS

5.3.1. Memorial Descritivo

Para a produção de biodiesel foi utilizado dados de matéria-prima, obtidos em Santos (2013), sendo óleo de microalga do gênero *Chlorella*. Para o meio de cultivo foi utilizado a vinhaça, um resíduo líquido efluente da produção de etanol. Foram dimensionadas duas vias de produção utilizando a quantidade total de vinhaça gerada em uma usina sucroalcooleira na região norte do estado de São Paulo, que consiste em uma vazão de 540 m^3/hora .

A primeira linha de produção consiste nas seguintes unidades:

- Unidade de tratamento preliminar da vinhaça bruta
- Área de cultivo de microalgas em lagoas de alta taxa
- Unidade de extração do óleo por liquefação hidrotérmica
- Unidade de conversão do óleo em biodiesel

A primeira e a segunda linhas de produção diferem no sistema de cultivo utilizado:

- Unidade de tratamento preliminar da vinhaça
- Área de cultivo de microalgas com fotobiorreatores tubulares
- Unidade de extração do óleo por liquefação hidrotérmica
- Unidade de conversão do óleo em biodiesel

5.3.1.1 Unidade de tratamento preliminar

A unidade de tratamento preliminar da vinhaça se mantém igual para as duas linhas de produção. Devido à grande vazão de projeto (150 L/s) e os parâmetros que a vinhaça deve apresentar para o crescimento da biomassa, determinada por Santos (2013), foi selecionada a tecnologia de tratamento físico-químico. Os dados experimentais para o tratamento da vinhaça foi obtida em Lima (2013).

Para a utilização da vinhaça como meio de cultivo, dois aspectos devem ser observados: a correção do pH e a remoção de sólidos. A correção do pH é realizado com a adição de hidróxido de sódio (NaOH) e a remoção dos sólidos através de decantação. A unidade apresenta os seguintes processos:

I. Uma calha Parshall: medidor de vazão e dispositivo hidráulico para mistura rápida e coagulação.

II. Dois flocculadores hidráulicos: dispositivo para a flocculação com escoamento vertical através de chicanas, divididas em três compartimentos com gradientes hidráulicos decrescentes.

III. Dois decantadores retangulares convencionais em paralelo: unidade para decantação dos flocos por gravidade, contendo três calhas coletoras de água decantada no final.

A calha Parshall foi escolhida de acordo com a vazão de projeto de 150 L/s, que de acordo com a Tabela 5.1 possui garganta de 9". Com essa vazão, ocorre ressalto hidráulico do tipo fraco, com gradiente de velocidade de 1859 s^{-1} . Este valor encontra-se fora do intervalo recomendado pela ABNT (1992), porém não é obrigatório, e para o projeto foi observado o critério técnico e econômico. A aplicação do hidróxido de sódio foi realizado no canal de entrada da estação e a aplicação de coagulantes na saída da garganta da calha Parshall.

Santos (2013) determinou que o pH ideal para o cultivo das microalgas na vinhaça é de 9,2. A quantidade de NaOH necessária para corrigir o pH de 4,3 até o ideal foi determinada através de ensaio de laboratório, que resultou em 1,92 g por litro de vinhaça.

Para a coagulação foi utilizado o estudo de Lima (2013) que realizou experimento de coagulação em vinhaça com diferentes tipos de coagulantes. O escolhido foi o sulfato de alumínio por apresentar um custo de mercado menor que os outros, e apresenta remoção de sólidos adequada ao cultivo. Porém, a dosagem do sulfato é de 10 g/L de vinhaça, que totaliza um gasto diário de R\$ 11.067.840,00.

A água coagulada é conduzida ao flocculador por um canal de concreto liso, de dimensões internas de 0,03 m de base, 0,40 m de altura por 7,00 metros de comprimento.

O floculador foi dimensionado com um tempo de detenção de 30 minutos. Dividiu-se em três compartimentos de mesmo comprimento e área com dimensões de 2,50 m de largura, 6,00 m de comprimento e 3,00 m de altura. Cada um apresentando um tempo de detenção de 10 minutos, com gradientes de velocidade de 70 s^{-1} , 50 s^{-1} , e 20 s^{-1} com 57, 45 e 25 chicanas removíveis, e com espaçamento de 0,10, 0,13 e 0,24 m respectivamente. Os espaçamentos entre as chicanas e a largura do compartimento foram analisados a fim de garantir que a velocidade da vinhaça fique na faixa de 0,10 m/s e 0,30 m/s, velocidades que evitam a sedimentação dos flocos no floculador evitando, assim, a quebra de flocos já formados. O fundo do floculador possui uma inclinação de 1% para facilitar a limpeza e manutenção da unidade.

O decantador é a última unidade no tratamento preliminar da vinhaça, e é onde acontece a sedimentação dos flocos. O dimensionamento do decantador foi iniciado com a adoção do valor da taxa de aplicação superficial (TAS) de acordo com a ABNT (1992) e verificado tempo de detenção hidráulica (TDH) mínima de 2 horas, indicado por Di Bernardo e Sabogal-Paz (2009). A TAS adotada foi de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, e com uma vazão de 75 L/s (dois decantadores) a área superficial do decantador é de $162,00 \text{ m}^2$ com uma altura de 4,00 m. O TDH foi de 2,4 horas, e suas dimensões de 6,00 m de largura e 27,00 de comprimento, com uma velocidade horizontal de fluxo de 0,31 m/s.

A água decantada é captada por três calhas coletoras com 5,00 m de comprimento, 0,60 m de largura e 0,20 m de profundidade. As calhas estão instaladas no final do decantador encaminham a água decantada para um reservatório; seu comprimento respeita o comprimento máximo de 20% do comprimento do decantador.

O descarte do lodo é realizado por uma comporta localizada no final do canal de lodo, que apresenta dimensões de 1,00 m de largura com inclinação de 5%, com isso a altura de um lado é de 1,00 m e no lado da comporta de 1,30 m. A retirada do lodo é programada e realizada de forma mecânica, com raspadores de fundo, que a encaminha para o canal de lodo e ao final do ciclo, a comporta é aberta e destina-o para a unidade de tratamento específica.

5.3.1.2. Área de cultivo de microalgas em lagoas de alta taxa

O dimensionamento das lagoas de alta taxa considerou o tempo de detenção de três dias para o crescimento da biomassa e a colheita (SANTOS, 2013). Este valor foi obtido por Santos (2013) que realizou experimento com crescimento de microalgas para produção de biodiesel em vinhaça. Com a vazão de projeto de $540 \text{ m}^3/\text{h}$, o volume total requerido para lagoa é de 38.800 m^3 . Foi adotado 0,30 m de altura, esse valor tem como base ensaios

realizados por Couto (2016) na relação entre a altura da lâmina de água e a produção de biomassa.

Dado o volume da lagoa e sua altura, a área de ocupação é de 129.600 m² que foram distribuídas em oito lagoas com dimensões de 50,00 m de largura, 288,00 m de comprimento e meia circunferência em cada ponta de 25,00 m de raio. O volume de cada lagoa é de 4.909,05 m³ com um motor de 2,25 kW de potência, com isso, a lagoa atinge uma velocidade de 0,2 m/s e uma perda de carga de 0,026 m. A velocidade, de acordo com Abomohra et al. (2016), deve ser maior que 0,10 m/s para prevenir a estratificação térmica na lagoa e a sedimentação das microalgas.

Como não há relatos na literatura de dados experimentais de cultivo de microalgas em vinhaça por lagoas de alta taxa, foi realizada uma projeção com base no estudo de Santos (2013) que realizou o cultivo em fotobiorreatores. A relação utilizada para projeção dos dados, foi obtido em Raes et al. (2014) que comparou o rendimento de uma LAT e um fotobiorreator sob as mesmas condições. Com isso, a produtividade projetada para a lagoa de alta taxa do presente estudo é de 413,5 mg por litro de vinhaça, produzindo 223,29 kg/h de biomassa.

5.3.1.3. Área do cultivo de microalgas em fotobiorreatores

O fotobiorreator é construído pela junção de tubos acrílicos transparentes para favorecer a passagem de luz. Foi escolhido o diâmetro de 100 mm interno e 110 mm externo e 2,00 m de comprimento. Para volume total do fotobiorreator é utilizado toda vinhaça produzida, com o tempo de detenção ideal determinado por Santos (2013) de três dias, resultando em 38.880 m³.

Cada tubo utilizado para a construção do fotobiorreator possui volume de 15,7 L, com isso, o número total de tubos utilizados é de 2.476.434 unidades. Eles foram dispostos em 103 grupos, cada grupo com quatro fileiras com 300 tubos na horizontal e 20 níveis na vertical. As dimensões de cada fotobiorreator são de 600 metros de comprimento e 3,00 m de altura, com espaçamento entre as camadas de 0,05 m e entre as fileiras de 0,90 m.

Serão utilizadas 103 bombas centrífugas de 1,1 kW de potência para a alimentação, sendo uma bomba para cada fotobiorreator. A bomba foi escolhida através de catálogo de bombas hidráulicas para vazão de 5,24 m³/h e uma altura piezométrica de 26,40 m. Para o cálculo da altura piezométrica foi considerado a perda de carga distribuída e a altura geométrica.

A alimentação ocorre na parte superior do fotobiorreator e a colheita na parte inferior, as ligações entre as fileiras e camadas são realizadas por ligações em U, sendo inicialmente ligadas as fileiras do mesmo nível e em seguida para a camada inferior. A velocidade do

líquido é de 0,15 m/s sendo maior que o necessário para evitar a sedimentação das microalgas.

O rendimento de produção de biomassa nos fotobiorreatores foi considerado de 772,00 mg por litro de vinhaça (SANTOS, 2013). Sendo assim, são produzidos 416,88 kg/h de biomassa por esse sistema.

5.3.1.4. Unidade de extração por Liquefação hidrotérmica

Para simular o processo de extração por LHT, é importante que a concentração biomassa/água esteja adequada. Para isso, foi considerada uma máquina centrífuga de fluxo contínuo, adaptada para microrganismos, com potência de 220 kW. De acordo com Jazrawi et al. (2013), a melhor concentração de biomassa/água é a razão de 10:1, porém por questões construtivas e de produção, a concentração utilizada para o presente estudo é de 1:1, com a temperatura de 350 °C e tempo de residência de 3 minutos.

Para a linha de produção que utiliza LAT como sistema de cultivo, após a centrifugação a vazão de concentrado de biomassa é de 230 L/h, que são reservados em um tanque sob pressão atmosférica. Esse concentrado é bombeado em duas etapas para o reator térmico, a primeira acontece com uma bomba de baixa pressão, que é responsável por fornecer pressão necessária de sucção até a segunda bomba de alta pressão.

No primeiro bombeamento são utilizadas três bombas de baixa pressão em paralelo, que alimentam duas bombas de alta pressão com vazão de 90 L/h e uma bomba de alta pressão com vazão de 50 L/h. Antes de chegar ao reator o concentrado bombeado passa por dois trocadores de calor, ocorrendo um pré-aquecimento pelo efluente do reator.

São necessários três reatores, cada um composto por quatro espirais feitas em aço inoxidável com diâmetro externo de 9,5 mm e paredes de 1,65 mm, com comprimento de 19,70 m cada. As espirais por onde passa o fluído, estão inseridas em um leito com cerca de 200 kg de alumina fluidizada por ar comprimido, e o aquecimento do leito é realizado por quatro resistores com potência de 6 kW.

O efluente passa pelo terceiro trocador de calor onde circula água de resfriamento e depois pelos dois trocadores de pré-aquecimento do afluente do reator. Após o resfriamento e a troca de calor, existe uma válvula de alívio para reduzir a pressão, atingindo pressão atmosférica. Por fim, as fases são separadas por decantação e os gases são liberados à atmosfera após passar por um filtro de carbono.

Para a linha de produção que utiliza o fotobiorreator, o concentrado de biomassa possui vazão de 430 L/h. As características de funcionamento são similares ao sistema de extração descrito para a vazão fornecida pela LAT. São incluídas duas bombas de baixa

pressão, duas de alta, sendo que a ultima funciona com uma nova vazão de 70 L/h, e por fim, mais dois reatores. Os comprimentos das espirais em que ocorre a reação são de 22,0 m.

Para quantificar os lipídios extraídos, foram utilizados dados obtidos por Santos (2013). Para a linha que utiliza a LAT foram obtidos 27,57 kg/h de óleo, e para o sistema com fotobiorreatores, 50,76 kg/h.

5.3.1.5. Unidade de conversão do óleo em biodiesel

A unidade de conversão de óleo foi projetada de acordo com a quantidade de óleo produzida pela biomassa. Foi considerada uma produção em fluxo contínuo com o processo de transesterificação em duas etapas (TDSP), modificado para o uso de etanol como reagente, proposto por Guzatto et al. (2012). O processo consiste nas seguintes etapas:

I. 1º reator químico CSTR: Acontece reação de transesterificação com a entrada do óleo, etanol e catalizador básico.

II. 2º reator químico CSTR: Onde ocorre a segunda reação de transesterificação com entrada do efluente do primeiro reator, adição de etanol e catalizador ácido.

III. 1º trocador de calor: Onde ocorre a troca de calor dos produtos formados no segundo reator com um líquido de resfriamento, necessário para a decantação.

IV. Decantador: onde ocorre a separação entre o biodiesel e o glicerol formado pela transesterificação. O biodiesel concentra-se na parte superior e o glicerol na parte inferior do decantador.

V. 2º trocador de calor: Nesse dispositivo o biodiesel irá aumentar sua temperatura com a troca de calor com um líquido mais quente, auxiliando a entrada no evaporador.

VI. Evaporador: O evaporador escolhido é do tipo cesto, que funciona com transferência de calor e evaporação. É o dispositivo para a recuperação do etanol em excesso, ou seja, para a quantidade maior de etanol que não reagiu com o óleo para formar os produtos.

VII. 3º trocador de calor: Dispositivo onde ocorre a condensação do etanol evaporado.

VIII. Filtro: Ocorre a limpeza do biodiesel.

IX. Tanques de armazenamento de produtos e reagentes: tanques para a reserva de 5 horas de produtos e reagentes.

Para o projeto dos reatores, foram utilizados os dados de tempo espacial e relações molares dos reagentes e catalizadores (etanol:óleo:catalizador) do estudo de Guzatto et al. (2012). Para o primeiro reator o tempo de reação espacial é de 0,5 horas com uma relação molar de 10:1:0,094, sendo utilizado o hidróxido de potássio como catalizador. O segundo

reator reage por 1 hora, com relação molar de 15:1:0,19 e é utilizado o ácido sulfúrico como catalizador.

Para o sistema por LAT, a entrada de óleo é de 27,54 kg/h. O primeiro reator apresenta um volume de projeto de 23,83 litros e dimensões de 0,31 m de diâmetro, e 0,315 m de altura. São posicionados quatro defletores nas paredes, com espessura de 31 mm e um agitador mecânico digital com potência de 186 W. O reator é revestido por uma camisa de aquecimento com espaçamento interno de 5,00 cm água a temperatura de 81 °C.

O segundo reator apresenta volume de 57,35 litros, com 0,42 m de diâmetro, 0,415 m de altura. A espessura dos defletores é de 42 mm e a mistura é realizada com um agitador mecânico digital com potência de 186 W. A camisa de aquecimento possui espaçamento de 5,00 cm com a parede do reator e a água de circulação apresenta temperatura de 74 °C.

Utilizando o fotobiorreator para o cultivo, a quantidade de óleo é de 50,76 kg/h. Com isso, o primeiro reator apresenta volume de 43,88 litros, 0,38 m de diâmetro, 0,38 m de altura, defletores com espessura de 38 mm e agitador mecânico digital de 186 W de potência. O aquecimento na camisa é realizado por água a 85 °C.

O segundo reator apresenta volume de 106 litros, 0,51 m de diâmetro, 0,515 m de altura, defletores com espessura de 51 mm e agitador mecânico digital de 186 W de potência. A água de aquecimento apresenta temperatura de 76 °C.

O evaporador consiste em um tanque preenchido com óleo térmico aquecido por três cintas elétricas de 2 kW, com três cestos chicanados, no cesto superior ocorre a passagem do biodiesel e nos dois inferiores a passagem do glicerol. Os vapores do etanol chegam ao terceiro trocador de calor, com uma serpentina de refrigeração por água, onde ocorre à condensação e recuperação do etanol. Esse modelo de decantador foi obtido no estudo de Guzzatto (2010).

A produção de biodiesel é de 22,05 kg/h e 40,60 kg/h para o sistema com as LAT e fotobiorreatores, respectivamente.

5.3.2. Memorial de cálculo

5.3.2.1. Dimensionamento calha Parshall e mistura rápida

Para a vazão de 0,150 m³/s foi selecionada a calha com uma garganta de $w = 9''$ e de suas dimensões de acordo com a Tabela 5.1. A Figura 5.2 ilustra a configuração da calha Parshall adotada no projeto.

Cálculo da lâmina líquida:

Para o cálculo da altura da lâmina líquida foi utilizada a equação 5.2.

$$h_a = \sqrt[1,530]{\frac{0,15}{0,535}} = 0,435 \text{ m}$$

Figura 5.2 - Dimensões da calha Parshall utilizada no projeto

Fonte: Autor

Cálculo da largura na sessão de medida:

Utilizando a equação 5.3 encontra-se o valor da largura na sessão de medida de vazão da calha Parshall.

$$D' = \frac{2}{3}(0,575 - 0,229) + 0,229 = 0,4596 \text{ m}$$

Cálculo da velocidade do líquido na sessão de medida e energia total disponível:

A velocidade do líquido é obtida pela equação 5.4 e seu resultado é necessário para o cálculo da energia total disponível pela equação 5.5.

$$V_a = \frac{0,15}{0,4596 \times 0,435} = 0,75 \text{ m/s}$$

$$E_a = 0,435 + \frac{0,75^2}{2 \times 9,81} + 0,114 = 0,577 \text{ m}$$

Cálculo do ângulo fictício Θ :

O cosseno do ângulo fictício é calculado pela equação 5.6.

$$\cos(\theta) = -\frac{9,81 \times 0,15}{0,229 \times (0,67 \times 9,81 \times 0,577)^{3/2}} = -0,870$$

Aplicando a função arccos, tem-se que $\theta = 150,45^\circ$.

Características do ressalto hidráulico:

Com a equação 5.7 obtém-se o valor da velocidade no início do ressalto, aplicando a velocidade V_1 na equação 5.8 determina-se a altura do líquido (y_1). Para verificar o ressalto, calcula-se o número de Froude pela equação 5.9 e com equação 5.10 determina-se a altura conjugada do ressalto.

$$V_1 = 2 \cos\left(\frac{150,45}{3}\right) \cdot \left(\frac{2 \times 9,81 \times 0,577}{3}\right)^{1/2} = 2,48 \text{ m/s}$$

$$y_1 = 0,577 - \frac{2,48^2}{2 \times 9,81} = 0,26 \text{ m}$$

$$Fr_1 = \frac{2,48}{\sqrt{9,81 \times 0,26}} = 1,55$$

$$y_3 = \frac{0,26}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \times 1,55^2} - 1 \right) = 0,455 \text{ m}$$

Assim, ressalto hidráulico é do tipo fraco, com altura conjugada de 0,455 m.

Para as características do trecho divergente, tendo a altura do ressalto calcula-se a profundidade da lâmina líquida (equação 5.11), e a velocidade de saída (equação 5.12). A perda de carga é calculada pela equação 5.13.

$$y_2 = 0,455 - 0,114 + 0,076 = 0,417 \text{ m}$$

$$V_2 = \frac{0,15}{0,417 \times 0,38} = 0,946 \text{ m/s}$$

$$\Delta H = (0,435 + 0,114) - 0,455 = 0,094 \text{ m}$$

Cálculo do tempo de residência médio no trecho divergente:

Para o cálculo do gradiente de velocidade, o tempo de residência médio no trecho divergente é obtido pela equação 5.14.

$$\theta_h = \frac{0,457}{\left(\frac{2,48+0,946}{2}\right)} = 0,266 \text{ s}$$

Determinado a perda de carga do ressalto e tempo de residência médio, o valor do gradiente de velocidade é obtido pela equação 5.1.

$$G = \sqrt{\frac{9810 \times 0,094}{1,003 \cdot 10^{-3} \times 0,266}} = 1.859 \text{ s}^{-1}$$

Segundo a norma ABNT (1992) as condições ideais de gradiente de velocidade, tempo de mistura e concentração da solução devem ser determinadas em laboratório.

Se não for possível a realização de ensaio, a ABNT (1992) orienta que a dispersão utilizando coagulantes metálicos hidrolisáveis deve ser realizada com gradientes de velocidade entre 700 s^{-1} e 1100 s^{-1} , com um tempo de mistura menor que 5 segundos.

O gradiente de velocidade calculado compreendeu-se em um valor maior ao recomendado pela ABNT (1992), o qual deve estar contido no intervalo entre 700 s^{-1} e 1100 s^{-1} . Com isso, foi realizado os cálculos para calha com garganta de 1' e 2', que apresentaram gradiente de 1609 s^{-1} e 1601 s^{-1} , respectivamente. O critério para a escolha da calha Parshall adequada foi o técnico-econômico, visto que, a calha de 2' ocorre um aumento de 100% no preço e apenas 13,87% de redução no gradiente de velocidade, sendo a calha de 9" escolhida para o projeto.

Considerações relativas ao coagulante:

O estudo realizado por Lima (2013) analisou o uso de três coagulantes para o uso em vinhaça: Sulfato de alumínio, cloreto férrico e óxido de cálcio. A tabela 5.3 resume os resultados de remoção de turbidez e a dosagem utilizada dos três coagulantes testados.

Tabela 5.5 – Porcentagem de remoção de cor, turbidez, DQO, DBO e faixa de dosagem de agentes coagulantes.

Coagulantes	% de Remoção				Faixa de dosagem (gL^{-1})
	Cor	Turbidez	DQO	DBO	
Sulfato de Alumínio	98,93	99,05	38,18	55,03	10-12
Cloreto Férrico	97,90	99,18	45,03	69,32	11-12
Óxido de Cálcio	97,80	99,35	37,39	60,58	9-12

Legenda – Demanda Química de oxigênio (DQO); Demanda Biológica de oxigênio (DBO). Fonte: Lima (2013).

Os coagulantes testados apresentaram resultados satisfatórios para o cultivo de microalgas. O sulfato de alumínio foi escolhido por apresentar menores custos em comparação com o cloreto férrico e o óxido de cálcio afeta o pH do meio.

De acordo com orçamento fornecido por Schiavo⁵ o preço de 500g de sulfato de alumínio custa R\$ 42,70. Utilizando a dosagem de 10 g/L com um volume diário de 12.960 m³ de vinhaça, o montante diário gasto com a aquisição do coagulante é de R\$ 11.067.840,00.

Levando em consideração que a produção diária de biodiesel é de 592,2 kg utilizando lagoas de alta taxa para o cultivo, o valor unitário do biodiesel, apenas levando em consideração o custo do coagulante, é de R\$ 20.914,28. Para o cultivo realizado por fotobiorreatores, com uma produção diária de 974,4 kg de biodiesel, o custo unitário é de R\$ 11.358,62.

Esses dois valores de custo unitário inviabilizam o processo do ponto de vista econômico. Considerando que um valor competitivo de mercado para o custo de produção é de R\$ 2,50, conversão do óleo em biodiesel de 100%, e que o teor de lipídio das microalgas seja de 80% da base seca, a produtividade de biomassa deve ser de 427 g por litro de vinhaça. Esse valor é 1032 vezes maior que o da produtividade projetada para lagoas de alta taxa e 553 vezes maior que a produtividade obtida nos ensaios de Santos (2013) para microalgas cultivadas na vinhaça.

No entanto, os valores de conversão e teor de lipídio para projetar a produtividade necessária não são atingíveis, e mesmo se possível, resulta numa pasta com relação biomassa/água de 1:2,4. Nessas condições de meio de cultivo, questões ligadas à engenharia do processo apresentariam dificuldades, como o simples bombeamento e escoamento pelos tubos e canais, além de questões biológicas envolvidas para o crescimento da biomassa.

5.3.2.2. Dimensionamento do canal de vinhaça coagulada:

Hipóteses iniciais:

Velocidade $V_c = 1,25$ m/s

Profundidade da lâmina d'água $h = 0,30$ m

Canal de concreto $n = 0,014$

⁵ SCHIAVO, D. I. **Grupo LAC – Artigos para laboratório**. Informação obtida por e-mail danilo@grupolac.com.br em 06 de Set. 2016.

Com o valor da vazão de projeto igual a 150 L/s, a velocidade e a altura da lâmina líquida, pela equação 5.15.

$$b = \frac{0,15}{1,25 \times 0,4} = 0,3 \text{ m}$$

Portanto, o canal apresenta dimensões hidráulicas de 0,40 m de largura, 0,30 m de altura e 13,00 m de comprimento, área molhada de 0,12 m² e raio hidráulico de 0,12 m.

A perda de carga é calculada pela equação 5.17.

$$J = \left(\frac{0,15 \times 0,014}{0,12 \cdot 0,12^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = 5,17 \times 10^{-3} \text{ m/m}$$

Com os dados necessários e a equação 5.16 calcula-se o gradiente de velocidade.

$$G = \sqrt{\frac{9810 \cdot 1,25 \cdot 0,00517}{1,003 \cdot 10^{-3}}} = 251,5 \text{ s}^{-1}$$

5.3.2.2. Dimensionamento dos flocladores hidráulicos

Tempo de decantação: 30 minutos

Número de câmaras: 3 câmaras

Número de flocladores: 2 unidades

Gradiente de velocidade: 20 s⁻¹, 50 s⁻¹ e 70 s⁻¹

Profundidade: 3,0 metros

Largura do Decantador: 6 metros

Cálculo do Volume do Floclador

Como serão utilizados dois flocladores no tratamento da vinhaça a vazão de projeto que sai da calha Parshall será distribuída igual. Cada floclador receberá 0,075 m³/s de vinhaça.

Com a equação 5.18 determina-se o volume total do floclador

$$V_f = 0,075 \cdot 30 \cdot 60 = 135 \text{ m}^3$$

Cálculo da Área superficial do floclador

Para o cálculo da área superficial usou-se a equação 5.19.

$$A_s = \frac{V_f}{h} = \frac{135}{3} = 45 \text{ m}^2$$

Cálculo da Largura do Floculador

Como hipótese de projeto admitiu-se que a decantação será realizada em dois tanques com largura total de 12 metros, sendo assim, cada floculador alimentará um decantador, com dimensão de 6 metros. Com a equação 5.20 determina a largura total do floculador.

$$B_f = \frac{A_s}{B_d} = \frac{45}{6} = 7,5 \text{ m}$$

Cada floculador possuirá largura igual a 2,5 m.

O número de espaçamentos em cada compartimento é calculado com um tempo de detenção de 10 min e gradiente de velocidade respectivo, e é calculado pela equação 5.21.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados do número de espaçamentos em cada um dos trechos do floculador, a distância entre as chicanas (equação 5.22) a velocidade nos trechos retos e em curva (equação 5.23).

Tabela 5.4: Características construtivas e hidráulicas dos compartimentos do floculador.

Trecho	G (s ⁻¹)	n°	e (m)	V ₁ (m/s)	V ₂ (m/s)
1	70	57	0,105	0,285	0,190
2	50	45	0,130	0,231	0,154
3	20	25	0,240	0,125	0,083

5.3.2.3. Dimensionamento das unidades de sedimentação

Hipóteses iniciais:

Vazão: 0,159 m³/s

q = 40 m/dia

Número de decantadores: 2

H = 4 m

Cálculo da área superficial do decantador:

A taxa de aplicação superficial utilizada é de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, valor esse, recomendado pela ABNT (1992) caso não seja possível sua determinação por ensaios laboratoriais. Como a unidade de tratamento possui dois decantadores, a vazão é dividida igualmente entre os dois. A área superficial do decantador é calculada pela equação 5.25.

$$A_s = \frac{6480}{40} = 162 \text{ m}^2$$

Verificação do tempo de decantação hidráulico:

O tempo de decantação é o tempo que um elemento infinitesimal de fluído leva para ir do ponto de entrada do decantador até o ponto de saída. Ele é calculado pela razão do volume do decantador e a vazão que entra.

$$\theta_h = \frac{V_{dec}}{Q} = \frac{162 \cdot 4}{0,075 \cdot 3600} = 2,4 \text{ horas}$$

Definição da geometria do decantador

Seguindo o critério de que o comprimento seja maior ou igual a quatro vezes a largura do fotobiorreator, com a área obtém-se:

$$B = 6,36 \sim 6 \text{ m}$$

$$L = 27 \text{ m}$$

Cálculo da Velocidade horizontal e número de Reynolds:

Os cálculos da velocidade e do número de Reynolds servem para verificação do decantador. São utilizadas as equações 5.26 e 5.27 para os respectivos cálculos.

$$V_h = \frac{0,075}{4 \cdot 6} = 0,312 \text{ cm/s}$$

$$Re = \frac{3,12 \cdot 10^{-3} \cdot 1,71}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 5343$$

Dimensionamento das calhas de coleta de água decantada

Por fim, utilizou-se a equação 5.28 para determinar a vazão linear que a calha deve possuir e utilizada para determinar o comprimento total (equação 5.29).

$$q_l \leq 0,018 \cdot 4 \cdot 40 = 2,88 \text{ l/m/s}$$

$$q_{ladotado} = 2,5 \text{ l/m/s}$$

$$L_v = \frac{75}{2,5} = 30,0 \text{ m}$$

Admitindo que o comprimento da calha de coleta de água não exceda 20% do comprimento do decantador, seu comprimento máximo é de 5,4 m. Para atender a vazão linear adotada, são necessárias três calhas com comprimento de 5,0; 0,6 de largura e 0,2 de profundidade, com espaçamento de 2,0 entre elas.

5.3.2.4. Dimensionamento da lagoa de alta taxa

Para a determinação do volume necessário da lagoa de alta taxa, utilizou-se a equação 5.30. A vazão média foi considerada como sendo 540 m³/h (considerando que o volume precipitado é igual às perdas por evaporação e infiltração) e o tempo de detenção adotado foi de três dias. Esse valor tem como base o tempo de crescimento da biomassa para a colheita em ensaios realizados por Santos (2013) utilizando a vinhaça como meio de cultivo em fotobiorreatores.

$$V_l = 3 \times 540 \times 24 = 38.880 \text{ m}^3$$

Para o projeto da LAT, foi admitida uma lagoa com 0,30 m de altura (altura da lâmina líquida) esse valor foi obtido no estudo de Couto (2016) com 288,00 m de comprimento, 50,00 m de largura, divida no meio em cada ponta uma semicircunferência de 25,00 metros de raio.

O volume de cada LAT é de 4.909,05 m³. Portanto, são necessárias 8 lagoas com essas dimensões.

Para o cálculo dos pedais giratórios foi considerado que o mesmo deve fornecer uma velocidade de 0,2 m/s. Utilizando a equação 5.16 para determinar a perda de carga unitária, a potência do motor necessário é calculada pela equação 5.31.

$$J = \left(\frac{0,2 \cdot 0,014}{0,29^3} \right)^2 = 4,03 \cdot 10^{-5} \text{ m/m}$$

O comprimento médio do canal é de 654,54 m, com isso a perda de carga é de 0,026 m. A eficiência do motor recomendado é de 0,17 segundo Borowitka (2005).

$$Pot = \frac{1,5 \times 1000 \times 0,026}{102 \times 0,17} = 2,25 \text{ kW}$$

5.3.2.5. Dimensionamento do fotobiorreator

Para o dimensionamento do fotobiorreator tem-se que o tempo de crescimento das microalgas é de três dias (SANTOS, 2013), e a vazão de vinhaça produzida pela usina é de 540 m³/hora. O fotobiorreator funciona em fluxo contínuo construídos em tubos de material acrílico transparente com diâmetro externo de 110 mm e diâmetro interno de 100 mm com comprimento de 2 metros, resultando num volume interno de 15,70 litros.

O volume de vinhaça necessário para os três dias de crescimento das microalgas correspondem a 38.880 m³, sendo necessário 2.476.434 tubos. O fotobiorreator será configurado com segue: 412 fileiras na horizontal com 20 camadas na vertical.

Para a alimentação será utilizada uma bomba para abastecer quatro fileiras, totalizando 24.000 tubos, com comprimento de 48.000 metros. A entrada ocorre pela camada superior, localizada a 3 metros de altura, e prosseguindo para os demais.

Para o cálculo da bomba necessária, foi utilizada a formula de Hazen-Willians (equação 5.32) com o coeficiente C de 135 (considerado plástico PVC com diâmetro 60 – 100 mm), para o cálculo da perda de carga distribuída e a perda de carga localizada foi desprezada.

$$\Delta h = 23,40 \text{ m}$$

A altura manométrica que a bomba deve superar é de 26,40 metros. Para isso, é utilizada uma bomba centrífuga com potência de 1,5 cv.

5.3.2.6. Dimensionamento da unidade de extração

Os parâmetros reacionais para a liquefação hidrotérmica foi obtida em Jazrawi et al. (2013), com tempo de residência de 3 minutos, relação biomassa/água de 1:10 e temperatura de 350 °C. Contudo, por motivos de viabilidade, foi admitida 1:1 a concentração de sólidos.

A quantidade de biomassa formada pelo sistema de lagoa de alta taxa é de 223,29 kg/h, logo, a quantidade de vinhaça para a LHT é de 223,29 kg/h. A vinhaça possui uma densidade de 1,03234 kg/L, com isso, o volume de concentrado de biomassa produzido por hora é de 230 litros.

A capacidade de vazão da bomba de alta pressão utilizada é de 90 L/h, sendo necessárias duas bombas operando em capacidade máxima e uma operando com 50 L/h.

Ao chegar ao conjunto de reatores, a vazão é distribuída igualmente entre três reatores (modelo obtido em Jazrawi et al. (2013)).

O reator é construído por quatro espirais de aço inox interligados, com diâmetro externo de 9,5 mm e paredes de 1,65 mm. Para calcular o comprimento de cada espiral que fornece o tempo de residência de 3 minutos, divide-se a vazão em cada reator pela área da seção transversal. Feito o cálculo, obtiveram-se a velocidade de 26,29 m/min, para o tempo de 3 minutos, o comprimento total é de 78,87 m. Como o reator é dividido em quatro espirais interligadas, cada uma apresenta comprimento de 19,70 m.

O mesmo cálculo é realizado para a quantidade de biomassa produzida pelo sistema de fotobiorreator. A vazão de concentrado de biomassa é de 430 L/h sendo necessário o uso de quatro bombas de alta pressão funcionando com capacidade de vazão máxima e uma a 70 L/h. São necessários cinco reatores, com as espirais com comprimento de 22,20 metros cada.

5.3.2.7. Dimensionamento da unidade de conversão do óleo em biodiesel

A princípio o volume dos reatores contínuos foi calculado pela equação 5.33 do balanço molar. A dificuldade consistiu na falta de ensaios laboratoriais para determinar os parâmetros reacionais e a cinética da reação.

Foram testados alguns valores de energia de ativação (E_a) e fatores pré-exponenciais (A), obtidos em revisão de literatura. Esses estudos realizaram ensaios cinéticos de reação para determinar esses parâmetros e assim poder calcular a velocidade da reação, porém, específico para óleo de girassol (DANTAS, 2006) e óleo de soja (VIOMAR, 2013) e condições de reações específicas.

Com A de $2,19 \times 10^4$, E_a de $67,87 \times 10^3$ J/mol, temperatura de 65 °C e vazão de óleo de 50,76 kg/h, o volume do reator obtido foi de 22,63 m³. Esse valor apresenta um tempo espacial maior que 10 dias, incoerente com estudos de transesterificação que indicam tempo de reação de 1 a 5 horas em geral (AVHAD; MARCHETTI, 2015)

Foram testados outros valores para A e E_a , obtidos em Viomar (2013), que resultou em um volume de 1,13 m³ com um tempo espacial de aproximadamente 12 horas, ainda grande para a produção em grande escala.

Como visto, os parâmetros cinéticos da reação tem grande sensibilidade para o cálculo do volume de reatores químicos, pois o balanço molar do reator CSTR depende da velocidade de reação e qualquer mudança nos valores da energia de ativação influência de maneira exponencial o resultado final. Como não foi possível realizar ensaios cinéticos, a

solução para determinar o volume dos reatores foi baseando-se no tempo de reação e a vazão volumétrica de entrada (equação 5.35).

Foram utilizado dados do tempo de reação e relações molares de Guzzatto et al. (2012). A reação ocorre em duas etapas: no primeiro reator, com a presença de catalizador básico e no segundo, com catalizador ácido. A limitação desse método de cálculo consiste que os experimentos realizados pelo autor foram em reatores em bateladas, e para o presente estudo são reatores contínuos.

Um parâmetro importante em uma reação química é a conversão dos reagentes nos produtos. Foi adotado um valor de conversão de 80%, valor que baseado na prática de conversão de óleo em biodiesel em unidades industriais, além dos estudos de transesterificação utilizando óleo de microalgas, indicado na Tabela 5.4.

Tabela 5.5: Conversão do óleo de microalgas em biodiesel

Espécie	Álcool	Conversão	Autor
<i>Nannochloropsis salina</i>	Metanol	100,0%	Silva et al. (2014)
<i>Nannochloropsis gaditana</i>	Metanol	71,00%	López et al. (2016)
<i>Chlorella protothecoides</i>	Metanol	90,80%	Nan et al. (2015)
<i>Chlorella protothecoides</i>	Etanol	87,80%	Nan et al. (2015)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Metanol	80,00%	Tran et al. (2013)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Metanol	79,50%	Nautiyal, Subramanian e Dastidar (2014)
<i>Spirulina platensis</i>	Metanol	74,60%	Nautiyal, Subramanian e Dastidar (2014)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Metanol	95,00%	Lam e Lee (2013)
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Metanol	73,00%	Valasquez-Ortega, Lee e Harvey (2013)
<i>Chlorella sp.</i>	Metanol	92,00%	Valasquez-Ortega, Lee e Harvey (2013)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Etanol	67,00%	Reddy et al. (2014)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Metanol	96,90%	Valasquez-Ortega, Lee e Harvey (2012)
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Metanol	94,87%	Dong et al. (2013)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Metanol	95,00%	Li et al. (2011)
<i>Chlorella protothecoides</i>	Metanol	95,50%	Liu et al. (2015)
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Metanol	92,00%	Teo et al. (2014)

O tempo de reação no primeiro reator é de 30 minutos com relação molar de um mol de óleo para 10,00 mols de etanol e 0,094 de hidróxido de potássio (KOH). No segundo reator, o tempo de reação é de 60 min e a cada mol de óleo são utilizados 15,00 mols de etanol e 0,19 de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Para realizar os cálculos foram necessários dados dos compostos químicos, que foram resumidos na Tabela 5.5. No balanço de energia, foi admitida uma conversão global de 80%, foi considerado 40% da conversão no primeiro reator e 40% no segundo.

Tabela 5.6 – Propriedades dos compostos químicos necessários para o balanço molar e balanço de energia

Composto	Massa Molar (g/mol)	Densidade (kg/L)	Calor específico (kJ/mol K)	Entalpia de formação (kJ/mol)
Óleo	854,00	0,960 ^a	1,637 ^a	-1906,05 ^b
Etanol	46,06	0,789 ^a	0,112 ^a	-277,60 ^a
Biodiesel	292,30	-	0,560 ^a	-260,43 ^b
Glicerol	92,09	-	0,213 ^a	-665,90 ^b
KOH	56,10	2,120 ^a	0,065 ^a	-
H ₂ SO ₄	98,08	1,840 ^a	0,139 ^a	-

Fontes: ^a Perry, Green e Maloney (1997); ^b Costa (2009)

A. Utilizando o fluxo de óleo de 27,57 kg/h (Via Lagoas de alta taxa)

Para o primeiro reator a vazão volumétrica de entrada dos reagentes e catalizador são calculadas pela relação molar.

Óleo: 28,71 L/h

Etanol: 18,86 L/h

KOH: 0,08 L/h

Logo o $v_0 = 45,65$ L/h

Aplicando a equação 5.35 para o tempo espacial de 0,5 h, o volume do reator é de 23,85 L.

$$V = 0,5 \times 45,65 = 23,85 \text{ L}$$

É recomendado que a altura do reator CSTR por seu diâmetro possua uma razão igual a um. Adotando um diâmetro de 0,31 m e isolando a altura na fórmula do volume, encontra-se 0,315 m. Portanto, o reator apresenta uma área de contato externo de 0,333 m².

Para o balanço energia, calcula-se o calor de reação na temperatura de referência de 25 °C, pela equação 5.37 e dados da Tabela 5.5.

$$\Delta H_R(T_R) = 3(-260,43) + 1(-665,9) - 3(-277,6) - 1(-1906,05)$$

$$\Delta H_R(T_R) = 1.291,66 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

A variação global do calor específico é calculada pela equação 5.38 e dados da tabela 5.5.

$$\Delta C_p = 3(0,560) + 1(0,213) - 1(1,637) - 3(0,112)$$

$$\Delta C_p = -0,08 \frac{kJ}{mol.K}$$

Utilizando a equação 5.36 obtém-se o calor adicionado no reator.

$$\dot{Q} = 32,28 \times 0,4 [1291,66 - 0,08(65 - 25)] = 32,28 \times (2,763 \times (65 - 25))$$

$$\dot{Q} = 20.242,91 \frac{kJ}{h} = 5.623,0 W$$

Para determinar a temperatura da água de aquecimento na camisa, utiliza-se a equação 5.40.

$$5623 = 1000 \times 0,333(T_A - 65)$$

$$T_A = 81 ^\circ C$$

Considerando que o aquecimento da água é feito por resistores elétricos e o sistema de transferência de calor é isolado, apenas ocorreu troca de calor entre a camisa de aquecimento e o interior do reator. A resistência elétrica necessária apresenta potência de 6.000 W.

No segundo reator as vazões volumétricas são de:

Óleo: 28,71 L/h

Etanol: 28,30 L/h

H₂SO₄: 0,34 L/h

v_o: 57,35 L/h

Aplicando a equação 5.35 e tempo espacial de 1 h, o volume do reator é de 57,35 L, com 0,42 m de diâmetro e 0,415 m de altura.

Utilizando a equação 5.36 obtém-se o calor adicionado no reator de 5.829,98 W e através da equação 5.40, a temperatura da água é de 74 °C aquecida com resistores elétricos de 6.000 W.

B. Utilizando o fluxo de óleo de 50,76 kg/h (Via Fotobiorreator)

Para o primeiro reator a vazão volumétrica de entrada dos reagentes e catalizador são calculadas pela relação molar.

Óleo: 52,88 L/h

Etanol: 34,74 L/h

KOH: 0,15 L/h

$v_0 = 87,76$ L/h

Aplicando a equação 5.35 para o tempo espacial de 0,5 h, o volume do reator é de 43,88 L, com 0,38m de diâmetro e 0,38 m de altura.

Para o balanço de energia, o calor de reação na temperatura de referência de 25 °C, pela equação 5.37 é de 1.291,66 kJ/mol. A variação global do calor específico é calculada pela equação 5.38 e dados da tabela 5.6. é de -0,08 kJ/mol.K.

Utilizando a equação 5.36 obtém-se o calor adicionado no reator de 10.354,2 W e através da equação 5.40, a temperatura da água é de 85 °C aquecida com resistores elétricos de 11.500 W.

No segundo reator as vazões volumétricas são de:

Óleo: 52,88 L/h

Etanol: 52,10 L/h

H₂SO₄: 0,61 L/h

v_0 : 106 L/h

Aplicando a equação 5.35 e tempo espacial de 1 h, o volume do reator é de 106,0 L, com 0,51m de diâmetro e 0,515 m de altura.

Utilizando a equação 5.36 obtém-se o calor adicionado no reator de 10.735,25 W e através da equação 5.40, a temperatura da água é de 76 °C aquecida com resistores elétricos de 11.500 W.

5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o dimensionamento preliminar, pode-se observar uma maior produção de biodiesel pelo sistema utilizando os fotobiorreatores para o cultivo, com uma produção diária de 974,4 kg de biodiesel contra 529,2 kg com o sistema de lagoas de alta taxa. Esse resultado é explicado pela maior produtividade de biomassa produzida em fotobiorreatores, devido ao maior controle da cultura que no sistema aberto.

Algumas simplificações de cálculo foram realizadas no dimensionamento dos sistemas, como o cálculo do volume dos reatores, do coeficiente global de transferência de

calor, e a relação biomassa/água na liquefação hidrotérmica. Essas restrições foram necessárias e confere ao projeto caráter preliminar, devendo ser realizados ensaios específicos para um detalhamento completo.

Apesar das restrições, o sistema de produção de biodiesel proposto pelo presente estudo apresenta-se inviável do ponto de vista econômico. A integração com usina sucroalcooleira e o uso da vinhaça para o cultivo de microalgas, necessita de um tratamento preliminar. A tecnologia empregada utiliza-se de grande quantidade de sulfato de alumínio como coagulante, gerando um custo diário de R\$ 11.067.840,00, valor inviável para a quantidade de biodiesel gerado, tanto pelo sistema de lagoas de alta taxa como por fotobiorreatores.

A solução não é apenas otimização da produtividade das microalgas, mas encontrar uma tecnologia de tratamento de vinhaça capaz de tratar volumes grandes com baixo custo. Além da etapa do coagulante, deve ser projetada uma tecnologia maior e mais adequada para a unidade de liquefação hidrotérmica, que possa atender as necessidades da reação.

Apesar das problemáticas encontradas, a importância do dimensionamento foi encontrar esses pontos, evidenciando-os para que pesquisas futuras concentrem esforços para solucioná-los, contribuindo assim com a evolução e busca pela viabilidade do processo.

5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-RAOUF, N.; AL-HOMIDAN, A. A.; IBRAHEEM, I. B. M. Microalgae and wastewater treatment. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 19, n. 3, p. 257–275, jul. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9826**: Medição de vazão de líquido em canais abertos - Calhas Parshall e SANIIRI. Rio de Janeiro, 2008. 25 p.

ABOMOHR, A. E.-F.; JIN, W.; TU, R.; HAN, S.-F.; EID, M.; ELADEL, H. Microalgal biomass production as a sustainable feedstock for biodiesel: Current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 596–606, out. 2016.

AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 696–718, out. 2015.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

BOROWITZKA, M.A. Culturing microalgae in outdoor ponds. In: ANDERSEN I. A. (ed). **Algal culturing Techniques**. Nova Iorque: Elsevier; 2005. p. 205–218.

CLARENS, A. F.; RESURRECCION, E. P.; WHITE, M. A.; COLOSI, L. M. Environmental Life Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 5, p. 1813–1819, mar. 2010.

COSTA, R. A. B. **Estudo das eficiências de operação e consumo de energia em plantas de produção de biodiesel**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em engenharia química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

COUTO, E. A. **Produção de biomassa em lagoas de alta taxa com diferentes profundidades e seu aproveitamento para geração de energia via liquefação hidrotérmica**. 2016. 219 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

DANTAS, H. J. **Estudo termoanalítico, cinético e reológico de biodiesel derivado de óleo de algodão (*Gossypium hirsutum*)**. 2006. 105f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em química, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL-PAZ, L. P.. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. v.01. São Carlos: Ldibe, 2008. 878 p.

DONG, T.; WANG, J.; MIAO, C.; ZHENG, Y.; CHEN, S. Two-step in situ biodiesel production from microalgae with high free fatty acid content. **Bioresource Technology**, v. 136, p. 8–15, maio 2013.

FOGLER, H. S. **Elementos de engenharia das reações químicas**. Tradução Verônica Calado, Evaristo c. Biscaia Jr. Revisão técnica Frederico W. Tavares. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009, 853 f.

GUZZATTO, R.; DEFFERRARI, D.; REIZNAUTT, Q. B.; CADORE, Í. R.; SAMIOS, D. Transesterification double step process modification for ethyl ester biodiesel production from vegetable and waste oils. **Fuel**, v. 92, n. 1, p. 197–203, fev. 2012.

JAZRAWI, C.; BILLER, P.; ROSS, A. B.; MONTOYA, A.; MASCHMEYER, T.; HAYNES, B. S. Pilot plant testing of continuous hydrothermal liquefaction of microalgae. **Algal Research**, v. 2, n. 3, p. 268–277, jul. 2013.

LAM, M. K.; LEE, K. T. Catalytic transesterification of high viscosity crude microalgae lipid to biodiesel: Effect of co-solvent. **Fuel Processing Technology**, v. 110, p. 242–248, jun. 2013.

LI, P.; MIAO, X.; LI, R.; ZHONG, J. In Situ Biodiesel Production from Fast-Growing and High Oil Content *Chlorella pyrenoidosa* in Rice Straw Hydrolysate. **Journal of Biomedicine and Biotechnology**, v. 2011, p. 1–8, 2011.

LIMA, H. H.S. **Tratamento físico-químico da vinhaça por coagulação e adsorção em carvão ativado do bagaço de cana-de-açúcar**. 2013. 83 f. Dissertação (Mestrado) – programa de pós-graduação em engenharia urbana e ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

LIU, J.; LIN, R.; NAN, Y.; TAVLARIDES, L. L. Production of biodiesel from microalgae oil (*Chlorella protothecoides*) by non-catalytic transesterification: Evaluation of reaction kinetic models and phase behavior. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 99, p. 38–50, abr. 2015.

LÓPEZ, E. N.; ROBLES MEDINA, A.; GONZÁLEZ MORENO, P. A.; ESTEBAN CERDÁN, L.; MARTÍN VALVERDE, L.; MOLINA GRIMA, E. Biodiesel production from *Nannochloropsis gaditana* lipids through transesterification catalyzed by *Rhizopus oryzae* lipase. **Bioresource Technology**, v. 203, p. 236–244, mar. 2016.

MARQUES, S. S. I.; NASCIMENTO, I. A.; DE ALMEIDA, P. F.; CHINALIA, F. A. Growth of *Chlorella vulgaris* on Sugarcane Vinasse: The Effect of Anaerobic Digestion Pretreatment. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 171, n. 8, p. 1933–1943, 7 dez. 2013.

NAN, Y.; LIU, J.; LIN, R.; TAVLARIDES, L. L. Production of biodiesel from microalgae oil (*Chlorella protothecoides*) by non-catalytic transesterification in supercritical methanol and ethanol: Process optimization. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 97, p. 174–182, fev. 2015.

NAUTIYAL, P.; SUBRAMANIAN, K. A.; DASTIDAR, M. G. Production and characterization of biodiesel from algae. **Fuel Processing Technology**, v. 120, p. 79–88, abr. 2014.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perry's chemical engineers' handbook**. 7th ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1997.

RAES, E. J.; ISDEPSKY, A.; MUYLAERT, K.; BOROWITZKA, M. A.; MOHEIMANI, N. R. Comparison of growth of *Tetraselmis* in a tubular photobioreactor (Biocoil) and a raceway pond. **Journal of Applied Phycology**, v. 26, n. 1, p. 247–255, 24 fev. 2014.

RAMIREZ, N. N. V.; FARENZENA, M.; TRIERWEILER, J. O. Growth of microalgae *Scenedesmus* sp in ethanol vinasse. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 57, n. 5, p. 630–635, set. 2014.

REDDY, H. K.; MUPPANENI, T.; PATIL, P. D.; PONNUSAMY, S.; COOKE, P.; SCHAUB, T.; DENG, S. Direct conversion of wet algae to crude biodiesel under supercritical ethanol conditions. **Fuel**, v. 115, p. 720–726, jan. 2014.

SANTOS, P. V.. **Seleção de cepas oleaginosas de microalga *Chlorella* spp. e otimização do seu cultivo em meio sintético e vinhaça visando à produção sustentável de biodiesel**. 2013. 138 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SILVA, A. G.; CARTER, R.; MERSS, F. L. M.; CORRÊA, D. O.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B.; ORDONEZ, J. C.; SCHERER, M. D. Life cycle assessment of biomass production in microalgae compact photobioreactors. **GCB Bioenergy**, v. 7, n. 2, p. 184–194, 2015.

SILVA, C.; SOLIMAN, E.; CAMERON, G.; FABIANO, L. A.; SEIDER, W. D.; DUNLOP, E. H.; COALDRAKE, A. K. Commercial-Scale Biodiesel Production from Algae. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 13, p. 5311–5324, 2 abr. 2014.

TEO, S. H.; ISLAM, A.; YUSAF, T.; TAUFIQ-YAP, Y. H. Transesterification of *Nannochloropsis oculata* microalgae's oil to biodiesel using calcium methoxide catalyst. **Energy**, v. 78, p. 63–71, dez. 2014.

TRAN, D. T.; LE, B. H.; LEE, D. J.; CHEN, C. L.; WANG, H. Y.; CHANG, J. S. Microalgae harvesting and subsequent biodiesel conversion. **Bioresource Technology**, v. 140, p. 179–186, 2013.

VALDERRAMA, L. T.; DEL CAMPO, C. M.; RODRIGUEZ, C. M.; BACHAN, L. E.; BACHAN, Y. Treatment of recalcitrant wastewater from ethanol and citric acid production using the microalga *Chlorella vulgaris* and the macrophyte *Lemna minuscula*. **Water Research**, v. 36, p. 29-36, 2008.

VELASQUEZ-ORTA, S. B.; LEE, J. G. M.; HARVEY, A. Alkaline in situ transesterification of *Chlorella vulgaris*. **Fuel**, v. 94, p. 544–550, abr. 2012.

VELASQUEZ-ORTA, S. B.; LEE, J. G. M.; HARVEY, A. P. Evaluation of FAME production from wet marine and freshwater microalgae by in situ transesterification. **Biochemical Engineering Journal**, v. 76, p. 83–89, jul. 2013.

VIOMAR, A. **Estudo das variáveis da produção de biodiesel**. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Bioenergia, Universidade Estadual do Centro-oeste, Guarapuava, 2013.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Lagoas de estabilização**, v.03. Minas Gerais: ABES, 1996.

6. ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO VINHAÇA E MICROALGAS: CULTIVO POR FOTOBIOREATOR E LAGOA DE ALTA TAXA, COM ALOCAÇÕES DE MASSA, ECONÔMICA E *CUT-OFF*

RESUMO

Foi realizado um estudo de ACV em dois sistemas de produção de biodiesel dimensionados no capítulo 5. O método empregado é descrito pela série ISO 14.040, com as representantes brasileiras ABNT NBR ISO 14.040 e ABNT NBR ISO 14.044. A estrutura é composta por quatro fases iterativas: definição dos objetivos e escopo, inventário do ciclo de vida, avaliação do impacto do ciclo de vida e interpretação. Foi definido como unidade funcional 1 kg de biodiesel, avaliando os potenciais de impactos, acidificação, aquecimento global, eutrofização e formação fotoquímica do ozônio troposférico pelo método EDIP (1997) e ecotoxicidade e toxicidade humana (cancerígena e não cancerígena) pelo método USEtox. Por se tratar de sistemas multifuncionais, foram aplicados o uso de quatro critérios de alocação diferentes: em massa, econômico, *cut-off* e massa e *cut-off* e econômico. Foi realizada comparação entre os sistemas de produto A e B. Através do inventário do ciclo de vida (ICV), foi possível realizar uma análise energética, e os resultados indicaram que em todos critérios de alocação, ambos os sistemas consumiram mais energia para produção de 1 kg de biodiesel, que a energia gerada pelo mesmo. Tal relação obteve maior valor no sistemas de A (lagos de alta taxa) pelo critério de alocação em massa, sendo consumido 60 vezes mais energia que a gerada. Do ponto de vista ambiental, o sistema B (fotobiorreatores) apresentou redução em todas as categorias de potencial impacto ambiental, em média 45%, em relação ao sistema A. Comparado com outros sistemas pesquisados, o presente estudo obteve maiores contribuições de impacto para a unidade funcional, com amplitude de até 1632 vezes maior para a categoria de aquecimento global. Os critérios de alocação apresentaram grande influência nos resultados, contudo é as recomendações de norma estabelecem que procedimentos de alocação entre produtos devem ser realizados, primeiramente, através de relações físicas, como a massa dos produtos e subprodutos.

Palavras chave: impactos ambientais, biodiesel, critérios de alocação

6.1. INTRODUÇÃO

Segundo documento publicado pela ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2015a) a evolução da economia global tem sido dominada pelo modelo linear de produção e consumo, ou seja, modelo em que os bens são fabricados a partir de matérias-primas, vendidos, utilizados e descartados como resíduo. Ainda de acordo com o documento, qualquer modelo baseado no consumo e sem utilização restaurativa dos recursos implica em perdas significativas da cadeia de valor. Além disso, com a aceleração das economias de consumo extrativas, desde meados do século XX, resulta em um crescimento econômico mundial de caráter insustentável.

De acordo com Huysman et al. (2017) a transição para uma economia mais sustentável é uma tarefa complexa, e uma das estratégias utilizadas é o conceito de economia circular. A economia circular é definida como um modelo restaurador e regenerativo que visa manter os recursos em seus mais altos níveis de utilidade e valor. Como consequência, permite-se gerar crescimento econômico, criação de empregos, e reduzir os impactos ambientais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015b).

Nesse contexto, o presente estudo visou a geração de um novo produto, com duas rotas tecnológicas dimensionadas no capítulo 5, para aproveitamento da vinhaça, um resíduo da produção de etanol. A avaliação do ciclo de vida, foi a ferramenta utilizada para avaliar a viabilidade ambiental do sistema de produto desenvolvido, além de explicitar os pontos críticos apresentados.

6.2. MÉTODOS

O método empregado no estudo foi organizado conforme recomendações internacionais para estudos de ACV, pela série ISO 14.040, representadas pelas normas da NBR ISO 14.040 e NBR ISO 14.044 da ABNT no Brasil. Conforme esses documentos a metodologia para estudos de ACV são divididas em quatro fases: definição do objetivo e escopo, análise do inventário do ciclo de vida, avaliação do impacto do ciclo de vida e interpretação.

6.2.1. Definição do Objetivo e Escopo

Essa é a primeira fase de um estudo de ACV. Na definição do objetivo deve-se declarar as aplicações pretendidas, as razões para a realização do estudo e o público alvo (ABNT, 2009b). O objetivo da ACV foi definido de acordo com o objetivo da pesquisa.

O segundo passo é definir o escopo da ACV, que conta com os seguintes aspectos de acordo com a ABNT (2009b), que devem ser descritos de forma clara:

- Sistema de produto a ser estudado;
- As funções do sistema de produto;
- Fronteira do sistema;
- A unidade funcional;
- Procedimento de alocação;
- Método de AICV e tipos de impactos;
- Interpretação a ser utilizada;
- Requisitos dos dados.
- Pressupostos;
- Escolha de valores e elementos opcionais;
- Limitações;
- Requisitos de qualidade dos dados;
- Tipo de revisão crítica, se aplicável;
- Tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

Sistema de produto

O sistema de produto é o conjunto de processos elementares, apresentando fluxo de entrada e saída, podendo desempenhar uma ou mais funções (ABNT, 2009a). Os processos elementares são subdivisões do sistema de produto, ou seja, são os menores processos que ocorrem no sistema.

Quanto aos fluxos do sistema, os fluxos intermediários são aqueles que ligam os processos elementares, podem ser partes do produto final ou resíduo. Os fluxos de produtos são entradas de outro sistema de produto. E por fim, os fluxos elementares, que são os fluxos ligados ao meio ambiente (ABNT, 2009a).

A ABNT(2009b) recomenda que o sistema seja descrito através de fluxogramas de processo, mostrando os processos elementares e suas relações. Cada processo deve ser descrito de forma a definir seu início, com entrada de matérias-primas ou produtos intermediários, a natureza das operações e transformações que ocorrem, e o seu término, com o destino dos produtos intermediários ou finais.

No presente estudo foram definidos dois sistemas de produto, como dimensionado no capítulo 5, abrangendo as etapas do ciclo de vida da vinhaça. Sendo assim, definidas seis unidades: atividades agrícolas da cana-de-açúcar, produção industrial do etanol, tratamento preliminar da vinhaça, cultivo das microalgas (sistema 1: lagoas de alta taxa; sistema 2: fotobiorreatores), extração do óleo e conversão. A abrangência do ciclo de vida

do biodiesel nesse estudo é da forma *grave to gate*, ou seja, da extração da matéria-prima até o produto final, não sendo considerado seu consumo final. Essa é uma limitação do estudo e deve ser claramente documentado.

Função do sistema de produto e unidade funcional

O escopo de uma ACV deve deixar claro quais são as funções do sistema, que deve ser determinado pela finalidade do produto estudado. A definição da unidade funcional é unidade quantitativa da função do produto, que leva em consideração o seu desempenho. A unidade funcional deve ser claramente definida e mensurável, para que sirva de referência a normalização dos dados de entrada e saída do sistema num sentido matemático (ABNT, 2009b).

Após a definição da função e da unidade funcional, deve ser definido o fluxo de referência. Esse fluxo é uma medida quantitativa de fluxos intermediários, ou seja, de partes do produto ou que formam o produto, necessárias para cumprir a função do sistema mensurado pela unidade funcional. Segundo a ABNT (2009b) comparações entre sistemas, que é o caso do estudo, só pode ser realizado com base nas mesmas funções, com as mesmas unidades funcionais.

Fronteira do Sistema

A fronteira do sistema determina quais os processos elementares devem compreender o sistema de produto, de acordo com o objetivo do estudo. A exclusão de estágios do ciclo de vida, processos, fluxos de entrada e saída, é permitida apenas se não afetar a conclusão geral do estudo, e se realizada deve ser registrada de forma clara, e as razões e implicações para sua exclusão (ABNT, 2009b).

Para estabelecer a fronteira do sistema faz-se uso de critérios de corte, sendo necessários para determinar quais entradas e saídas serão incluídas. Os critérios mais utilizados são de massa, energia e significância ambiental. O critério de corte por massa é uma decisão que utiliza a massa da entrada como requisito de inclusão no sistema, sendo aquelas que superam uma porcentagem cumulativa maior que a pré-fixada. Da mesma forma que o critério de energia é uma decisão baseada na entrada de energia. Por fim, o critério da significância ambiental inclui as entradas que, mesmo não dispondo representatividade em termos de massa ou energia, apresentam relevância ambiental.

Procedimentos de alocação

Na definição do escopo, os procedimentos de alocação que serão utilizados no estudo, se necessários, devem ser descritos de forma clara, bem como suas razões.

Um dos objetivos da presente dissertação é comparar três tipos de alocação, por critério de massa, econômica e *cut-off*. Para a alocação de massa é considerada a divisão dos agravantes ambientais divididos entre os produtos que saem do sistema ou subsistema, pela relação da física da massa entre eles. No processo econômico, o valor econômico de mercado dos insumos e produtos é utilizado para o processo de divisão. E por fim, o critério *cut-off* é utilizado em sistemas de reciclagem e reuso, onde os processos produtivos do produto a ser reciclado é cortado do sistema de produto.

Metodologia de AICV e tipos de impactos

Ainda na definição do escopo, as categorias de impacto, indicadores de impacto e modelos de caracterização devem ser pré-determinados para a realização do AICV. Para a escolha desses elementos, faz-se de acordo com o objetivo do estudo e as aplicações desejadas (ABNT, 2009b).

Requisito de qualidade dos dados

A especificação dos requisitos de qualidade dos dados serve para alcançar os objetivos e escopo, determinando as características dos dados necessários ao estudo, que de acordo com a ABNT (2009b) deve abranger:

- **Cobertura temporal:** determina a idade dos dados e o período de tempo mínimo para ocorrer a coleta dos dados.
- **Cobertura geográfica:** Característica que confere aos dados a área geográfica onde estes devem ser coletados para os processos elementares, satisfazendo o objetivo do estudo.
- **Cobertura tecnológica:** qual a tecnologia específica ou o conjunto de tecnologias utilizadas. Um exemplo é a produção de energia elétrica, que pode ser produzida por via eólica, hidrelétricas, queima de carvão e outros. Sendo assim, esse requisito para os dados determina se foram utilizadas informações de um mix das tecnologias de produção, se foi considerado apenas uma, por motivo de modernidade, tradição ou outra razão.
- **Outros:** devido ao grau de detalhamento exigido pelo estudo, e no caso de estudos comparativos a serem divulgadas publicamente, podem ainda ser contemplados requisitos como a precisão, a completeza, a representatividade, a consistência, a reprodutibilidade, as fontes dos dados e incerteza da informação.

Como o presente estudo emprega uma avaliação comparativa, todos os itens acima foram especificados na primeira fase da ACV.

Pressupostos

Na primeira fase de ACV, deve ser descrito os pressupostos, que são as considerações tomadas com base nas limitações do estudo de ACV. De acordo com o manual ILCD (2010) essas limitações podem ocorrer pela ausência de dados, definições técnicas e estabelecimento de cenários.

Para o presente estudo de ACV, os pressupostos foram tomados no capítulo 5 para o dimensionamento dos processos de produção do biodiesel. Como exemplo, a adoção de dados de conversão, de projeção de produtividade nas lagoas de alta taxa, e até mesmo extrapolação dos dados para produção em larga escala. Por se tratar de um estudo baseado em dados de literatura e o sistema de produção ser teórico, não houve coleta de dados, sendo estes projetados.

Limitações

Todas as limitações e restrições apresentadas pelo estudo devem ser descritas, se baseando na falta de dados, no uso de métodos de AICV que possuem modelagem para outro contexto geográfico, questões inerentes à fronteira do sistema, e questões técnicas relacionadas ao produto.

As limitações devem ser justificadas e detalhadas, com o grau de restrição que a mesma provoca nos resultados do estudo de ACV.

Tipo de revisão crítica

Quando o propósito do estudo de ACV é fornecer afirmações comparativas de produtos com divulgação ao público, a revisão crítica é um item obrigatório. No escopo deve ser estabelecido como a revisão será conduzida, qual o tipo de revisão e quem irá conduzi-la.

Tipo e formato do relatório requerido para o estudo

No escopo é determinado o tipo de relatório será apresentado o estudo de ACV para a comunicação com o público alvo especificado no objetivo.

6.2.2. Análise do inventário do ciclo de vida (ICV)

A análise do inventário é conduzida de acordo com os objetivos e escopo do estudo, definidos na primeira fase da ACV. A ABNT (2009b) apresenta os passos operacionais que devem ser seguidos durante a execução, do plano para a análise, conforme a Figura 6.1.

Figura 6.1 – Procedimentos simplificados para análise de inventário

Fonte: ABNT (2009b)

Para o desenvolvimento dos ICV que compõem o presente estudo, a coleta de dados dos processos tratamento preliminar da vinhaça, cultivo das microalgas (lagoas de alta taxa, fotobiorreator), extração do óleo e conversão, que são os específicos para a produção do biodiesel foram obtidos através do capítulo 5, onde foi realizado o dimensionamento do sistema.

Para os processos da etapa de produção da vinhaça, foi utilizado dados o inventário do ciclo de vida da cana-de-açúcar realizada por Cavalett et al. (2013) e do inventário do ciclo de vida do etanol realizado por Chagas, Bonomi e Cavalett (2015).

O ICV da produção de cana de açúcar apresenta a etapa agrícola do processo, com a preparação do terreno, plantio, cultivo, colheita e transporte. No inventário do ciclo de vida do etanol o processo inicia-se com a recepção e limpeza da cana de açúcar, extração do

caldo, tratamento do caldo, concentração do caldo, fermentação e destilação e o sistema de cogeração.

Além de revisão literária utilizada para o dimensionamento e obtenção dos dados do capítulo 5, outros dados secundários foram retiradas, principalmente, das bases do *software* de ACV *GaBi*.

6.2.2.1. Procedimentos de alocação

Um dos objetivos da pesquisa é analisar a influência nos resultados devido a procedimentos de alocação, para isso foram adotados quatro critérios de alocação: massa, econômico e *cut-off* e massa, *cut-off* e econômico. O procedimento torna-se necessário devido o sistema em estudo apresentar pontos de multifuncionalidade. Os processos da atividade agrícola da produção de cana de açúcar e a produção industrial do etanol devem ser alocados, pois no subsistema de produção de etanol, os produtos finais são etanol e vinhaça.

Uma segunda alocação foi realizada com o processo de conversão do óleo em biodiesel e todas as fases anteriores. Durante esse processo, dois produtos são formados, o biodiesel e o glicerol.

Alocação pelo critério de massa

Pelo critério de massa, na primeira alocação, foi utilizada a relação em massa dos produtos finais do ICV obtidos em Chagas, Bonomi e Cavalett (2015). Para a alocação entre o biodiesel e o glicerol, foi utilizada a quantidade produzida ao final da reação de transesterificação. A tabela 6.1 apresenta a relação de massa e a porcentagem para a alocação dos potenciais de impacto.

Tabela 6.1 – Alocação por massa entre os produtos finais em cada fase do sistema de produto

Produtos	Quantidade (kg)	Alocação (%)
Primeira alocação		
Etanol	40,40	5,99
Vinhaça	634,30	94,01
Total	674,7	100,00
Segunda Alocação		
Biodiesel	40,60	83,33
Glicerol	8,10	16,67
Total	48,73	100,00

A quantidade de vinhaça foi alterada do valor original de Chagas, Bonomi e Cavalett (2015), justificado pelo fato do dado primário de produção de vinhaça ser de 12 litros para cada litro, e o valor descrito pelo autor foi obtido através de simulação computacional.

Alocação pelo critério econômico

Os dados econômicos para o etanol, açúcar e bagaço de cana, foram obtidos em Chagas, Bonomi e Cavalett (2015). A vinhaça não possui valor econômico de forma direta no mercado, porém o seu uso na fertirrigação diminui custos devido a menor uso de fertilizantes químicos. De acordo com Borges et al. (2011) comparando uma mesma área com o uso de vinhaça e outra apenas com fertilizantes, tem-se uma economia de R\$ 36,80/ha, sendo uma referência indireta para o valor econômico da vinhaça. E por fim, o biodiesel e do glicerol, foram associados ao um valor econômico por média de mercado do ano de 2016. A tabela 6.2 apresenta os percentuais de alocação para cada produto.

Tabela 6.2 – Alocação econômica entre os produtos finais em cada fase do sistema de produto

Produtos	Valor	Alocação (%)
Primeira alocação	(US\$/ha)	
Etanol	2.762,03	99,61
Vinhaça	10,76	0,39
Total	2.772,79	100,00
Segunda Alocação	(R\$/RP*)	
Biodiesel	129,55	98,64
Glicerol	1,78	1,36
Total	3,41	100,00

Legenda: *Estequiometria de produção.

Alocação pelo critério Cut-off

O critério *cut-off* é utilizado para sistemas de reuso aberto, ou seja, onde o sistema do produto reutilizado é diferente do sistema de origem. A vinhaça por ser um resíduo da produção de etanol, e sendo reutilizada para a produção de biodiesel, fundamenta o uso desse critério. Com isso, o sistema de produto inicia-se com o tratamento preliminar da vinhaça, sendo ela uma das matérias-primas do sistema de produção do biodiesel.

Mesmo realizando a alocação pelo critério *cut-off*, a alocação entre o biodiesel e o glicerol precisam ser realizado. Com isso, foram utilizados o critério de massa e o critério econômico.

6.2.3. Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

A fase de AICV foi realizada de acordo com os objetivos e escopo do estudo (ABNT, 2009a). Foram realizados apenas os procedimentos obrigatórios, a seleção, classificação e caracterização. A ABNT (2009b) determina que em AICV para afirmações comparativas, deve ser empregado um conjunto abrangente de indicadores de categoria, e que a comparação deve ser realizada indicador por indicador.

No presente estudo para a fase de AICV selecionou-se as categorias de impacto dos métodos EDIP (1997) e USEtox. Os resultados foram gerados a partir do *software* Gabi, com os resultados de ICV utilizados para a modelagem do sistema.

6.2.3.1. Métodos de AICV

Como não existe um método de AICV específico para as realidades brasileiras, foi utilizado mais de um método, entre os internacionalmente aceitos, que melhor se adaptam ao contexto.

Para o estudo AICV foi utilizado o método EDIP (1997). A escolha do método é justificado por ser internacionalmente aceito, científico e trabalhos que apresentam partes em comum com o presente estudo, como Ometto, Hauschild e Roma (2009), utiliza-lo para as quantificações de impactos potenciais.

Além dos fatores apresentados, o EDIP 97 foi preferencialmente aplicado porque suas categorias de impactos são válidas para qualquer região, enquanto outros métodos possuem algumas ou todas as categorias apenas para uma região global específica, como a atualização EDIP (2003). As categorias de impactos selecionadas para este estudo, embasadas no método do EDIP 97 são apresentadas na tabela 6.3:

Outro método adotado para a pesquisa foi o USEtox. Pois trata-se de um método para avaliar os impactos toxicológicos, resultado de um esforço entre diversos grupos de especialistas para a criação de um modelo consensual entre os diferentes métodos existentes. As categorias de impacto selecionadas para o estudo do método USEtox, são descritas na Tabela 6.3.

As definições para as categorias de impacto da tabela 6.3, são descritas por Silva (2012) como:

- **Acidificação:** essa categoria de impacto refere-se à diminuição do pH ocasionado pela adição de cátions de hidrogênio, conduzindo um aumento na acidez de corpos hídricos ou solo. É causado principalmente por substâncias ácidas como os óxidos de nitrogênio (NO_x) e de enxofre (SO_x), emitidos para a água, ar, ou solo. Chuva ácida é um efeito que ocorre dessa categoria de impacto, afetando a fauna e a flora, entre outros danos. Os seus

resultados são expressos, geralmente, por dióxido de enxofre equivalente, em kg SO₂-eq./kg de emissão.

Tabela 6.3 – Categorias de impacto ambiental selecionada pelos métodos adotados para a AICV.

Categorias de impacto selecionadas	EDIP (1997)	USEtox
Acidificação	X	-
Aquecimento global	X	-
Ecotoxicidade	-	X
Eutrofização	X	-
Formação fotoquímica do ozônio troposférico	X	-
Toxicidade humana	-	X

As definições para as categorias de impacto da tabela 6.3, são descritas por Silva (2012) como:

- **Aquecimento global:** está relacionado com a emissão de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). O efeito dessa categoria de impacto é o aumento da temperatura na baixa atmosfera, ocasionando mudanças climáticas que afetam a qualidade de vida do homem e de todo ecossistema. O aquecimento global é expresso em kg CO₂-eq./kg de emissão.
- **Ecotoxicidade:** essa categoria refere-se à ação de substâncias tóxicas à fauna e flora, afetando os organismos vivos e a estrutura do ecossistema. A unidade de referência para medir essa categoria depende do método adotado. O USEtox considera apenas a ecotoxicidade aquática, e utiliza o *Comparative Toxicity Unit (CTU)*.
- **Eutrofização:** esse é um impacto causado na água ou no solo, pelo enriquecimento de nutrientes, principalmente, nitrogênio e fósforo. Com o excesso desses nutrientes, irá ocorrer um desequilíbrio, favorecendo determinadas espécies e levando à diminuição da concentração de oxigênio dissolvido, com isso muitas espécies são afetadas e altera a biodiversidade do ecossistema. A eutrofização é medida por nitrato equivalente, kg NO₃-eq.
- **Formação fotoquímica do ozônio troposférico:** Essa categoria de impacto relacionada à reação fotoquímica que ocorre entre NO_x e compostos orgânicos voláteis (VOC) sobre a influência dos raios ultravioletas. O resultado dessa reação é a formação de oxidantes que causam o nevoeiro fotoquímico. A unidade de referência é expresso em kg de etileno equivalente, C₂H₄-eq./kg de emissão.
- **Toxicidade humana:** é ocasionada por atividades antrópicas que emitem substâncias tóxicas, afetando a saúde humana, através da ingestão ou inalação. Nesta

categoria os efeitos tóxicos são medidos no ambiente habitado pelo homem, não o ambiente de trabalho. Os efeitos podem ser cancerígenos ou não cancerígenos e toxicológicos crônicos.. No método USEtox a unidade de referência é *Comparative Toxicity Unity (CTU)*.

6.2.3.2. Software e Base de dados

A modelagem do ciclo de vida de biodiesel do presente estudo foi realizada com o auxílio do *software* de ACV GaBi. Esse *software* foi desenvolvido na Alemanha pela *PE International* e permite construir e gerenciar grandes conjuntos de dados e modelagens de ciclos de vida dos produtos.

Foi utilizada a versão profissional, *GaBi Software* versão 6, com extensão das bases de dados *ecoinvent integrated SP 22*, *ecoinvent integrated v3.1*, *Extension database XX – Food and Feed*, *Extension DB X – Manufacturing processes* e *Extension DB XII – Renewable raw materials* disponível no Laboratório de Gestão e Operação do Departamento de Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

6.3. RESULTADOS

6.3.1. Objetivo e escopo

Nesta sessão serão apresentados os resultados da primeira fase da ACV. A definição dos objetivos e o escopo encontram-se a seguir.

6.3.1.1. Objetivo

Este estudo tem por objetivo comparar o ciclo de vida da produção de biodiesel, de terceira geração, com a utilização do óleo de microalgas cultivadas na vinhaça, integrado com uma usina sucroalcooleira em dois sistemas de cultivo: o primeiro utilizando fotobiorreator e o segundo com lagoa de alta taxa (LAT). Para isso, foi levantado o inventário dos aspectos ambientais e quantificado os potenciais impactos ambientais em cada sistema.

As razões para a realização do presente estudo de afirmações comparativas consistem primeiramente, em criar um cenário de produção de biodiesel, através das tecnologias existentes, integrado com uma usina sucroalcooleira, além de utilizar a ACV para o desenvolvimento e melhoria do sistema de produto. A segunda razão consiste em verificar qual sistema de cultivo, entre os verificados, apresenta maior potencial para a

produção do biodiesel em grande escala. E por fim, para verificar a viabilidade ambiental do processo frente à outros estudos realizados.

A aplicação esperada com este estudo de ACV é que os resultados forneçam:

- Informações sobre o sistema adotado de produção de biodiesel nos aspectos ambientais e que posteriormente sejam aplicados em outros estudos comparativos e complementares.
- Ser utilizado para realizar comparações ambientais com outros tipos de combustíveis ou até mesmo com biodiesel produzido por outras vias tecnológicas.
- Disponibilizar informações importantes para pesquisadores da área, órgãos públicos e iniciativa privada, para adequarem o processo e encontrar soluções para pontos críticos no ciclo de vida do produto, com foco na sustentabilidade.
- Disponibilizar dados para discussão acerca dos métodos de alocação para sistemas multifuncionais, como o sistema em estudo, que reutiliza um resíduo para a produção de outra energia.

O público alvo para o presente estudo são, primeiramente, usuários da ACV que utilizem em seus estudos recursos abordados nessa pesquisa. Outro público são os pesquisadores de sistema de produção de biodiesel, principalmente os que utilizam microalgas como matéria-prima, e profissionais que contribuem para o desenvolvimento das tecnologias necessárias ao processo. Por fim, o presente estudo destina-se também ao corpo científico da metodologia da ACV, para empresas ligadas ao tema e para o público geral.

6.3.1.2. Funções dos sistemas de produto

O ciclo de vida dos dois sistemas de produção estudado apresenta-se como sendo *cradle to gate*, produzindo o biodiesel como produto final, sendo excluída a fase de uso na ACV. Com isso, não foi estabelecido o seu uso específico que pode ser de várias naturezas, como o uso em máquinas agrícolas ou queima em reatores de calor.

A função depende diretamente do propósito e a finalidade de qual o produto se destina. Com isso não foi necessário definir uma função específica para os sistemas em estudo.

6.3.1.3. Unidades funcionais

Como o presente estudo de ACV não abrange a fase de uso do biodiesel, e não sendo definida uma função para o mesmo, as unidades funcionais para os dois sistemas, foram iguais aos fluxos de referência, no caso, a produção de um (1) kg de biodiesel.

6.3.1.4. Fluxo de referência

Os fluxos de referência estabelecidos para os dois sistemas, foram iguais à unidade funcional, sendo a produção de um (1) kg de biodiesel produzido. A unidade de medida será em massa devido à mudança de volume em temperaturas diferentes.

Para fins de transformações e base para cálculo dos dados deste estudo, para produção de 1 kg de biodiesel são necessários 1,25 kg de óleo. A quantidade de biomassa utilizada é de 10,26 kg.

6.3.1.5. Sistemas de produto

Foram determinados dois sistemas de produto para ACV de afirmações comparativas.

O primeiro sistema ocorre à produção do biodiesel através do uso de óleo de microalgas cultivadas no sistema de lagoas de alta taxa (sistema de produto A). Os processos elementares que compõem o sistema de produto A são: atividades agrícolas da cana-de-açúcar, produção industrial do etanol, tratamento da vinhaça, cultivo das microalgas em LAT, extração do óleo por LHT e conversão do óleo em biodiesel. A Figura 6.2 ilustra esquematicamente o sistema de produto A para o ciclo de vida *cradle to gate* do biodiesel.

Figura 6.2 – Fluxograma do sistema de produto para a produção de biodiesel – Sistema A.

Fonte: Autor

No segundo sistema ocorre a produção do biodiesel através do uso de óleo de microalgas cultivadas no sistema de fotobiorreatores (sistema de produto B). Os processos elementares que compõem o sistema de produto B são: Atividades agrícolas da cana-de-açúcar, produção industrial do etanol, tratamento da vinhaça, cultivo das microalgas em fotobiorreator, extração do óleo por LHT e conversão do óleo em biodiesel. A Figura 6.3 ilustra esquematicamente o sistema de produto A para o ciclo de vida *cradle to gate* do biodiesel.

Figura 6.3 - Fluxograma do sistema de produto para a produção de biodiesel – Sistema B.

Fonte: Autor

Os sistemas de produtos A e B, mostrados nas figuras 6.2 e 6.3, além dos seis processos elementares, inclui as etapas de produção dos seguintes insumos: Hidróxido de sódio, sulfato de alumínio, hidróxido de potássio, ácido sulfúrico, produção de etanol e a geração de energia elétrica através do sistema de cogeração na indústria de etanol.

Os processos de 3 a 6 representa o subsistema de produção do biodiesel. O processo 1 representa todo o subsistema das atividades agrícolas de produção da cana-de-açúcar e o processo 2 todo o subsistema da produção industrial do etanol. Os processos 1 e 2 não foram desagregados devido aos dados de inventário, obtidos por Cavalett et al. (2013) e Chagas, Bonomi e Cavalett (2015), que apresentaram os resultados ICV de todo o subsistema, não individualizando-os.

6.3.1.6. Fronteira dos sistemas de produto

Os sistemas apresentados nas Figuras 6.2 e 6.3 mostram uma abrangência do ciclo de vida que não inclui o uso do produto. Sendo assim, as relações entre a tecnosfera e o meio ambiente acontecem apenas nas etapas do preparo do cultivo à produção de etanol, no ciclo de vida do etanol, e do tratamento da vinhaça à produção de biodiesel. Os dois sistemas foram formados pela junção desses subsistemas, onde a vinhaça é reutilizada para produção de biodiesel.

A fronteira do sistema foi definida pelo critério de corte por massa, ou seja, com base na quantidade em massa dos insumos consumidos, sendo incluídos no sistema de produto aqueles maiores que 1,0% do total de entrada. Outro critério utilizado foi significância ambiental do insumo. Em relação ao critério de corte por massa, no sistema de produto A, 99,91% dos fluxos de entrada são representados pelo sulfato de alumínio (83,82%) e o hidróxido de sódio (16,09%). No sistema de produto B, 99,85% dos fluxos de entradas são representados pelos menos insumos, 83,34% sulfato de alumínio e 16,51% o hidróxido de sódio. Pelo critério de significância ambiental foram incluídas na fronteira do sistema a produção de energia elétrica pelo sistema de cogeração com a queima do bagaço de cana, produção do etanol, produção do hidróxido de potássio e produção do ácido sulfúrico.

Foram excluídos dos sistemas os seguintes insumos:

- Os insumos auxiliares, como por exemplo, as embalagens dos materiais que são utilizados no sistema que entram no processo, porém não são utilizados como parte do produto;
- O lodo produzido no tratamento preliminar da vinhaça;
- Produção e manutenção de bens de capital;
- Produção e manutenção de bens pessoais.

Os bens de capital como a construção e manutenção das estruturas físicas e dos equipamentos utilizados, como a construção dos fotobiorreatores e seus componentes, as lagoas de alta taxa, os equipamentos de extração, os reatores químicos e os demais, não foram considerados devido à insuficiência de informações relacionados, e a relação da influência da vida útil dos bens em relação à unidade funcional.

Da mesma forma, os bens pessoais como a alimentação e transportes de funcionários, materiais para a administração e outros, não foram considerados. A insuficiência de informações desses insumos deve ao fato do dimensionamento realizado da

cadeia de produção do capítulo 5 ser de caráter preliminar, considerando apenas os principais aspectos de cada processo.

6.3.1.7. Procedimento de Alocação

Na definição do objetivo do presente estudo, foi estabelecido que os dados fossem aplicados na discussão de método de alocação em sistemas multifuncionais, como no caso de reuso/reciclagem em sistemas abertos. Para isso, foi criado 4 cenários para os processos de alocação em cada um dos sistemas, sendo:

1º Cenário: Alocação pelo critério de massa: foi realizada alocação pelo critério de massa nos processos 1 e 2 entre a vinhaça e o etanol, e uma segunda alocação entre os processos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 entre o biodiesel e o glicerol.

2º Cenário: Alocação pelo critério econômico: foi realizada alocação pelo critério econômico nos processos 1 e 2 entre a vinhaça e o etanol, e uma segunda alocação entre os processos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 entre o biodiesel e o glicerol.

3º Cenário: Alocação pelo critério *cut-off*: Os processos 1 e 2 foram excluídos do sistema do produto, e realizada alocação pelo critério de massa nos processos 3,4,5 e 6.

4º Cenário: Alocação pelo critério *cut-off*: Os processos 1 e 2 foram excluídos do sistema do produto, e realizada alocação pelo critério econômico nos processos 3,4,5 e 6.

Os quatros cenários foram aplicados em cada um dos sistemas de produto, A e B, gerando oito resultados de ICV e AICV.

6.3.1.8. Tipos de impacto e método de avaliação de impacto e interpretação

Para este estudo de ACV, utilizou-se para a avaliação de impacto os métodos de AICV EDIP (1997) e USEtox.

As categorias de impactos ambientais potenciais utilizadas pelo método EDIP (1997) são: acidificação, aquecimento global, ecotoxicidade, eutrofização, formação fotoquímica de ozônio troposférico e toxicidade humana. Para o método USEtox foram utilizadas as categorias de impactos ambientais potenciais a ecotoxicidade e a toxicidade humana,

Os resultados dessas categorias não foram normalizados, agrupados ou ponderados, devido a ACV possuir caráter de afirmações comparativas.

6.3.1.9. Requisitos dos dados

Os dados do subsistema de produção do etanol foram obtidos através de inventários do ciclo de vida realizados por Cavalett et al. (2013) e Chagas, Bonomi e Cavalett (2015), do

Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CTBE/CNPEM).

Como ainda não existe a produção em larga escala de biodiesel através do cultivo de microalgas em vinhaça, os dados necessários para os processos elementares vêm essencialmente de fontes secundárias, coletados em revisão bibliográfica e por informações pessoais de especialistas no assunto. O subsistema de produção do biodiesel foi dimensionado, com as entradas e saídas, com embasamento nas publicações e dados da literatura nacional e internacional envolvida no assunto.

Para manter os dados próximo da realidade, foram observados estudos que mantêm similaridades com as condições geográficas e tecnológicas de uma produção de biodiesel integrada em uma usina sucroalcooleira na região Sudeste do Brasil. Muitos estudos sobre a produtividade de óleo por microalgas apresentam valores maiores que o utilizado no presente estudo, como reportado por Jazzar et al. (2015). Porém são estudos realizados em escala laboratorial com alto índice de controle sobre os parâmetros de crescimento.

Na literatura encontram-se também experimentos que obtiveram maiores conversões do óleo em biodiesel, como exemplo o estudo de Nan et al. (2015), porém além de serem condições específicas para reação em laboratório, ainda não existe tecnologia viável para aplicação em escala industrial. Com isso, mesmo se baseando em pesquisas científicas, tomou-se o cuidado para adquirir os dados com maior representatividade para as condições em estudo.

Os dados da produção de insumos utilizados nos sistemas de produtos, de acordo com a Figura 6.2 e 6.3, foram obtidos através de banco de dados, com o uso do *software* de ACV GaBi 6, versão profissional, do Laboratório de Gestão e Operação, localizado no Departamento de Engenharia de Produção da EESC/USP.

6.3.1.10. Pressupostos

O estudo baseia-se nas técnicas usuais em uma usina sucroalcooleira, com a inclusão de um sistema para produção de biodiesel, que ainda não existe em larga escala, escolhendo as rotas mais promissoras publicadas em trabalhos científicos pelo mundo, do ponto de vista à aplicabilidade da tecnologia.

No trabalho foi considerada que a área agrícola já está destinada a cultura da cana-de-açúcar. As instalações físicas das etapas industriais estão prontas, com o sistema de tratamento da vinhaça, reatores de cultivo, extração e conversão em operação. Os impactos referentes a essas instalações, assim como, a linha de montagem dos veículos, equipamentos e manutenção do local não serão considerados no estudo.

Para a coleta e tratamento dos dados na ICV foi considerado como fluxo de referência a produção de 1 kg de biodiesel, que corresponde a 1,11 litros, com uma massa específica de 0,895 kg/L (MATHIMANI; UMA; PRABAHARAN, 2015).

Para a obtenção de 1 kg de biodiesel é necessário a extração de 1,250 kg de óleo das microalgas, devido a eficiência da conversão de 80%, valor adotado através das considerações de cálculo desenvolvidas no capítulo 5..

Santos (2013) obteve um rendimento de microalgas cultivadas em um fotobiorreator utilizando a vinhaça como meio de cultivo, e obteve o desempenho de 772 mg de biomassa por litro de vinhaça, e 19 mg de lipídios dessa biomassa. Com base nesses resultados, a quantidade de biomassa necessária é de 10,26 kg com a utilização de 13.297 litros de vinhaça, correspondendo à produção de 1.108,0 litros de etanol.

Como não existem dados experimentais de cultivo de microalgas em vinhaça em LATs, foi realizada uma projeção com base em estudos comparativos entre cultivos simultâneos sob as mesmas condições entre os dois sistemas. Para o presente estudo, foi utilizado a relação obtida por Raes et al. (2014), com 67 mg/l.dia e 36 mg/l.dia da produtividade da biomassa em um fotobiorreator e uma lagoa de alta taxa, respectivamente, no período de outono.

Projetando os dados de Santos (2013) para a LAT, obteve-se as quantidades de 413,5 mg/L e 51,05 mg/L de biomassa e lipídios totais, respectivamente. Para a unidade funcional, são necessários 24.485 litros de vinhaça, que corresponde à produção de 2.040,4 litros de etanol.

A seguir, estão as descrições específicas de cada processo elementar dos sistemas de produto.

Sistema de produto A:

Processo 1: Atividades agrícolas da cana-de-açúcar

Os dados para a modelagem do processo atividades agrícolas foram obtidos no inventário realizado por Cavalett et al. (2013). Os próximos parágrafos descrevem as características adotadas para os resultados ICV.

A unidade funcional para o inventário foi de um hectare de colheita de cana. As atividades agrícolas incluídas no processo são ilustradas na Figura 6.5. Para cada atividade foi considerada consumo de matéria-prima, energia, infraestrutura e uso de terra. Também é incluso no sistema o transporte das matérias-primas e da cana-de-açúcar para usina.

Figura 6.5 – Atividades consideradas para a realização do ICV do processo de atividades agrícolas da cana-de-açúcar.

Fonte: Cavalett et al. (2013)

A atividade de plantio ocorre quando há necessidade de nova área de plantação ou reforma da área já existente, que ocorre após cinco colheitas. Por isso, a atividade de plantio ocorre em 22,8 % da área total de cana-de-açúcar, considerado nesse valor, a porcentagem da cana plantada destinada ao replantio.

As principais operações que ocorrem durante a atividade de cultivo são o monitoramento e controle de pragas, análise tecnológica da cana-de-açúcar e adubação. Os

insumos típicos são os agrotóxicos, fertilizantes e vinhaça. Há também a aplicação de herbicidas entre as fileiras, e em alguns casos, o uso de inseticidas é necessário.

Na atividade de colheita, a cana-de-açúcar foi colhida manualmente, com o uso de operários, e mecanizada com a queima ou sem queima. As proporções em cada processo podem ser observadas na Figura 6.5.

As considerações adotadas para o transportes da cana, assim como outras informações podem ser obtidas em Cavalett et al. (2013).

Processo 2: Processo industrial da produção de etanol

O processo industrial de produção de etanol foi modelado de acordo com os dados de ICV do etanol realizado por Chagas, Bonomi e Cavalett (2015), que detalha os principais usos de recursos e emissões nas atividades industriais de conversão da cana-de-açúcar em etanol e eletricidade. Foi utilizado um modelo de produção de primeira geração de etanol, onde também ocorre a produção de açúcar. A Figura 6.4 ilustra os processos adotados pelos autores para a formulação do ICV, e os próximos parágrafos descrevem as considerações realizadas por eles.

Os primeiros processos consistem na recepção da cana-de-açúcar e sua limpeza para retirada das impurezas. O processo de limpeza é realizado com o uso de água, que é reutilizada após passar por um tratamento com decantação e correção do pH. No entanto, a etapa do tratamento não foi considerada para o ICV.

Após a limpeza, a cana-de-açúcar passa por um sistema de preparação, onde dispõe de uma série de equipamentos para corta e abrir a estrutura da cana para a operação de extração. Antes da extração, a cana preparada passa por uma estrutura magnética para remover partículas metálicas.

A extração da cana é realizada nos moinhos de moagem, onde são separados o caldo e o bagaço com uma eficiência de 96%. O caldo da cana contém água, sacarose, açúcares reduzidos, minerais, sais e ácidos orgânicos, além de sujeira e partículas de fibras, que devem ser removidas antes da fermentação. Para isso é utilizada uma tela rotativa, retirando as fibras e retornando ao moinho de moagem para recuperação adicional de açúcares.

No tratamento do caldo, ocorre um tratamento químico para remover as demais impurezas. O processo ocorre com o aquecimento de 30 a 70° C com adição de ácido fosfórico e cal, em seguida ocorre um segundo aquecimento com temperaturas de até 105 °C. Em seguida é removido o ar dissolvido e adicionado um floculante polimérico. As impurezas são removidas em um filtro, onde é formada a torta de filtro.

Na fermentação os fermentadores são alimentados com células de levedura e o caldo da cana. Durante o processo, uma parte de etanol formado, é liberado nos

fermentadores sendo necessário o recolhimento por uma coluna de absorção, onde é recuperado com o uso de água. No final do ciclo de fermentação, é formado o vinho, que são enviados para centrífugas para a recuperação das células de levedura e sua separação do vinho. As células obtidas da centrifugação são enviadas a um reator com a adição de ácido sulfúrico e água, para diminuir a contaminação por bactérias, e em seguida reutilizada na fermentação. O vinho é misturado com o etanol recuperado pelas colunas de absorção e enviado para a unidade de destilação.

A destilação ocorre com um conjunto de colunas. Na primeira coluna ocorre a formação da vinhaça, ocorrendo sua saída pelo fundo e a saída do etanol hidratado pelo topo da segunda coluna.

A desidratação é um processo para a produção do etanol anidro que é realizado com a destilação azeotrópica com ciclo-hexano.

O sistema de cogeração considerado no ICV produz 22 bar de vapor com o bagaço da cana. O vapor é utilizado para gerar toda a energia térmica e elétrica utilizada na usina.

Os processos da Figura 6.4 e descritos anteriormente, foram simulados em um programa de simulação chamado Aspen Plus[®] para obter os balanços de massa e energia para o inventário. Os dados para simulação foram obtidos em instalações já existentes e com peritos no assunto. Para o inventário foi considerado que a unidade industrial processa 500 toneladas métricas de cana-de-açúcar por hora, durante 167 dias por ano. A unidade funcional adotada foi de 1000 kg de cana processada e considerou-se que apenas o etanol anidro é produzido.

Com isso, os dados do inventário são relacionados apenas com a produção de etanol. As emissões geradas pelo sistema de cogeração são relacionadas com as energias térmicas e elétricas utilizadas para a produção do etanol. Foi considerado que o etanol anidro é produzido no mesmo processo que a vinhaça, sendo assim, ocorre alocação entre os dois.

Processo 3: Tratamento da vinhaça

O tratamento da vinhaça será realizado a fim de tornar o meio adequado para o cultivo e crescimento das microalgas, necessitando clarificar o meio e regular o pH.

A clarificação foi realizada por um tratamento físico-químico, com os processos de mistura rápida na calha Parshall, floculação e decantação. O coagulante utilizado é sulfato de alumínio com dosagem de 10 g/L.

Ao elevar o pH da vinhaça, para adequar as condições ideais para o cultivo de microalgas da espécie *Chlorella sp.*, foi utilizado hidróxido de sódio (NaOH) adicionado antes à entrada da vinhaça na calha Parshall, com uma dosagem de 1,92 g/L.

Sendo necessários 24.485 litros de vinhaça para obter a unidade funcional, a dosagem dos insumos são 244,85 kg de sulfato de alumínio e de 47,01 kg de NaOH.

Figura 6.4 – Processos da produção de etanol e eletricidade a partir da cana-de-açúcar considerada para os dados ICV.

Fonte: Chagas, Bonomi e Cavalett (2015).

Processo 4: Cultivo de microalgas em Lagoas de alta taxa

O CO₂ utilizado no meio de cultivo é obtido pelos processos do próprio sistema de produto. Foi considerado que a fixação, segundo dados de Nascimento et al. (2015), é de 1,89 g de CO₂ a cada grama de biomassa. Para a unidade funcional, são necessários

10.265,3 g de biomassa, resultando em 19.401,4 g de CO₂, em uma concentração de 5% com o ar atmosférico.

As lagoas de alta taxa operam em ambiente externo, onde a intensidade luminosa incidente é a do sol, sendo utilizadas para a mistura e agitação da lagoa oito motores elétricos para rotação das pás giratórias de 2,25 kW de potência. Para a unidade funcional é gasto 0,816 kWh de energia.

Processo 5: Extração do óleo por Liquefação Hidrotérmica (LHT)

As condições de operação do reator para o processo de extração por LHT, acontece nas condições otimizadas descritas por Jazrawi et al. (2013). Todas as considerações para o processo foram descritas na sessão 5.3.1.4 do capítulo 5.

Os equipamentos do sistema possuem o seguinte gasto de energia:

- Uma centrífuga industrial com potência de 220 kW;
- Três bombas de baixa pressão com potência de 0,37 kW;
- Três bombas de alta pressão com potência de 6 kW;
- Três bombas centrífugas com potência de 0,735 kW,
- 12 aquecedores com potência de 6 kW.

Para a unidade funcional são consumidos 14,20 kWh de energia elétrica, com emissão à atmosfera de 1,51 kg de CO₂ e 0,031 kg de metano.

Processo 6: Conversão do óleo em biodiesel

As características do processo de conversão do óleo em biodiesel encontram-se na sessão 5.3.1.5 do capítulo 5.

Para a unidade funcional utiliza-se 0,2 kg de etanol, 0,007 kg de hidróxido de potássio, 0,027 kg de ácido sulfúrico e 1,031 kWh de energia.

Sistema de produto B:

Processo 1: Atividades agrícolas da cana-de-açúcar

Os dados para a modelagem do processo atividades agrícolas foram obtidos no inventário realizado por Cavalett et al. (2013). E possui os mesmos pressupostos que o processo 1 no sistema A.

Processo 2: Processo industrial da produção de etanol

O processo industrial de produção de etanol foi modelado de acordo com os dados de ICV do etanol realizado por Chagas, Bonomi e Cavalett (2015), que detalha os principais usos de recursos e emissões nas atividades industriais de conversão da cana-de-açúcar em etanol e eletricidade. O processo apresenta as mesmas considerações que o processo 1 descrito para o sistema A.

Processo 3: Tratamento da vinhaça

O tratamento da vinhaça será realizado a fim de tornar o meio adequado para o cultivo e crescimento das microalgas, necessitando clarificar o meio e regular o pH.

A clarificação foi realizada por um tratamento físico-químico, com os processos de mistura rápida na calha Parshall, floculação e decantação. O coagulante utilizado é sulfato de alumínio com dosagem de 10 g/L.

O elevar o pH da vinhaça, para adequar as condições ideais para o cultivo de microalgas da espécie *Chlorella sp.*, foi utilizado hidróxido de sódio (NaOH) adicionado antes à entrada da vinhaça na calha Parshall, com uma dosagem de 1,92 g/L.

Sendo necessários 13.297 litros de vinhaça para obter a unidade funcional, a dosagem dos insumos são 132,97 kg de sulfato de alumínio e de 25,53 kg de NaOH.

Processo 4: Cultivo de microalgas em fotobiorreator

O CO₂ utilizado no meio de cultivo é obtido dos processos do próprio sistema de produto. Foi considerado que a fixação, segundo dados de Nascimento et al. (2015), é de 1,89 g de CO₂ a cada grama de biomassa. Para a unidade funcional, são necessários 10.265,3 g de biomassa, resultando em 19.401,4 g de CO₂, em uma concentração de 5% com o ar atmosférico.

Os fotobiorreatores operam em ambiente externo, onde a intensidade luminosa incidente é a do sol, sendo alimentados com 103 bombas de 1,1 kW de potência. Para a unidade funcional é gasto 2,79 kWh de energia.

Processo 5: Extração do óleo por Liquefação Hidrotérmica (LHT)

As condições de operação do reator para o processo de extração por LHT, acontece nas condições otimizadas descritas por Jazrawi et al. (2013). Todas as considerações para o processo foram descritas na sessão 5.3.1.4 do capítulo 5.

Os equipamentos do sistema possuem o seguinte gasto de energia:

- Uma centrífuga industrial com potência de 220 kW;
- Cinco bombas de baixa pressão com potência de 0,37 kW;
- Cinco bombas de alta pressão com potência de 6 kW;

- Cinco bombas centrífugas com potência de 0,735 kW,
- 20 aquecedores com potência de 6 kW.

Após o termino da reação, são formados óleo, fase aquosa, CO₂, e sólidos totais. É considerada que a vinhaça que foi separada da biomassa na centrifugação, junto com os sólidos totais e fase aquosa da reação, formam uma mistura saída com as mesmas concentrações de compostos químicos da vinhaça utilizada para fertirrigação.

Para determinar a emissão de gases, foi utilizado o estudo de Barreiro et al. (2014), com o rendimento de gás de 15% da massa da biomassa seca, sendo 98% formado por CO₂ e 2% metano.

Para a unidade funcional são consumidos 9,25 kWh de energia elétrica, com emissão à atmosfera de 1,51 kg de CO₂ e 0,031 kg de metano.

Processo 6: Conversão do óleo em biodiesel

As características do processo de conversão do óleo em biodiesel encontram-se na sessão 5.3.1.5 do capítulo 5.

Para a unidade funcional utiliza-se 0,2 kg de etanol, 0,007 kg de hidróxido de potássio, 0,027 kg de ácido sulfúrico e 0,824 kWh de energia.

6.3.1.11. Limitações

As maiores limitações quanto ao estudo devem-se ao fato dos dados serem projetados, não sendo de uma cadeia de produção real. Os dados de produtividade das microalgas em fotobiorreatores foram extrapolados de produção em laboratório e pequena escala para grande escala. Existe a incerteza quanto ao rendimento real do fotobiorreator e para a lagoa de alta taxa, além da quantidade de óleo extraído e fatores de conversão.

A segunda limitação está no fato do sistema ter abrangência *cradle to gate*, não contemplando todo o ciclo de vida do produto, excluindo a fase do uso. Essa limitação foi necessária, pois não foi possível realizar coleta de dados e ensaios para determinar as emissões de um uso específico para o biodiesel.

A limitação quanto os dados serem projetados, foi necessária devido ao objetivo do estudo ser para estudar a viabilidade da produção, ou seja, desenvolvimento de produto.

6.3.1.12. Tipo de revisão crítica

Por se tratar de um estudo de ACV com afirmações comparativas entre dois sistemas que sejam divulgadas ao público, a ABNT (2009a) torna obrigatória a análise crítica. Para isso, foram consultados especialistas do assunto durante os dimensionamentos dos sistemas e durante toda a aplicação da ACV.

6.3.1.13. Tipo e formato do relatório requerido para o estudo

Um estudo de ACV deve ser documentado de maneira fiel, imparcial, completa e exata para a comunicação ao público. Esse estudo de ACV foi realizado com o objetivo de titulação acadêmica em nível de mestrado. Com isso, o relatório final foi apresentado no modelo de dissertação sendo que, os resultados apresentam a estrutura metodológica previsto nas normas vigentes.

6.3.2. Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A análise do inventário (ICV) para este estudo de ACV com afirmações comparativas foi realizado de acordo com as divisões do sistema de produto A e sistema de produto B, com os diferentes critérios de alocação.

As Tabelas de 6.4 a 6.9 apresentam os resultados de ICV para o sistema de lagoas de alta taxa (Sistema A) com alocação de massa. Da Tabela 6.10 a Tabela 6.15 são os resultados ICV do sistema A com alocação pelo critério econômico. As Tabelas 6.16 até 6.19 apresentam os resultados ICV para alocação *cut-off* no subsistema de produção de etanol e alocação pelo critério de massa entre o biodiesel e o glicerol. E as Tabelas de 6.20 a 6.23 alocação *cut-off* com alocação por critério econômico.

E representado os resultados de ICV para o sistema com a utilização dos fotobiorreatores, sistema B, nas Tabelas de 6.24 a 6.43, com os diferentes critério de alocação. Pelo critério de massa das Tabelas 6.24 a 6.29, critério econômico das Tabelas 6.30 a 6.35, critério *cut-off*, seguido pelo critério de massa, Tabelas 6.36 a 6.39 e por fim, critério *cut-off* e critério econômico da Tabelas 6.40 à 6.43.

6.3.2.1. Inventário do ciclo de vida do sistemas A - Cultivo em lagoas de alta taxa

Tabela 6.4 – Inventário das atividades agrícolas da cana-de-açúcar com critério de alocação em massa: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXOS INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça	56,99 m³	25,31 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
<u>FLUXOS DE ENTRADA</u>					
Fertilizantes					
Amônia, como nitrogênio	8,31 kg	3,69 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Ureia, como nitrogênio	80,572 kg	35,78 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Nitrato de amônia, como nitrogênio	8,92 kg	3,96 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fosfato de monoamônia, como P2O5	3,08 kg	1,37 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fosfato de monoamônia, como nitrogênio	0,58 kg	0,26 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Superfosfato simples, como P2O5	41,06 kg	18,23 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cloreto de potássio, como K2O	74,68 kg	33,16 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Calcário	456,22 kg	202,59 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Gesso	228,11 kg	101,30 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Torta de filtro	558,90 kg	248,19 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Agrotóxicos					
Glifosato	0,26 kg	0,12 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Diuron	0,11 kg	0,05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Carbofuran	0,48 kg	0,21 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Reguladores de crescimento	0,1 kg	0,04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Inseticidas	0,05 kg	0,02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Herbicidas	0,28 kg	0,12 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Maquinário					
Colheitadeira	3,51 kg	1,56 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Trator	7,83 kg	3,48 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Maquinário agrícola	11,65 kg	5,17 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transportes da cana-de-açúcar					
Transporte, caminhão 16-32t	139,8 tkm	62,08 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte, caminhão > 32t	2125 tkm	943,64 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
					Continua

Continuação

ENTRADA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
Transportes dos materiais					
Transporte, caminhão 7.5-16t	43,8 tkm	19,45 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte, caminhão 16-32t	1020,3 tkm	453,08 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte, navio transoceânico de carga	2313,8 tkm	1027,48 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte da vinhaça					
Transporte, caminhão 16-32t	235,9 tkm	104,76 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Aplicação da vinhaça					
Propagação de lodo, por tanque de vácuo	3,42 m³	1,52 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Canal de transporte de vinhaça	5,18E-05 km	2,30E-05 km		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Operação do sistema de bombeamento e armazenamento da vinhaça	35,91 m³	15,95 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Operação do sistema de aspersão da vinhaça	53,57 m³	23,79 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Consumo de energia					
Diesel	133,6 kg	59,33 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
SAÍDA	Dado bruto (um/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Cana-de-açúcar	70.300 kg	39849,90 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>					
Devido a mudança do uso do solo					
Dióxido de carbono	3,53E+03 kg	1567,55 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido a queima para colheita					
Compostos orgânicos voláteis (VOC)	20,93 kg	9,29 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de carbono (biogênico)	275,08 kg	122,15 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Óxido de nitrogênio	7,48 kg	3,32 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Partículas >10 um	23,32 kg	10,36 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Partículas, <2,5um	11,66 kg	5,18 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de enxofre	1,2 kg	0,53 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Metano (biogênico)	8,07 kg	3,58 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
					Continua

Continuação

SAÍDA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
Devido a uso de fertilizantes e resíduos					
Monóxido de dinitrógeno (adubo nitrogenado)	1,92 kg	0,85 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Amônia (fertilizante nitrogenado)	32 kg	14,21 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Dióxido de carbono (Ureia)	126,6 kg	56,22 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Dióxido de carbono (cal)	217,46 kg	96,57 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Monóxido de dinitrógeno (Vinhaça)	0,4 kg	0,18 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Monóxido de dinitrógeno (Torta de filtro)	0,13 kg	0,06 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Monóxido de dinitrógeno (lixo não queimado)	0,82 kg	0,36 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Monóxido de dinitrógeno (raízes da cana-de-açúcar)	0,66 kg	0,29 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Devido a queima do diesel					
Dióxido de carbono (fóssil)	416,7 kg	185,04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Metano (fóssil)	17,23 g	7,65 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Monóxido de dinitrógeno	16,03 g	7,12 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Amônia	26,71 g	11,86 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Dióxido de enxofre	134,9 g	59,90 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Benzeno	0,975 g	4,33E-01 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Cádmio	0,0013 g	5,77E-04 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Cromo	0,0067 g	2,98E-03 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Cobre	0,227 g	1,01E-01 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Níquel	0,0093 g	4,13E-03 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Selênio	0,0013 g	5,77E-04 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Zinco	0,134 g	5,95E-02 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Benzo (a) pireno	0,004 g	1,78E-03 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
PHA, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	0,439 g	1,95E-01 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Monóxido de carbono (fóssil)	712,2 g	316,26 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Óxidos de nitrogênio	5.676 g	2520,52 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
COVNM, compostos orgânicos voláteis não metânicos	400,7 g	177,94 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Partículas, <2,5 um	1.301,50 g	577,95 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
EMISSIONES PARA ÁGUA (SUBTERRÂNEA)					
Devido ao uso de fertilizantes					
Nitrato	19,35 kg	8,59 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	Continua

Conclusão

SAÍDA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
EMISSIONES PARA A ÁGUA (SUPERFICIAL)					
Devido ao uso de agrotóxicos					
Carbofurano	7,19E-03 kg	3,19E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Diuron	1,67E-03 kg	7,42E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Fipronil	6,84E-03 kg	3,04E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Glifosato	3,90E-03 kg	1,73E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Hexazinona	4,86E-04 kg	2,16E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Imazapic	2,03E-03 kg	9,01E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Tebuthiuron	1,71E-03 kg	7,59E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Trinexapac-etilo	1,45E-03 kg	6,44E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
EMISSIONES PARA O SOLO					
Devido ao uso de agrotóxicos					
Carbofurano	4,20E-01 kg	1,87E-01 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Diuron	1,10E-01 kg	4,88E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Fipronil	4,49E-02 kg	1,99E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Glifosato	2,56E-01 kg	1,14E-01 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Hexazinona	3,19E-02 kg	1,42E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Imazapic	1,33E-01 kg	5,91E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Tebuthiuron	1,12E-01 kg	4,97E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Trinexapac-etilo	9,50E-02 kg	4,22E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Devido ao uso de fertilizantes					
Cádmio	1,05E-03 kg	4,66E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Cobre	1,28E-02 kg	5,68E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Zinco	5,62E-02 kg	2,50E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Chumbo	2,31E-02 kg	1,03E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Níquel	1,24E-02 kg	5,51E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Cromo	1,53E-02 kg	6,79E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Devido aos pneus dos maquinários					
Zinco	25,48 g	11,31 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Chumbo	4,14 g	1,84 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Cádmio	0,96 g	0,43 g	Literatura	Cavalett et al. (2013)	

Tabela 6.5 - Inventário da produção industrial do etanol com critério de alocação em massa: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Cana-de-açúcar	1000 kg	39849,98	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
<u>FLUXOS DE ENTRADA</u>					
Ácido sulfúrico	358 g	11176,00	g	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Cal	1,01 kg	31,53	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Produtos químicos inorgânicos	7,4 g	231,01	g	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Fabricação de produtos de aço, usinagem média de metais	2,03E-01 kg	6,34	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Fabricação de produtos de aço cromado, metal médio de trabalho	1,18E-02 kg	0,37	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Concreto, placa de base e fundação	1,43E-04 m³	4,46E-03	m³	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Construção, parede, construção em aço	5,68E-05 m²	1,77E-03	m²	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Óleo de lubrificação	0,013 kg	0,41	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Ciclohexano	0,043 kg	1,34	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Transporte, caminhão 16-32t	0,635 tkm	19,82	tkm	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
SAÍDA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça bruta	634,3 kg	25276,84	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>					
Etanol	0,08 kg	1,36	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Processo de fermentação					
Dióxido de carbono, biogênico	41,4 kg	1292,42	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Queima do bagaço					
Dióxido de carbono, biogênico	166,7 kg	5204,02	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Monóxido de carbono	0,131 kg	4,09	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Óxidos de nitrogênio	0,13 kg	4,06	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Monóxido de dinitrógeno	0,007 kg	0,22	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Óxidos de enxofre	0,007 kg	0,22	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Metano	0,054 kg	1,69	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)

Continua

Conclusão

SAÍDA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
Compostos orgânicos voláteis	0,009 kg	0,28 kg	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Partículas, > 2,5 um e < 10 um	0,148 kg	4,62 kg	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Partículas, < 2,5 um	0,074 kg	2,31 kg	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)

Tabela 6.6 – Inventário do tratamento preliminar da vinhaça com critério de alocação em massa: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça bruta	150 L/s	25276,84 kg	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXOS DE ENTRADA</u>					
Sulfato de alumínio	0,01 kg/L	204,03 kg	kg	Calculado	Relação Lima (2013)
Hidróxido de sódio	1,92E-03 kg/L	39,17 kg	kg	Calculado	Obtido em ensaio de laboratório
SAÍDA	Dado bruto uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça tratada	150 L/s	25276,84 kg	kg	Calculado	Relação Santos (2013)

Tabela 6.7 – Inventário do cultivo em lagoas de alta taxa com critério de alocação em massa: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça Tratada	150 L/s	25276,84 kg	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>					
Energia elétrica	18 kWh	0,68 kWh	kWh	Calculado	Catálogos de bombas
SAÍDA	DB uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Biomassa	223,29 kg/h	10,27 kg	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>					
Dióxido de carbono	-422 kg/h	16,17 kg	kg	Calculado	Relação Nascimento et al. (2015)

Tabela 6.8 – Inventário do processo de extração do óleo (LHT) com alocação em massa: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	223,29	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	313,32	kWh	11,84	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	27,57	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	32,81	kg/h	1,24	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)
Metano	0,67	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)

Tabela 6.9 – Inventário do processo de conversão do óleo em biodiesel com critério de alocação em massa: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	27,57	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Etanol	4,46	kg/h	0,17	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
Hidróxido de potássio	0,17	kg/h	0,01	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
Ácido sulfúrico	0,61	kg/h	0,02	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
<u>Consumo de energia</u>						
Energia elétrica	22,74	kWh	0,86	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biodiesel	22,06	kg/h	1,00	kg	Calculado	Obtido com rendimento de 80%

Tabela 6.10 – Inventário das atividades agrícolas da cana-de-açúcar com critério de alocação econômica: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça	56,99 m ³	0,12 m ³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
<u>FLUXOS DE ENTRADA</u>					
Fertilizantes					
Amônia, como nitrogênio	8,31 kg	1,81E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Uréia, como nitrogênio	80,572 kg	1,76E-01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Nitrato de amônia, como nitrogênio	8,92 kg	1,95E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fosfato de monoamônia, como P2O5	3,08 kg	6,72E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fosfato de monoamônia, a base de nitrogênio	0,58 kg	1,26E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Superfosfato simples, como P2O5	41,06 kg	8,95E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cloreto de potássio, como K2O	74,68 kg	1,63E-01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Calcário	456,22 kg	9,95E-01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Gesso	228,11 kg	4,97E-01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Torta de filtro	558,90 kg	1,22 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Agrotóxicos					
Glifosato	0,26 kg	5,67E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Diuron	0,11 kg	2,40E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Carbofuran	0,48 kg	1,05E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Reguladores de crescimento	0,1 kg	2,18E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Inseticidas	0,05 kg	1,09E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Herbicidas	0,28 kg	6,11E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Maquinário					
Colheitadeira	3,51 kg	7,65E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Trator	7,83 kg	1,71E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Maquinário agrícola	11,65 kg	2,54E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transportes da cana-de-açúcar					
Transporte, caminhão 16-32t	139,8 tkm	0,30 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte, caminhão > 32t	2125 tkm	4,63 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transportes dos materiais					
Transporte, caminhão 7.5-16t	43,8 tkm	0,10 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)

Continua

Continuação					
ENTRADA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
Transporte, caminhão 16-32t	1020,3 tkm	2,22 tkm	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Transporte, navio transoceânico de carga	2313,8 tkm	5,05 tkm	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Transporte da vinhaça					
Transporte, caminhão 16-32t	235,9 tkm	0,51 tkm	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Aplicação da vinhaça					
Propagação de lodo, por tanque de vácuo	3,42 m³	0,01 m³	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Canal de transporte de vinhaça	5,18E-05 km	1,25E-05 km	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Operação do sistema de bombeamento e armazenamento da vinhaça	35,91 m³	0,08 m³	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Operação do sistema de aspersão da vinhaça	53,57 m³	0,12 m³	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Consumo de energia					
Diesel	133,6 kg	0,29 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
SAÍDA	Dado bruto	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
FLUXO INTERMEDIÁRIO					
Cana-de-açúcar	70.300 kg	39849,90 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
EMISSIONES PARA O AR					
Devido a mudança do uso do solo					
Dióxido de carbono	3,53E+03 kg	7,70 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Devido a queima para colheita					
Compostos orgânicos voláteis (VOC)	20,93 kg	4,56E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Monóxido de carbono (biogênico)	275,08 kg	6,00E-01 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Óxido de nitrogênio	7,48 kg	1,63E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Partículas >10 um	23,32 kg	5,09E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Partículas, <2,5um	11,66 kg	2,54E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Dióxido de enxofre	1,2 kg	2,62E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Monóxido de dinitrogênio	0,21 kg	4,58E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Metano (biogênico)	8,07 kg	1,76E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Devido a uso de fertilizantes e resíduos					
Monóxido de dinitrógeno (adubo nitrogenado)	1,92 kg	4,19E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Amônia (fertilizante nitrogenado)	32 kg	6,98E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	

Continuação

SAÍDA	Dado bruto	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
Dióxido de carbono (Ureia)	126,6 kg	2,76E-01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de carbono (cal)	217,46 kg	4,74E-01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (Vinhaça)	0,4 kg	8,72E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (Torta de filtro)	0,13 kg	2,83E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (lixo não queimado)	0,82 kg	1,79E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (raízes da cana-de-açúcar)	0,66 kg	1,44E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido a queima do diesel					
Dióxido de carbono (fóssil)	416,7 kg	9,09E-01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Metano (fóssil)	17,23 g	3,76E-02 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno	16,03 g	3,50E-02 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Amônia	26,71 g	5,82E-02 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de enxofre	134,9 g	2,94E-01 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Benzeno	0,975 g	2,13E-03 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cádmio	0,0013 g	2,83E-06 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cromo	0,0067 g	1,46E-05 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cobre	0,227 g	4,95E-04 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Níquel	0,0093 g	2,03E-05 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Selênio	0,0013 g	2,83E-06 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Zinco	0,134 g	2,92E-04 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Benzo (a) pireno	0,004 g	8,72E-06 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
PHA, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	0,439 g	9,57E-04 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de carbono (fóssil)	712,2 g	1,55 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Óxidos de nitrogênio	5,676 g	12,38 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
COVNM, compostos orgânicos voláteis não metânicos	400,7 g	0,87 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Partículas, <2,5 um	1.301,50 g	2,84 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
EMISSIONES PARA ÁGUA (SUBTERRÂNEA)					
Devido ao uso de fertilizantes					
Nitrato	19,35 kg	4,22E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
EMISSIONES PARA A ÁGUA (SUPERFICIAL)					
Devido ao uso de agrotóxicos					
Carbofurano	7,19E-03 kg	1,57E-05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)

Conclusão

FLUXOS DE SAÍDA	Dado bruto		Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
Diuron	1,67E-03	kg	3,64E-06	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fipronil	6,84E-03	kg	1,49E-05	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Glifosato	3,90E-03	kg	8,50E-06	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Hexazinona	4,86E-04	kg	1,06E-06	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Imazapic	2,03E-03	kg	4,43E-06	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Tebuthiuron	1,71E-03	kg	3,73E-06	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Trinexapac-etilo	1,45E-03	kg	3,16E-06	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
EMISSIONES PARA O SOLO					Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido ao uso de agrotóxicos						
Carbofurano	4,20E-01	kg	9,16E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Diuron	1,10E-01	kg	2,40E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fipronil	4,49E-02	kg	9,79E-05	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Glifosato	2,56E-01	kg	5,58E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Hexazinona	3,19E-02	kg	6,96E-05	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Imazapic	1,33E-01	kg	2,90E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Tebuthiuron	1,12E-01	kg	2,44E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Trinexapac-etilo	9,50E-02	kg	2,07E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido ao uso de fertilizantes						
Cádmio	1,05E-03	kg	2,29E-06	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cobre	1,28E-02	kg	2,79E-05	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Zinco	5,62E-02	kg	1,23E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Chumbo	2,31E-02	kg	5,04E-05	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Níquel	1,24E-02	kg	2,70E-05	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cromo	1,53E-02	kg	3,34E-05	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido aos pneus dos maquinários						
Zinco	25,48	g	5,56E-02	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Chumbo	4,14	g	9,03E-03	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cádmio	0,96	g	2,09E-03	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)

Tabela 6.11 - Inventário da produção industrial do etanol com critério de alocação econômico: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Cana-de-açúcar	1000 kg		39849,98 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
<u>Consumo de recursos não renováveis</u>					
Ácido sulfúrico	358 g		86,52 g	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Cal	1,01 kg		0,24 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Produtos químicos inorgânicos	7,4 g		1,79 g	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Fabricação de produtos de aço, usinagem média de metais	2,03E-01 kg		0,05 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Fabricação de produtos de aço cromado, metal médio de trabalho	1,18E-02 kg		2,85E-03 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Concreto, placa de base e fundação	1,43E-04 m³		3,46E-05 m³	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Construção, parede, construção em aço	5,68E-05 m²		1,37E-05 m²	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Óleo de lubrificação	0,013 kg		3,14E-03 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Ciclohexano	0,043 kg		1,04E-02 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Transporte, caminhão 16-32t	0,635 tkm		1,53E-01 tkm	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
SAÍDA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça bruta	634,3 kg		25276,84 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>					
Etanol	0,08 kg		0,01 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Dióxido de carbono, biogênico	41,4 kg		6,35 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Dióxido de carbono, biogênico	166,7 kg		25,56 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Monóxido de carbono	0,131 kg		2,01E-02 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Óxidos de nitrogênio	0,13 kg		1,99E-02 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Monóxido de dinitrógeno	0,007 kg		1,07E-03 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Óxidos de enxofre	0,007 kg		1,07E-03 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Metano	0,054 kg		8,28E-03 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Compostos orgânicos voláteis	0,009 kg		1,38E-03 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Partículas, > 2,5 um e < 10 um	0,148 kg		2,27E-02 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)
Partículas, < 2,5 um	0,074 kg		1,13E-02 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)

Tabela 6.12 – Inventário do processo de tratamento preliminar da vinhaça com critério de alocação econômico: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça bruta	150	L/s	25276,84	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Sulfato de alumínio	0,01	kg/L	241,52	kg	Calculado	Relação Lima (2013)
Hidróxido de sódio	1,92E-03	kg/L	46,37	kg	Calculado	Obtido em ensaio de laboratório
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça tratada	150	L/s	25276,84	kg	Calculado	Relação Santos (2013)

Tabela 6.13 – Inventário do processo de cultivo em lagoas de alta taxa com critério de alocação econômico: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça Tratada	150	L/s	25276,84	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	18	kWh	0,80	kWh	Calculado	Catálogos de bombas
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	223,29	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	-422	kg/h	19,14	kg	Calculado	Relação Nascimento et al. (2015)

Tabela 6.14 – Inventário do processo de extração do óleo (LHT) com critério de alocação econômico: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	223,29	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	313,32	kWh	14,01	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	27,57	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	32,81	kg/h	1,47	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)
Metano	0,67	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)

Tabela 6.15 – Inventário do processo de conversão do óleo em biodiesel com critério de alocação econômico: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	27,57	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Hidróxido de potássio	0,17	kg/h	0,01	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
Etanol	4,46	kg/h	0,20	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
Ácido sulfúrico	0,61	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
<u>Consumo de energia</u>						
Energia elétrica	22,74	kWh	1,02	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biodiesel	22,06	kg/h	1,00	kg	Calculado	Obtido com rendimento de 80%

Tabela 6.16 – Inventário do processo de tratamento preliminar da vinhaça com critério de alocação *cut-off* e massa: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça bruta	150	L/s	25276,84	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Sulfato de alumínio	0,01	kg/L	204,03	kg	Calculado	Relação Lima (2013)
Hidróxido de sódio	1,92E-03	kg/L	39,17	kg	Calculado	Obtido em ensaio de laboratório
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça tratada	150	L/s	25276,84	kg	Calculado	Relação Santos (2013)

Tabela 6.17 – Inventário do processo de cultivo em lagoas de alta taxa com critério de alocação *cut-off* e massa: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça Tratada	150	L/s	25276,84	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	18	kWh	0,68	kWh	Calculado	Catálogos de bombas
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	223,29	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	-422	kg/h	16,17	kg	Calculado	Relação Nascimento et al. (2015)

Tabela 6.18 – Inventário do processo de extração do óleo (LHT) com critério de alocação *cut-off* e massa: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	223,29	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	313,32	kWh	11,84	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	27,57	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	32,81	kg/h	1,24	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)
Metano	0,67	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)

Tabela 6.19 – Inventário do processo de conversão do óleo em biodiesel com critério de alocação *cut-off* e massa: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	27,57	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Etanol	4,46	kg/h	0,17	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
Hidróxido de potássio	0,17	kg/h	0,01	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
Ácido sulfúrico	0,61	kg/h	0,02	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
<u>Consumo de energia</u>						
Energia elétrica	22,74	kWh	0,86	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biodiesel	22,06	kg/h	1,00	kg	Calculado	Obtido com rendimento de 80%

Tabela 6.20 – Inventário do processo de tratamento preliminar da vinhaça com critério de alocação *cut-off* e econômico: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça bruta	150	L/s	25276,84	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Sulfato de alumínio	0,01	kg/L	241,52	kg	Calculado	Relação Lima (2013)
Hidróxido de sódio	1,92E-03	kg/L	46,37	kg	Calculado	Obtido em ensaio de laboratório
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça tratada	150	L/s	25276,84	kg	Calculado	Relação Santos (2013)

Tabela 6.21 – Inventário do processo de cultivo em lagoas de alta taxa com critério de alocação *cut-off* e econômico: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça Tratada	150	L/s	25276,84	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	18	kWh	0,80	kWh	Calculado	Catálogos de bombas
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	223,29	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	-422	kg/h	19,14	kg	Calculado	Relação Nascimento et al. (2015)

Tabela 6.22 – Inventário do processo de extração do óleo (LHT) com critério de alocação *cut-off* e econômico: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	223,29	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	313,32	kWh	14,01	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	27,57	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	32,81	kg/h	1,47	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)
Metano	0,67	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)

Tabela 6.23 - Inventário do processo de conversão do óleo em biodiesel com critério de alocação *cut-off* e econômico: Sistema A

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	27,57	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Etanol	4,46	kg/h	0,20	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
Hidróxido de potássio	0,17	kg/h	0,01	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
Ácido sulfúrico	0,61	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Guzzatto et al. (2012)
<u>Consumo de energia</u>						
Energia elétrica	22,74	kWh	1,02	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biodiesel	22,06	kg/h	1,00	kg	Calculado	Obtido com rendimento de 80%

6.3.2.2. – Inventários do ciclo de vida do sistema B: Cultivo em fotobiorreatores

Tabela 6.24 – Inventário das atividades agrícolas da produção de cana-de-açúcar com critério de alocação em massa: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça	56,99 m³	13,74 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>					
Fertilizantes					
Amônia, como nitrogênio	8,31 kg	2,00 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Ureia, como nitrogênio	80,572 kg	19,43 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Nitrato de amônia, como nitrogênio	8,92 kg	2,15 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fosfato de monoamônia, como P2O5	3,08 kg	0,74 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fosfato de monoamônia, a base de nitrogênio	0,58 kg	0,14 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Superfosfato simples, como P2O5	41,06 kg	9,90 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cloreto de potássio, como K2O	74,68 kg	18,01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Calcário	456,22 kg	110,02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Gesso	228,11 kg	55,01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Torta de filtro	558,90 kg	134,78 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Agrotóxicos					
Glifosato	0,26 kg	0,06 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Diuron	0,11 kg	0,03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Carbofuran	0,48 kg	0,12 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Reguladores de crescimento	0,1 kg	0,02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Inseticidas	0,05 kg	0,01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Herbicidas	0,28 kg	0,07 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Maquinário					
Colheitadeira	3,51 kg	0,85 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Trator	7,83 kg	1,89 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Maquinário agrícola	11,65 kg	2,81 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transportes da cana-de-açúcar					
Transporte, caminhão 16-32t	139,8 tkm	33,71 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte, caminhão > 32t	2125 tkm	512,46 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Continua					

Continuação

ENTRADA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
Transportes dos materiais					
Transporte, caminhão 7.5-16t	43,8 tkm	10,56 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte, caminhão 16-32t	1020,3 tkm	246,05 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte, navio transoceânico de carga	2313,8 tkm	557,99 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte da vinhaça					
Transporte, caminhão 16-32t	235,9 tkm	56,89 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Aplicação da vinhaça					
Propagação de lodo, por tanque de vácuo	3,42 m³	0,82 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Canal de transporte de vinhaça	5,18E-05 km	1,25E-05 km		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Operação do sistema de bombeamento e armazenamento da vinhaça	35,91 m³	8,66 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Operação do sistema de aspersão da vinhaça	53,57 m³	12,92 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Consumo de energia					
Diesel	133,6 kg	32,22 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
SAÍDA	Dado bruto	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
FLUXO INTERMEDIÁRIO					
Cana-de-açúcar	70.300 kg	21641,20 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
EMISSIONES PARA O AR					
Devido à mudança do uso do solo					
Dióxido de carbono	3,53E+03 kg	851,29 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido à queima para colheita					
Compostos orgânicos voláteis (VOC)	20,93 kg	5,05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de carbono (biogênico)	275,08 kg	66,34 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Óxido de nitrogênio	7,48 kg	1,80 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Partículas >10 um	23,32 kg	5,62 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Partículas, <2,5um	11,66 kg	2,81 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de enxofre	1,2 kg	0,29 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno	0,21 kg	0,05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Metano (biogênico)	8,07 kg	1,95 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)

Continua

Continuação

SAÍDA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
Devido ao uso de fertilizantes e resíduos					
Monóxido de dinitrógeno (adubo nitrogenado)	1,92 kg	0,46 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Amônia (fertilizante nitrogenado)	32 kg	7,72 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de carbono (Ureia)	126,6 kg	30,53 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de carbono (cal)	217,46 kg	52,44 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (Vinhaça)	0,4 kg	0,10 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (Torta de filtro)	0,13 kg	0,03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (lixo não queimado)	0,82 kg	0,20 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (raízes da cana-de-açúcar)	0,66 kg	0,16 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido a queima do diesel					
Dióxido de carbono (fóssil)	416,7 kg	100,49 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Metano (fóssil)	17,23 g	4,16 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno	16,03 g	3,87 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Amônia	26,71 g	6,44 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de enxofre	134,9 g	39,04 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Benzeno	0,975 g	2,35E-01 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cádmio	0,0013 g	3,14E-04 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cromo	0,0067 g	1,62E-03 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cobre	0,227 g	5,47E-02 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Níquel	0,0093 g	2,24E-03 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Selênio	0,0013 g	3,14E-04 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Zinco	0,134 g	3,23E-02 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Benzo (a) pireno	0,004 g	9,65E-04 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
PHA, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	0,439 g	1,06E-01 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de carbono (fóssil)	712,2 g	1,72E+02 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Óxidos de nitrogênio	5.676 g	1,37E+03 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
COVNM, compostos orgânicos voláteis não metânicos	400,7 g	9,66E+01 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Partículas, <2,5 um	1.301,50 g	3,14E+02 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
EMISSIONES PARA ÁGUA (SUBTERRÂNEA)					
Devido ao uso de fertilizantes					
Nitrato	19,35 kg	4,67E+00 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
					Continua

Conclusão

SAÍDA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
EMISSIONES PARA A ÁGUA (SUPERFICIAL)					
Devido ao uso de agrotóxicos					
Carbofurano	7,19E-03 kg	1,73E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Diuron	1,67E-03 kg	4,03E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fipronil	6,84E-03 kg	1,65E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Glifosato	3,90E-03 kg	9,41E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Hexazinona	4,86E-04 kg	1,17E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Imazapic	2,03E-03 kg	4,90E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Tebuthiuron	1,71E-03 kg	4,12E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Trinexapac-etilo	1,45E-03 kg	3,50E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
EMISSIONES PARA O SOLO					
Devido ao uso de agrotóxicos					
Carbofurano	4,20E-01 kg	1,01E-01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Diuron	1,10E-01 kg	2,65E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fipronil	4,49E-02 kg	1,08E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Glifosato	2,56E-01 kg	6,17E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Hexazinona	3,19E-02 kg	7,69E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Imazapic	1,33E-01 kg	3,21E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Tebuthiuron	1,12E-01 kg	2,70E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Trinexapac-etilo	9,50E-02 kg	2,29E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido ao uso de fertilizantes					
Cádmio	1,05E-03 kg	2,53E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cobre	1,28E-02 kg	3,09E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Zinco	5,62E-02 kg	1,36E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Chumbo	2,31E-02 kg	5,57E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Níquel	1,24E-02 kg	2,99E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cromo	1,53E-02 kg	3,69E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido aos pneus dos maquinários					
Zinco	25,48 g	6,14E+00 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Chumbo	4,14 g	9,98E-01 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cádmio	0,96 g	2,32E-01 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)

Tabela 6.25 – Inventário do processo industrial de produção de etanol com critério alocação em massa: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Cana-de-açúcar	1000 kg	21641,20 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Tratamento de água	1,5 kg	25,43 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>					
Ácido sulfúrico	358 g	6069,32 g	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Cal	1,01 kg	17,12 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Produtos químicos inorgânicos	7,4 g	125,46 g	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Fabricação de produtos de aço, usinagem média de metais	2,03E-01 kg	3,44 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Fabricação de produtos de aço cromado, metal médio de trabalho	1,18E-02 kg	0,20 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Concreto, placa de base e fundação	1,43E-04 m³	0,00 m³	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Construção, parede, construção em aço	5,68E-05 m²	0,00 m²	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Óleo de lubrificação	0,013 kg	0,22 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Ciclohexano	0,043 kg	0,73 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Transporte, caminhão 16-32t	0,635 tkm	10,77 tkm	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
SAÍDA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça bruta	634,3 kg	13727,01 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>					
Etanol	0,08 kg	1,36 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Devido à fermentação					
Dióxido de carbono, biogênico	41,4 kg	701,87 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Devido à queima do bagaço					
Dióxido de carbono, biogênico	166,7 kg	2826,13 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Monóxido de carbono	0,131 kg	2,22 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Óxidos de nitrogênio	0,13 kg	2,20 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Monóxido de dinitrógeno	0,007 kg	0,12 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Óxidos de enxofre	0,007 kg	0,12 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
					Continua

Conclusão						
SAÍDA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários	
Metano	0,054 kg		0,92 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Compostos orgânicos voláteis	0,009 kg		0,15 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Partículas, > 2,5 um e < 10 um	0,148 kg		2,51 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Partículas, < 2,5 um	0,074 kg		1,25 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	

Tabela 6.26 – Inventário do processo de tratamento preliminar da vinhaça com critério de alocação em massa: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça bruta	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Sulfato de alumínio	0,01	kg/L	110,80	kg	Calculado	Relação Lima (2013)
Hidróxido de sódio	1,92E-03	kg/L	21,27	kg	Calculado	Obtido em ensaio de laboratório
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça tratada	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)

Tabela 6.27 – Inventário do processo de cultivo por fotobiorreatores com critério de alocação em massa: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça Tratada	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	113,54	kWh	2,33	kWh	Calculado	Catálogos de bombas
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	416,88	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	-787,9	kg/h	-16,17	kg	Calculado	Relação Nascimento et al. (2015)

Tabela 6.28 – Inventário do processo de extração do óleo (LHT) com critério de alocação em massa: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	416,88	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	375,53	kWh	7,71	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	50,76	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	61,28	kg/h	1,26	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)
Metano	1,25	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)

Tabela 6.29 – Inventário do processo de conversão do óleo em biodiesel com critério de alocação em massa: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	50,76	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Etanol	8,21	kg/h	0,17	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
Hidróxido de potássio	0,31	kg/h	0,01	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
Ácido sulfúrico	1,12	kg/h	0,02	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
<u>Consumo de energia</u>						
Energia elétrica	33,471	kWh	0,69	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biodiesel	40,61	kg/h	1,00	kg	Calculado	Obtido com rendimento de 80%

Tabela 6.30 – Inventário das atividades agrícolas da cana-de-açúcar com critério de alocação econômico: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça	56,99 m³	0,07 m³	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
<u>FLUXOS DE ENTRADA</u>					
Fertilizantes					
Amônia, como nitrogênio	8,31 kg	9,84E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Ureia, como nitrogênio	80,572 kg	9,54E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Nitrato de amônia, como nitrogênio	8,92 kg	1,06E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Fosfato de monoamônia, como P2O5	3,08 kg	3,65E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Fosfato de monoamônia, a base de nitrogênio	0,58 kg	6,87E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Superfosfato simples, como P2O5	41,06 kg	4,86E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Cloreto de potássio, como K2O	74,68 kg	8,84E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Calcário	456,22 kg	5,40E-01 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Gesso	228,11 kg	2,70E-01 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Torta de filtro	558,90 kg	0,66 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Agrotóxicos					
Glifosato	0,26 kg	3,08E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Diuron	0,11 kg	1,30E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Carbofuran	0,48 kg	5,68E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Reguladores de crescimento	0,1 kg	1,18E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Inseticidas	0,05 kg	5,92E-05 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Herbicidas	0,28 kg	3,32E-04 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Maquinário					
Colheitadeira	3,51 kg	4,16E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Trator	7,83 kg	9,27E-03 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Maquinário agrícola	11,65 kg	1,38E-02 kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Transportes da cana-de-açúcar					
Transporte, caminhão 16-32t	139,8 tkm	0,17 tkm	Literatura	Cavalett et al. (2013)	
Transporte, caminhão > 32t	2125 tkm	2,52 tkm	Literatura	Cavalett et al. (2013)	

Continua

Continuação

ENTRADA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
Transportes dos materiais					
Transporte, caminhão 7.5-16t	43,8 tkm	0,05 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte, caminhão 16-32t	1020,3 tkm	1,21 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte, navio transoceânico de carga	2313,8 tkm	2,74 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Transporte da vinhaça					
Transporte, caminhão 16-32t	235,9 tkm	0,28 tkm		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Aplicação da vinhaça					
Propagação de lodo, por tanque de vácuo	3,42 m³	0,00 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Canal de transporte de vinhaça	5,18E-05 km	1,25E-05 km		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Operação do sistema de bombeamento e armazenamento da vinhaça	35,91 m³	0,04 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Operação do sistema de aspersão da vinhaça	53,57 m³	0,06 m³		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Consumo de energia					
Diesel	133,6 kg	0,16 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
SAÍDA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
FLUXO INTERMEDIÁRIO					
Cana-de-açúcar	70.300 kg	21641,20 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
EMISSIONES PARA O AR					
Devido à mudança do uso do solo					
Dióxido de carbono	3,53E+03 kg	4,18 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido a queima para colheita					
Compostos orgânicos voláteis (VOC)	20,93 kg	2,48E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de carbono (biogênico)	275,08 kg	3,26E-01 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Óxido de nitrogênio	7,48 kg	8,86E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Partículas >10 um	23,32 kg	2,76E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Partículas, <2,5um	11,66 kg	1,38E-02 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de enxofre	1,2 kg	1,42E-03 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitogênio	0,21 kg	2,49E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)

Continua

Continuação

SAÍDA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
Metano (biogênico)	8,07 kg	9,56E-03	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido ao uso de fertilizantes e resíduos					
Monóxido de dinitrógeno (adubo nitrogenado)	1,92 kg	2,27E-03	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Amônia (fertilizante nitrogenado)	32 kg	3,79E-02	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de carbono (Uréia)	126,6 kg	1,50E-01	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de carbono (cal)	217,46 kg	2,58E-01	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (Vinasse)	0,4 kg	4,74E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (Torta de filtro)	0,13 kg	1,54E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (lixo não queimado)	0,82 kg	9,71E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno (raízes da cana-de-açúcar)	0,66 kg	7,82E-04	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido a queima do diesel					
Dióxido de carbono (fóssil)	416,7 kg	4,93E-01	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Metano (fóssil)	17,23 g	2,04E-02	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de dinitrógeno	16,03 g	1,90E-02	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Amônia	26,71 g	3,16E-02	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Dióxido de enxofre	134,9 g	1,60E-01	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Benzeno	0,975 g	1,15E-03	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cádmio	0,0013 g	1,54E-06	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cromo	0,0067 g	7,93E-06	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cobre	0,227 g	2,69E-04	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Níquel	0,0093 g	1,10E-05	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Selênio	0,0013 g	1,54E-06	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Zinco	0,134 g	1,59E-04	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
PHA, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	0,439 g	5,20E-04	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Monóxido de carbono (fóssil)	712,2 g	8,43E-01	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Óxidos de nitrogênio	5,676 g	6,72E+00	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
COVNM, compostos orgânicos voláteis não metânicos	400,7 g	4,75E-01	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
Partículas, <2,5 um	1.301,50 g	1,54E+00	g	Literatura	Cavalett et al. (2013)
EMISSIONES PARA ÁGUA (SUBTERRÂNEA)					
Devido ao uso de fertilizantes					
Nitrato	19,35 kg	2,29E-02	kg	Literatura	Cavalett et al. (2013)

Conclusão

SAÍDA	Dado bruto (uni/ha)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
EMISSIONES PARA A ÁGUA (SUPERFICIAL)					
Devido ao uso de agrotóxicos					
Carbofurano	7,19E-03 kg	8,51E-06 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Diuron	1,67E-03 kg	1,98E-06 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fipronil	6,84E-03 kg	8,10E-06 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Glifosato	3,90E-03 kg	4,62E-06 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Hexazinona	4,86E-04 kg	5,76E-07 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Imazapic	2,03E-03 kg	2,40E-06 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Tebuthiuron	1,71E-03 kg	2,03E-06 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Trinexapac-etilo	1,45E-03 kg	1,72E-06 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
EMISSIONES PARA O SOLO				Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido ao uso de agrotóxicos					
Carbofurano	4,20E-01 kg	4,97E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Diuron	1,10E-01 kg	1,30E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Fipronil	4,49E-02 kg	5,32E-05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Glifosato	2,56E-01 kg	3,03E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Hexazinona	3,19E-02 kg	3,78E-05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Imazapic	1,33E-01 kg	1,58E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Tebuthiuron	1,12E-01 kg	1,33E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Trinexapac-etilo	9,50E-02 kg	1,13E-04 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido ao uso de fertilizantes					
Cádmio	1,05E-03 kg	1,24E-06 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cobre	1,28E-02 kg	1,52E-05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Zinco	5,62E-02 kg	6,66E-05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Chumbo	2,31E-02 kg	2,74E-05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Níquel	1,24E-02 kg	1,47E-05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cromo	1,53E-02 kg	1,81E-05 kg		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Devido aos pneus dos maquinários					
Zinco	25,48 g	3,02E-02 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Chumbo	4,14 g	4,90E-03 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)
Cádmio	0,96 g	1,14E-03 g		Literatura	Cavalett et al. (2013)

Tabela 6.31 – Inventário do processo industrial de produção de etanol com critério de alocação econômica: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Cana-de-açúcar	1000 kg	21641,20 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Tratamento de água	1,5 kg	0,12 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>					
Ácido sulfúrico	358 g	29,80 g	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Cal	1,01 kg	0,08 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Produtos químicos inorgânicos	7,4 g	0,62 g	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Fabricação de produtos de aço, usinagem média de metais	2,03E-01 kg	0,02 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Fabricação de produtos de aço cromado, metal médio de trabalho	1,18E-02 kg	9,82E-04 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Concreto, placa de base e fundação	1,43E-04 m³	1,19E-05 m³	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Construção, parede, construção em aço	5,68E-05 m²	4,73E-06 m²	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Óleo de lubrificação	0,013 kg	1,08E-03 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Ciclohexano	0,043 kg	3,58E-03 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Transporte, caminhão 16-32t	0,635 tkm	5,29E-02 tkm	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
SAÍDA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>					
Vinhaça bruta	634,3 kg	13727,01 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>					
Etanol	0,08 kg	0,01 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Devido à fermentação					
Dióxido de carbono, biogênico	41,4 kg	3,45 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Devido à queima do bagaço					
Dióxido de carbono, biogênico	166,7 kg	13,88 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Monóxido de carbono	0,131 kg	1,09E-02 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Óxidos de nitrogênio	0,13 kg	1,08E-02 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Monóxido de dinitrógeno	0,007 kg	5,83E-04 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Óxidos de enxofre	0,007 kg	5,83E-04 kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	

Continua

Continuação						
SAÍDA	Dado bruto (uni/ton. cana)	Unidade funcional	Uni	Origem	Comentários	
Metano	0,054 kg	4,50E-03	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Compostos orgânicos voláteis	0,009 kg	7,49E-04	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Partículas, > 2,5 um e < 10 um	0,148 kg	1,23E-02	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	
Partículas, < 2,5 um	0,074 kg	6,16E-03	kg	Literatura	Chagas, Bonomi e Cavalett (2015)	

Tabela 6.32 – Inventário do processo de tratamento preliminar da vinhaça com critério de alocação econômica: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça bruta	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Sulfato de alumínio	0,01	kg/L	131,16	kg	Calculado	Relação Lima (2013)
Hidróxido de sódio	1,92E-03	g/L	25,18	kg	Calculado	Obtido em ensaio de laboratório
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça tratada	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)

Tabela 6.33 – Inventário do processo de cultivo em fotobiorreatores com critério de alocação econômico: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça Tratada	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	113,54	kWh	2,76	kWh	Calculado	Catálogos de bombas
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	416,88	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	-787,9	kg/h	-19,14	kg	Calculado	Relação Nascimento et al. (2015)

Tabela 6.34 – Inventário do processo de extração do óleo (LHT) com critério de alocação econômico: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	416,88	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	375,53	kWh	9,12	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	50,76	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	61,28	kg/h	1,49	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)
Metano	1,25	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)

Tabela 6.35 – Inventário do processo de conversão do óleo em biodiesel com critério de alocação econômico: Sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	50,76	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Etanol	8,21	kg/h	0,20	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
Hidróxido de potássio	0,31	kg/h	0,01	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
Ácido sulfúrico	1,12	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
<u>Consumo de energia</u>						
Energia elétrica	33,471	kWh	0,81	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biodiesel	40,61	kg/h	1,00	kg	Calculado	Obtido com rendimento de 80%

Tabela 6.36 – Inventário do processo de tratamento preliminar da vinhaça com critério de alocação *cut-off* e massa: sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça bruta	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Sulfato de alumínio	0,01	kg/L	110,80	kg	Calculado	Relação Lima (2013)
Hidróxido de sódio	1,92E-03	kg/L	21,27	kg	Calculado	Obtido em ensaio de laboratório
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça tratada	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)

Tabela 6.37 – Inventário do processo de cultivo por fotobiorreatores com critério de alocação *cut-off* e massa: sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça Tratada	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	113,54	kWh	2,33	kWh	Calculado	Catálogos de bombas
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	416,88	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	-787,9	kg/h	-16,17	kg	Calculado	Relação Nascimento et al. (2015)

Tabela 6.38 – Inventário do processo de extração do óleo (LHT) com critério de alocação *cut-off* e massa: sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	416,88	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	375,53	kWh	7,71	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	50,76	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	61,28	kg/h	1,26	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)
Metano	1,25	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)

Tabela 6.39 – Inventário do processo de conversão do óleo em biodiesel com critério de alocação *cut-off* e massa: sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	50,76	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Etanol	8,21	kg/h	0,17	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
Hidróxido de potássio	0,31	kg/h	0,01	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
Ácido sulfúrico	1,12	kg/h	0,02	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
<u>Consumo de energia</u>						
Energia elétrica	33,471	kWh	0,69	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biodiesel	40,61	kg/h	1,00	kg	Calculado	Obtido com rendimento de 80%

Tabela 6.40 – Inventário do processo de tratamento preliminar da vinhaça com critério de alocação *cut-off* e econômico: sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça bruta	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Sulfato de alumínio	0,01	kg/L	131,16	kg	Calculado	Relação Lima (2013)
Hidróxido de sódio	1,92E-03	g/L	25,18	kg	Calculado	Obtido em ensaio de laboratório
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça tratada	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)

Tabela 6.41 – Inventário do processo de cultivo em fotobiorreatores com critério de alocação *cut-off* e econômico: sistema B

ENTRADA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Vinhaça Tratada	150	L/s	13727,01	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	113,54	kWh	2,76	kWh	Calculado	Catálogos de bombas
SAÍDA	Dado bruto	uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	416,88	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	-787,9	kg/h	-19,14	kg	Calculado	Relação Nascimento et al. (2015)

Tabela 6.42 – Inventário do processo de extração do óleo (LHT) com critério de alocação *cut-off* e econômico: sistema B

ENTRADA	Dado bruto	Uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biomassa	416,88	kg/h	10,27	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Energia elétrica	375,53	kWh	9,12	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	Uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	50,76	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>EMISSIONES PARA O AR</u>						
Dióxido de carbono	61,28	kg/h	1,49	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)
Metano	1,25	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Barreiro et al. (2014)

Tabela 6.43 – Inventário do processo de conversão do óleo em biodiesel com critério de alocação *cut-off* e econômico: sistema B

ENTRADA	Dado bruto	Uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Óleo de microalgas	50,76	kg/h	1,25	kg	Calculado	Relação Santos (2013)
<u>FLUXO DE ENTRADA</u>						
Etanol	8,21	kg/h	0,20	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
Hidróxido de potássio	0,31	kg/h	0,01	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
Ácido sulfúrico	1,12	kg/h	0,03	kg	Calculado	Relação Guzatto et al. (2012)
<u>Consumo de energia</u>						
Energia elétrica	33,471	kWh	0,81	kWh	Calculado	Catálogos de equipamentos
SAÍDA	Dado bruto	Uni	Unidade Funcional	uni	Origem	Comentários
<u>FLUXO INTERMEDIÁRIO</u>						
Biodiesel	40,61	kg/h	1,00	kg	Calculado	Obtido com rendimento de 80%

Com relação ao uso de energia, cujo os resultados foram apresentadas nas Tabelas 6.4 a 6.43, ambos os sistemas em todos os critério de alocação utilizados, apresentaram inviabilidade energética. A energia gerada por 1 kg de biodiesel, segundo Batan, Quinn e Bradley (2013), é de 37,6 MJ, contudo, os sistemas estudados necessitaram de uma quantidade maior de energia para produzir a unidade funcional, ocorrendo perda de energia no processo.

Os gastos energéticos para produção de 1 kg de biodiesel (unidade funcional), em cada critério de alocação, foram apresentados nas Tabelas 6.44 e 6.45, sistema A e sistema B, respectivamente.

Tabela 6.44 – Consumo energético do sistema de produção utilizando lagoas de alta taxa para unidade funcional

Critério de alocação	massa	Econômico	<i>cut-off</i> e massa	<i>cut-off</i> e econômico
Gasto energético (MJ)	2.257,83	69,26	48,17	56,99

Tabela 6.45 – Consumo energético do sistema de produção utilizando fotobiorreatores para unidade funcional

Critério de alocação	massa	Econômico	<i>cut-off</i> e massa	<i>cut-off</i> e econômico
Gasto energético (MJ)	1.401,54	52,45	38,63	45,68

O sistema A, pelo critério de alocação de massa, apresentou grande consumo energético para produção da unidade funcional, cerca de 60 vezes maior que a energia gerada. O ponto de maior consumo energético, é o processo de atividades agrícolas da cana-de-açúcar, onde ocorre o consumo de 59,33 kg de óleo diesel, que possui 42,30 MJ/kg de energia (COSTA NETO et al., 2000). A utilização de aproximadamente 60 kg de óleo diesel, no ciclo de vida para produção de 1 kg de biodiesel, apresenta inconsistência, já que os dois produtos apresentam a mesma função. Além disso, o biodiesel produzido, considerado combustível renovável, não atende esse critério se o ciclo de vida for analisado, devido ao alto consumo de energia fóssil utilizada para sua produção.

Pelo critério de alocação econômica, o sistema A, apresenta consumo energético de 1,84 vezes a energia gerada pelo combustível produzido. A maior parte da energia consumida foi através de energia elétrica, e o processo de extração do óleo foi onde ocorreu maior consumo, com 50,44 MJ. No ciclo de vida da produção, ocorreu o consumo de 0,29 kg de óleo diesel, com gasto energético de 12,27 MJ.

Pelos critérios de alocação *cut-off* massa e econômico, o sistema A não apresentou viabilidade energética, com relação de energia consumida pela gerada de 1,28 e 1,52,

respectivamente. Em ambos os critérios, o processo de extração do óleo foi onde ocorreu maior consumo de energia elétrica, justificado principalmente pela etapa de centrifugação para concentração da biomassa, e os equipamentos elétricos utilizados na liquefação hidrotérmica.

O sistema B apresentou, em todos os critérios de alocação, redução no consumo de energia em relação ao sistema A. O processo de cultivo por fotobiorreatores apresentou um consumo cerca de 3,45 vezes maior que o cultivo por lagoas, no entanto no ciclo de vida, a maior produção de biodiesel pelo sistema A, resultou em menor gasto energético por unidade produzida.

Pelo critério de alocação em massa, o sistema B, apresentou uma relação de energia consumida cerca de 37 vezes em relação a energia gerada. No processo de atividades agrícolas, ocorreu um consumo de 32,22 kg de óleo diesel para unidade funcional. Nos critérios de alocação econômico e os *cut-off* massa e econômico, a relação de energia consumida por energia gerada foi de 1,39, 1,03 e 1,21, respectivamente. Os maiores gastos energéticos ocorreram no processo de extração do óleo, na forma de energia elétrica.

Do ponto de vista energético, o melhor cenário obtido foi do sistema B com critério de alocação *cut-off* e massa, onde a energia consumida foi muito próxima da energia gerada. Com redução no consumo energético do sistema de extração, pela mudança do processo ou tecnologia empregada, o sistema poderá apresentar viabilidade energética. Outra solução é o aumento da produtividade, através de maior controle no cultivo e estudos de otimização da produção de óleo pelas microalgas.

6.3.3. Avaliação de Impacto do ciclo de vida

Nesta sessão são discutidas os resultados da terceira fase da ACV, avaliação dos impactos ambientais, considerando as categorias de impacto determinadas na fase do objetivo e escopo. Os resultados foram obtidos com base nos fatores de caracterização e modelo dos métodos de AICV EDIP (1997) e USEtox, correlacionados com os dados do ICV.

Os resultados para as categorias de impacto selecionadas referente ao sistema de lagoas de alta taxa são apresentados nas Figuras de 6.5 a 6.32. Para o sistema de cultivo em fotobiorreatores, as categoria de impacto selecionadas encontra-se nas Figuras 6.33 a 6.60.

6.3.3.1. Resultados AICV do sistema de Lagoas de alta taxa: Sistema A

Para cada categoria de impacto ambiental, a quantidade de contribuição foi relacionada para cada processo do sistema de produto. O processo PR1, representa as atividades agrícolas da cana-de-açúcar, PR2 produção industrial do etanol, PR3 processo de tratamento preliminar da vinhaça, PR4 processo de cultivo em lagoas de alta taxa, PR5 processo de extração do óleo (LHT) e por fim, PR6 processo de conversão do óleo em biodiesel.

Sistema A com critério de alocação de massa

- Potencial de acidificação (PA)

Os resultados para o PA estão representados no gráfico da Figura 6.5 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação em massa.

Pode-se observar pela Figura 6.5 que o processo que mais contribui para o potencial de acidificação é o PR1, com 80,35% das emissões de SO_2 -equiv. Isso é explicado principalmente pela emissão de amônia relacionada ao uso de fertilizantes nitrogenados na cultura, responsável por 80,30% da carga no processo.

Figura 6.5 – Potencial de acidificação do sistema A com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

- Potencial de Aquecimento global (PAG)

Os resultados para o PAG estão representados no gráfico da Figura 6.6 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.6 – Potencial de aquecimento global do sistema A com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

Pela Figura 6.6 as atividades do subsistema de produção de etanol contribui 97,90% em todo o ciclo de vida do biodiesel para o potencial de aquecimento global. O processo PR2 é o que mais contribui individualmente, resultado de grande quantidade de gás carbônico liberado durante o processo de fermentação e principalmente, queima do bagaço para produção de vapor e energia elétrica que foram utilizados na produção do etanol.

- Potencial de Eutrofização (PEU)

Os resultados para o PEU estão representados no gráfico da Figura 6.7 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação em massa.

Pode-se observar na Figura 6.7 que o processo PR1 apresentou a maior contribuição para o PEU, devido principalmente ao uso de fertilizantes para o cultivo da cana-de-açúcar.

Figura 6.7 – Potencial de eutrofização do sistema A com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

- Potencial de Formação Fotoquímica de ozônio troposférico (PFFOT)

Os resultados para o PFFOT estão representados no gráfico da Figura 6.8 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação em massa.

Pela Figura 6.8 o PR1 é o processo que mais contribui para o PFFOT, justificado pela queima da lavoura para preparo da colheita, que resulta na emissão de partículas aromáticas e compostos orgânicos voláteis, e o uso de diesel.

Figura 6.8 – Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico do sistema A com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

- Potencial de Ecotoxicidade (PEC)

Os resultados para o PEC estão representados no gráfico da Figura 6.9 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.9 – Potencial de ecotoxicidade do sistema A com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

Conforme a Figura 6.9 o processo PR1 é responsável pela contribuição em 82,28% da categoria PEC, devido principalmente pelo uso de agrotóxicos na produção da cana-de-açúcar.

- Potencial de Toxicidade humana, cancerígena (PTHC)

Os resultados para o PTHC estão representados no gráfico da Figura 6.10 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação em massa.

Pode-se observar pela Figura 6.10 que o PR3 é o processo que mais contribui para a categoria PTHC, e o ciclo de vida da produção do sulfato de alumínio é responsável por 99,98% das emissões para a unidade final de toxicidade, *comparative toxic units* (CTUh).

Figura 6.10 – Potencial de toxicidade humana, cancerígena, do sistema A com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

- Potencial de Toxicidade humana, não cancerígena (PTHNC)

Os resultados para o PTHNC estão representados no gráfico da Figura 6.11 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.11 – Potencial de toxicidade humana, não cancerígena, do sistema A com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

Conforme a Figura 6.11 o processo PR1 é o que mais contribui para a categoria PTHNC, e deve-se principalmente ao uso de agrotóxicos nas atividades agrícolas da cana-de-açúcar.

Sistema A com critério de alocação econômico

- Potencial de acidificação (PA)

Os resultados para o PA estão representados no gráfico da Figura 6.12 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação econômico.

Conforme a Figura 6.12 o processo PR3 contribui em 96,91% para o potencial de acidificação no ciclo de vida,

Figura 6.12 – Potencial de acidificação do sistema A com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

- Potencial de Aquecimento global (PAG)

Os resultados para o PAG estão representados no gráfico da Figura 6.13 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação econômico.

De acordo com a Figura 6.13 o PR3 é o processo que mais contribui para o aquecimento global. Esse resultado é devido à grande quantidade de sulfato de alumínio utilizado na coagulação da vinhaça.

Figura 6.13 – Potencial de aquecimento global do sistema A com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

- Potencial de Eutrofização (PEU)

Os resultados para o PEU estão representados no gráfico da Figura 6.14 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.14 – Potencial de eutrofização do sistema A com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

Pela imagem 6.14 o processo PR3 representa 89,83% das emissões que contribuem para a categoria de impacto PEU. A maior parte da contribuição é devido a cadeia produtiva do sulfato de alumínio, usado em grande quantidade para a unidade funcional.

- Potencial de Formação Fotoquímica de ozônio troposférico (PFFOT)

Os resultados para o PFFOT estão representados no gráfico da Figura 6.15 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação econômico.

O processo PR1 e PR3 contribuem com 92,04% das emissões relacionadas a formação fotoquímica do ozônio troposférico, resultado da queima da plantação de cana-de-açúcar para a colheita, e em maior contribuição, a cadeia produtiva do sulfato de alumínio usado como coagulante no tratamento da vinhaça.

Figura 6.15 – Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico do sistema A com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

- Potencial de Ecotoxicidade (PEC)

Os resultados para o PEC estão representados no gráfico da Figura 6.16 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação econômico.

Pela Figura 6.16 é possível observar que o processo PR3 apresenta a maior contribuição para a categoria, com 97,66%.

Figura 6.16 – Potencial de ecotoxicidade do sistema A com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

- Potencial de Toxicidade humana, cancerígena (PTHC)

Os resultados para o PTHC estão representados no gráfico da Figura 6.17 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação econômico.

Figura 6.17 – Potencial de toxicidade humana, cancerígena, do sistema A com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 6.17, o processo PR3 apresenta 99,90% de contribuição para a categoria.

- Potencial de Toxicidade humana, não cancerígena (PTHNC)

Os resultados para o PTHNC estão representados no gráfico da Figura 6.18 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação econômico.

Pela Figura 6.18 o processo PR3 representa a maior parte das emissões para o PTHNC, com 87,95%.

Figura 6.18 – Potencial de toxicidade humana, não cancerígena, do sistema A com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

Sistema A com critério de alocação *cut-off* e massa

- Potencial de acidificação (PA)

Os resultados para o PA estão representados no gráfico da Figura 6.19 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

Pela Figura 6.19 é possível observar que o processo PR3 contribui em 99,66% na categoria PA. Esse resultado é justificado pela produção de sulfato de alumínio, que gera 96,97% da emissão de SO₂equiv. dentro do processo.

Figura 6.19 – Potencial de acidificação do sistema A com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

- Potencial de Aquecimento global (PAG)

Os resultados para o PAG estão representados no gráfico da Figura 6.20 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

Figura 6.20 – Potencial de aquecimento global do sistema A com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

Para a categoria de aquecimento global, visto a Figura 6.20, o processo PR3 apresenta maior emissão de CO₂-equiv., e o processo PR4 consome o dióxido de carbono em seu processo.

- Potencial de Eutrofização (PEU)

Os resultados para o PEU estão representados no gráfico da Figura 6.21 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

O processo PR3 contribui em 98,54% da categoria, sendo a cadeia de produção do sulfato de alumínio responsável pela maior parte das emissões que geram o potencial de eutrofização.

Figura 6.21 – Potencial de eutrofização do sistema A com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

- Potencial de Formação Fotoquímica de ozônio troposférico (PFFOT)

Os resultados para o PFFOT estão representados no gráfico da Figura 6.22 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e massa. A maior contribuição ocorre no processo PR3, justificado pela grande quantidade de sulfato de alumínio utilizado no tratamento.

Figura 6.22 – Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico do sistema A com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

- Potencial de Ecotoxicidade (PEC)

Os resultados para o PEC estão representados no gráfico da Figura 6.23 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

Pela Figura 6.23 o processo PR3 contribui com a maior parte das emissões para a ecotoxicidade, sendo 99,93% gerado pela cadeia de produção do sulfato de alumínio.

Figura 6.23 – Potencial de ecotoxicidade do sistema A com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

- Potencial de Toxicidade humana, cancerígena (PTHC)

Os resultados para o PTHC estão representados no gráfico da Figura 6.24 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

Figura 6.24 – Potencial de toxicidade humana, cancerígena, do sistema A com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

Conforme a Figura 6.24 o PR3 é o processo que mais contribui para a PTHC, com 99,97%.

- Potencial de Toxicidade humana, não cancerígena (PTHNC)

Os resultados para o PTHNC estão representados no gráfico da Figura 6.25 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

O processo PR3 é responsável por 94,75% das emissões para essa categoria, representando a atividade que mais contribui para o PTHNC.

Figura 6.25 – Potencial de toxicidade humana, não cancerígena, do sistema A com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

Sistema A com critério de alocação *cut-off* e econômico

- Potencial de acidificação (PA)

Os resultados para o PA estão representados no gráfico da Figura 6.26 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e econômico.

Figura 6.26 – Potencial de acidificação do sistema A com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

Pela Figura 6.26 o processo PR3 é responsável por 99,65% das emissões que contribuem para essa categoria de impacto.

- Potencial de Aquecimento global (PAG)

Os resultados para o PAG estão representados no gráfico da Figura 6.27 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e econômico.

Pela Figura 6.27 a maior parte das emissões ocorre no processo PR3, porém no processo PR4 ocorre o consumo de dióxido de carbono.

Figura 6.27 – Potencial de aquecimento global do sistema A com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

- Potencial de Eutrofização (PEU)

Os resultados para o PEU estão representados no gráfico da Figura 6.28 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e econômico.

Conforme a Figura 6.28 o processo PR3 apresenta a maior contribuição para o PEU, justificado pela alta quantidade de sulfato de alumínio, considerando sua cadeia de produção.

Figura 6.28 – Potencial de eutrofização do sistema A com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

- Potencial de Formação Fotoquímica de ozônio troposférico (PFFOT)

Os resultados para o PFFOT estão representados no gráfico da Figura 6.29 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.29 – Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico do sistema A com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

Pela Figura 6.29, o processo PR3 contribui com 93,93% das emissões que resultam no potencial de formação fotoquímica do ozônio troposférico.

- Potencial de Ecotoxicidade (PEC)

Os resultados para o PEC estão representados no gráfico da Figura 6.30 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.30 – Potencial de ecotoxicidade do sistema A com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 6.30 o PR3 é o processo que mais contribui para o potencial de ecotoxicidade, representando 99,60%.

- Potencial de Toxicidade humana, cancerígena (PTHC)

Os resultados para o PTHC estão representados no gráfico da Figura 6.31 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e econômico.

De acordo com a Figura 6.31 o processo PR3 representa a etapa do ciclo de vida do biodiesel que mais contribui para o PTHC, com 99,90%.

Figura 6.31 – Potencial de toxicidade humana, cancerígena, do sistema A com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

- Potencial de Toxicidade humana, não cancerígena (PTHNC)

Os resultados para o PTHNC estão representados no gráfico da Figura 6.32 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema A, pelo critério de alocação *cut-off* e econômico. O processo PR3 contribui em 94,86% das emissões para essa categoria.

Figura 6.32 – Potencial de toxicidade humana, não cancerígena, do sistema A com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

6.3.3.2. Resultados AICV do sistema de Fotobiorreatores: Sistema B

Para cada categoria de impacto ambiental, a quantidade de contribuição foi relacionada para cada processo do sistema de produto. O processo PR1, representa as atividades agrícolas da cana-de-açúcar, PR2 produção industrial do etanol, PR3 processo de tratamento preliminar da vinhaça, PR4 processo de cultivo em lagoas de alta taxa, PR5 processo de extração do óleo (LHT) e por fim, PR6 processo de conversão do óleo em biodiesel.

Sistema B com critério de alocação de massa

- Potencial de acidificação (PA)

Os resultados para o PA estão representados no gráfico da Figura 6.33 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.33 – Potencial de acidificação do sistema B com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 6.33 o PR1 é o processo que mais contribui para a categoria PA, com 80,33%.

- Potencial de Aquecimento global (PAG)

Os resultados para o PAG estão representados no gráfico da Figura 6.34 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.34 – Potencial de aquecimento global do sistema B com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

Pela Figura 6.34 o processo PR2 apresenta maior contribuição para o potencial de aquecimento global, seguido pelo PR1, no processo PR4 ocorre consumo de dióxido de carbono.

- Potencial de Eutrofização (PEU)

Os resultados para o PEU estão representados no gráfico da Figura 6.35 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação em massa.

De acordo com a Figura 6.35 o processo PR1 contribui com 88,67% da categoria PEU.

Figura 6.35 – Potencial de eutrofização do sistema B com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

- Potencial de Formação Fotoquímica de ozônio troposférico (PFFOT)

Os resultados para o PFFOT estão representados no gráfico da Figura 6.36 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.36 – Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico do sistema B com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

Pela Figura 6.36 o PR1 é o processo que apresenta maior contribuição com a categoria PFFOT, com 88,88%.

- Potencial de Ecotoxicidade (PEC)

Os resultados para o PEC estão representados no gráfico da Figura 6.37 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.37 – Potencial de ecotoxicidade do sistema B com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

Conforme a Figura 6.37 o PR1 é o processo que apresenta maior contribuição para a categoria PEC, com 82,73%, seguido pelo processo PR3, com 17,17%.

- Potencial de Toxicidade humana, cancerígena (PTHC)

Os resultados para o PTHC estão representados no gráfico da Figura 6.38 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação em massa.

De acordo com a Figura 6.38 o PR3 apresenta maior contribuição para o PTHC, com 93,71%.

Figura 6.38 – Potencial de toxicidade humana, cancerígena, do sistema B com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

- Potencial de Toxicidade humana, não cancerígena (PTHNC)

Os resultados para o PTHNC estão representados no gráfico da Figura 6.39 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.39 – Potencial de toxicidade humana, não cancerígena, do sistema B com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

Pela Figura 6.39 o PR3 é o processo que apresenta maior contribuição para a toxicidade humana, não cancerígena, com 94,90%.

Sistema A com critério de alocação econômico

- Potencial de acidificação (PA)

Os resultados para o PA estão representados no gráfico da Figura 6.40 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação econômico.

Figura 6.40 – Potencial de acidificação do sistema B com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 6.40 o PR3 apresenta maior contribuição para o PA, com 96,75%.

- Potencial de Aquecimento global (PAG)

Os resultados para o PAG estão representados no gráfico da Figura 6.41 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação econômico.

Conforme a Figura 6.41 o processo PR3 apresenta a maior contribuição para o potencial de aquecimento global, no processo PR4 ocorre o consumo de dióxido de carbono.

Figura 6.41 – Potencial de aquecimento global do sistema B com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

- Potencial de Eutrofização (PEU)

Os resultados para o PEU estão representados no gráfico da Figura 6.42 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.42 – Potencial de eutrofização do sistema B com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 6.42 o processo PR3 apresenta maior contribuição para o PEU, com 89,27%.

- Potencial de Formação Fotoquímica de ozônio troposférico (PFFOT)

Os resultados para o PFFOT estão representados no gráfico da Figura 6.43 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação econômico.

Figura 6.43 – Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico do sistema B com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 6.43 o processo PR3 apresenta maior contribuição para PFFOT, com 53,97%, seguido pelo processo PR1, com 36,51%. Os dois processos representam 90,48% no ciclo de vida do biodiesel para a categoria.

- Potencial de Ecotoxicidade (PEC)

Os resultados para o PEC estão representados no gráfico da Figura 6.44 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação econômico.

Pela Figura 6.44 o PR3 é o processo que apresenta maior contribuição para a ecotoxicidade, com 97,47%.

Figura 6.44 – Potencial de ecotoxicidade do sistema B com critério de alocação em massa

Fonte: Autor

- Potencial de Toxicidade humana, cancerígena (PTHC)

Os resultados para o PTHC estão representados no gráfico da Figura 6.45 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação econômico.

Figura 6.45 – Potencial de toxicidade humana, cancerígena, do sistema B com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 6.45 o PR3 apresenta maior contribuição para a PTHC, com 99,93%.

- Potencial de Toxicidade humana, não cancerígena (PTHNC)

Os resultados para o PTHNC estão representados no gráfico da Figura 6.46 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação econômico.

Figura 6.46 – Potencial de toxicidade humana, não cancerígena, do sistema B com critério de alocação econômico

Fonte: Autor

Pela Figura 6.46 pode-se observar que o processo PR3 apresenta maior contribuição para PTHNC, com 85,94%.

Sistema A com critério de alocação *cut-off* e massa

- Potencial de acidificação (PA)

Os resultados para o PA estão representados no gráfico da Figura 6.47 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

De acordo com a Figura 6.47 o PR3 apresenta maior contribuição para a categoria de impacto, com 99,45%.

Figura 6.47 – Potencial de acidificação do sistema B com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

- Potencial de Aquecimento global (PAG)

Os resultados para o PAG estão representados no gráfico da Figura 6.48 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

Figura 6.48 – Potencial de aquecimento global do sistema B com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

Conforme a Figura 6.48 o PR3 apresenta maior contribuição para o potencial de aquecimento global, o PR4 ocorre o consumo de dióxido de carbono.

- Potencial de Eutrofização (PEU)

Os resultados para o PEU estão representados no gráfico da Figura 6.49 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

Figura 6.49 – Potencial de eutrofização do sistema B com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

Pela Figura 6.49 o PR3 apresenta maior contribuição para PEU, com 97,85%.

- Potencial de Formação Fotoquímica de ozônio troposférico (PFFOT)

Os resultados para o PFFOT estão representados no gráfico da Figura 6.50 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

Conforme a Figura 6.50 o PR3 apresenta maior contribuição para a formação fotoquímica do ozônio troposférico, com 93,55%

Figura 6.50 – Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico do sistema B com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

- Potencial de Ecotoxicidade (PEC)

Os resultados para o PEC estão representados no gráfico da Figura 6.51 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

Figura 6.51 – Potencial de ecotoxicidade do sistema B com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 6.51 o PR3 apresenta maior contribuição para o potencial de ecotoxicidade, com 99,41%.

- Potencial de Toxicidade humana, cancerígena (PTHC)

Os resultados para o PTHC estão representados no gráfico da Figura 6.52 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

Figura 6.52 – Potencial de toxicidade humana, cancerígena, do sistema B com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

Pela Figura 6.52 o PR3 apresenta maior contribuição para a categoria de PTHC, com 98,94%.

- Potencial de Toxicidade humana, não cancerígena (PTHNC)

Os resultados para o PTHNC estão representados no gráfico da Figura 6.53 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e massa.

Conforme a Figura 6.53 o PR3 apresenta maior contribuição para a categoria de impacto PTHNC, com 92,52%

Figura 6.53 – Potencial de toxicidade humana, não cancerígena, do sistema B com critério de alocação *cut-off* e massa

Fonte: Autor

Sistema A com critério de alocação *cut-off* e econômico

- Potencial de acidificação (PA)

Os resultados para o PA estão representados no gráfico da Figura 6.54 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e econômico.

Figura 6.54 – Potencial de acidificação do sistema B com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 6.54 o PR3 apresenta maior contribuição para a categoria de PA, com 99,47%.

- Potencial de Aquecimento global (PAG)

Os resultados para o PAG estão representados no gráfico da Figura 6.55 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e econômico.

Figura 6.55 – Potencial de aquecimento global do sistema B com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

Conforme a Figura 6.55 o PR3 apresenta maior emissão de dióxido de carbono equivalente, contudo, o PR4 ocorre consumo de dióxido de carbono.

- Potencial de Eutrofização (PEU)

Os resultados para o PEU estão representados no gráfico da Figura 6.56 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e econômico.

Pela Figura 6.56 o PR3 apresenta maior contribuição para o potencial de eutrofização, com 97,83%.

Figura 6.56 – Potencial de eutrofização do sistema B com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

- Potencial de Formação Fotoquímica de ozônio troposférico (PFFOT)

Os resultados para o PFFOT estão representados no gráfico da Figura 6.57 pelo método EDIP (1997) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.57 – Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico do sistema B com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 6.57 o PR3 apresenta maior contribuição para o PFFOT, com 91,89%.

- Potencial de Ecotoxicidade (PEC)

Os resultados para o PEC estão representados no gráfico da Figura 6.58 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação em massa.

Figura 6.58 – Potencial de ecotoxicidade do sistema B com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

Conforme a Figura 6.58, o PR3 apresenta maior contribuição para a categoria de ecotoxicidade, com 99,41%.

- Potencial de Toxicidade humana, cancerígena (PTHC)

Os resultados para o PTHC estão representados no gráfico da Figura 6.59 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e econômico. Pela Figura 6.59, o PR3 apresenta maior contribuição para o PTHC, com 99,97%.

Figura 6.59 – Potencial de toxicidade humana, cancerígena, do sistema B com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

- Potencial de Toxicidade humana, não cancerígena (PTHNC)

Os resultados para o PTHNC estão representados no gráfico da Figura 6.60 pelo método USEtox (2008) para cada processo do ciclo de vida do produto do sistema B, pelo critério de alocação *cut-off* e econômico.

Figura 6.60 – Potencial de toxicidade humana, não cancerígena, do sistema B com critério de alocação *cut-off* e econômico

Fonte: Autor

Por fim, de acordo com a Figura 6.60, o PR3 apresenta maior contribuição para a categoria de PTHNC, com 92,52%.

6.3.4. Interpretação

6.3.4.1. Comparação entre os sistemas de produção com LAT e fotobiorreatores

Um dos objetivos para a realização do presente estudo de ACV, consiste na comparação da utilização de dois sistemas de cultivo diferentes para o desenvolvimento da produção de biodiesel por microalgas. Os resultados das emissões que contribuem para cada categoria de impacto ambiental selecionada para o estudo, encontra-se nas Tabelas 6.45 e 6.46.

Tabela 6.45 – Potencial de impacto ambiental para produção de biodiesel utilizando o sistema de lagoas de alta taxa com os critérios de alocação aplicado.

LAT	Categoria de Impacto						
Critério de alocação	PA (Kg SO2-Equiv.)	PAG (kg CO2-Equiv.)	PEU (Kg NO3-Equiv.)	PFFOT (Kg Eteno-Equiv.)	PEC (CTUe)	PTHC (CTUh)	PTHNC (CTUh)
Massa	41,40	9629,61	84,71	9,61	9893,34	9,59E-05	2,16E-03
Econômico	6,44	284,92	4,52	0,11	2059,46	1,06E-04	1,38E-04
<i>cut-off</i> e massa	5,29	201,72	3,48	0,06	1705,82	8,99E-05	1,08E-04
<i>cut-off</i> e econômico	6,27	238,62	4,12	0,07	2019,25	1,06E-04	1,28E-04

Tabela 6.46 – Potencial de impacto ambiental para produção de biodiesel utilizando o sistema de fotobiorreator com os critérios de alocação aplicado.

FBR	Categoria de Impacto						
Critério de alocação	PA (Kg SO2-Equiv.)	PAG (kg CO2-Equiv.)	PEU (Kg NO3-Equiv.)	PFFOT (Kg Eteno-Equiv.)	PEC (CTUe)	PTHC (CTUh)	PTHNC (CTUh)
Massa	22,49	5223,95	46,02	5,22	5374,515	5,21E-05	1,17E-03
Econômico	3,51	148,08	2,47	0,06	1120,524	5,78E-05	7,70E-05
<i>cut-off</i> e massa	2,88	103,97	1,91	0,03	928,138	4,88E-05	6,04E-05
<i>cut-off</i> e econômico	3,41	122,93	2,26	0,04	1098,69	5,78E-05	7,15E-05

Pode-se observar com os resultados das Tabelas 6.45 e 6.46 que em todas as categorias de impacto e nos diferentes critérios de alocação, o sistema com o uso de lagoas

de alta taxa apresentou maior índice no potencial de impacto que o sistema com fotobiorreatores. A justificativa consiste na maior produtividade de biomassa que o fotobiorreator apresenta em relação a LAT, com isso, ocorre maior produção de biodiesel resultando em impactos por unidade produzida menores.

Para afirmações comparativas em estudos de ACV, a ABNT (2009a) e ABNT (2009b) determinam que a avaliação de impacto deve ser realizada sem o uso dos elementos opcionais. Essa condição é necessária, pois a comparação entre diferentes produtos com a mesma função, deve ser realizada categoria por categoria de impacto.

- Potencial de Acidificação

O potencial de acidificação pelo critério de alocação em massa, as atividades agrícolas da cana-de-açúcar apresentou maior contribuição para categoria. A justificativa encontra-se principalmente pela emissão de amônia durante o processo, que é contabilizado pelo método EDIP (1997) para categoria de acidificação. Para o critério de alocação econômico, o processo PR1 apresentou pouca contribuição no valor total, devido ao critério de alocação atribuir apenas 0,39% das emissões para a vinhaça, que é usada como fluxo intermediário para o biodiesel.

Nos dois sistemas, o processo PR3 apresentou maior contribuição para o PA nos critérios de alocação econômico, *cut-off* e *massa*, *cut-off* e econômico. A razão encontra-se na alta dosagem do coagulante sulfato de alumínio no tratamento da vinhaça, que é aproximadamente de 100 a 240 vezes a unidade funcional. O sistema de LAT apresentou maior carga que o sistema de fotobiorreatores, pois é necessário uma quantidade maior do coagulante, já que a produtividade da lagoa é menor e demanda maior quantidade de vinhaça tratada.

Para o critério de alocação em massa, o as emissões totais de SO₂-equiv. são 45,68% menor no sistema de fotobiorreatores em relação ao sistema de LAT. Essa diferença está ligada principalmente pelo maior uso de vinhaça para atender a unidade funcional, sendo 24.485 litros para LAT e 13.297 litros para fotobiorreatores, uma redução de 45,69%.

No critério de alocação econômico, o sistema de fotobiorreatores apresenta redução de 45,61% na emissão de SO₂-equiv. em relação ao sistema de lagoas. Por esse critério, o subsistema de produção de etanol apresenta pouca contribuição na emissão total, sendo o PR3 o processo que mais contribui para a categoria.

O sistema por fotobiorreatores apresentou redução na emissão total de SO₂-equiv. foi de 45,60% pelo critério de alocação *cut-off* e massa, e 45,60% pelo critério *cut-off* e econômico.

Individualmente, o processo PR4 foi o único que apresentou maior emissão de SO₂-equiv. do sistema de fotobiorreator em relação ao de lagoas em todos os critério de alocação. Isso acontece pelo maior uso de energia elétrica para o funcionamento dos fotobiorreatores do que no sistema de lagoas.

- Potencial de Aquecimento global

Para a categoria de PAG, o sistema por LAT apresentou maiores emissões totais CO₂-equiv. que o sistema por fotobiorreatores em todos os critérios de alocação. Pelo critério de alocação em massa, nos dois sistemas, a maior contribuição foi no PR2, devido o processo da queima do bagaço da cana para geração de vapor e energia. O processo PR1 também apresentou considerável contribuição, principalmente pelo processo mudança no uso do solo, queima da cana para colheita, no uso de fertilizantes e queima do diesel usado nos maquinários agrícolas.

Pelos demais critérios de alocação, econômico, *cut-off* e massa, e *cut-off* e econômico, o processo que apresenta maior contribuição para o aquecimento global é o PR3. O processo consome grande quantidade de sulfato de alumínio relativo à unidade funcional, necessário para o tratamento da vinhaça.

Pelo critério de alocação em massa, o sistema por fotobiorreatores apresentaram uma redução na emissão de CO₂-equiv. de 45,75%. O subsistema de produção de etanol é o maior contribuinte para a categoria de impacto, ocorrendo um consumo de dióxido de carbono no processo PR4.

Para o critério de alocação econômica, ocorre a redução de 48,03% das emissões de CO₂-equiv. A influência das emissões do subsistema de produção de etanol são bem reduzidas, com o processo PR3 torna-se o principal emissor de compostos que contribuem para a categoria.

Em relação ao critério de alocação *cut-off* e massa, o sistema por fotobiorreatores apresentou uma redução de 48,45% nas emissões de CO₂-equiv, e de 48,48% pelo critério de alocação *cut-off* e econômico.

Considerando as emissões para a categoria de PAG em cada processo, o PR4 do sistema por lagoas de alta taxa, em todos os critérios de alocação, apresentaram vantagens em relação ao sistema por fotobiorreatores. Nesse processo, ocorre o cultivo das microalgas, sendo necessária a mesma quantidade de biomassa para a produção da unidade funcional, ou seja, ocorre o mesmo consumo de dióxido de carbono. No entanto,

ocorre maior demanda de energia pelo fotobiorreator, e assim, a lagoa consome maior quantidade de dióxido de carbono no final do processo e contribui com a mitigação de CO₂.

- Potencial de eutrofização

Para todos os critérios de alocação, o sistema por fotobiorreatores apresenta menores emissões totais em relação ao sistema por lagoas em relação ao PEU. Com alocação por massa, o PR1 foi o processo que mais contribui na emissão para eutrofização. O uso de fertilizantes na cultura da cana-de-açúcar contribui para a grande emissão de NO₃⁻-equiv.

Com critério de alocação econômica, *cut-off* e massa, e *cut-off* e econômico o PR3 apresentou as maiores contribuições para a categoria. Devido a baixa influência do subsistema de produção de etanol pelo critério econômico, e a exclusão nos critérios *cut-off*, o uso do sulfato de alumínio emitiu a maior parte dos compostos que causam o enriquecimento de nutrientes nos corpos hídricos.

Pelo critério em massa, a redução na emissão de NO₃⁻-equiv. foi 45,68% no sistema por fotobiorreatores em relação ao de lagoas. Para o critério econômico, essa redução foi de 45,36%. Para os critérios de alocação *cut-off* reduziu-se 45,31%.

Em todos os critério de alocação, o único processo do sistema por lagoas que apresentou menores contribuições individuais em relação ao sistema por fotobiorreatores, foi o PR4. A diferença foi de 66,66% (pelos critérios de alocação massa, e *cut-off* e massa) e 72,72% (pelos critérios de alocação econômico e *cut-off* e econômico). A justificativa consiste no maior uso de energia elétrica para o funcionamento dos fotobiorreatores.

- Potencial de formação fotoquímica do ozônio troposférico

Em todos os critérios de alocação, ocorreu redução nas emissões que contribuem para o PFFOT no sistema por fotobiorreatores em relação ao sistema por lagoas. O processo que mais contribui para a categoria de impacto é o PR1 para o critério de alocação em massa, e o PR3 para o critério de alocação econômico, *cut-off* e massa, e *cut-off* e econômico. Porém, no critério econômico, o PR1 apresenta uma contribuição considerável para categoria. O PR1 é o processo que ocorre parcialmente a queima da lavoura de cana para a colheita, e também a combustão do diesel nos maquinários agrícolas, fazendo com que ocorra a emissão dos compostos que contribuam para a formação de Eteno-equiv.

As reduções totais para a categoria pelo sistema por fotobiorreatores é de 45,69% para o critério de alocação em massa, 44,25% para o critério de alocação econômico,

44,64% pelo critério de alocação *cut-off* e massa, 43,94% pelo critério de alocação *cut-off* e econômico.

O único processo do sistema por lagoas que apresentou vantagens sobre o sistema por fotobiorreatores foi o PR4, em todos os critérios de alocação. Isso acontece pelo menor uso de energia elétrica no funcionamento das lagoas.

- Potencial de ecotoxicidade

Em todos critérios de alocação, o sistema por fotobiorreatores mostrou redução para potencial de ecotoxicidade total em relação ao sistema por lagoas. Para o critério de alocação em massa, a redução foi de 45,67%, e de 45,47% para o critério de alocação econômico, 45,72% para o critério *cut-off* e massa, e de 45,47 para o critério *cut-off* e econômico.

O processo PR4 foi o único processo pelo sistema por lagoas que apresentou redução nas emissões para o PEC em relação ao sistema por fotobiorreator. A redução foi em médio de 70%.

- Potencial de toxicidade humana, cancerígena

Em todos critérios de alocação, o sistema por fotobiorreatores mostrou redução para potencial de ecotoxicidade total em relação ao sistema por lagoas. Para o critério de alocação em massa, a redução foi de 45,67%, e de 45,47% para o critério de alocação econômico, 45,72% para o critério *cut-off* e massa, e de 45,47 para o critério *cut-off* e econômico.

- Potencial de toxicidade humana, não cancerígena

Em todos critérios de alocação, o sistema por fotobiorreatores mostrou redução para potencial de ecotoxicidade total em relação ao sistema por lagoas. Para o critério de alocação em massa, a redução foi de 45,83%, e de 44,20% para o critério de alocação econômico, 44,07% para o critério *cut-off* e massa, e de 44,14 para o critério *cut-off* e econômico.

O processo PR4 para o PTHNC o sistema por fotobiorreatores apresentou redução nas emissões para o PEC em relação ao sistema por lagoas. A redução foi em média de 70,00%.

Pelos resultados apresentados por cada categoria, o sistema por fotobiorreatores apresentou vantagens em relação ao sistema por lagoas de alta taxa, com redução média de 45% das emissões. Porém, no processo individual do cultivo, as LATs apresentaram redução para cada categoria em relação aos fotobiorreatores, exceto nos potenciais de toxicidade humana cancerígena, que foi zero para as duas, e no potencial de toxicidade humana não cancerígena.

Brentner, Eckelman e Zimmerman (2011) realizaram um estudo comparando diferentes tecnologias na cadeia de produção de biodiesel, entre elas, sistemas de cultivo com fotobiorreatores e lagoa de alta taxa. Para isso foi utilizado um estudo de ACV e de demanda de energia, onde foi obtido resultados para demanda de energia cumulativa, emissão de gás de efeito estufa, uso de água, eutrofização e uso de área. Comparando apenas os reatores, os resultados indicaram o fotobiorreator de placas planas como o que causa menos impacto em todas as categorias estudadas, exceto uso de área. O fotobiorreator tubular, que foi o utilizado no presente estudo, apresentou o pior caso. Segundo os autores, os melhores processos são aqueles que consome menos energia, e o fotobiorreator tubular gasta em ordem 36 vezes mais energia que a lagoa de alta taxa.

Esse resultado indica porque o processo PR4 apresentou melhores resultados individuais no sistema por lagoas, já que o consumo de energia por unidade funcional é menor que no sistema por fotobiorreatores.

Outro estudo comparativo entre o sistema de cultivo, foi realizado por Stephenson et al. (2010), que comparou o uso de fotobiorreatores tubulares e lagoas de alta taxa. Foi calculado o potencial de aquecimento global através do uso do método EDIP (2003). Os resultados indicaram que o sistema que apresentou pior desempenho foi o de fotobiorreatores. Os autores justificaram o resultado, pelo consumo de energia do sistema de fotobiorreatores ser significativamente maior que o de lagoas de alta taxa, com um consumo maior de energia fóssil.

No presente estudo, os impactos gerados pelo uso de energia não foram tão significativos devido à alta quantidade de sulfato de alumínio, utilizado no processo de tratamento da vinhaça. Além de expressar emissões menores, a energia utilizada provém da queima do bagaço da cana, apresentando um aspecto mais renovável e com menos componentes fósseis, um dos maiores responsáveis por emissões de gases de efeito estufa.

6.3.4.2. Identificação dos pontos críticos dos sistemas de produção

Os processos que mais contribuíram para o potencial de impacto em cada categoria variaram-se entre os métodos de alocação empregados. No critério de alocação por massa,

os processos que mais contribuíram foram os do subsistema de produção de etanol. Para o critério econômico, as maiores emissões em cada categoria foram emitidos no subsistema de produção de biodiesel, assim como nos critério de alocação *cut-off* massa e econômico.

No critério de alocação em massa, o processo PR1 foi onde ocorreu as maiores emissões que contribuíram para as categorias de acidificação, eutrofização, formação fotoquímica do ozônio troposférico, ecotoxicidade e toxicidade humana não cancerígena. Os processos PR2 e PR3 foram os que mais contribuíram para aquecimento global e toxicidade humana cancerígena, respectivamente.

No processo PR1 as principais emissões são devido ao uso de fertilizantes e a queima do óleo diesel, na forma de amônia e dióxido de carbono. O processo PR2 ocorre grande emissão de dióxido de carbono, e é dado pelos processos de fermentação do caldo, e pela queima do bagaço para a o sistema de cogeração de vapor e energia elétrica.

Para os critérios de alocação econômico, *cut-off* e massa, e *cut-off* e econômico, em todas categorias de impacto, o processo PR3 apresentou as maiores contribuições, sendo o maior ponto crítico. Isso se deve principalmente ao uso de uma grande quantidade de coagulante, sulfato de alumínio, necessário à unidade funcional.

O sistema de tratamento da vinhaça por processos físico-químicos necessita do uso de coagulante. Uma alternativa para diminuir os potenciais de impacto, consiste na mudança do sistema de tratamento. Wilkie, Riedesel e Owens (2000) discutiram sobre diferentes tecnologias de tratamento para vinhaça. Os autores destacam o tratamento anaeróbico como uma alternativa efetiva e viável economicamente, contudo, o efluente não apresenta as características desejadas para o cultivo de microalgas.

Novas alternativas de tratamento podem ser testadas, como o uso de uma reator anaeróbico seguido por um tratamento físico-químico. O efluente gerado pelo primeiro reator, apresenta menor carga orgânica e uma porcentagem de remoção de turbidez, com o isso necessita-se de uma menor dosagem de coagulante, reduzindo o insumo que mais contribui para as categorias de impacto no processo.

6.3.4.3. Comparação entre os critérios de alocação

Os resultados do presente estudo se mostraram totalmente dependente do critério de alocação utilizado. A ABNT (2009b) determina que caso não seja possível evitar a alocação entre os produtos, ela deve ser realizada preferencialmente por relações físicas. Caso nenhuma relação física possa ser estabelecida, outros critérios podem ser utilizado, como valor econômico.

Usualmente, outras técnicas de alocação para produtos reciclados são estabelecidos, como o critério *cut-off*, que para o caso, é admitido que a vinhaça possui carga de impacto anterior igual a zero. Porém, o objetivo da criação de um sistema que aproveite a carga nutritiva da vinhaça, pensando na fronteira do sistema, apresenta apenas como saída açúcar, etanol, energia elétrica, biodiesel e glicerol. A vinhaça foi utilizada para um sistema de produção complementar, e sua destinação final, a fertirrigação, ocorre de maneira que a mesma encontrou-se dentro da fronteira tecnológica.

Para o estudo, o critério de massa pode ser estabelecido, o que justificou-se o seu emprego. A quantidade de vinhaça produzida em relação a quantidade de etanol é 12 vezes maior, resultando na atribuição de grande parte dos impactos desse subsistema para o biodiesel, uma vez que a vinhaça é o insumo principal que liga os dois subsistemas.

Ometto (2009) realizou um estudo de ACV da produção de etanol, pelo método EDIP (1997), para uma tonelada de etanol produzido, seus resultados foram próximos dos apresentados para a o biodiesel pelo critério de alocação em massa. Os resultados encontram-se próximos, já que para produção de 1 kg de biodiesel são necessários um pouco mais de 1 tonelada de etanol, para gerar a quantidade de vinhaça necessária para o cultivo em fotobiorreatores. Para a produção utilizando o cultivo em lagoas de alta taxa, o valor foi praticamente duplicado, pois é necessário um pouco mais de 2 toneladas de etanol para atender a demanda.

Com relação a valorização econômica, o etanol é um produto de alto comercial agregado em relação a vinhaça, que não apresenta valor comercial de mercado, sendo estimado através da economia gerada pela substituição de fertilizantes químicos.

Observando os preceitos da ABNT (2009b) e considerando o processo tradicional de produção de etanol, a vinhaça é considerada um produto reciclado onde não ocorrem transformações de suas propriedades inerentes, sendo assim, reciclagem em ciclo fechado. Nesse caso, a norma estabelece que a alocação não é necessária, uma vez que o produto substitui o uso de materiais primários, em específico, o uso de fertilizantes.

O critério de *cut-off* é uma técnica aplicada para produtos reciclados de carácter aberto, porém, uma questão a se considerar, até quando um produto é dito reciclado ou não. Alguns estudos, como Zhu (2015), abordam as chamadas biorrefinarias, conceituadas como indústrias promissoras que possuem auto suficiência e reutilizam todos os resíduos. Com essa concepção, um resíduo passa-se a comportar-se como um insumo.

Comparando os resultados obtidos em cada critério de alocação, os critérios econômico e os *cut-off*, apresentaram pouca variação no valor total das cargas de impacto. No entanto, os resultados pelo critério de massa foram consideravelmente maiores em todas as categorias, com exceção do potencial de toxicidade humana cancerígena. Esta categoria

de impacto apresentou-se com valores próximos em todos os critério de alocação, justificado que o processo que apresenta maior contribuição é o PR3, tratamento da vinhaça, com o pouca contribuição do subsistema de produção de etanol.

Mesmo considerando apenas os critérios de alocação econômico, *cut-off* e massa, e *cut-off* e econômico, as cargas de impactos obtidas foram maiores que as obtidas em outros estudos de ACV de biodiesel por microalgas. Yanfen, Zehao e Xiaoqian (2012) obtiveram, para produção de 1 kg de biodiesel 5,9 kg CO₂equiv., 0,037 kg SO₄equiv., 0,041 kg NO₃equiv. e 0,019 kg eteno-equiv. Para o potencial de aquecimento global, os resultados apresentados foram de 48, 34 e 40 vezes maior para os critério de alocação econômico, *cut-off* e massa e *cut-off* e econômico, respectivamente. Já para o critério de alocação em massa, os valores obtidos foram 1632 vezes maior.

Os resultados indicaram inviabilidade ambiental para processo desenvolvido, sendo que outros modelos estudados apresentaram valores inferiores de emissões de cargas de impacto.

6.3.4.4. Limitações do estudo de ACV

As principais limitações do estudo, se baseia em dados de dimensionamento preliminar teóricos e com a exclusão da fase de uso do biodiesel. Como o estudo baseia-se em desenvolvimento de um sistema de produção, os dados utilizados foram obtidos de fontes teóricas, extrapoladas principalmente de ensaios laboratoriais para escala industrial. Esses dados podem não ser coincidentes com os reais, sendo apenas projetados. Outra característica importante, ocorre devido ao caráter preliminar do dimensionamento, onde emissões ou insumos importantes podem não terem sido contemplados, afetando os resultados finais das categorias de impacto.

A exclusão da fase de uso do biodiesel afeta na comparação dos sistemas estudados em relação a outros produtos com a mesma função. Contudo, para o objetivo de comparação entre os dois sistemas analisados, não ocorre grandes comprometimentos, pois a fase de uso nos dois sistemas ocorre com o mesmo produto, em quantidade e características semelhantes.

6.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a avaliação dos impactos ambientais, a avaliação do ciclo de vida contribui para não avaliar apenas o processo industrial de produção ou uma atividade em específico, mas

pelas fases do ciclo de vida do produto. Nesse contexto, foi possível o desenvolvimento de rotas produtivas, e a comparação entre elas.

O sistema de produto com a utilização de fotobiorreator para o cultivo das microalgas mostrou redução em média 45% das emissões em todas as categorias, em comparação com o uso de lagoas de alta taxa. A justificativa baseou-se, principalmente, na maior produtividade projetado pelo sistema fechado, que demandou de menor uso de vinhaça, consequentemente uma menor quantidade de sulfato de alumínio como coagulante. Para o critério de alocação em massa, a maior quantidade de vinhaça também contribuiu para o acúmulo das emissões geradas pelo subsistema de produção de etanol.

Ambos os sistemas, apresentaram inviabilidade energética, pois a energia demanda para a produção de 1 kg de biodiesel, foi maior que a energia produzida pelo mesmo. As relações energia demanda pela energia gerada pelo sistema A foram de 60, 1,84, 1,28, 1,62, para os critérios de alocação em massa, econômico, *cut-off* e massa, *cut-off* e econômico, respectivamente. Para o sistema B, as relações energéticas foram de 37, 1,39, 1,03 e 1,21, para os critérios de alocação em massa, econômico, *cut-off* e massa, *cut-off* e econômico, respectivamente.

Um destaque importante, na análise energética, os sistemas A e B pelo critério de alocação em massa, apresentaram um consumo de diesel fóssil de 60 kg e 32,22 kg para produção de 1 kg de biodiesel. Esse fato, apresenta uma inocência do ponto de vista ambiental, uma vez que em seu ciclo de vida, ocorre um alto consumo de energia fóssil, além de consumir uma quantidade maior para produzir um produto com a mesma função.

Em comparação com outras pesquisas, com sistemas de produção diferentes para o biodiesel, os dois sistemas desenvolvidos apresentaram maior emissão para as categorias de impacto. Para o potencial de aquecimento global, foram de 1632, 48, 34, 40 vezes maior para os critérios de alocação em massa, econômico, *cut-off* e massa e *cut-off* e econômico, respectivamente.

Os principais pontos críticos foram o subsistema de produção de etanol para o critério de alocação em massa, e o sistema de tratamento da vinhaça para os demais critérios de alocação. O primeiro, deve-se principalmente devido à grande atribuição dos impactos para a vinhaça, matéria-prima para o subsistema de produção do biodiesel, que a produção é 12 vezes maior que o etanol. Para o sistema de tratamento da vinhaça, o principal limitante foi o uso do coagulante sulfato de alumínio, que atribui grandes emissões devido ao seu ciclo produtivo.

Comparando os critérios de alocação, a ABNT (2009b) normaliza que o procedimento deve ocorrer primeiramente através de relações físicas entre os produtos que saem do sistema, no caso, massa do etanol, biodiesel e glicerol. Se não for possível estabelecer esse

tipo de relação, pode-se aplicar critério econômico. Para o critério de alocação *cut-off*, é difícil estabelecer até que ponto um produto é considerado reciclado, ainda mais levando-se em conta o conceito de biorrefinarias, onde todo “resíduo” é considerado insumo.

As principais limitações do presente estudo, compreende-se na qualidade dos dados e a exclusão da fase de uso do biodiesel. Os dados utilizados para a quantificação dos impactos, foram obtidos através de projeções de dados em escala laboratorial para produção em grande escala, sendo que pode-se ocorrer divergências entre o projetado e o real. A exclusão da fase de uso do biodiesel, apresenta-se como limitação conceitual da ACV, uma vez que, em seus princípios estabelecidos pela ABNT (2009a), o ciclo de vida do produto como um todo deve ser analisado. Com isso, comparações entre outros estudos fica-se limitado somente para casos que avaliam até a fase de produção..

6.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 20p. 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 46p. 2009b.

BARREIRO, D L.; SAMOR, C.; TERRANELLA, G.; HORNUNG, U.; KRUSE, A.; PRINS, W. Assessing microalgae biorefinery routes for the production of biofuels via hydrothermal liquefaction. *Bioresource Technology*, v. 174, p. 256–265, dez. 2014.

BATAN, L.; QUINN, J. C.; BRADLEY, T. H. Analysis of water footprint of a photobioreactor microalgae biofuel production system from blue, green and lifecycle perspectives. *Algal Research*, v. 2, n. 3, p. 196–203, 2013.

BRENTNER, L. B.; ECKELMAN, M. J.; ZIMMERMAN, J. B. Combinatorial life cycle assessment to inform process design of industrial production of algal biodiesel. *Environmental Science and Technology*, v. 45, n. 16, p. 7060–7067, 2011.

BORGES, V. M. S.; SILVA, A. A.; SANTANA, G. R.; CASTRO, S. S.; OLIVEIRA, M. G. Avaliação econômica da adubação com vinhaça e da adubação mineral de soqueiras de cana-de-açúcar na usina São Francisco S/A – Quirinópolis-GO. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 2011, Uberlândia. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas. Viçosa: SBCS, v. 1, 2011.

CAVALETT, O.; CHAGAS, M. F.; ERGUY, N. R.; SUGAWARA, E. T.; CARDOSO, T. F.; BONOMI, A. Sugarcane Life Cycle Inventory. Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory. Report, 2013.

CHAGAS, M. F. BONOMI, A. CAVALETT, O. Ethanol Life Cycle Inventory. Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory. Report, 2015.

COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S.; ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. *Química Nova*, v.20, p.532-537, 2000.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards a Circular Economy**: Business rationale for an accelerated transition. Report, 2015a.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Delivering the circular economy**: a toolkit for policymakers. Report, 2015b.

GUZATTO, R.; DEFFERRARI, D.; REIZNAUTT, Q. B.; CADORE, Í. R.; SAMIOS, D. Transesterification double step process modification for ethyl ester biodiesel production from vegetable and waste oils. *Fuel*, v. 92, n. 1, p. 197–203, fev. 2012.

HUYSMAN, S.; DE SCHAEPMEESTER, J.; RAGAERT, K.; DEWULF, J.; DE MEESTER, S. Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 120, p. 46–54, maio 2017.

INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM. **ILCD Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. First edition March 2010. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.

JAZRAWI, C.; BILLER, P.; ROSS, A. B.; MONTOYA, A.; MASCHMEYER, T.; HAYNES, B. S. Pilot plant testing of continuous hydrothermal liquefaction of microalgae. *Algal Research*, v. 2, n. 3, p. 268–277, jul. 2013.

JAZZAR, S.; QUESADA-MEDINA, J.; OLIVARES-CARRILLO, P.; MARZOUKI, M. N.; ACIÉN-FERNÁNDEZ, F. G.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M.; MOLINA-GRIMA, E.; SMAALI, I. A whole biodiesel conversion process combining isolation, cultivation and in situ supercritical methanol transesterification of native microalgae. *Bioresource technology*, v. 190, p. 281–8, 2015.

LIMA, H. H.S. **Tratamento físico-químico da vinhaça por coagulação e adsorção em carvão ativado do bagaço de cana-de-açúcar**. 2013. 83 f. Dissertação (Mestrado) – programa de pós-graduação em engenharia urbana e ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

MATHIMANI, T.; UMA, L.; PRABAHARAN, D. Homogeneous acid catalysed transesterification of marine microalga *Chlorella* sp. BDUG 91771 lipid – An efficient biodiesel yield and its characterization. *Renewable Energy*, v. 81, p. 523–533, set. 2015.

NAN, Y.; LIU, J.; LIN, R.; TAVLARIDES, L. L. Production of biodiesel from microalgae oil (*Chlorella protothecoides*) by non-catalytic transesterification in supercritical methanol and ethanol: Process optimization. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 97, p. 174–182, fev. 2015.

NASCIMENTO, I. A.; CABANELAS, I. T. D.; SANTOS, J. N. dos; NASCIMENTO, M. A.; SOUSA, L.; SANSONE, G. Biodiesel yields and fuel quality as criteria for algal-feedstock selection: Effects of CO₂-supplementation and nutrient levels in cultures. *Algal Research*, v. 8, p. 53–60, mar. 2015.

OMETTO, A. R.; HAUSCHILD, M. Z.; ROMA, W. N. L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 14, n. 3, p. 236–247, 18 maio 2009.

RAES, E. J.; ISDEPSKY, A.; MUYLEAERT, K.; BOROWITZKA, M. A.; MOHEIMANI, N. R. Comparison of growth of *Tetraselmis* in a tubular photobioreactor (Biocoil) and a raceway pond. *Journal of Applied Phycology*, v. 26, n. 1, p. 247–255, 24 fev. 2014.

SANTOS, P. V.. Seleção de cepas oleaginosas de microalga *Chlorella* spp. e otimização do seu cultivo em meio sintético e vinhaça visando à produção sustentável de biodiesel. 2013. 138 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.4 fev. 2014

STEPHENSON, A. L.; KAZAMIA, E.; DENNIS, J. S.; HOWE, C. J.; SCOTT, S. A.; SMITH, A. G. Life-cycle assessment of potential algal biodiesel production in the united kingdom: A comparison of raceways and air-lift tubular bioreactors. *Energy and Fuels*, v. 24, n. 7, p. 4062–4077, 2010.

WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K. J.; OWENS, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, v. 19, n. 2, p. 63–102, ago. 2000.

YANFEN, L.; ZEHAO, H.; XIAOQIAN, M. Energy analysis and environmental impacts of microalgal biodiesel in China. *Energy Policy*, v. 45, p. 142–151, jun. 2012.

ZHU, L. Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 1376–1384, 2015.

7. CONCLUSÃO GERAL

Com o crescente aumento na demanda de energia no mundo e políticas públicas para diminuir os impactos ambientais, principalmente a emissão de CO₂ na atmosfera, o biodiesel encontra-se como um promissor substituto para o diesel fóssil. No entanto muitos desafios tecnológicos precisam ser superados para aproveitar esse potencial.

O presente estudo contribuiu com o desenvolvimento de dois sistemas de produção, com alteração do sistema utilizado para o cultivo das microalgas. Foi realizado um dimensionamento preliminar e aplicado a metodologia da avaliação do ciclo de vida, uma ferramenta capaz de avaliar os impactos ambientais dos processos no ciclo de vida do produto, e assim, contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias.

Com o dimensionamento preliminar, pode-se observar uma maior produção de biodiesel pelo sistema utilizando os fotobiorreatores para o cultivo, com uma produção diária de 974,4 kg de biodiesel contra 529,2 kg com o sistema de lagoas de alta taxa. Esse resultado é explicado pela maior produtividade de biomassa produzida em fotobiorreatores, devido ao maior controle da cultura que no sistema aberto.

Ao analisar o custo necessário para o tratamento da vinhaça, a tecnologia empregada utiliza-se de grande quantidade de sulfato de alumínio como coagulante, gerando um custo diário de R\$ 11.067.840,00, para produção de 529,2 kg e 974,4 kg, através do sistema de lagoas de alta taxa e fotobiorreatores, respectivamente. Com isso, ambos os sistemas apresentaram inviabilidade econômica para o biodiesel, com alto valor de produção comparado ao preço de mercado atual.

Através de uma análise da energia consumida pela energia gerada, ambos os sistemas, apresentaram inviabilidade energética, pois a energia demanda para a produção de 1 kg de biodiesel, foi maior que a energia produzida pelo mesmo. Para o sistema A, chegou-se a utilizar até 60 vezes mais energia do que a gerada pelo biodiesel, através do método de alocação em massa. Houve uma redução para o sistema A, sendo a relação a consumida/gerada de 37. Em ambos os sistemas, pelos demais critérios de alocação, apresentaram um valor maior que 1, significando maior energia consumida em relação a gerada pelo uso do biodiesel.

Além disso, os sistemas A e B pelo critério de alocação em massa, apresentaram um consumo de diesel fóssil de 60 kg e 32,22 kg para produção de 1 kg de biodiesel, em seu ciclo de vida. Fato que, apresenta incoerência com a definição conceitual do biodiesel, sendo forma de combustível originado de fontes renováveis.

Comparado com outras pesquisas, outros sistemas de produção apresentaram menores emissões para o ambiente que resultou em menores potenciais de impacto,

comparado com os dois sistemas. Comparando o potencial de aquecimento global, mesmo o sistemas B, com menores emissões, apresentou emissões 1632, 48, 34 40 vezes maior para os critério de alocação em massa, econômico, *cut-off* e massa e *cut-off* e econômico, respectivamente.

A solução para melhor os sistemas, não consiste apenas na otimização da produtividade das microalgas, mas também, encontrar uma tecnologia de tratamento de vinhaça capaz de tratar volumes grandes com baixo custo e com uso de material de baixo impacto ambiental. Além da etapa do coagulante, deve ser projetada uma tecnologia com menor consumo energético para a unidade de liquefação hidrotérmica, que possa atender as necessidades da reação e o grande volume atendido.

Apesar dos sistemas desenvolvido apresentarem restrições econômicas, energéticas e ambientais, a importância do estudo consistiu-se em apresentar os pontos críticos, analisando todo ciclo de vida, foram os processos agrícolas de produção de cana-de-açúcar, processo industrial de etanol, tratamento da vinhaça, e extração do óleo por liquefação hidrotérmica. Com isso, pesquisas futuras podem concentrar esforços para solucioná-los, contribuindo assim com a evolução e busca pela viabilidade do processo.