



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**EDUARDO GALDINO DE SOUZA**

**BIORREFINARIA MULTIPRODUTO A PARTIR DOS RESÍDUOS DO  
PROCESSAMENTO DA TILÁPIA DO NILO (*Oreochromis niloticus*) E ESGOTO  
DOMÉSTICO: UMA ABORDAGEM A PARTIR DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA  
DOS PRODUTOS**

**FORTALEZA**

**2021**

EDUARDO GALDINO DE SOUZA

BIORREFINARIA MULTIPRODUTO A PARTIR DOS RESÍDUOS DO  
PROCESSAMENTO DA TILÁPIA DO NILO (*Oreochromis niloticus*) E ESGOTO  
DOMÉSTICO: UMA ABORDAGEM A PARTIR DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA  
DOS PRODUTOS

Tese apresentada a Coordenação do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da  
Universidade Federal do Ceará, como  
parte dos requisitos para a obtenção do  
título de Doutor em Engenharia Civil  
(Recursos Hídricos). Área de  
concentração: Saneamento Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Marisete Dantas  
de Aquino

Coorientador: Prof. Dr. José Osvaldo  
Beserra Carioca

**FORTALEZA**

**2021**



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S237b Souza, Eduardo Galdino de.  
BIORREFINARIA MULTIPRODOTO A PARTIR DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO  
DA TILÁPIA DO NILO (*Oreochromis niloticus*) E ESGOTO DOMÉSTICO: UMA  
ABORDAGEM A PARTIR DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS /  
Eduardo Galdino de Souza. – 2021.  
144 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Marisete Dantas de Aquino.

Coorientação: Prof. Dr. José Osvaldo Beserra Carioca.

1. Biorrefinarias. 2. Microalgas. 3. ACV. 4. Impactos ambientais. 5. Efluentes. I. Título.

---

CDD 628

EDUARDO GALDINO DE SOUZA

BIORREFINARIA MULTIPRODUTO A PARTIR DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DA TILÁPIA DO NILO (*Oreochromis niloticus*) E ESGOTO DOMÉSTICO: UMA ABORDAGEM A PARTIR DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS

Tese apresentada a Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos). Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em 15/12/2020

BANCA EXAMINADORA

---

Profª Drª Marisete Dantas De Aquino (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Jose Osvaldo Beserra Carioca (Coorientador)  
Parque de Desenvolvimento Tecnológico (PADETEC)

---

Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Fernando Jose Araujo Da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Adeildo Cabral Da Silva  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. Mauricio Alves Da Motta Sobrinho  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

**À Deus.**

**À minha família.**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pela oportunidade de chegar até aqui.

À minha mãe, que nunca desistiu de acreditar no poder do conhecimento, e sempre me incentivou, mesmo sem condições, às vezes, de custear o material escolar mais simples, na minha infância.

À minha esposa, Camila Kellen que, por diversas vezes, me deu palavras de ânimo e não me deixou desistir do desafio. O apoio dado ultrapassou as fronteiras do emocional, em cada gesto de carinho, cada abraço, cada momento em que ela pediu a Deus por mim.

Ao Prof. Dr Osvaldo Carioca que me acolheu, por duas vezes, em seu laboratório. Pela sua cordialidade, amizade e confiança. Hoje, posso afirmar que, exercendo também o magistério, aplico os conhecimentos científicos e experiências pessoais adquiridos em nossa caminhada.

À minha orientadora, Prof. Dra Marisete, que me deu apoio em momento de muita aflição e sempre confiou no meu trabalho. Sempre admirei a forma como conduz suas aulas e posso afirmar que muito me espelho em seu profissionalismo e empatia na minha profissão de professor.

À CAPES pelo apoio financeiro. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

**Então Samuel pegou uma pedra e a ergueu entre Mispá e Sem; e deu-lhe o nome de Ebenézer, dizendo: "Até aqui o Senhor nos ajudou". (1 Samuel 7:12)**

## RESUMO

Nos 20 últimos anos, tem-se fomentado a prática da piscicultura nos açudes públicos do Ceará, uma importante ação de cunho social e econômico que tem melhorado a vida de milhares de pessoas do interior do estado. Porém, importantes impactos ambientais têm sido observados na água e no solo, com potencial risco à saúde humana e aos ecossistemas, causado tanto pela atividade pesqueira como pelo lançamento irregular de esgotos domésticos nos corpos hídricos. Neste contexto, uma alternativa promissora para o aproveitamento dos resíduos da piscicultura e dos esgotos domésticos gerados nas cidades é o seu tratamento em Biorrefinaria de Terceira Geração (BTG). Por esta tecnologia, efluentes tanto domésticos como industriais passam a ser insumos para a obtenção de produtos de alto valor agregado. Dessa maneira, este trabalho intentou projetar duas rotas tecnológicas para a produção de biomassa de microalgas, sob o prisma de uma BTG, e avaliar os processos que mais impactam o meio ambiente a partir de uma Avaliação de Ciclo de Vida de produtos. Os resultados foram comparados com os impactos ambientais da produção de biomassa de microalgas com a utilização de fertilizantes comerciais (processo convencional), para as categorias de impactos ambientais: mudanças climáticas; depleção hídrica; depleção da camada de ozônio; formação de oxidantes fotoquímicos; formação de material particulado; formação de oxidantes fotoquímicos; acidificação terrestre; depleção fóssil; ocupação urbana e ocupação de terras aráveis. O método de avaliação de impactos ambientais foi o ReCiPe e toda a rotina de cálculo foi realizada utilizando-se o *software* proprietário Simapro da Prè-Consultants. Foi constatado que a rota de produção de biomassa de microalgas com fertilizantes comerciais (rota C0) foi responsável por maiores impactos ambientais em todas as categorias de impactos avaliadas. Na rota tecnológica para a produção de biomassa a partir de resíduos do processamento do pescado (C2), os processos que mais impactaram o meio ambiente foram o pré-tratamento, cultivo e secagem de biomassa, ou seja, processos com alta demanda de energia elétrica e uso de produtos químicos. Já na rota de produção de biomassa microalgal seca, as etapas de cultivo e secagem de biomassa responderam pelos maiores impactos ambientais, notadamente pela maior demanda por eletricidade. Processos como a produção de eletricidade por meio de fontes não-renováveis (carvão mineral), madeira e por cana-de-açúcar foram relacionados em mais da metade de todas as categorias de impactos ambientais

elencados, não somente pela emissão de diversas substâncias químicas para o solo, água e ar como também pela ocupação de terras aráveis, transformação de áreas naturais e emissão de compostos cancerígenos. Ficou evidente que os principais gargalos ambientais das rotas C2 e C3 estão relacionados com a utilização de energia não-renovável e de produtos químicos em seus processos.

Palavras-chave: Biorrefinarias; microalgas; ACV; impactos ambientais; efluentes.

## ABSTRACT

In the last 20 years, the practice of fish farming in public dams in Ceará has also been promoted, an important social and economic action that has improved the lives of thousands of people in the interior of the state. However, important environmental impacts have been observed on water and soil, with a potential risk to human health and ecosystems, caused both by fishing activity and by the irregular discharge of sewage into water bodies. In this context, a promising alternative for the use of fish waste and domestic sewage generated in cities is its treatment in a Third Generation Biorefinery (TGB). Through this technology, both domestic and industrial effluents become inputs for obtaining value-added products. In this way, this work tried to design two technological routes for the production of microalgae biomass, under the prism of a TGB, and to evaluate the processes that most impact the environment from a Life Cycle Assessment of products. The results were compared with the environmental impacts of microalgae biomass production with the use of commercial fertilizers (conventional process), for the categories of environmental impacts: climate change; water depletion; depletion of the ozone layer; formation of photochemical oxidants; formation of particulate material; formation of photochemical oxidants; terrestrial acidification; fossil depletion; urban occupation and occupation of arable land. The environmental impact assessment method was ReCiPe and the entire calculation routine was performed using the proprietary Simapro software from Prè-Consultants. It was discovered that the microalgae biomass production route with commercial fertilizers (route C0) was responsible for the greatest environmental impacts in all the impact categories evaluated. In the technological route for the production of biomass from fish processing residues (C2), the processes that most impacted the environment were the pre-treatment, cultivation and drying of biomass, that is, processes with high demand for electricity and use of chemicals. On the dry microalgal biomass production route, the biomass cultivation and drying stages accounted for the greatest environmental impacts, notably the greater demand for electricity. Processes such as the production of electricity from non-renewable sources (mineral coal), wood and sugar cane have been linked in more than half of all the categories of environmental impacts listed, not only by the emission of various chemical substances for the soil, water and air as well as the occupation of arable land, transformation of natural areas and emission of carcinogenic compounds. It was evident that the main environmental



bottlenecks on routes C2 and C3 are related to the use of non-renewable energy and chemicals in their processes.

Keywords: Biorefineries; microalgae; LCA; environmental impacts; effluents.

## Lista de Figuras

Figura 2.1 Mapa esquemático do eixo de integração, reservatório Castanhão, região metropolitana de Fortaleza, Ceará (trechos de 1 a 5). .....	28
Figura 2. 2 Etapas do processamento da Tilápia do Nilo realizada ao longo das açudes públicos do Estado do Ceará. ....	33
Figura 2. 3 Biorrefinaria a partir da Cadeia Produtiva do Pescado.....	35
Figura 2. 4 Matérias-primas e processos em biorrefinarias, segundo a literatura .....	41
Figura 2. 5 Principais etapas de uma ACV e correlações entre si.....	44
Figura 2. 6 Relação entre Inventário de Ciclo de Vida e categorias de impactos ambientais .....	49
Figura 2. 7 Relação entre categorias de Ponto Médio e categorias de Danos proposta por Jolliet et al. (2004). .....	50
Figura 3. 1 Concepção da Biorrefinaria de Terceira Geração .....	56
Figura 3.2 Visceras armazenadas em freezer horizontal (a) e efluente gerado durante o armazenamento (b) .....	57
Figura 3. 3 Viscera in natura (a), liquidificador industrial (b) e víscera triturada (c)...	58
Figura 3.4 Perfil de fases obtido após o processo de cocção e decantação por 24 h. ....	59
Figura 3. 5 Fase aquosa obtida nos processos de cocção e decantação por 24 h com a presença fase sólida sedimentável. ....	59
Figura 3. 6 Reatores anaeróbios do tipo UASB com o sistema de bombeamento....	60
Figura 3. 7 Reator de tratamento do biogás (a), material de enchimento, anéis de PVC, e os bags de armazenamento de biometano (c). .....	61
Figura 3. 8 Fotobiorreatores tipo placa plana e piscina de cultivo tipo <i>raceway</i> .....	62
Figura 3. 9 Sistema de cultivo instalado no laboratório (a); "Maternidade" (sistema de cultivo em pequena escala antes da inoculação no fotobiorreator) (b); Sistema de queima de gás natural e geração de CO2 (c) e o queimador do sistema alternativo de geração de CO2 para a produção de biomassa microalgal (d) .....	63
Figura 3. 10 Montagem do eletroflotador Eletroflotador de escala piloto. ....	65
Figura 3. 11 Sistema ilustrativo de bancada para eletroflotação de biomassa microalgal. Em (a), os dados de operação do sistema; Em (b), a pasta de microalga	

obtida; Em (c), perfil de separação (ao final do processo e em (d) Perfil antes do processo de eletrofloculação.....66

Figura 3. 12 Estufa com circulação forçada de ar (a) e biomassa seca obtida no final do processo de secagem (b). .....67

Figura 3. 13 Concepção da Biorrefinaria de Terceira Geração com aproveitamento de esgotos domésticos.....68

Figura 3. 14 Aparato experimental de escala de bancada para o tratamento anaeróbio. ....69

Figura 3. 15 Concepção do sistema de produção de biomassa microalgal seca com a utilização de fertilizantes comerciais. ....71

Figura 3. 16 Biorrefinaria de 3ª Geração – Rota 02 (vísceras de tilápia) – Unidades de processos, fluxos de entradas, saídas e emissões. ....74

Figura 3. 17 Biorrefinaria de 3ª Geração – Rota C3 (esgotos domésticos) – Unidades de processos, fluxos de entradas, saídas e emissões. ....75

Figura 3. 18 Processo de obtenção de biomassa seca – Rota C0 (fertilizantes comerciais) – Unidades de processos, fluxos de entradas, saídas e emissões. ....76

## Lista de Gráficos

Gráfico 2.1 - Precipitação anual para o período de 2008 – 2018, nas bacias do Jaguaribe, Salgado e Metropolitana (CE).....	25
Gráfico 4.2. 1 Emissões de CO <sub>2</sub> eq para as 3 rotas tecnológicas avaliadas. ....	97
Gráfico 4.2. 2 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Mudanças Climáticas.....	98
Gráfico 4.2. 3 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Mudanças Climáticas. ....	99
Gráfico 4.2. 4 Emissões de CFC – 11eq para as 3 rotas tecnológicas avaliadas. ..	101
Gráfico 4.2. 5 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção da Camada de Ozônio. ....	102
Gráfico 4.2. 6 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção da Camada de Ozônio. ....	103
Gráfico 4.2. 7 Depleção hídrica para as 3 rotas tecnológicas avaliadas em m <sup>3</sup> .....	104
Gráfico 4.2. 8 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção Hídrica.....	105
Gráfico 4.2. 9 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção Hídrica.....	106
Gráfico 4.2. 10 Consumo de recursos fósseis para as 3 rotas tecnológicas avaliadas. ....	107
Gráfico 4.2. 11 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção Fóssil.....	108
Gráfico 4.2. 12 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção Fóssil.....	109
Gráfico 4.2. 13 Ocupação de Terras Aráveis para as 3 rotas tecnológicas avaliadas. ....	110
Gráfico 4.2. 14 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Ocupação de Terras Aráveis.....	111
Gráfico 4.2. 15 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Ocupação de Terras Aráveis. ....	112
Gráfico 4.2. 16 Formação de Material Particulado para as 3 rotas tecnológicas avaliadas. ....	113

Gráfico 4.2. 17 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Material Particulado.....	114
Gráfico 4.2. 18 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Material Particulado .....	115
Gráfico 4.2. 19 Ocupação de Áreas Urbanas para as 3 rotas tecnológicas avaliadas. ....	116
Gráfico 4.2. 20 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Ocupação de Áreas Urbanas. ....	117
Gráfico 4.2. 21 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Ocupação de Áreas Urbanas.....	118
Gráfico 4.2. 22 Formação de Material Particulado para as 3 rotas tecnológicas avaliadas .....	119
Gráfico 4.2. 23 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Oxidantes Fotoquímicos....	120
Gráfico 4.2. 24 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Oxidantes Fotoquímicos. ....	121
Gráfico 4.2. 25 Emissões de Radiação Ionizante para as 3 rotas tecnológicas avaliadas. ....	123
Gráfico 4.2. 26 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Radiação Ionizante.....	124
Gráfico 4.2. 27 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Radiação Ionizante. ....	125
Gráfico 4.2. 28 Emissões de SO <sub>2</sub> eq para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.....	126
Gráfico 4.2. 29 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Acidificação Terrestre.....	127
Gráfico 4.2. 30 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Acidificação Terrestre. ....	129

### Lista de Quadros

Quadro 2.1 Cobertura dos serviços de saneamento básico nos municípios situados no entorno do reservatório Castanhão. ....	27
Quadro 2. 2 Classificação das biorrefinarias segundo os tipos de matérias-primas processadas .....	38

### Lista de Tabelas

Tabela 4. 1 Inventário do processo de armazenagem de vísceras de tilápia. ....	79
Tabela 4. 2 Inventário do processo de armazenagem de vísceras de tilápia. ....	80
Tabela 4. 3 Inventário do processo de cocção de vísceras de tilápia. ....	81
Tabela 4. 4 Inventário do processo de neutralização de substratos.....	82
Tabela 4. 5 Inventário do processo de digestão anaeróbia do substrato neutralizado. ....	83
Tabela 4. 6 Inventário do processo de purificação do biogás e obtenção de biometano. ....	84
Tabela 4. 7 Inventário do processo de purificação do biogás e obtenção de biometano. ....	85
Tabela 4. 8 Inventário do processo de cultivo de biomassa microalgal em fotobiorreator de placa plana. ....	86
Tabela 4. 9 Inventário do processo de sedimentação de biomassa microalgal.....	87
Tabela 4. 10 Inventário do processo de eletrofloculação de biomassa microalgal...88	
Tabela 4. 11 Inventário do processo de eletrofloculação de biomassa microalgal....88	
Tabela 4. 12 Inventário do processo de tratamento anaeróbio da rota C3.....89	
Tabela 4. 13 Inventário do processo de tratamento anaeróbio da rota C3.....90	
Tabela 4. 14 Inventário do processo de tratamento do biogás, na rota C3. ....90	
Tabela 4. 15 Inventário do processo de cultivo de biomassa microalgal, na rota C3. ....91	
Tabela 4. 16 Inventário do processo de sedimentação de biomassa microalgal, na rota C3.....92	
Tabela 4. 17 Inventário do processo de eletroflotação de biomassa microalgal, na rota C3.....92	

Tabela 4. 18 Inventário do processo de secagem de biomassa microalgal, na rota C3. .....	93
Tabela 4. 19 Inventário do processo de produção de biomassa microalgal, na rota C0. .....	94
Tabela 4. 20 Inventário do processo de produção de sedimentação de biomassa microalgal, na rota C0. ....	95
Tabela 4. 21 Inventário do processo de produção de centrifugação de biomassa microalgal, na rota C0. ....	96
Tabela 4. 22 Inventário do processo de secagem de biomassa microalgal, na rota C0. .....	96
Tabela 4. 23 Processos que mais impactaram em cada categoria de impacto ambiental por cada rota de processos de produção de biomassa microalgal seca.	131

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1. OBJETIVOS .....	24
1.1.1. Objetivo geral .....	24
1.1.2. Objetivos específicos .....	24
1.2. Estrutura do Trabalho.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
2.2. A questão do saneamento básico nas cidades banhadas pelo açude Castanhão .....	27
2.3. Produção pesqueira no Brasil.....	30
2.4. Etapas do Processamento do Pescado.....	33
2.5. Biorrefinarias como plataforma para a mitigação dos impactos ambientais e valorização dos efluentes industriais e domésticos .....	35
2.6. Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos.....	42
2.6.1. Etapas de um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida .....	43
2.6.1.1. Definição do Objetivo e do Escopo do estudo .....	43
2.6.1.2. Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) .....	47
2.6.1.3. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) .....	48
2.6.1.4. Fase de Interpretação do Ciclo de Vida .....	54
3. METODOLOGIA .....	55
3.1. Concepção da Biorrefinaria de Terceira Geração a partir de Vísceras de Tilápia do Nilo.....	55
3.1.1. Unidade I: Armazenamento de Vísceras de Tilápia .....	55
3.1.2. Unidade II: Pré-tratamento das Vísceras de Tilápia .....	57
3.1.3. Unidade III: Tratamento Anaeróbio e Geração de Biometano .....	60
3.1.4. Unidade IV: Cultivo, Colheita e Secagem de Biomassa Microalgal.....	61
3.2. Concepção da Biorrefinaria de Terceira Geração com aproveitamento de Esgotos Domésticos.....	67



3.2.1. Unidade I: Tratamento Anaeróbio .....	69
3.2.2. Unidade II: Tratamento de Gases e Geração de CO <sub>2</sub> .....	69
3.2.3. Unidade III: Cultivo, Colheita e Secagem da Biomassa Microalgal .....	70
3.3. Concepção do Sistema de Produção de Biomassa Seca com a Utilização de Fertilizantes Comerciais .....	70
3.4. Estudos de Análise de Ciclo de Vida .....	72
3.4.1. Objetivo e Escopo do Estudo .....	72
3.4.2. Função e Unidade Funcional.....	72
3.4.3. Sistema de produto e fronteiras do sistema .....	73
3.4.4. Procedimentos de Alocação de Produtos e Coprodutos .....	77
3.4.5. Procedimentos de alocação de fim de vida .....	77
3.4.6. Categorias de impacto ambiental .....	77
3.4.7. Requisitos de dados.....	77
3.4.8. Requisitos de Qualidade de dados.....	78
4. Resultados e Discussão .....	79
4.1. Inventário do Ciclo de Vida das Rotas Tecnológicas C2, C3 e C0 .....	79
4.1.1. Inventário de Ciclo de Vida da Biorrefinaria de Terceira Geração com Aproveitamento de Visceras de Tilápia – Rota Tecnológica C2.....	79
A) Unidade I: Armazenamento de Visceras de Tilápia.....	79
B) Unidade II: Pré-tratamento das Visceras de Tilápia .....	80
C) Unidade III: Processo de digestão anaeróbia em Reator de Fluxo Ascendente	82
D) Unidade IV: Cultivo, Colheita e Secagem da Biomassa Microalgal.....	85
4.1.2. Inventário de Ciclo de Vida da Biorrefinaria de Terceira Geração com Aproveitamento de Esgotos Domésticos – Rota Tecnológica C3 .....	88
A) Unidade I: Tratamento Anaeróbio e Remoção de Sólidos.....	89
B) Unidade II: Tratamento do Biogás .....	90
C) Unidade III: Cultivo, Colheita e Secagem da Biomassa Microalgal .....	91

4.1.3. Inventário de Ciclo de Vida da Produção de Biomassa Microalgal com a Utilização de Fertilizantes Comerciais – Rota Tecnológica C0 .....	93
A) Cultivo de Biomassa de Microalgas.....	94
B) Etapa de Concentração de Biomassa e Recuperação de Água.....	95
C) Etapa de Secagem de Biomassa .....	96
4.2. Avaliação de Impacto Ambiental – Caracterização das Rotas Tecnológicas ..	97
4.2.1. Mudanças Climáticas .....	97
4.2.2. Depleção da Camada de Ozônio .....	100
4.2.3. Depleção Hídrica.....	104
4.2.4. Depleção Fóssil.....	106
4.2.5. Ocupação de Terras Aráveis.....	109
4.2.6. Formação de Material Particulado.....	112
4.2.7. Ocupação de Áreas Urbanas .....	116
4.2.8. Formação de Oxidantes Fotoquímicos.....	118
4.2.9. Radiação Ionizante.....	122
4.2.10. Acidificação Terrestre .....	125
5. CONCLUSÕES.....	136
REFERÊNCIAS.....	137

## 1. INTRODUÇÃO

Com precipitações médias anuais de, aproximadamente, 700 mm, e taxas de evaporação por volta de 2000 mm (FERNANDES *et al.*, 2017; LACERDA *et al.*, 2018), o estado do Ceará, assim como os outros estados do nordeste brasileiro, e o governo federal, tem buscado amenizar os efeitos trazidos pela seca por meio de diversas políticas públicas. Dentre essas medidas, podem ser citadas as de caráter estruturantes como: a construção de reservatórios (como o Castanhão); adutoras (como o Eixão das Águas e o Canal do Trabalhador); a interligação de bacias; a transposição das águas do Rio São Francisco; a construção de poços profundos e a aquisição de dessalinizadores.

Atualmente, essas medidas não somente visam a segurança hídrica do estado, sob o ponto de vista da quantidade de água armazenada, bem como desempenha um importante papel socioeconômico nas regiões do entorno dos reservatórios. Com incentivos diretos do governo do estado do Ceará e do Governo Federal, por meio da Secretaria de Desenvolvimento Agrário, comunidades que anteriormente sobreviviam exclusivamente da agropecuária, passaram a exercer a piscicultura. Com produção de forma isolada ou por meio de cooperativas, o estado do Ceará passou a ser destaque na produção de tilápia do Nilo do Brasil o que, claramente, refletiu no aumento de renda daquelas comunidades, antes do período de estiagem iniciado em 2012.

Todavia, o crescimento da atividade da piscicultura não foi acompanhado por um planejamento ambiental da atividade, no sentido de se promover um destino correto dos efluentes gerados na etapa de pesca e de beneficiamento, evitando-se impactos ambientais no solo e na água dos reservatórios. Dessa forma, as etapas de abate, descamação, evisceração e lavagem do pescado são realizadas, em muitos casos, às margens do próprio açude. Mesmo nas centrais de beneficiamento de pescados existentes, o tratamento de efluentes não é realizado de forma a atender às normas de descarte e proteger os corpos hídricos e solo, como nas instalações industriais de grande porte, conforme reportado em trabalho prévio (SOUZA, 2014).

Como boa parte do pescado é beneficiada dentro da própria embarcação (barco de pequeno porte), vê-se, em diversos pontos ao longo das margens do açude Castanhão, por exemplo, rejeitos como vísceras e escamas de peixes lançadas

diretamente sobre o solo. Além disso, em diversos pontos do açude são vistas vegetação típica de ambientes eutrofizados.

Contrastando com a realidade exposta, as técnicas mais modernas de beneficiamento de pescados visam não somente o produto final, que pode ser um filé, um enlatado, ou mesmo um peixe *in natura* mas também o aproveitamento dos resíduos de filetagem como carcaça, vísceras e a pele do peixe, para a obtenção de subprodutos de valor de mercado interessante: óleo de peixe; farinha de peixe; artefatos de pele (como bolsas e sapatos); ácidos poliinsaturados; colágeno e quitosana (DENHAM, 2015).

Com o advento de um longo período de estiagem, compreendido entre os anos de 2012 a 2018, o volume médio de água armazenada nos reservatórios cearenses chegou a ser de 10,68 % (COGERH, 2019). O principal reservatório cearense, o açude Castanhão, chegou a atingir um pouco mais de 4% de sua capacidade, levando à preocupação o governo do estado não somente pela ameaça iminente de racionamento de água na região metropolitana de Fortaleza, bem como o cessar do fornecimento de água para o funcionamento de grandes empresas (Siderúrgica e Termelétrica do Pecém - São Gonçalo do Amarante), como também pelo impacto negativo na produção de pescados, deixando sem renda milhares de famílias ao longo do interior cearense. Essa situação trouxe a reflexão sobre os usos prioritários da água em períodos de estiagem e sobre o consumo e reúso da água na indústria, nas cidades e no campo.

Diante de problemas ambientais comprometedores advindos da atividade pesqueira e de fatores climáticos que afetam diretamente a segurança hídrica do estado do Ceará, agora sob o ponto de vista também da qualidade hídrica, torna-se pertinente a discussão de uma tecnologia que, além de otimizar o atual processo de tratamento de efluentes do processamento de pescados no entorno dos açudes, com aproveitamento de rejeitos para a obtenção de subprodutos de valor comercial, também seja capaz de aumentar a cadeia produtiva do pescado a partir de um conceito amigável ao meio ambiente.

Nesta direção, um conceito se apresenta como alternativa tecnológica que alia a mitigação dos impactos ambientais com o aumento da cadeia produtiva dos pescados: a Biorrefinaria de Terceira Geração. Baseada nos preceitos da ecologia

industrial, esta proposta visa atingir resíduo zero na cadeia de beneficiamento do pescado, ao mesmo tempo em que são obtidos outros produtos de valor comercial, como energia, proteína vegetal (microalgas), óleo e gordura, além de água de reúso.

Este trabalho busca avaliar de forma comparativa, três diferentes cenários de aproveitamento de resíduos da piscicultura e de esgotos domésticos, para a produção de biomassa algal e outros subprodutos de alto valor agregado, através da Avaliação do Ciclo de Vida. Por esta metodologia, é possível identificar os principais processos que mais impactam o meio ambiente e ser possível a tomada de decisão para a mitigação dos impactos ambientais.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Avaliar os principais impactos ambientais do ciclo de vida da biomassa microalgal obtida a partir de uma Biorrefinaria de Terceira Geração que integra o tratamento de resíduos da piscicultura e de esgotos domésticos.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Conceber da Biorrefinaria de Terceira Geração e suas unidades de processo;
- Propor de rotas alternativas de operação da biorrefinaria;
- Levantar os fluxos mássicos e energéticos (inventário do ciclo de vida) da biorrefinaria e das rotas alternativas propostos;
- Avaliar os impactos do ciclo de vida da rota tecnológica base de operação da biorrefinaria e das rotas alternativas propostas;
- Identificar os processos mais impactantes (*hotspots*);
- Propor de melhorias nas rotas (base e alternativas) a partir dos *hotspots* identificados.

## **1.2. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho é composto por 5 capítulos: Introdução; Revisão Bibliográfica; Metodologia; Resultados e Discussão e Conclusão. Ainda faz parte deste documento um capítulo extra com todas as referências bibliográficas utilizadas, como artigos científicos, livros, sites de instituições públicas e privadas e legislações com os respectivos links diretos para acesso rápido.

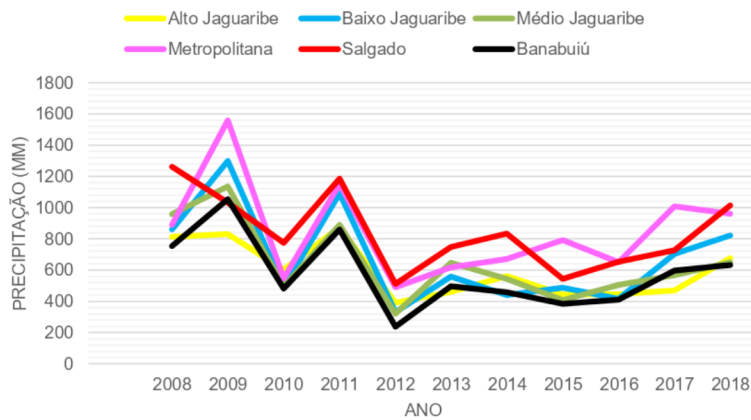
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Crise hídrica no estado do Ceará

O estado do Ceará possui média histórica anual de precipitação em torno de 700 mm enquanto os índices de evaporação podem chegar a 2000 mm, características incontestáveis de regiões de clima semiárido (FERNANDES *et al.*, 2017; LACERDA *et al.*, 2018). No passado, a estiagem era uma das grandes responsáveis por calamidades públicas, como a retratada na obra de Raquel de Queiroz, O Quinze.

O Gráfico 2.1 mostra dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) acerca das precipitações anuais no período de 2008 a 2018 para a Bacia do Jaguaribe (Alto, Médio e Baixo), Salgado e Metropolitana. Verifica-se constantes precipitações abaixo da média no período compreendido entre 2012 e 2016 e precipitações em torno da média em 2017 e 2018. Além disso, pode-se perceber a grande variabilidade temporal e espacial das precipitações ao longo das diversas bacias hidrográficas cearenses. Esses fenômenos estão diretamente ligados a questões de mudanças climáticas, a zona de convergência intertropical e ao fenômeno do El Niño (PEREIRA *et al.*, 2018).

Gráfico 2.1 - Precipitação anual para o período de 2008 – 2018, nas bacias do Jaguaribe, Salgado e Metropolitana (CE)



Fonte: FUNCEME (2019)

Os dados mostrados revelam uma situação de vulnerabilidade quanto à segurança hídrica no estado do Ceará, que depende quase que exclusivamente de grandes reservatórios para abastecimento d'água de sua população. No nordeste brasileiro, o estado do Ceará possui a maior capacidade de armazenamento de água, em torno de 18 bilhões de metros cúbicos, porém, com a escassez hídrica, este valor chegou a estar abaixo de 30%, sendo que o açude Castanhão, o maior do Estado, atingiu níveis abaixo de 5% de sua capacidade (FUNCEME, 2020).

Dessa maneira, ao longo dos últimos 20 anos, medidas tomadas, tanto no nível federal como estadual, vêm somando esforços no combate aos efeitos da estiagem. Dentre essas ações, podem ser citadas a construção de diversos reservatórios, canais (Eixão das Águas, Canal da Integração e Canal do Trabalhador, por exemplo), instalação de dessalinizadores, carros pipa e assistência social (via transferência de renda) e renegociação de dívidas de pequenos agricultores, via Lei Nº 11.322/2006 conhecida como a Lei Eunício Oliveira, que beneficiou mais de 350 mil famílias do semiárido nordestino.

Outra importante ação social foi o incentivo à piscicultura. O Governo do Estado do Ceará disponibilizou até 1% dos espelhos d'água do estado para esta atividade (SOUZA, 2014). Neste contexto, o Ceará tornou-se destaque na produção de tilápia no Brasil, quando foi lançado Programa PISCIS, que visava a produção de 220 mil toneladas de tilápia até 2020, programa inviabilizado devido à forte estiagem, iniciada em 2012. Em 2019, o Governo do Estado do Ceará, por meio do Programa de Peixamento dos açudes públicos do estado, distribuiu mais de 1 milhão de alevinos de espécies como tilápia, tambaqui, carpa e curimatã, em 24 municípios cearenses, distribuídos em áreas represadas nos açudes públicos (SDA, 2019).

A mais recente grande obra para garantia da segurança hídrica do estado é a Transposição das Águas do Rio São Francisco, com obra concluída em 2020. Um outro projeto de grande interesse social reside em uma parceria entre o Governo do Estado do Ceará e Israel para a instalação de uma usina de dessalinização de água para abastecimento da cidade de Fortaleza e região metropolitana (EBC, 2019).



## 2.2. A questão do saneamento básico nas cidades situadas no entorno do açude Castanhão

O estado do Ceará, por meio da COGERH, realiza o monitoramento ambiental de 155 reservatórios, totalizando um volume de 18,6 bilhões de metros cúbicos de água distribuídos em todas as regiões cearenses. Esse gigantesco volume de água armazenado se configura em uma importante estratégia de segurança hídrica, em épocas de estiagem. Não obstante essa infraestrutura, diversas atividades antrópicas nas bacias de contribuição vêm comprometendo a qualidade da água desses reservatórios (SOUZA et. al, 2017).

Conforme a Figura 2.1, o Castanhão, o principal reservatório hídrico do Estado do Ceará, está localizado na bacia hidrográfica do Jaguaribe, garantindo água para diversos projetos de irrigação no Vale do Jaguaribe, o abastecimento público da região do Baixo Jaguaribe, a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) bem como ao Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), por meio do Canal da Integração (Eixão da Águas) (DNOCS, 2019).

Quatro municípios situam-se no entorno do Castanhão: Alto Santo, Nova Jaguaribara, Jaguaratama e Jaguaribe. Consonante com a realidade brasileira, suas populações convivem com problemas de acesso a serviços de água, coleta e tratamento de esgotos, drenagem e coleta e tratamento de resíduos sólidos. O Quadro 2.1 mostra os dados dos principais indicadores de saneamento dessas quatro cidades.

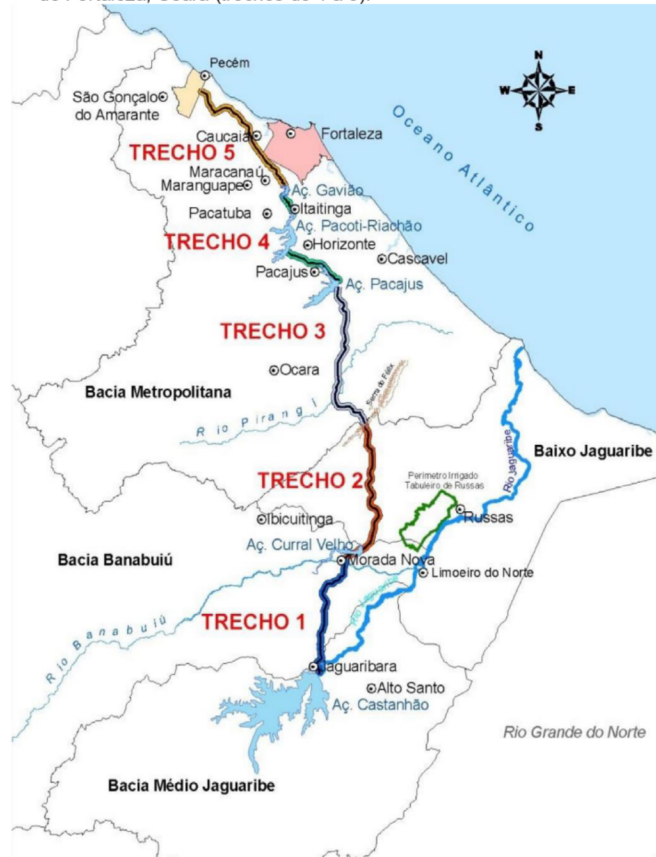
Quadro 2.1 Cobertura dos serviços de saneamento básico nos municípios situados no entorno do reservatório Castanhão.

Serviços	Municípios				
		Alto Santo	Nova Jaguaribara	Jaguaratama	Jaguaribe
Empresa Responsável	Local	CAGECE	CAGECE	CAGECE	SAAE
Índice de atendimento de água (%) <sup>3</sup>	Urbano	93,79	99,96	98,09	100,00
Índice de coleta de esgotos (%) <sup>3</sup>	Urbano	10,56	64,20	6,36	85,00
Índice de Tratamento de esgotos (%) <sup>1</sup>	Total	0,00	100,00	100,00	100,00
Limpeza Urbana (%) <sup>3</sup>	-	41,69	75,16	48,22	66,19
Drenagem Urbana (%) <sup>2</sup>	-	Insatisfatória	Satisfatória	Insatisfatória	Insatisfatória

Fonte: <sup>1</sup>SNIS (2014), <sup>2</sup>COGERH (2011), <sup>3</sup>IPECE (2017).

CAGECE: Companhia de Água e Esgoto do Ceará; SAAE: Serviço Autônomo de Água e Esgoto.

Figura 2.1 Mapa esquemático do eixo de integração, reservatório Castanhão, região metropolitana de Fortaleza, Ceará (trechos de 1 a 5).



Fonte: SRH (2002)

Percebe-se que a melhor situação em termos de serviços de saneamento é a da cidade de Nova Jaguaribara com 100 % de cobertura de água tratada na zona urbana (o que corresponde a 70 % da população atendida por serviço de água tratada), sendo que 64,20 % dos esgotos domésticos gerados na cidade são coletados e 100% tratados. O índice de limpeza urbana (coleta de resíduos sólidos urbanos) de Nova Jaguaribara é de 75,16 % e possui uma satisfatória rede de drenagem urbana.

Na cidade de Jaguaribara 98,09 % da população possui acesso à água tratada, via companhia de saneamento local, na área urbana. Quanto à limpeza urbana, apenas 48,22 % da população tem acesso à coleta regular de resíduos

sólidos, concentrado basicamente na zona urbana. Grande preocupação reside na coleta de esgotos domésticos gerados na cidade, com apenas 6,36 % da população com acesso ao serviço. De acordo com o SNIS, todo o esgoto coletado na cidade é submetido à tratamento antes de sua disposição final. Quanto à drenagem urbana, a cidade não possui rede satisfatória de cobertura para este serviço.

A cidade de Jaguaribe destaca-se pela alta cobertura de atendimento à água tratada com 100% na área urbana e 99,4% da população total. A coleta de esgotos domésticos na zona urbana é de 85 %, sendo que todo o esgoto doméstico coletado é tratado. Drenagem urbana é classificada como insatisfatória de acordo com a COGERH.

Contrastando com o município de Jaguaribe, a cidade de Alto Santo possui sérios problemas de índices de saneamento básico. Enquanto 93,79 % de sua população tem acesso à água (seja por poço ou nascente ou pela companhia de saneamento local), a cidade possui apenas 10,56 % de suas residências com acesso à rede coletora de esgotos. De acordo com a COGERH, a rede de drenagem de águas pluviais é insatisfatória, enquanto apenas 41,69 % da população tem acesso à coleta regular de resíduos sólidos.

Todos esses números se constituem em um problema socioambiental importante uma vez que, a população, sem acesso ao serviço de coleta de esgotos, recorre a sistemas individuais de tratamento (fossa-sumidouro) ou, em regiões de maior vulnerabilidade social, vê-se obrigada a dispor seus efluentes diretamente sobre o solo (contaminando o lençol freático) ou mesmo no corpo hídrico (PEREIRA et. al., 2018).

Os municípios do entorno do reservatório Castanhão apresentam baixo índice de cobertura de limpeza urbana (42 a 66%); apenas Nova Jaguaribara tem 75,2%. Eles dispõem seus resíduos sólidos domiciliares em lixões. Como não existe obediência a critérios ambientais na sua concepção, os lixões têm provocado contaminação do solo e dos recursos hídricos, uma vez que o chorume pode atingir o lençol freático e acarretar diversos problemas de saúde, em caso de contaminação por microrganismos ou mesmo intoxicações (LEVY, K.; SMITH, S. M.; CARLTON E. J., 2018).

Seguindo-se a mesma lógica, a insatisfatória cobertura de rede de drenagem de águas pluviais faz com que resíduos presentes nas cidades sejam carreados para o corpo hídrico, provocando a diminuição da qualidade da água utilizada pela própria população.

Além dos problemas quanto ao acesso aos serviços de saneamento básico, essas cidades contam com atividade agropecuária nas margens do açude Castanhão. Essa atividade, importante econômica e socialmente, acarreta potenciais riscos ambientais quando realizadas nas proximidades de corpos aquáticos (LI et al, 2019). Isso se deve pelo possível transporte de defensivos agrícolas, por meio da água da chuva, até o manancial, podendo atingir localidades distantes do ponto de lançamento (RODRIGUES et al, 2018; JOKANOVIĆ, 2018; MCCLELLANDA *et al.*, 2018).

### **2.3. Produção pesqueira no Brasil**

Para a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), o crescimento mundial (econômico e populacional), em que se espera atingir aproximadamente 9,8 bilhões de pessoas em 2050, tem sido os responsáveis pelo aumento da demanda por alimento, seja na forma *in natura* ou mesmo processada, exercendo forte pressão sobre os recursos naturais em todo o mundo (FAO, 2017).

Em valores médios, 17% da proteína animal consumida pela população mundial provém de produtos da pesca, sendo que o consumo *per capita* deste produto praticamente duplicou nos últimos 40 anos. Projeções indicam que o consumo médio de pescados pode chegar a 16,2 kg/pessoa/ano, nos países em desenvolvimento, e a 21,5 kg/pessoa/ano, nos países desenvolvidos (NOWAK, 2018). Além disso, o pescado que não é utilizado para alimentação humana é processado para obtenção de óleo de peixe e insumos para a fabricação de ração animal (como o óleo e a farinha de peixe) (FURLAN, 2015).

Nesse cenário, a FAO classifica o Brasil como um dos maiores produtores de pescados do mundo, com expectativa de produção de 20 milhões de toneladas, em 2030 (FAO, 2017). A atividade pesqueira gera um Produto Interno Bruto (PIB) em torno de R\$ 5 bilhões, empregando, direta e indiretamente, 3,5 milhões de pessoas,

usufruindo-se de 8,4 mil quilômetros de costa litorânea e 5,5 milhões de hectares de reservatórios de água doce (MPA, 2014).

Na expectativa de se alcançar o potencial produtivo de pescados previsto pela FAO, o Brasil tem fomentado o desenvolvimento de diversos mecanismos de caráter político e econômico como, por exemplo, a criação de pastas exclusivas para assuntos relativos à área de pesca e aquicultura (Secretaria Especial e Aquicultura e da Pesca, posteriormente, transformada em ministério, em 2009, e, agora, novamente retorna ao status de secretaria, com a reforma ministerial de 2019) e o Plano Safra da Pesca, onde mais de 4 bilhões de reais foram investidos em ações de assistência técnica especializada, acesso à crédito, formação de cooperativas, melhorias nas condições de armazenagem e comercialização de pescados etc. (PORTAL BRASIL, 2014).

Durante esse período, o Governo do Estado do Ceará, aproveitando-se dos mais de 150 reservatórios presentes no estado e da longa faixa costeira, também tomou medidas de desenvolvimento à atividade pesqueira, com a criação da Secretaria da Pesca e Aquicultura (SPA), em 2011, com atribuições que vão desde a fiscalização da atividade até a promoção de pesquisas científicas, desenvolvimento novas tecnologias, passando por atividades como cadastro de pescadores junto ao então Ministério da Pesca e Aquicultura (SDA, 2019).

A partir dessas ações, cidades ribeirinhas aos grandes reservatórios (em especial as do Castanhão) foram impactadas positivamente em suas atividades econômicas, com importante aumento de renda de parte da população, que antes se dedicava à atividade agropecuária. Neste cenário, considerando-se o regime hidrológico cearense, com baixa incidência de chuvas, alto índice de evaporação e solos com baixa capacidade de armazenamento de água em aquíferos (LACERDA *et al.*, 2018) e o importante impacto positivo da atividade pesqueira, os açudes públicos passaram a ser responsáveis não somente pela segurança hídrica do estado, como também um meio de emprego e renda da população sertaneja. Atualmente, o Governo do Estado do Ceará disponibiliza 1 % do espelho d'água dos reservatórios para a atividade da pesca (ADECE, 2018).

Considerando-se o potencial pesqueiro, as ações governamentais (a níveis estadual e federal) e infraestrutura desenvolvida, a Agência de Desenvolvimento do

Estado do Ceará (ADECE) criou um programa de fomento à atividade pesqueira que objetivava uma produção superior a 200 mil toneladas de pescados até o ano de 2020 (ADECE, 2013). Porém, a partir de 2012, iniciou-se um importante período de estiagem prolongada, em que diversos açudes secaram e outros ficaram com níveis abaixo de 10 %, inviabilizando-se a atividade pesqueira. Espera-se que, com a chegada das águas do Rio São Francisco, a atividade pesqueira seja aos poucos retomada.

Um fato a ser observado, é que a atividade da pesca nos açudes cearenses ainda acontece sem o devido tratamento ou mesmo sem o aproveitamento energético dos efluentes gerados. Souza et al (2014) observaram diversos pontos ao longo das margens do açude Castanhão, onde foram encontrados resíduos de processamento de pescado e animais que se alimentam dos resíduos, como porcos e até mesmo urubus. Conforme aqueles autores evidenciaram, é muito comum a prática do processamento do pescado nas margens ou mesmo na própria embarcação, utilizando-se da água do próprio açude.

Porém, essa prática vem cada vez mais sendo desencorajada por parte dos órgãos de controle, dado o alto grau poluidor dos resíduos de peixe. Como contrapartida, o governo vem fomentando a criação de associações de piscicultores e a construção de centrais de beneficiamento de pescados, onde os pescados são tratados desde a evisceração até o processo de filetagem, com o aproveitamento da pele da tilápia (para artesanato, especialmente) e de carcaças.

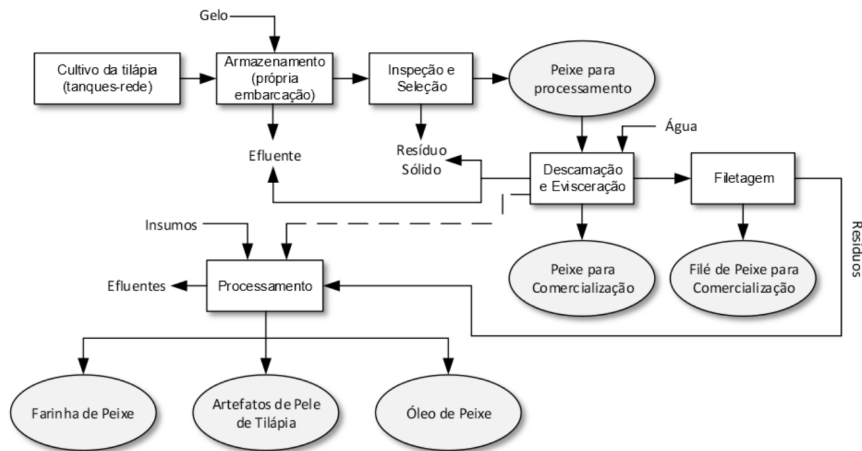
Vale salientar que os resíduos gerados em indústrias de beneficiamento de pescados contam com água de lavagem, vísceras, pedaços de peixes, escamas etc. resultando-se em um efluente altamente concentrado em matéria orgânica e nutrientes, sendo, muitas vezes, necessária a combinação de tecnologias de tratamento físico-químico e biológico para adequação aos padrões de lançamento exigidos em lei (NOWAK, 2018). O tratamento de resíduos com alta concentração de matéria orgânica, como os gerados na indústria de alimentos, tem recebido especial atenção dado o potencial de aproveitamento do biogás e a extração de moléculas de valor agregado, tornando-se a tecnologia viável econômica e ambientalmente viável.

## 2.4. Etapas do Processamento do Pescado ao longo dos Açudes Públicos do Estado do Ceará

A carne da tilápia do Nilo obtida ao longo dos açudes públicos do Estado do Ceará, classifica-se como sendo minimamente processada com etapas básicas de beneficiamento de pescados. Essas etapas de beneficiamento englobam, basicamente: a captura, armazenamento, seleção, evisceração e lavagem e, opcionalmente, a filetagem (FURLAN, 2015).

Conforme mostrado na Figura 2.2, o pescado cultivado em tanques rede é capturado e, na própria embarcação, acondicionado. O processo é realizado com a utilização de gelo, tanto para o abate como para o correto armazenamento até a chegada na central de processamento. Ao chegar à margem do açude, o pescado é transportado até o local do beneficiamento e um efluente com alta carga orgânica é obtido, oriundo da etapa de acondicionamento.

Figura 2. 2 Etapas do processamento da Tilápia do Nilo realizada ao longo dos açudes públicos do estado do Ceará.



Fonte: Autor (2020)

Após a etapa de captura e transporte, faz-se necessária uma etapa de inspeção e seleção. A tecnologia de criação em tanques-rede propicia um rápido crescimento e multiplicação de tilápia (FURLAN, 2015) e, por isso, tem ganhado disseminação entre os piscicultores. Por outro lado, a competição por alimento e o

estresse causado por baixa concentração de oxigênio na massa aquática levam à morte parte do pescado nos tanques-rede. Esse pescado, portanto, não possui boa qualidade para o consumo humano, conforme determina a Portaria 185 do MAPA, de 1997, e é separado dos demais peixes, antes do processo de evisceração e lavagem. Além dessa triagem inicial, faz-se necessária também inspeção quanto ao frescor, sinais de decomposição, hematomas, coloração, incisões ou rupturas das superfícies externas, aspecto dos olhos, escamas, pele, brânquias, mucos, opérculos, músculos, odor e sabor, conforme definido pela Portaria 185 do MAPA, de 1997. Notadamente, se o pescado não atender aos padrões de qualidade exigidos, este não será beneficiado, obtendo-se, então um resíduo sólido.

O processamento do pescado, então, inicia-se com a descamação e evisceração. Nesta etapa, a escama do peixe é retirada bem como as vísceras, com o auxílio de utensílios especiais e alto consumo de água, gerando-se um efluente líquido rico em sangue, gordura e sólidos. Salienta-se que as vísceras da tilápia correspondem a, aproximadamente, 10 % do peso total do animal e pode ser matéria-prima para a obtenção de óleo de peixe e de torta (matéria-prima para a produção de farinha de peixe) (FURLAN, 2015; SOUZA, 2014).

Após a descamação e a evisceração, o peixe encontra-se pronto para comercialização. Para aumentar o valor agregado deste produto, pode-se proceder a remoção da cabeça, rabo, pele e espinhas, obtendo-se apenas o filé do pescado (etapa de filetagem). Nesta etapa, é gerada uma considerável quantidade de efluente de lavagem e resíduos sólidos, como a pele e a carcaça. A pele pode ser utilizada para a fabricação de peças de artesanatos enquanto a carcaça é insumo para a fabricação de farinha de peixe.

Como subprodutos da cadeia produtiva, pode-se, então, elencar a torta (para a produção de farinha de peixe), a pele (para a fabricação de artesanatos) e o óleo de tilápia (insumo para a produção de ração para peixe), conforme observado por Wang (2019). Desses subprodutos, vale ser destacado o mercado mundial de farinha e óleo de peixe que teve um expressivo crescimento de 90 %, em 2018, em relação ao ano anterior, com o Peru (maior produtor) aumentando sua exportação em 72 %. Por outro lado, a China aparece como o maior consumidor de farinha e óleo de pescados dada sua forte indústria de aquacultura. Os preços no mercado internacional para estes dois produtos variam de ano para ano, devido a fatores climáticos, às leis ambientais da China ou mesmo a doenças relacionadas à pecuária (como por

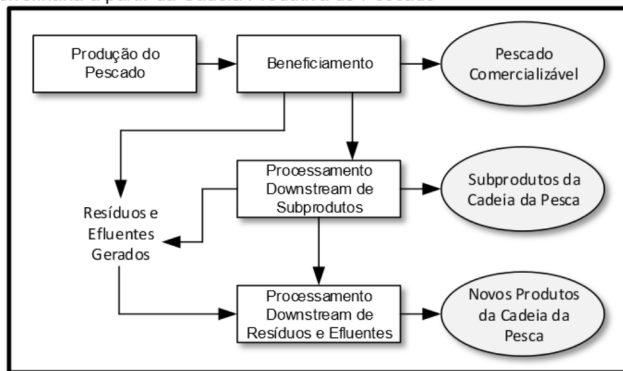


exemplo à febre suína africana, que foi a responsável por imensa mortandade de animais na China, em 2018) (GLOBEFISH, 2019).

Apesar de alternativas tecnológicas para o aproveitamento dos resíduos do processamento do pescado, Wang (2019) afirma que milhares de toneladas são dispostas no meio ambiente de forma irregular, em todo o mundo. Infelizmente, essa realidade ainda existe em boa parte da produção ao longo dos açudes públicos do Estado do Ceará, em especial, aquela executada por pequenos piscicultores (conforme visita *in loco*), apesar do trabalho governamental de conscientização realizado. Mesmo em centrais de processamento de pescados, os efluentes gerados na cadeia produtiva do pescado precisam de tratamento antes de sua disposição no meio ambiente, dada a sua alta carga poluidora, onde nem sempre dispõem de sistemas eficientes de tratamento.

Conforme a Figura 2.3, a ideia de uma biorrefinaria da indústria da pesca deve englobar todos os fluxos de massa e energia envolvidos na cadeia, com o envolvimento dos fluxos de resíduos e efluentes. Estes, agora, passam a englobar a rede de matéria-prima e obtenção de novos produtos de valor agregado, valorizando a cadeia e tornando-a ambientalmente sustentável (CARIOCA; BEZERRA, 2016).

Figura 2. 3 Biorrefinaria a partir da Cadeia Produtiva do Pescado



Fonte: Carioca; Bezerra (2016)

## 2.5. Biorrefinarias como plataforma para a mitigação dos impactos ambientais e valorização dos efluentes industriais e domésticos

O crescimento da população mundial bem como da demanda de energia, fortemente dependente de combustíveis fósseis e de matérias-primas oriundas do petróleo, aliados às incertezas quanto às reservas de petróleo e às mudanças climáticas, trazem um grande desafio tecnológico para a sociedade atual (NIZAMI *et al.* 2017). Qualquer nova tecnologia deve atender a questões econômicas e ambientais, no tocante ao gerenciamento de resíduos e emissões de gases poluentes. Reconhece-se que este não é um problema de simples solução e que qualquer tomada de decisão deve prever mudanças de comportamento da população e a introdução de novos combustíveis e insumos de fontes renováveis (KHOO, *et al.*, 2019).

Neste contexto, os efluentes, oriundos de diversas atividades humanas, passam a ser considerados recursos importantes em uma nova abordagem de processos: a Biorrefinaria. Existem diversas definições para biorrefinaria, sendo a mais difundida a da IEA Bioenergy Task 42: "Biorrefinar é processar, de forma sustentável, a biomassa em uma gama de produtos e energia, com valor de mercado agregado" (IEA, 2007). Dessa maneira, uma biorrefinaria é uma instalação industrial (ou uma rede de instalações industriais interligadas) que integra processos e equipamentos para conversão de biomassa, no sentido de produzir energia e produtos químicos de valor agregado (CHANDRA *et al.*, 2019). Este conceito é análogo à ideia de uma tradicional refinaria de petróleo, onde são produzidos combustíveis e diversos produtos químicos, a partir de diversas operações físico-químicas de refino do óleo fóssil (CHEW *et al.*, 2017).

Fundamentada no conceito de ecologia industrial, onde o efluente de uma atividade é matéria-prima para outra(s) instalação(ões) industrial(is), resíduos agrossilvipastoris, aquacultura, industriais, resíduos sólidos urbanos etc. entram em uma rede de processamento físico-químico para a obtenção de diversos produtos de valor de mercado (CHERUBINI *et al.*, 2010; MOHAN *et al.*, 2019).

A Figura 2.4 mostra um panorama geral das principais matérias-primas para uma biorrefinaria com seus respectivos produtos que podem ser obtidos. Como constituintes das diversas atividades humanas, pode-se citar proteínas, carboidratos (amido, celulose, hemicelulose) e lignina, triglicerídeos (glicerina, ácidos graxos saturados e insaturados) e resíduos orgânicos em geral (fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, resíduos da operação de estações de tratamento de água e esgotos, resíduos da indústria de alimentos, efluentes domésticos, etc) (NIZAMI *et al.*, 2017).

Esses resíduos, constituídos de macromoléculas orgânicas, podem ser submetidos a diversos tratamentos térmicos, físicos, químicos ou biológicos para sua despolimerização e desoxigenação. Dentre esses processos, podemos citar os: Termoquímicos; Bioquímicos; Mecânicos e Físicos e os Químicos (NARRON *et al.*, 2016).

Os processos termoquímicos mais importantes são a gaseificação e a pirólise. No processo de gaseificação, a biomassa é submetida a temperaturas superiores a 700 °C, em um ambiente com baixos níveis de oxigênio. Essas condições de operação convertem as macromoléculas orgânicas em uma mistura de gases, constituída por H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, conhecida como gás de síntese (Syngas), podendo ser utilizada diretamente como combustível ou ser matéria-prima para a obtenção de diversos compostos químicos de valor comercial, por meio da síntese de Fisher-Tropisch (ROMANÍ *et al.*, 2016).

Quanto à pirólise, este é um processo em que a biomassa é submetida a temperaturas entre 300 °C e 600 °C, em ambiente com total ausência de oxigênio. Nesse processo podem ser obtidos óleo pirolítico, carvão e uma mistura de gases leves similar ao gás de síntese (ALZATE *et al.*, 2018).

O terceiro processo termoquímico que poderia ser citado é a combustão direta da biomassa, porém, Cherubini (2010) afirma que este processo não se enquadra na definição de biorrefinaria.

Os processos bioquímicos envolvem a bioconversão de macromoléculas em compostos químicos como ácidos orgânicos, álcoois (butanol, etanol etc.), hidrogênio e diversos compostos como butirato, caproato, polihidroxialcanoatos, polihidroxivalerato etc., por meio da fermentação anaeróbia (sem metanogênese), e biogás, por meio da digestão anaeróbia (DIETRICH *et al.*, 2019). Um outro processo bioquímico que vem obtendo destaque mundial é a utilização de microalgas para o tratamento de efluentes líquidos, obtendo-se massa algal, matéria-prima para diversas aplicações, notadamente, a produção de biodiesel, e água de reúso para agricultura (KHOO *et al.*, 2019).

Os processos mecânicos e físicos, diferentemente da gaseificação, pirólise, fermentação e digestão anaeróbia, não têm como objetivo a transformação química das macromoléculas da biomassa. Tais processos visam tão somente a separação (extração) de moléculas (ou de fases de interesse) ou então a diminuição do tamanho das partículas, condicionando a biomassa para outros processos (WANG *et al.*, 2019).

Por outro lado, diversas rotas químicas podem compor o processo de biorrefino de uma determinada biomassa. Dentre esses processos pode-se citar a hidrólise química (ácida ou básica) e a enzimática, a transesterificação (com a produção de ésteres de ácidos graxos e glicerol, a partir de óleo vegetal ou animal), a reforma a vapor, a metanização, a síntese de Fisher-Tropisch etc (SAWATDEENARUNATA et al, 2018).

Vale ser ressaltado que na biorrefinaria proposta por Carioca et al (2016), diversos processos mecânicos, físicos e bioquímicos são utilizados para que se possa obter a máxima de produtos possíveis. Na oportunidade, os autores utilizaram desde o pré-tratamento de vísceras de tilápia do Nilo com trituradores industriais, cocção, para a separação de óleo, reatores do tipo manta de lodo e fluxo ascendente e fotobiorreatores para a depuração do efluente produzido na biorrefinaria. Os produtos obtidos por aquela metodologia proposta foram: água de reúso, microalgas, biogás e óleo de tilápia.

Na literatura científica, não existe um padrão de classificação para as biorrefinarias emergentes. Na maior parte dos casos, essa classificação é feita com base nos produtos e coprodutos que se pretendem obter e nos tipos de matérias-primas a serem biorrefinadas, sendo estas quem determina o tipo de tecnologia a ser empregada (CARDONA et al., 2016).

O Quadro 2.2 mostra a classificação das biorrefinarias sob o ponto de vista dos tipos de matérias-primas processadas.

Quadro 2. 2 Classificação das biorrefinarias segundo os tipos de matérias-primas processadas

Tipos de Biorrefinarias	Características	Produtos
Biorrefinaria da Agropecuária	Utiliza todos os resíduos gerados nas atividades agropecuárias	Metano, hidrogênio, biocombustíveis, energia, produtos químicos e insumos
Biorrefinaria do Cereal	Utiliza culturas com base no amido, açúcar e grãos	Bioetanol
Biorrefinaria de Oleaginosas	Utiliza culturas com base em sementes oleaginosas	Óleos vegetais, biodiesel
Biorrefinaria Verde	Utiliza forragem e plantas verdes	Bioetanol
Biorrefinaria de Lignocelulose	Utiliza resíduos da agricultura	Bioetanol (Lignocelulósico)
Biorrefinaria de Florestas	Utiliza resíduos florestais: cascas, serragem, fibras e etc	Combustíveis, energia e produtos químicos e insumos
Biorrefinaria de Efluentes Industriais ou Municipais	Utiliza todos os tipos de resíduos gerados nas indústrias e nas cidades (efluentes domésticos e resíduos sólidos)	Metano, hidrogênio, biocombustíveis, energia, produtos químicos e insumos

Fonte: Nizami et al. (2017)

De acordo com o Quadro 2.2, diversas matérias-primas podem ser processadas segundo o conceito de biorrefinaria, desde materiais ricos em celulose e lignocelulose, amido, ácidos graxos até efluentes industriais e municipais, como os resíduos sólidos urbanos e esgotos domésticos. Nesse contexto, as biorrefinarias podem ser classificadas sob uma nova perspectiva: Primeira, Segunda, Terceira e Quarta Gerações.

Biorrefinarias que processam matérias-primas oriundas diretamente da agricultura como, por exemplo, soja, girassol, cana de açúcar e mandioca são classificados como de Primeira Geração. A utilização dessas matérias-primas para o processo de biorrefino é bastante questionável sob o ponto de vista econômico-social e ambiental, uma vez que terras aráveis são direcionadas para a produção de energia e produtos químicos e não para a produção de alimentos. O uso de tais matérias-primas poderia elevar o preço mundial dos alimentos ou a pressão sobre o uso do solo em todo o mundo, contribuindo, assim, para uma aplicação não sustentável desta tecnologia (BICHOT *et al.*, 2018).

Por outro lado, a utilização de resíduos agropecuários, florestais, industriais e municipais pode contornar o dilema *alimento x energia*, uma vez que a obtenção desta matéria-prima não compete por terras aráveis. Entretanto, vale salientar, que pode haver conflito entre a produção de alimento animal e energia em algumas regiões. Biorrefinarias que processam estes tipos de resíduos são classificadas como de segunda geração (HERNANDEZ e SAMSATLI, 2017).

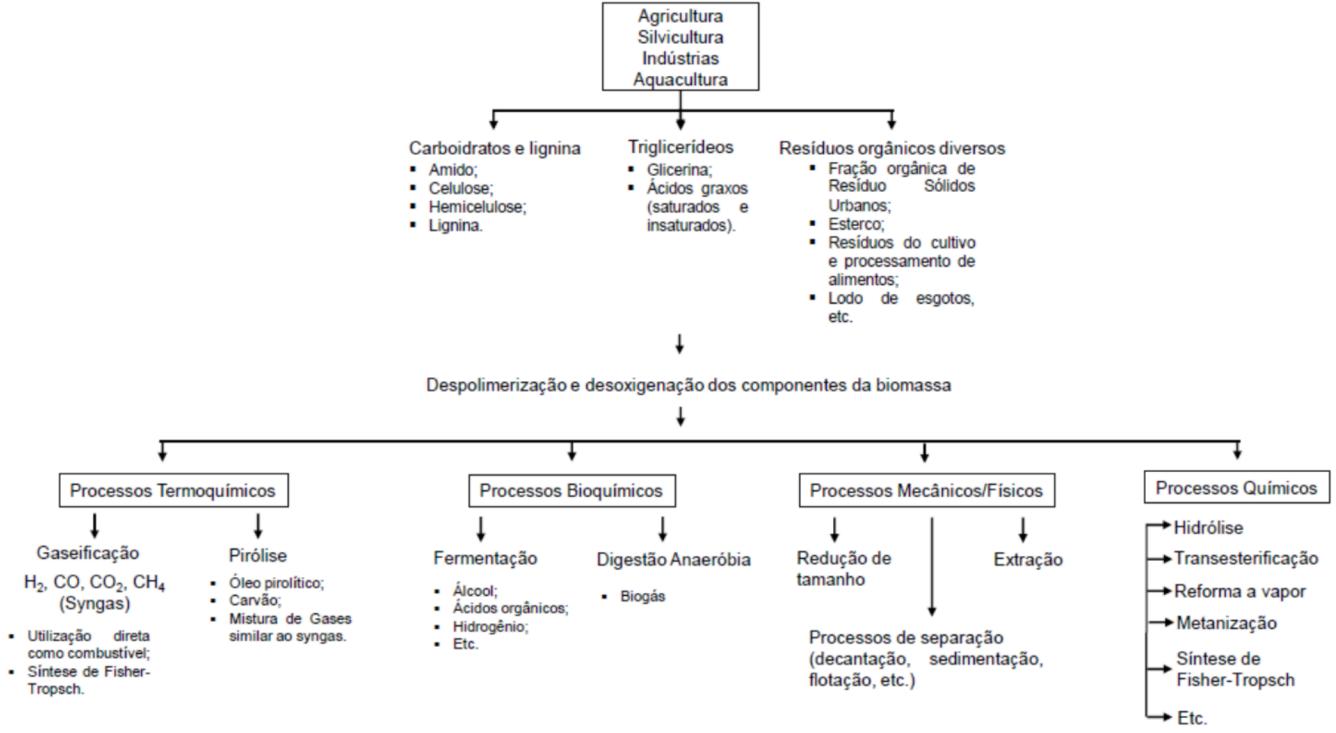
As Biorrefinarias de Terceira Geração objetivam utilizar microalgas em instalações industriais para converter energia renovável e CO<sub>2</sub> atmosférico em combustíveis e produtos químicos. Tais microrganismos vêm recebendo especial atenção nos últimos anos dada sua capacidade de produzir diversos produtos de alto valor agregado, como carotenoides, ácidos graxos polinsaturados, óleo, para a produção de biodiesel, ração animal, pelo potencial de captura de CO<sub>2</sub> e, mais recentemente, pelos promissores resultados na área de tratamento de efluentes (RÍO *et al.*, 2019).

Por fim, biorrefinarias que processam CO<sub>2</sub>, *jatropha* e *karanjaare* são conhecidas como de quarta geração, sendo que biorrefinarias que processam as duas últimas são ainda classificadas como de terceira geração por Nizami et al (2017).

A literatura sugere uma classificação similar para os produtos combustíveis que podem ser obtidos por meio das tecnologias de biorrefino. Biocombustíveis que

foram produzidos a partir de matérias-primas que competem diretamente com a produção de alimento humano ou animal são classificados como de primeira geração. Os exemplos mais conhecidos são o etanol da cana-de-açúcar, o biodiesel de óleo de soja e o biogás de amido de milho. Por outro lado, combustíveis produzidos a partir de culturas não comestíveis e resíduos agrícolas ou industriais são classificados como de segunda geração. Como exemplos, pode-se citar os biocombustíveis produzidos a partir de materiais lignocelulósicos, resíduos agrícolas, florestais e efluentes industriais e municipais. Já os combustíveis de terceira geração são aqueles obtidos a partir de microalgas como, por exemplo, biodiesel e hidrogênio. (e os combustíveis de quarta geração) (CHERUBINI *et al.*, 2010).

Figura 2. 4 Matérias-primas e processos em biorrefinarias.



Fonte: Compilado de Cherubini (2010)

Dada a gama de possibilidades de resíduos que podem passar pelo processo de biorrefino, uma mesma instalação industrial pode processar tanto matérias-primas de primeira como de segunda geração, podendo-se obter, portanto, um leque de produtos e coprodutos que viabilizam economicamente os investimentos na tecnologia.

Por outro lado, a complexidade da biorrefinaria aumenta com a presença de várias tecnologias para o processamento da biomassa. Nesse aspecto, ainda não existe um método universal completamente provado para avaliação de uma biorrefinaria (CHANDRA *et al.*, 2018).

Nesse contexto, a viabilidade ou não da utilização de uma determinada matéria-prima para biorrefino dependerá de muitos fatores onde podemos citar: a disponibilidade tecnológica e de mão de obra local, questões logísticas e da avaliação do ciclo de vida dos produtos obtidos na biorrefinaria. A metodologia mais utilizada é semelhante à aplicada para refinarias de petróleo. (NIZAMI *et al.*, 2017). Um Índice de Complexidade da Biorrefinaria (ICB) foi desenvolvido pela IEA Bioenergy Task 42 e baseia-se nas quatro características principais de uma biorrefinaria: a plataforma, os produtos, as matérias-primas e os processos (IEA, 2008).

## **2.6. Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos**

Desde a Revolução Industrial, ocorrida a partir do século XVIII, aliado ao aumento da população mundial, o meio ambiente vem sendo pressionado em seus recursos de forma mais incisiva. Dessa maneira, o planeta tem enfrentado uma diminuição gradual da qualidade de seus ecossistemas e o aumento do risco de ser degradado de forma difícil (ou mesmo irreversível) de se recuperar (BROMAN e ROBERT, 2017).

O conceito, então, de desenvolvimento sustentável, que surgiu em 1982 na Carta Mundial da Natureza, visa a conciliação entre o desenvolvimento econômico de longo prazo e a proteção eficiente dos recursos ambientais, de forma a não comprometer as gerações futuras (HÁK *et al.*, 2016).

Neste contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de um determinado produto ou serviço surgiu como uma ferramenta para a tomada de decisões no



desenvolvimento e seleção de tecnologias para determinada aplicação. Sob o ponto de vista da sustentabilidade ambiental, ACV tornou-se uma ferramenta de gestão ambiental particularmente importante no desenvolvimento tecnológico uma vez que permite avaliar os impactos de um determinado produto (ou serviço) desde o seu nascimento (berço) até sua morte (túmulo), passando por estágios de extração de matérias-primas, design de produto, fabricação e montagem, utilização e destino final de resíduos.

### **2.6.1. Etapas de um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida**

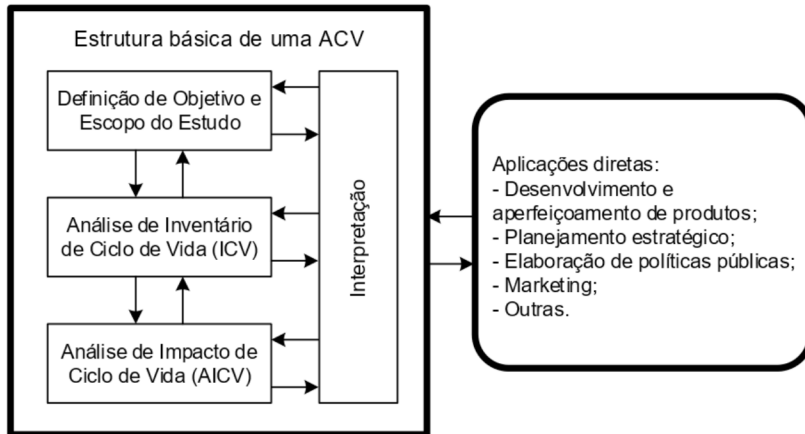
As normas ISO 14040 e 14044 determinam que um estudo de ACV deve contemplar quatro etapas bem definidas, a saber: Definição do Objetivo e do Escopo do estudo; Análise de Inventário de Ciclo de Vida; Avaliação de Impacto Ambiental e Interpretação de Resultados. A Figura 2.5 ilustra a interrelação entre as quatro etapas de qualquer estudo de ciclo de vida de um determinado produto ou serviço.

#### *2.6.1.1. Definição do Objetivo e do Escopo do estudo*

A primeira etapa de uma ACV consiste em definir o objetivo e o escopo do trabalho. Pode parecer uma etapa trivial e, aparentemente, desnecessária, porém, os resultados fornecidos pela ACV são fortemente dependentes das considerações feitas durante esta etapa do estudo. É durante esta etapa que são estabelecidos aspectos como, por exemplo, a aplicação pretendida do estudo, as razões que motivam sua realização, o público a quem se destina comunicar os resultados e se os resultados serão utilizados em comparações entre produtos ou serviços. Ressalta-se que os objetivos de uma ACV devem ser bem claros e não devem conter ambiguidades.

Na definição do escopo do estudo, informações adicionais são acrescentadas ao documento da ACV, no sentido de se eliminar dúvidas quanto ao nível de detalhamento do estudo. Dentre as principais informações pode-se citar:

Figura 2. 5 Principais etapas de uma ACV e correlações entre si.



Fonte: ISO 14044 (2009)

#### a) O sistema de produto

Conjunto de sistemas elementares (operações unitárias e processos químicos) que interagem dinamicamente para que se possa atingir uma determinada função;

#### b) A função do sistema

Definição de quais produtos e subprodutos podem ser obtidos a partir do sistema de produto e das características de desempenho oferecido. Pode ser um bem ou mesmo um serviço;

#### c) A unidade funcional e fluxo de referência

A unidade funcional oferece uma referência a quais dados de entrada e saída estão normalizados (no sentido matemático) enquanto o fluxo de referência. Por outro lado, o fluxo de referência é a quantidade de bens ou serviços que devem ser adquiridos para preencher a função do sistema e gerar a unidade funcional;

#### d) As fronteiras do sistema

Determinam que conjuntos de processos elementares estão inclusos ou excluídos na modelagem do sistema em uma ACV. A definição das fronteiras do sistema delimita o tipo de modelagem a ser realizado, a saber:

- **cradle to cradle (berço ao berço)** – avalia todas as fases do ciclo de vida de um determinado produto, desde a extração das matérias-primas, fabricação, utilização e retorno ao ciclo produtivo.
- **cradle to grave (berço ao túmulo)** – avalia as fases do ciclo de vida de um determinado produto desde a extração das matérias-primas, fabricação, utilização e descarte final de resíduos (fim de vida).
- **cradle to gate (berço ao portão)** – nesta modelagem, são considerados os impactos ambientais relativos à extração de matérias-primas e a fabricação de um determinado produto, não sendo avaliados, portanto, as etapas de utilização e descarte final de resíduos (fim de vida).
- **gate to gate (portão ao portão)** – neste tipo de modelagem, são avaliados apenas os impactos ambientais dos processos que ocorrem dentro da fábrica. Assim, não são avaliados processos de extração de matérias-primas, utilização do produto e descarte final de resíduos (fim de vida)

A ISO 14040 sugere os seguintes estágios do ciclo de vida que devem ser considerados em estudos de ACV: extração e refino de matérias-primas e energia; infraestrutura, maquinário, insumos e transportes; principais processos de manufatura; estágio de utilização (incluindo manutenção) e tratamento de resíduos (incluindo reuso, reciclo e recuperação de energia).

#### e) Os procedimentos de alocação

Um dado sistema pode fornecer um ou dois produtos secundários, além do produto principal, que não correspondem à função do sistema previamente adotada. Os procedimentos de alocação visam, então, distribuir a extração de recursos, consumo de energia e emissões entre o produto principal e os coprodutos fornecidos pelo sistema de produto.

De acordo com a ISO 14044, recomenda-se que os procedimentos de alocação devem ser evitados, sempre que possível, seja pela subdivisão das unidades

de processos seja pela expansão das fronteiras do sistema para incluir também as contribuições aos impactos ambientais dos subprodutos. Em situações em que não há como evitar a alocação, esta deve ser realizada conforme uma relação física entre fluxos de produtos e subprodutos, como por exemplo, massa e energia. Não havendo possibilidade de se estabelecer uma relação física, ainda é possível se utilizar valores econômicos (alocação econômica) para a distribuição dos impactos ambientais entre os fluxos de produtos e coprodutos.

**f) A(s) metodologia(s) de avaliação de impacto de ciclo de vida e as categorias de impactos ambientais**

Nesta fase da definição do escopo, são definidas as categorias e as metodologias de avaliação de impactos ambientais. As categorias podem ser de ponto médio (*midpoint*) como, por exemplo, aquecimento global, depleção hídrica, toxicidade, formação de matéria particulada etc. ou de ponto fina (*endpoint*) como, por exemplo, saúde humana, depleção de recursos naturais, qualidade de ecossistemas etc. Por outro lado, as metodologias de avaliação de impactos ambientais são as ferramentas a serem utilizadas para fazer o elo entre os dados do inventário e as categorias de impactos ambientais a serem estudadas como, por exemplo: ReCiPe, USET<sub>OX</sub>, TRACI, IMPACT 2002+, Water Scarcity etc.

A escolha de quais categorias e das metodologias de impactos ambientais que deverão ou não ser abordadas na ACV devem ser muito bem justificadas, geralmente, levando-se em consideração peculiaridades locais ou regionais e disponibilidade de banco de dados.

**g) Os requisitos de dados**

Os dados a serem computados para um estudo de ACV podem ser obtidos diretamente de uma instalação industrial, de trabalhos em escala piloto ou em laboratório. Podem ser um *mix* de valores levantados *in loco*, calculados (balanço de massa e energia, por exemplo) ou estimados.

De acordo com a ISO 14044 (2009) convém que os requisitos de qualidade de dados abranjam: as coberturas temporal (idade dos dados obtidos), geográfica (local de onde os dados foram obtidos) e tecnológica (conjunto de tecnologias ou tecnologias específicas); a precisão (medida da variabilidade estatística dos dados); completeza (porcentagem dos fluxos que é medida ou estimada); a

representatividade; consistência e reprodutibilidade; as fontes de dados e a incerteza das informações.

#### **h) As premissas e as limitações do estudo**

Nesta etapa da definição do escopo, todas premissas (considerações) e limitações, com relação a valores obtidos, tecnologias adotadas, cenários avaliados e abrangência dos dados são apresentados, no sentido de tornar transparente o estudo de ACV.

#### **i) Tipos de revisão e de formato de relatórios**

A revisão crítica visa verificar os métodos utilizados no estudo de ACV: são compatíveis com as normas ISO 14040 e 14044; se são científica tecnicamente válidas; se os dados utilizados são apropriados e razoáveis em relação ao objetivo do estudo; se as interpretações refletem as limitações identificadas e o objetivo do estudo e se o relatório do estudo é transparente e consistente. A revisão crítica pode ser por especialista interno ou externo ao grupo de trabalho de ACV.

O formato de relatório deve apresentar transparência precisão e imparcialidade. Todos os resultados, dados, métodos, pressupostos e limitações devem ser apresentados de forma clara e com nível de detalhamento para que as partes interessadas possam compreender a complexidade e compromissos inerentes à ACV.

#### *2.6.1.2. Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)*

A segunda etapa de uma ACV engloba contabilizar todos os fluxos de materiais e emissões (para água, solo e ar) que atravessam as fronteiras do sistema em estudo.

Neste contexto, duas metodologias de Análise de Inventário de Ciclo de Vida particularmente se destacam em estudos de ACV: a abordagem baseada em processos e a abordagem baseada em entradas e saídas (input – output). A primeira abordagem baseia-se no balanço de massa e energia realizado para que os fluxos de referência de cada unidade de processo sejam combinados com as emissões inventariadas. A segunda abordagem não se baseia em relações físicas, mas em uma

relação econômica (valores monetários) entre fluxos de referência e emissões. Os custos de cada setor econômico são, então, relacionados ao consumo de energia, extração de matérias-primas e emissões de poluentes por unidade monetária.

Nesta fase, considerável esforço pode ser necessário no levantamento e checagem de consistência dos dados coletados, fazendo-se necessária revisão periódica de dados pela equipe de trabalho. Geralmente, milhares de substâncias e emissões são catalogadas e a utilização de banco de dados internacionais (como o *Ecoinvent*) e de software (como o Simapro, Gabi e OpenLCA) para cálculos de balanço de massa são inevitáveis.

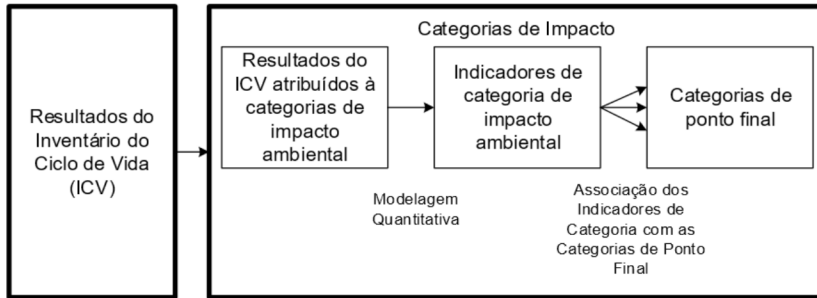
Vale ressaltar que os bancos de dados, como uma forma de simplificação, realizam a agregação dos dados, considerando-se que os efeitos das emissões para a água, solo e ar de uma determinada substância não variam no tempo e nem no espaço, o que pode elevar incertezas no estudo, principalmente quando não se tem banco de dados regionalizados.

#### 2.6.1.3. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)

O inventário de ciclo de vida fornece valores de emissões para o ar, solo e água e extração de recursos a partir da natureza, porém, sua análise isoladamente pode dificultar a interpretação dos impactos ambientais envolvidos.

A etapa de AICV, então, possui a missão de relacionar cada grupo de substâncias do inventário aos seus respectivos potenciais de danos ambientais, por meio de critérios muito bem definidos, de forma mais precisa possível. Para tanto, três etapas são fundamentais para a execução de uma AICV: a classificação das emissões em diferentes categorias de impactos ambientais, a caracterização dos impactos de ponto médio e a caracterização dos impactos de ponto final (também chamados de categorias de danos). A Figura 2.6 ilustra, de forma resumida, as três etapas de execução da AICV discutida.

Figura 2. 6 Relação entre Inventário de Ciclo de Vida e categorias de impactos ambientais



Fonte: Jolliet *et al.* (2004)

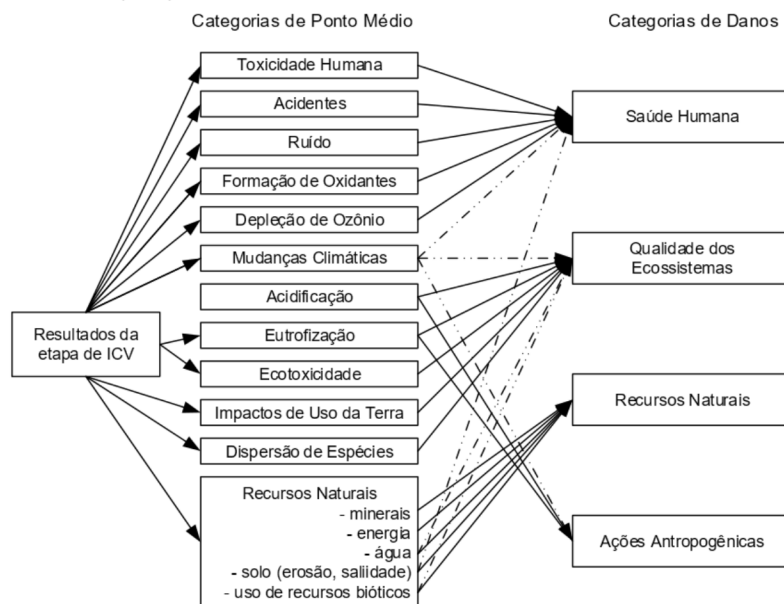
A classificação das emissões e extração de recursos visa agrupar todas as substâncias do inventário segundo critério comum de impactos ambientais. Assim, substâncias como, por exemplo, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O contribuem para o aquecimento global, enquanto nitrogênio e fósforo contribuem para eutrofização de corpos aquáticos. Vale salientar que uma mesma substância pode contribuir para diferentes categorias de impactos ambientais, como, por exemplo, SO<sub>2</sub>, que pode contribuir tanto para a formação de material particulado fino como para a acidificação terrestre, ou mesmo o metano que pode contribuir também para a formação de oxidantes fotoquímicos.

Classificadas as substâncias do inventário por categorias de impacto ambientais, segue-se a etapa de caracterização de ponto médio. Toma-se um indicador de categoria e o fator de caracterização para cada categoria de impacto ambiental. Aquecimento global, por exemplo, possui a força radiante como indicador de categoria de ponto médio e kg CO<sub>2eq</sub> como fator de caracterização. Assim, todas as substâncias com potencial para aquecimento global são relacionadas com o CO<sub>2</sub>, tomado como parâmetro base, nesta categoria de impacto ambiental. O termo "ponto médio" (*midpoint*) expressa o fato de que determinada categoria de impacto ambiental está situada entre o inventário de ciclo de vida e a categoria de dano (também chamado de categoria de "ponto final" – *endpoint*).

A Figura 2.7 ilustra diversas relações entre o ICV, as categorias de ponto médio e as categorias de ponto final propostas por Jolliet *et al.* (2004). Na matriz proposta, as diversas emissões ou extração de recursos são associadas a diversas

categorias de impactos ambientais de ponto médio, a saber: toxicidade humana, acidentes, ruído, formação de oxidantes, depleção de ozônio, mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade, impactos do uso da terra, dispersão de espécies e recursos naturais (minerais, energia, água, solo e uso de recursos bióticos).

Figura 2.7 Relação entre categorias de Ponto Médio e categorias de Danos proposta por Jolliet *et al.* (2004).



Fonte: Adaptado de Jolliet *et al.* (2004)

Como última etapa da execução de uma AICV, as categorias de impactos ambientais são então agrupadas em grandes áreas de proteção ambientais, chamadas de categorias de ponto final (*endpoint*), também chamada de categoria de danos. Dentre essas categorias, Jolliet *et al.* (2004) sugeriram: saúde humana, qualidade dos ecossistemas, recursos naturais e ações antropogênicas.

Assim como uma determinada substância pode contribuir para mais de uma categoria de impactos ambientais, uma categoria de ponto médio pode contribuir para



mais de uma categoria de ponto final e o fator de caracterização é chamado de fator de ponto médio para dano, dado em DALY/kg, ou seja, anos de vida de incapacidade / kg da substância emitida.

Dessa maneira, os danos à saúde humana são dados pela soma dos danos causados por toxicidade humana, acidentes, ruídos, formação de oxidantes, depleção da camada de ozônio, mudanças climáticas e a depleção de recursos naturais, notadamente, água e solo.

Diversas metodologias para avaliação de impactos ambientais encontram-se disponíveis para desenvolvedores de estudos de ACV. Dentre as principais ferramentas desenvolvidas podem ser citadas: ADP e AADP; CML 2001; EDIP 2003; *Impact 2002+*; Environmental Footprint; ReCiPe; TRACI; *Ecological Scarcity*; USETox; Eco-Indicator 99.

*Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential (AADP)* é um método de AICV complementar ao tradicional *Abiotic Depletion Potential (ADP)* desenvolvido pela *Technical University of Berlin*. Neste método são considerados, para efeitos de modelagem, recursos estocados na esfera tecnológica (antropogênica) como, por exemplo, em aterros sanitários bem como as emissões para o meio ambiente (água e metais) (SCHNEIDER *et al.*, 2011).

O método CML 2001 foi desenvolvido pelo *Institute of Environmental Sciences*, da Universidade de Leiden (Holanda) por Guinée *et al.* (2002), com fatores de caracterização para mais de 1700 substâncias e diversas categorias de impactos ambientais de ponto médio (mudanças climáticas, ecotoxicidade etc.). Este método não está mais sendo desenvolvido, uma vez que foi incorporado ao método ReCiPe.

O método EDIP 2003 (*Environmental Development of Industrial Products*) foi desenvolvido pelo Institute for Product Development, da Universidade da Dinamarca e é uma evolução do EDIP 1997. Nesta metodologia de avaliação de impacto ambiental, podem ser avaliadas categorias de impactos ambientais não globais como, por exemplo, acidificação, formação de ozônio fotoquímico, ecotoxicidade e toxicidade humana, enriquecimento com nutrientes, e ruído. Este método não mais se encontra em desenvolvimento.

Desenvolvido originalmente pelo *Swiss Federal Institute of Technology Lausanne* (EPFL), Suíça, o método *Impact 2002+* combina 14 categorias de impactos ambientais de ponto médio com 4 categorias de impactos de ponto final (categorias de danos). Dentre as categorias de impactos ambientais de ponto médio estão presentes: toxicidade humana, efeitos respiratórios (causados por inorgânicos), radiação ionizante, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, ecotoxicidade aquática e terrestre, acidificação aquática e terrestre, eutrofização, ocupação de terras, água para operação de turbinas, aquecimento global, energia não renovável, extração mineral, consumo de água e retirada de água (que considera água doce ou marinha, potável, para irrigação e para processos industriais, exceto para operação de turbinas). Como categorias de danos: saúde humana, qualidade de ecossistemas, transformação de unidades, mudanças climáticas e recursos (HUMBERT *et al.*, 2012).

O *Environmental Footprint* (EF) é uma iniciativa da *European Commission's Joint Research Centre* para se estabelecer uma metodologia comum de quantificação da performance ambiental de qualquer produto ou serviço por meio de seu ciclo de vida. Os métodos finais, chamados Pegada Ambiental do Produto e Pegada Ambiental da Organização, foram publicados como um anexo à Recomendação da Comissão sobre o uso de métodos comuns para medir e comunicar o desempenho ambiental do ciclo de vida de produtos e organizações.

O método ReCiPe engloba 18 categorias de impactos ambientais de ponto médio e 3 de ponto final, sendo que para cada uma dessas categorias são apresentados 3 fatores, de acordo com o horizonte de tempo e a perspectiva tecnológica futura na diminuição dos impactos ambientais. Esses fatores são:

- Individualista – horizonte de tempo de curto prazo, perspectiva de que a tecnologia poderá evitar muitos problemas no futuro;
- Hierárquica – modelo de consenso encontrado em trabalhos científicos (modelo padrão);
- Iguatário – Horizonte de tempo de longo prazo, baseado no princípio da precaução.

Modelo desenvolvido pelo *National Institute for Public Health and the Environment*, Holanda, *Radboud University Nijmegen*, *Norwegian University of*

*Science and Technology*, e *PRé – Consultants*, o ReCiPe é uma evolução dos métodos CML 2000 e *Eco-Indicator 99*, engloba metodologias de avaliação de impactos ambientais com escopo global e não inclui potenciais impactos ambientais de futuras extrações de recursos naturais como métodos como: *Eco-Indicator 99*, *EPS Method*, *LIME*, e *Impact 2002+*.

A metodologia TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*) foi desenvolvida pela *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA) e engloba categorias de ponto médio em sua estrutura, como, por exemplo, acidificação, formação de smog, eutrofização, saúde humana (câncer) e saúde humana (não-câncer), ecotoxicidade, mudanças climáticas e depleção da camada de ozônio, todos com critérios contextualizados para a realidade americana (EPA, 2012).

*Ecological Scarcity* é um método de AICV desenvolvido com base no princípio "*distance-to-target*", ou seja, se o valor de uma determinada emissão de uma substância está próximo ou excede os limites aceitáveis no meio ambiente, então esse composto possui maior score de impacto ambiental (FRISCHKNECHT *et al.*, 2013).

USETox é um modelo desenvolvido no âmbito do *United Nations Environment Program* (UNEP) pela *Society for Environmental Toxicology and Chemistry Life Cycle Initiative* (SETAC) para a caracterização dos impactos do ciclo de vida nas áreas de toxicologia humana e ecotoxicologia, com a missão de otimizar o gerenciamento de produtos químicos no meio ambiente. Neste modelo são consideradas 4 escalas espaciais: interior, urbano, continental e global. As escalas interior e urbano avaliam a qualidade do ar enquanto as escalas continental e global avaliam o ar, solos aráveis, solos naturais, água doce e água do mar. O USETox considera os fatores de caracterização para toxicidade humana e de água doce via rota ambiental de determinado poluente, onde a distribuição ou degradação de cada substância é modelada; através da exposição de seres vivos a cada substância e por meio dos efeitos, onde o dano inerente de cada substância é pesquisado (FANTKE *et al.*, 2018).

A metodologia *Eco-Indicator 99* surgiu de esforços do *Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment* (VROM) e da *Pré-Consultants* como parte da *Integrated Product Policy*, na Holanda. Nesta metodologia, são avaliadas 3

categorias de impactos ambientais de ponto final (categorias de danos), a saber: a saúde humana, qualidade de ecossistemas e extração de recursos. Os danos à saúde humana são modelados a partir dos efeitos das mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio e radiação ionizante. Já para a qualidade dos ecossistemas é avaliada a partir da ecotoxicidade, acidificação e eutrofização e uso e transformação da terra. Finalmente, a extração de recursos naturais está relacionada à qualidade dos recursos minerais e fósseis existentes, sendo que a extração desses recursos resultará em maior demanda de energia no futuro, para sua extração (GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001).

#### *2.6.1.4. Fase de Interpretação do Ciclo de Vida*

A etapa de interpretação visa identificar os estágios do ciclo de vida do produto que devem sofrer intervenção para se reduzir os impactos ambientais como um todo. Assim, esta fase permite a identificação dos hotspots, a explanação das limitações do estudo, as incertezas associadas e as recomendações. Nesta fase são apresentadas e comparadas as contribuições de cada etapa do ciclo de vida do produto, desde a extração e beneficiamento de matérias-primas, manufatura, uso de energia, transportes, uso e disposição final de resíduos.

Apesar de receber maior atenção após a execução das etapas anteriores (definição do objetivo e escopo, análise do inventário de ciclo de vida e análise do impacto de ciclo de vida), esta etapa deve ser realizada de forma sistêmica ao longo de toda a execução do estudo de ACV.

Ainda na etapa de execução de um AICV, a ISO 14040 cita três etapas que são opcionais, a saber: a normalização, o agrupamento e a ponderação. A normalização expressa um dado impacto por unidade funcional em relação ao impacto total em cada categoria de impacto para melhor entender a magnitude do dano. No agrupamento, as categorias podem ser agrupadas de acordo com grandes áreas de proteção do meio ambiente, por escala espacial (global, regional ou local) ou por hierarquia pré-definida (alta, média e baixa prioridade) de acordo com a importância dada pela sociedade ou pela equipe de trabalho. Por fim, a ponderação é aplicada quando se intenta obter pontuação única para cada cenário de processo, baseado em

valores sociais relativos, para discriminar que processos impactam mais ou menos de forma global (HUIJBREGTS, *et al.* 2017).

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Concepção da Biorrefinaria de Terceira Geração a partir de Visceras de Tilápia do Nilo**

A Biorrefinaria de Terceira Geração (BTG) proposta neste trabalho baseia-se no conceito de ecologia industrial ao interligar as saídas de uma unidade como entradas de outra unidade. Dessa forma, esta biorrefinaria propõe gerar um sistema com emissão zero de rejeitos ao meio ambiente.

A concepção desta BTG deu-se a partir de diversos trabalhos em escala de bancada, a saber: os trabalhos de Souza (2014), que desenvolveu uma metodologia simplificada, e, aqui neste trabalho otimizada, para o tratamento de vísceras de tilápia do Nilo para a produção de bioenergia (metano e biodiesel), Almeida (2016), que trabalhou com a remoção de nutrientes de efluente de reator UASB tratando rejeitos da piscicultura e nos trabalhos de Carioca *et al.* (2016).

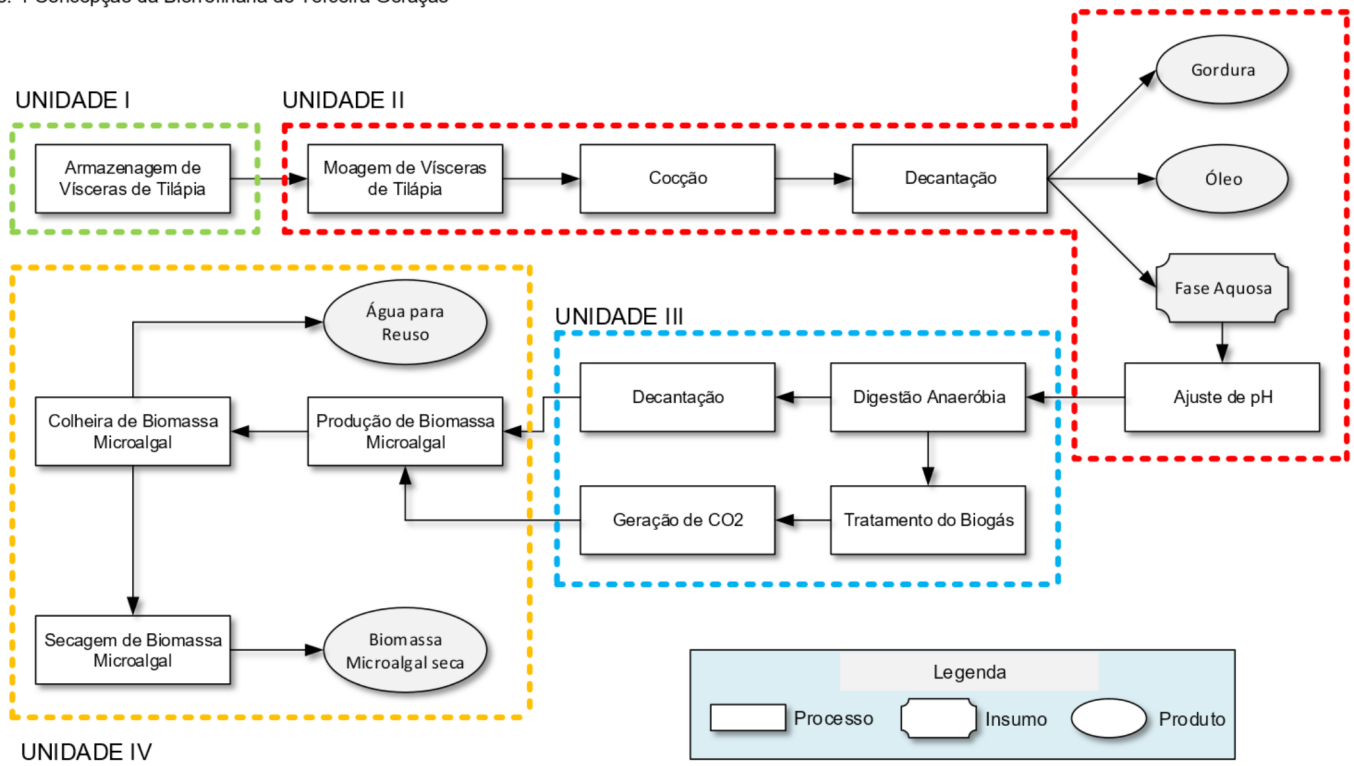
Dessa forma, a partir de dados em escala laboratorial, foi projetada uma planta piloto, englobando todas as etapas do processo, constantes da Figura 3.1 desde o armazenamento de vísceras de peixe até a obtenção de biomassa microalgal seca e água de reúso. Todas as unidades do processo estão descritas como se segue:

##### **3.1.1. Unidade I: Armazenamento de Visceras de Tilápia**

Esta unidade consta de um processo de resfriamento para armazenagem das vísceras geradas na central de processamento do pescado. Etapa realizada em *freezer* de 534 L de capacidade, com função de armazenamento em  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . As vísceras de peixe foram transportadas, por caminhão com refrigeração, a partir da estação de beneficiamento de pescados situada na cidade de Nova Jaguaribara, situada a aproximadamente 220 km da cidade de Fortaleza, onde está situada a planta piloto.

Transportadas em recipientes plásticos de 50 kg de capacidade, as vísceras foram armazenadas imediatamente após sua chegada em temperatura de  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , na própria planta piloto.

Figura 3. 1 Concepção da Biorrefinaria de Terceira Geração

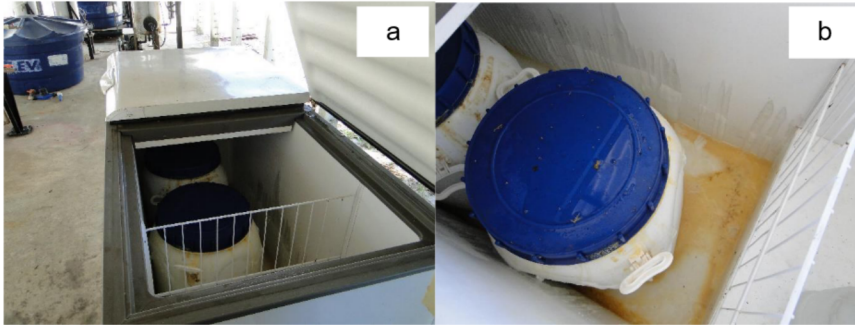


Fonte: Autor (2020)

Essa unidade apresenta fluxo mensal de vísceras de, aproximadamente, 920 kg, a um consumo de eletricidade médio de 72,1 kWh, conforme informado no catálogo do fabricante do freezer.

Conforme apresentado na Figura 3.2 (b), o processo de armazenagem das vísceras de tilápia gera um efluente líquido que fica depositado no freezer. Dessa maneira, faz-se necessária a limpeza quinzenal para a remoção desse resíduo a fim de preservar a estrutura física do refrigerador. Para tanto, foi necessário cerca de 40 kg de água/mês.

Figura 3.2 Vísceras armazenadas em freezer horizontal (a) e efluente gerado durante o armazenamento (b)



Fonte: Autor (2020)

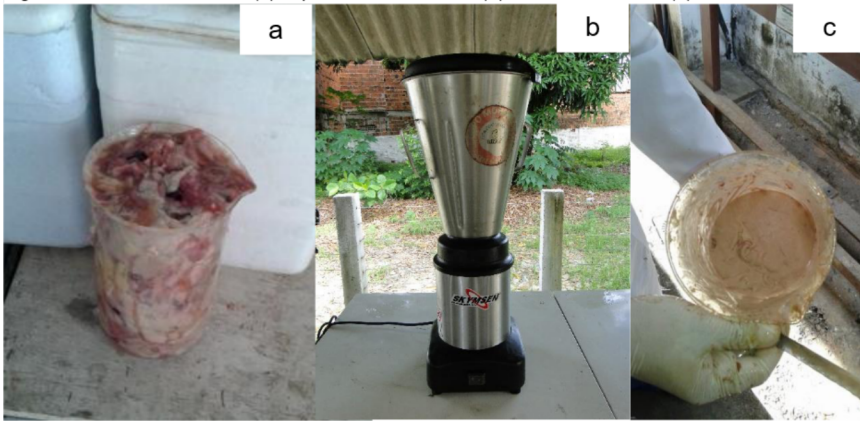
### 3.1.2. Unidade II: Pré-tratamento das Vísceras de Tilápia

Esta unidade é composta por processos que visam condicionar as vísceras de peixe ao tratamento anaeróbio em reator do tipo UASB e obtenção de produtos de valor comercial (óleo e gordura de peixe).

O processo de pré-tratamento das vísceras inicia-se com a trituração em liquidificador industrial a fim de diminuir-se sua granulometria e fragmentar o material fibroso, otimizando-se a etapa de cocção. As vísceras depois de trituradas passam a ter consistência pastosa e são armazenadas em tanque plástico simples de 50 L.

A Figura 3.3 mostra o liquidificador industrial utilizado para a trituração da víscera, a víscera *in natura* e o aspecto final da víscera pós-trituração.

Figura 3.3 Viscera in natura (a), liquidificador industrial (b) e viscera triturada (c)



Fonte: Autor (2020)

Após o processo de cocção, o material quente é deixado de repouso em decantador, de volume 50 L, por 24h para que se separe, com eficiência, a fase lipídica (óleo + gordura) da fase aquosa proteica. A fase lipídica obtida é armazenada em tambores plásticos de 100 L de capacidade e deixada em temperatura ambiente até ser transportada para destino final. A Figura 3.4 mostra o perfil de fases obtido após cocção e decantação, com clara estratificação em 4 fases de características distintas: Óleo, gordura (coagulada e dispersa), fase aquosa e resíduo sólido.

O efluente aquoso rico em proteínas é, então, neutralizado com soda cáustica para ajustar seu pH às exigências do tratamento anaeróbio. A Figura 3.5 mostra a fase aquosa obtida no processo de decantação com resquícios de sólidos que não foram completamente dissolvidos de cocção. Esse sólido pode ser facilmente degradado por forças de cisalhamento durante o processo de neutralização.

Também foi observado que o efluente aquoso sofre processo de coagulação com o passar do tempo, de forma que após 3 dias, o aspecto final é de um líquido escuro e com presença de pequenos coágulos de material orgânico.



Figura 3.4 Perfil de fases obtido após o processo de cocção e decantação por 24 h.



Fonte: Autor (2020)

Figura 3.5 Fase aquosa obtida nos processos de cocção e decantação por 24 h com a presença fase sólida sedimentável.



Fonte: Autor (2020)

### 3.1.3. Unidade III: Tratamento Anaeróbio e Geração de Biometano

Nesta etapa, foram construídos, em PVC, dois reatores do tipo UASB de 130 L cada, para tratar os efluentes gerados na biorrefinaria. Essa unidade tem a capacidade de tratar o equivalente a 1000 kg de vísceras de peixe mensalmente e produzir aproximadamente 400 L de biometano por dia. Os parâmetros de projeto utilizados para o dimensionamento dos reatores foram baseados em Chernicharo (2007) e nos trabalhos experimentais de Souza (2014) e considerando a existência de dois *bags* de armazenamento de gases (10 m<sup>3</sup> totais). O efluente líquido do reator UASB era bombeado para um decantador (500 L) para sedimentação de sólidos e estes retornavam ao reator UASB, por meio de bomba de recirculação.

A Figura 3.6 mostra os reatores do tipo UASB, com operação em paralelo. Uma estratégia de operação com os dois reatores em série também foi testada, porém com baixas eficiências na remoção de matéria orgânica, notadamente pelas altas concentrações de amônia livre geradas no segundo reator.

Figura 3. 6 Reatores anaeróbios do tipo UASB com o sistema de bombeamento.



Fonte: Autor (2020)

O biogás gerado no sistema anaeróbio foi submetido a borbulhamento, em NaOH 5%, em coluna de PVC contendo anéis de PVC e recirculação interna. A Figura 3.7 mostra o reator de purificação de biogás, os anéis de PVC e os *bags* de armazenamento de biometano utilizados nesse estudo.

Figura 3.7 Reator de tratamento do biogás (a), material de enchimento, anéis de PVC, e os *bags* de armazenamento de biometano (c).



Fonte: Autor (2020)

Para a quantificação do biogás, foi utilizado um medidor de gases de fluxo mássico da *Cole Parmer* modelo 32908-51, programado para a quantificação de metano e gás carbônico em termos percentuais, na corrente gasosa.

O resultado do processo de tratamento de biogás é o biometano. Este foi armazenado em *bag* de lona da Sansuy, com capacidade de 5 m<sup>3</sup>, conforme apresentado na Figura 3.7 (c).

#### **3.1.4. Unidade IV: Cultivo, Colheita e Secagem de Biomassa Microalgal**

Sabe-se que sistemas anaeróbios para tratamento de esgotos não possuem eficiência satisfatória para a remoção de nutrientes, o que se torna inevitável a instalação de uma segunda etapa de tratamento. (CHEN *et al.*, 2018)

Existem diversos sistemas reconhecidamente eficientes para remoção de nitrogênio e fósforo como, por exemplo, o processo de nitrificação/desnitrificação e o sistema BARDENPHO (XUE *et al.*, 2019). Nos últimos anos, o tratamento de esgotos utilizando-se microalgas vem obtendo atenção especial devido às altas eficiências de remoção de matéria orgânica, assimilação de nutrientes e CO<sub>2</sub>, e a produção de biomassa microalgal (como potencial matéria-prima para a produção de biocombustíveis) (GARCÍA *et al.*, 2018; LEONG *et al.*, 2018).

Esta unidade consta de uma piscina de cultivo de microalgas do tipo *raceway* acoplada a um fotobiorreator modelo placa plana. A *raceway* foi construída com fibra de vidro e tem volume total de 4,5 m<sup>3</sup>, enquanto o fotobiorreator (100 L) foi construído com vidro temperado de 8 mm de espessura, sendo sustentada por uma estrutura de alumínio. Neste trabalho, não foi viável a utilização da *raceway* devido à interrupção do fornecimento de vísceras de peixe a partir da cidade de Nova Jaguaribara. A Figura 3.8 mostra os fotobiorreatores de placa plana e a piscina de cultivo tipo *raceway*, com as pás giratórias (sistema não utilizado neste trabalho).

Figura 3. 8 Fotobiorreatores tipo placa plana e piscina de cultivo tipo *raceway*.



Fonte: Autor (2020)

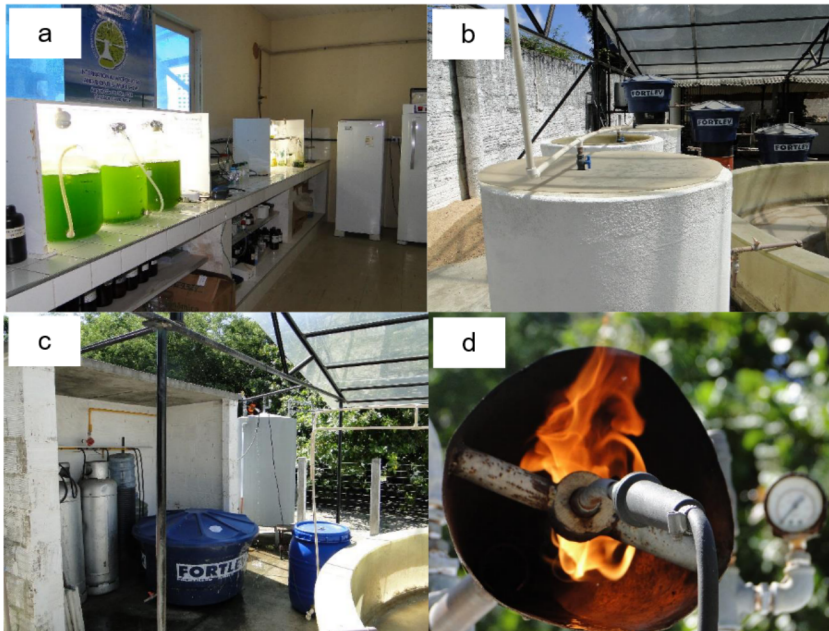
O fotobiorreator de placa plana foi construído com placas de vidro de 8 mm de espessura, com 1,5 m<sup>2</sup> e volume de 50 L cada, suportados por hastes de alumínio. O sistema contou com alimentação de CO<sub>2</sub> e bombas de recirculação interna, com tempo de cultivo de 10 dias. O volume total do sistema era de 100 L com capacidade



de produção de biomassa que variou conforme as condições de cultivo estabelecidas nas respectivas rotas.

Na biorrefinaria projetada, o fornecimento de CO<sub>2</sub> para o sistema de cultivo de biomassa foi garantido tanto pela queima de gás natural (proveniente de um sistema alternativo de geração de CO<sub>2</sub>), em substituição ao gerado na Unidade de Tratamento Anaeróbico e Geração de Biometano, como pelo bombeamento de ar atmosférico direto no fotobiorreator. A Figura 3.9 mostra os cilindros de gás natural, o lavador de gás e o queimador utilizados, o cultivo em laboratório e a “maternidade”.

Figura 3. 9 Sistema de cultivo instalado no laboratório (a); “Maternidade” (sistema de cultivo em pequena escala antes da inoculação no fotobiorreator) (b); Sistema de queima de gás natural e geração de CO<sub>2</sub> (c) e o queimador do sistema alternativo de geração de CO<sub>2</sub> para a produção de biomassa microalgal (d)



Fonte: Autor (2020)

A microalga utilizada neste estudo foi a *Nannochloropsis* sp. obtida do Laboratório de Biotecnologia da Universidade Federal do Ceará. Esta microalga pode estabelecer seu crescimento tanto em água salina como em água doce e possui características únicas como alto teor de proteínas e ácidos graxos poli-insaturados,

credenciando sua comercialização como matéria-prima para a produção de ração para alevinos ou mesmo para a produção de biodiesel. A composição da microalga foi tomada a partir dos trabalhos de Guan, Savage, e Weib, (2012) como sendo  $C_{23}H_{38}O_{10}N_3$ , com uma taxa de fixação de  $CO_2$  atmosférico de 1,96  $kgCO_2/kg$  de microalga cultivada.

O cultivo de *Nannochloropsis* sp. Iniciava-se no laboratório em frascos do tipo *erlenmeyers* de 500 mL. Com 10 dias de crescimento, o cultivo era transferido para um frasco de 5 L e, após 10 dias, para os garrafões de 20 L.

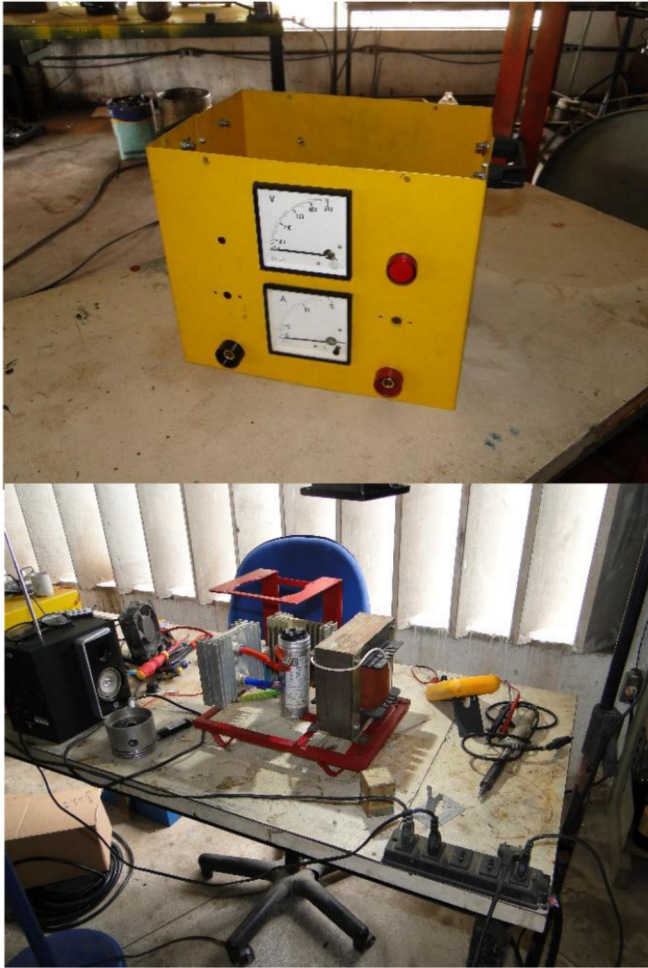
Na planta piloto, um sistema conhecido como "maternidade" foi construído para poder fazer a transição entre o cultivo de biomassa em condições controladas de laboratório e o cultivo em condições ambientais. A maternidade contava com 3 cubas de cultivo de 20 L de capacidade, construída em fibra de vidro e com alimentação de  $CO_2$  (atmosférico ou da queima de gás natural).

O cultivo desenvolvido foi do tipo mixotrópico, ou seja, tanto gás carbônico atmosférico quanto o carbono orgânico dissolvido no efluente foram utilizados como fonte de carbono para o crescimento microalgal. Neste ponto, vale salientar os trabalhos de Martinez e Orús (1991) que demonstraram haver taxas de crescimento celular similares quando utilizados  $CO_2$  atmosférico ou carbono orgânico em cultivos de laboratório, em cultivos mixotrópicos. Dessa forma, considerou-se, neste trabalho, que metade do carbono para crescimento celular foi advindo de carbono inorgânico e a outra metade de carbono orgânico dissolvido no efluente.

Após a etapa de cultivo de biomassa, procedeu-se a etapa de concentração por meio de sedimentação natural, durante 24 h. Como complemento à etapa de concentração de biomassa microalgal por meio de sedimentação, a biomassa sedimentada foi encaminhada para um sistema de eletroflotação, para recuperação de mais água de reúso, antes da secagem em estufa com circulação forçada de ar.

O sistema de eletroflotação, com capacidade de 40 L, foi construído em aço, e eletrodos de aço inox (área das placas de 0,16  $m^2$  cada e distância entre elas de 15 cm), interligados a uma fonte de alimentação 220 V. A Figura 3.10 mostra os detalhes construtivos do eletrofloculador utilizado neste estudo.

Figura 3. 10 Montagem do eletroflotador Eletroflotador de escala piloto.

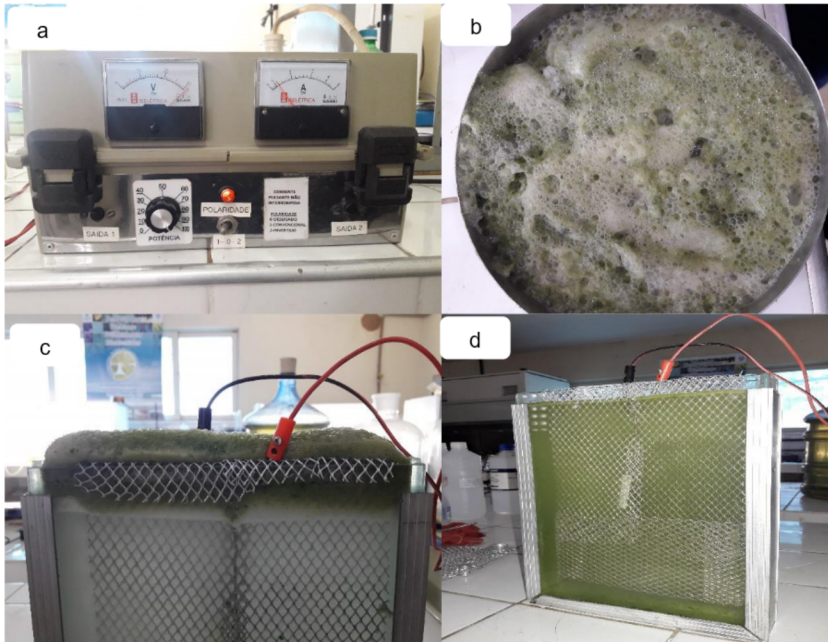


Fonte: Autor (2020)

O sistema projetado foi capaz de concentrar em 5 vezes o teor de biomassa na corrente, elevando-a para 100 g/L aproximadamente. O resultado deste processo foi biomassa em pasta, uma mistura de água, microalga e bolhas. A Figura 3.11 mostra o ensaio ilustrativo, em escala de laboratório, do processo de separação de

biomassa descrito. Como resultado do processo, tem-se a segunda água de reúso e a pasta de microalga.

Figura 3. 11 Sistema ilustrativo de bancada para eletroflotação de biomassa microalgal. Em (a), os dados de operação do sistema; Em (b), a pasta de microalga obtida; Em (c), perfil de separação (ao final do processo e em (d) Perfil antes do processo de eletrofloculação.

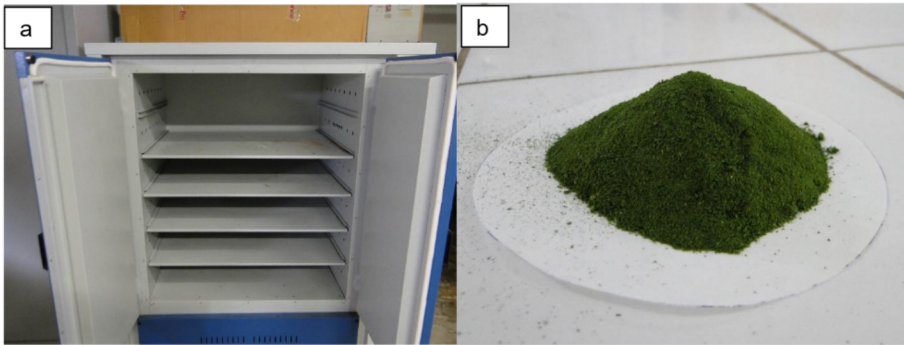


Fonte: Autor (2020)

Após os processos de sedimentação e eletroflotação, a operação foi finalizada com a secagem da biomassa em estufa com circulação forçada de ar. A biomassa em pasta era transferida para uma bandeja de aço inox e submetida ao processo de secagem por 12 h, a 50 °C. Após esse processo, a biomassa seca era coletada, pesada e armazenada. A Figura 3.12 mostra a estufa com circulação forçada de ar e a biomassa microalgal seca.



Figura 3. 12 Estufa com circulação forçada de ar (a) e biomassa seca obtida no final do processo de secagem (b).



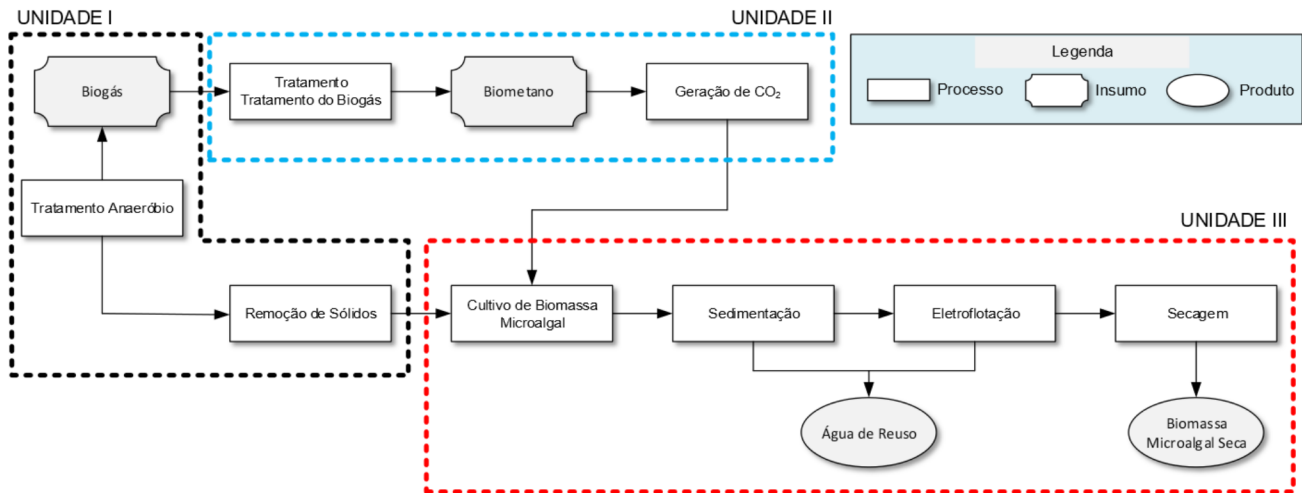
Fonte: Autor (2020)

### 3.2. Concepção da Biorrefinaria de Terceira Geração com aproveitamento de Esgotos Domésticos

Esta biorrefinaria foi projetada com o intuito de oferecer uma alternativa de aproveitamento dos esgotos gerados nas cidades do entorno do açude Castanhão. Conforme apresentado, a questão de saneamento básico naquela região é crítica, principalmente no tocante à coleta e tratamento de esgotos.

Neste sentido, diversas operações foram propostas para o aproveitamento do esgoto doméstico. Tais operações foram divididas em 3 unidades de processos, a saber: o tratamento anaeróbio, tratamento de gases e geração de  $\text{CO}_2$  e a unidade de produção e secagem de biomassa. Na Figura 3.13 é apresentado um fluxograma com as unidades de processos da biorrefinaria de terceira geração com aproveitamento de esgotos domésticos, objeto de estudo deste trabalho.

Figura 3. 13 Concepção da Biorrefinaria de Terceira Geração com aproveitamento de esgotos domésticos



Fonte: Autor (2020)

### 3.2.1. Unidade I: Tratamento Anaeróbio

O esgoto doméstico pré-tratado foi submetido a um tratamento anaeróbio em reator do tipo UASB para a geração de biogás e efluente líquido para o cultivo de biomassa microalgal. O esgoto doméstico pré-tratado foi obtido a partir de uma estação de tratamento de esgotos da companhia de saneamento local, armazenado e caracterizado (demanda química de oxigênio, nitrogênio total Kjeldahl, fósforo total, pH, alcalimidade e micronutrientes, todos segundo APHA (2005)) até sua utilização. A Figura 3.14 mostra o aparato experimental utilizado para o tratamento anaeróbio, em escala de bancada.

Figura 3. 14 Aparato experimental de escala de bancada para o tratamento anaeróbio.



Fonte: Autor (2020)

### 3.2.2. Unidade II: Tratamento de Gases e Geração de CO<sub>2</sub>

Esta unidade objetivou o tratamento do biogás e a geração de CO<sub>2</sub> para o cultivo de biomassa. Os dados de produtividade e composição do biogás foram levantados a partir do esquema experimental de bancada apresentado na Figura 3.14. Já para a geração de CO<sub>2</sub>, a partir de combustão, foi utilizado o sistema alternativo de geração de gases de combustão, apresentado na Figura 3.9c e 3.9d.

### **3.2.3. Unidade III: Cultivo, Colheita e Secagem da Biomassa Microalgal**

O sistema de cultivo, colheita e secagem de biomassa microalgal, para esta biorrefinaria foi o mesmo apresentado no item 3.1.4, com etapa de sedimentação, eletroflotação e secagem de biomassa em estufa com circulação interna de ar (consultar as figuras 3.8 a 3.12)

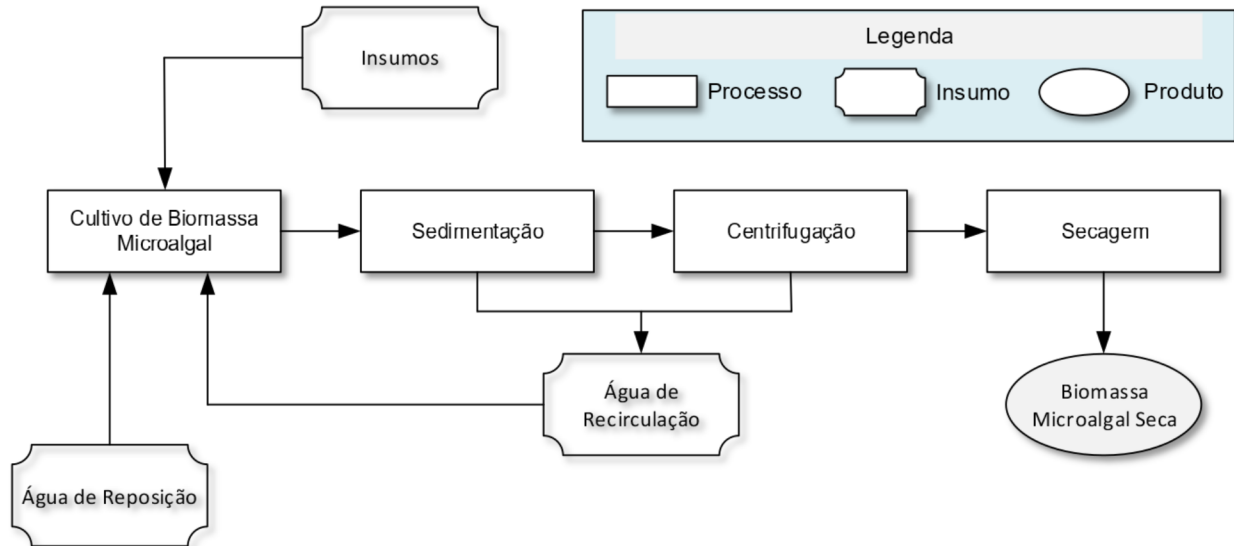
### **3.3. Concepção do Sistema de Produção de Biomassa Seca com a Utilização de Fertilizantes Comerciais**

O processo convencional de produção de biomassa microalgal seca contempla as etapas de cultivo, concentração e secagem da biomassa. A água utilizada no processo é recirculada no sistema, existindo apenas a reposição.

Para a modelagem desse processo, a quantidade de nutrientes demandada para o cultivo da biomassa foi consonante com a composição da microalga *Nannochloropsis* sp. Com fornecimento de Nitrogênio, Potássio e Fósforo na forma de fertilizantes comerciais, conforme estequiometria da composição da alga, e CO<sub>2</sub> proveniente da atmosfera.

Os fertilizantes comerciais utilizados foram Nitrogênio Fertilizante, Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e Potássio (K<sub>2</sub>O) e a fonte de carbono para crescimento celular foi 100 % CO<sub>2</sub> atmosférico. Após o cultivo da biomassa, foi realizada a sedimentação, a centrifugação e a secagem, em estufa com circulação interna de ar, conforme os procedimentos constantes nas etapas das biorrefinarias com aproveitamento de vísceras e esgotos domésticos. A Figura 3.15 mostra um fluxograma onde constam todas as etapas da obtenção de biomassa microalgal seca avaliada.

Figura 3. 15 Concepção do sistema de produção de biomassa microalgal seca com a utilização de fertilizantes comerciais.



Fonte: Autor (2020)

### **3.4. Estudos de Análise de Ciclo de Vida**

Neste estudo, foi realizado uma ACV da produção de biomassa microalgal seca em dois modelos de Biorrefinaria de Terceira Geração (uma com a utilização de vísceras de tilápia, e uma outra com a utilização de esgotos domésticos) e comparados com uma ACV da obtenção de biomassa seca, obtida a partir de fertilizantes comerciais. Todos esses estudos de avaliação de ciclo de vida foram baseados nas normas ABNT NBR 14040 e ABNT NBR 14044.

Dessa maneira, foram estabelecidos objetivos e o escopo do estudo, a função e a unidade funcional no sistema, o sistema de produto e suas fronteiras, os procedimentos de alocação de produtos e coprodutos, as categorias de impactos ambientais a serem avaliadas, os requisitos de dados e os requisitos de qualidade de dados.

#### **3.4.1. Objetivo e Escopo do Estudo**

Avaliar os principais impactos ambientais do ciclo de vida da biomassa microalgal seca obtida a partir de Biorrefinaria de Terceira Geração que contempla o aproveitamento de resíduos da piscicultura e de esgotos domésticos e comparar com os valores obtidos a partir da produção de biomassa microalgal oriunda de cultivo com fertilizantes comerciais.

#### **3.4.2. Função e Unidade Funcional**

A função do sistema, em todas as rotas, é produzir biomassa microalgal seca. A unidade de análise (unidade funcional) é a produção de 1kg de biomassa seca nas rotas de aproveitamento de efluentes (processamento do pescado e esgotos domésticos pré-tratados) e na rota utilizando fertilizantes comerciais.

### **3.4.3. Sistema de produto e fronteiras do sistema**

O sistema de produto engloba todos os processos constantes nas Figuras 3.16, 3.17 e 3.18 que tratam das rotas C2, C3 e C0, respectivamente. Na rota C2, as fronteiras do sistema enquadram os processos desde o armazenamento das vísceras de tilápia, na própria central de processamento de pescados, até a secagem da microalga produzida, passando pelos processos de pré-tratamento das vísceras, para a geração de efluentes líquidos e tratamento anaeróbio, para geração de biogás. Para a rota C3, com o aproveitamento do efluente doméstico pré-tratado, os processos englobados são o tratamento anaeróbio, tratamento do biogás, queima do biometano, remoção de sólidos do efluente anaeróbio, produção, concentração, colheita e separação de biomassa. Para o Caso da rota C0, os processos englobados são o cultivo, colheita e secagem de biomassa microalgal. Sob essa perspectiva, o estudo de ACV desenvolvido neste trabalho classifica-se como de berço ao portão.

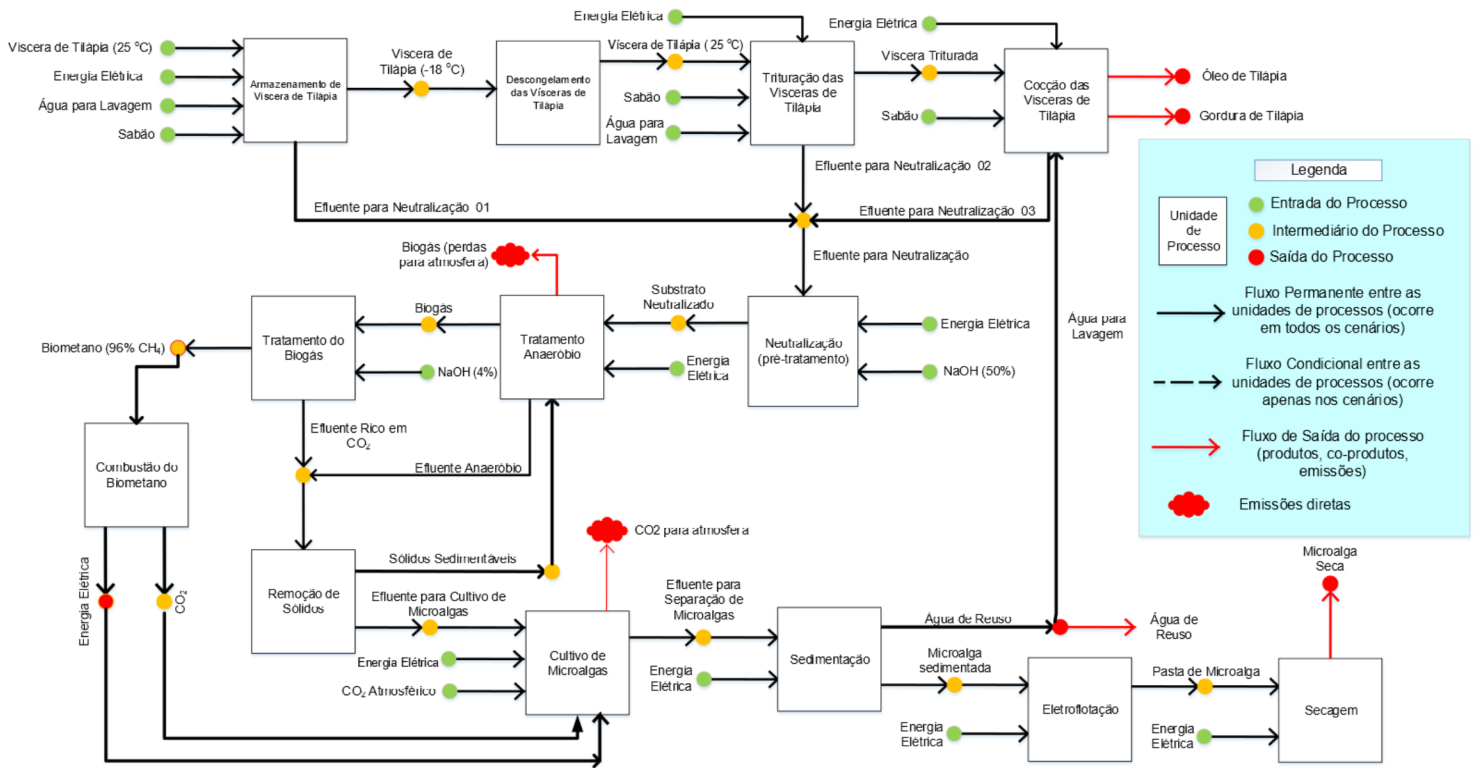
Não estão contemplados nas fronteiras do sistema, o processamento da biomassa microalgal (extração de óleo ou proteínas, formulação de rações etc.), o beneficiamento da gordura do peixe obtida no sistema, os processos de refino e transformação do óleo de tilápia, a utilização da água de reúso fora do sistema, processos de transportes, geração elétrica de alta e média voltagem, fabricação de produtos químicos, a infraestrutura para confecção de máquinas e equipamentos.

As rotas C2 e C3 contam com o reaproveitamento do CO<sub>2</sub> e energia elétrica obtidos a partir da queima do metano, evitando-se, assim o lançamento de gás carbônico para a atmosfera e otimizando o uso de energia elétrica na planta.

Na rota C3 utilizou-se esgotos domésticos para a produção de microalgas, aproveitando-se, assim, um recurso existente em abundância e que, atualmente, não tem destinação ambientalmente correta em grande parte da região do açude Castanhão.

Este trabalho, então, propõe um estudo comparativo das três rotas mencionadas, no sentido de se avaliar as etapas mais impactantes ao meio ambiente e sugerir melhorias, visando minimizar os impactos ambientais da Biorrefinaria.

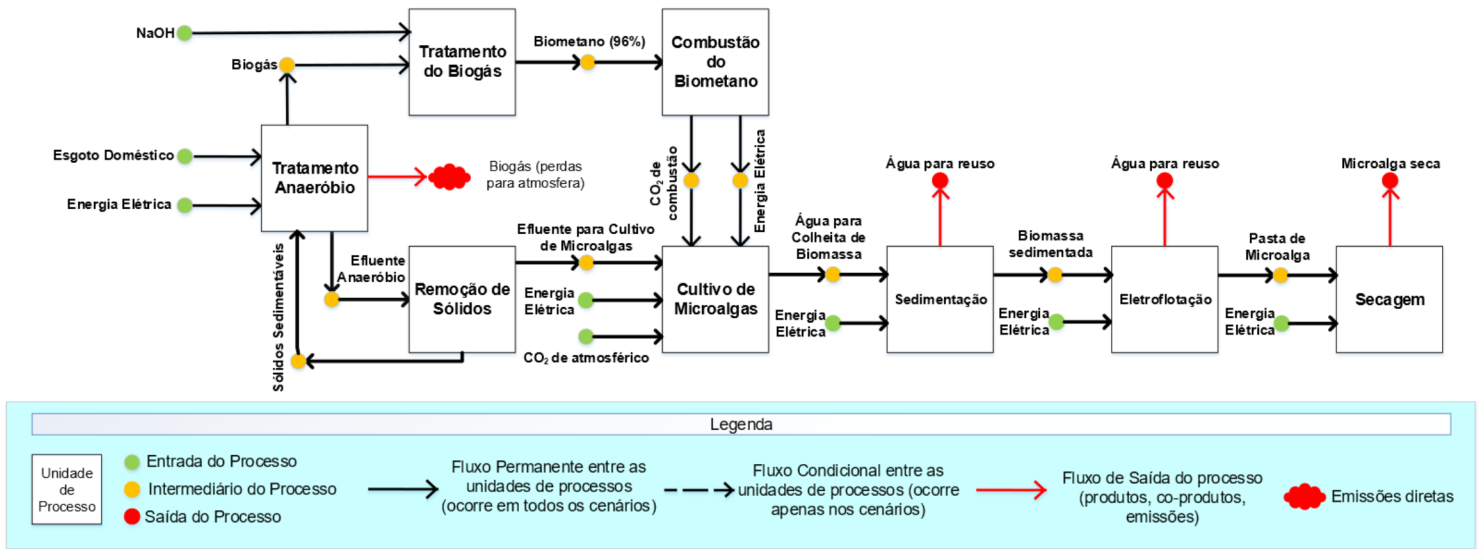
Figura 3. 16 Biorrefinaria de 3ª Geração – Rota 02 (vísceras de tilápia) – Unidades de processos, fluxos de entradas, saídas e emissões.



Fonte: Autor (2020)

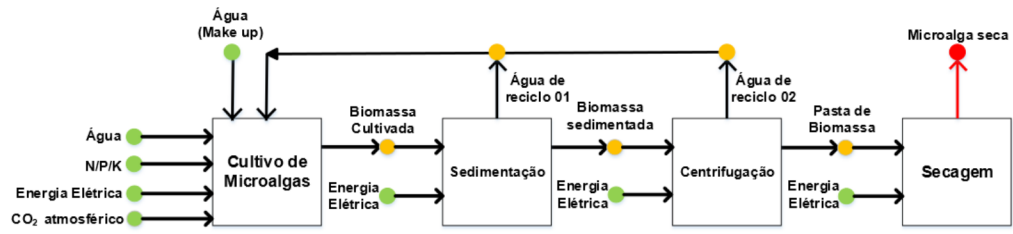


Figura 3. 17 Biorrefinaria de 3ª Geração – Rota C3 (esgotos domésticos) – Unidades de processos, fluxos de entradas, saídas e emissões.

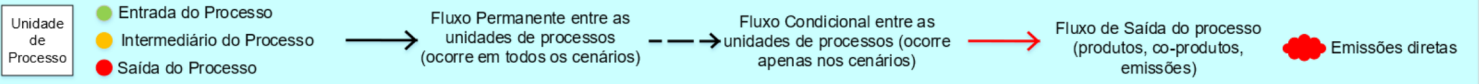


Fonte: Autor (2020)

Figura 3. 18 Processo de obtenção de biomassa seca – Rota C0 (fertilizantes comerciais) – Unidades de processos, fluxos de entradas, saídas e emissões.



Legenda



Fonte: Autor (2020)

#### **3.4.4. Procedimentos de Alocação de Produtos e Coprodutos**

A base mássica foi utilizada como procedimento de alocação de produtos e coprodutos, nas três rotas avaliadas neste estudo.

#### **3.4.5. Procedimentos de alocação de fim de vida**

A abordagem *Cut-off* (corte 100%) foi utilizada para os efluentes de víscera de tilápia e esgoto doméstico. Ou seja, não foram considerados os impactos ambientais na geração das vísceras de tilápia e do esgoto doméstico. Nessa situação, todos os impactos ambientais relativos ao processamento da tilápia foram alocados para o pescado beneficiado, enquanto os impactos ambientais da obtenção do esgoto doméstico foram alocados para a coleta dos esgotos domésticos.

#### **3.4.6. Categorias de impacto ambiental**

Os impactos ambientais foram avaliados pelo método ReCiPe nas seguintes categorias: mudanças climáticas; depleção hídrica; depleção da camada de ozônio; formação de oxidantes fotoquímicos; acidificação; formação de material particulado; formação de oxidantes fotoquímicos; acidificação terrestre; depleção fóssil; ocupação urbana e ocupação de terras aráveis.

#### **3.4.7. Requisitos de dados**

Os dados utilizados neste trabalho foram medidos diretamente através de equipamentos instalados na planta piloto (hidrômetros, medidor de vazão e composição de gases, sondas de temperatura e de pH, balanças etc.). Outros dados foram calculados, por meio de balanço de massa ou foram obtidos diretamente da literatura ou de banco de dados. O banco de dados utilizados nesse estudo foi o *Ecoinvent 3*, sendo que toda a rotina de cálculo foi realizada por meio do *software* proprietário SimaPro versão 8.0.3.14, licenciada pelo Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental (LERCA) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCe).

#### **3.4.8. Requisitos de Qualidade de dados**

Os dados aqui levantados foram plotados em uma Matriz de Pedigree, proposta por Weidema e Wesnaes (1996) para análise de qualidade dos dados obtidos e simulação de Monte Carlo.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Inventário do Ciclo de Vida das Rotas Tecnológicas C2, C3 e C0

#### 4.1.1. Inventário de Ciclo de Vida da Biorrefinaria de Terceira Geração com Aproveitamento de Vísceras de Tilápia – Rota Tecnológica C2

##### A) Unidade I: Armazenamento de Vísceras de Tilápia

O fluxo mensal de vísceras nessa unidade foi de, aproximadamente, 923 kg a um consumo de eletricidade médio de 72,1 kWh, conforme informado no catálogo do fabricante do freezer. As vísceras de tilápia eram armazenadas em temperatura de 0 °C, até o momento de sua utilização.

O processo de armazenagem das vísceras de tilápia gera um efluente líquido que fica depositado no freezer. Dessa maneira, faz-se necessário a limpeza quinzenal para a remoção desse resíduo a fim de preservar a estrutura física do refrigerador. Para tanto, foi necessário cerca de 40 kg de água e 0,5 kg de sabão para a completa limpeza do freezer. O efluente gerado durante a limpeza do freezer foi direcionado para o sistema de neutralização como pré-tratamento para o processo anaeróbio. A Tabela 4.1 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de armazenagem das vísceras de tilápia.

Tabela 4. 1 Inventário do processo de armazenagem de vísceras de tilápia.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Viscera Refrigerada	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Substrato p/ Neutral 01	4,39E-02	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Energia Elétrica	7,81E-02	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Valor fornecido pelo fabricante
Água para Lavagem	4,33E-02	Tap Water, at user {RoW}   Market for   Alloc Def, U	Medição em campo
Sabão	5,42E-04	Soap {GLO}   market for   Alloc Def, U	Medição em campo
Viscera (25 °C)	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo

Fonte: Autor (2020)

## B) Unidade II: Pré-tratamento das Visceras de Tilápia

### Processo de Trituração

A etapa de trituração de vísceras tornou-se fundamental para que fosse possível obter rendimento superior na etapa de cocção. Nesta etapa, víscera, à temperatura ambiente, era triturada em liquidificador do tipo industrial obtendo-se uma massa de consistência pastosa.

Para a trituração de 923 kg de víscera mensal eram necessárias 11 bateladas diárias com 5 min de operação cada. Considerando-se, a potência do liquidificador de 400 W, a energia elétrica necessária foi de 19,23 kWh. A Tabela 4.2 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de trituração das vísceras de tilápia.

Tabela 4. 2 Inventário do processo de armazenagem de vísceras de tilápia.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Viscera Triturada	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Substrato p/ Neutral 02	1,11 E-01	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Viscera Descongelada	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia Elétrica	2,08 E-02	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Água para Lavagem	1,08 E-01	Tap Water, at user {RoW}   Market for   Alloc Def, U	Medição em campo
Sabão	2,17 E-03	Soap {GLO}   market for   Alloc Def, U	Medição em campo

Fonte: Autor (2020)

Vale ressaltar que, sempre foi necessário parar o sistema várias vezes para a remoção de víscera que ficara presa à hélice do triturador. Dessa maneira, cerca de 1 kg de víscera, na forma de material que não conseguiu ser triturada no liquidificador, seguia diretamente para o tanque de cocção.

Ao final da operação, realizava-se a lavagem do liquidificador com 0,1 kg sabão e 5 L de água da torneira. No mês, cerca de 2kg de sabão e 100 L de água eram consumidos, gerando-se, portanto, 102 kg de efluente líquido para ser encaminhado ao sistema de neutralização.

### Processo de Cocção das Visceras de Tilápia

As vísceras de peixe, após trituradas, eram transferidas para um tanque de cocção para a extração de óleo, gordura e uma fase aquosa rica em proteínas. A temperatura no reator foi mantida em 60 °C, durante 1,5 h de batelada, para não degradar o óleo extraído no processo. Para tanto, óleo térmico foi utilizado em um sistema com serpentina e recirculação com gasto de energia em 306,24 kWh (aquecimento e agitação do sistema). Tal valor de energia foi calculado com base na capacidade calorífica da carne de peixe gorduroso ( $c_p = 0,775 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ ), conforme Johnston *et al.* (1994), o tempo de cada batelada e na potência do motor agitador (0,25 CV). A Tabela 4.3 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de cocção das vísceras de tilápia com obtenção de óleo e gordura animal.

Tabela 4. 3 Inventário do processo de cocção de vísceras de tilápia.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Substrato p/ Neutral 03	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Gordura de Tilápia	2,59 E-02	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Óleo de Tilápia	2,44 E-01	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Viscera Triturada	6,09 E-01	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia Elétrica	2,02 E-01	Electricity, medium voltage (BR)   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Água (reúso)	6,60 E-01	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Sabão	6,60 E-04	Soap {GLO}   market for   Alloc Def, U	Medição em campo

Fonte: Autor (2020)

O processo foi realizado em bateladas de 50 kg/dia para se processar 923 kg de víscera triturada, sendo que ao final do processo, procedia-se à lavagem do tanque de cocção com 50 L de água de reúso (recuperada do processo de colheita de microalgas), para a retirada de resíduos de cocção. Este efluente era encaminhado para o sistema de neutralização.

### Processo de Neutralização de Substrato

Os efluentes gerados nas etapas de armazenamento, trituração e cocção eram submetidos ao tratamento anaeróbio em reator de fluxo ascendente. Para tanto, esse efluente necessitou de ajuste de pH para próximo à neutralidade.

A neutralização era realizada com 15 kg de hidróxido de sódio 50% sob agitação contínua durante 5 min, uma vez por semana. O consumo de energia elétrica para esta operação foi apenas para agitação mecânica, e foi calculado com base na potência do agitador (184 W) e no tempo de agitação 5 min, totalizando-se 0,061 kWh. A Tabela 4.4 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de neutralização dos 3 substratos obtidos no processo.

Tabela 4. 4 Inventário do processo de neutralização de substratos.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Substrato Neutralizado	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Substrato p/ Neutral 01	2,42 E-02	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Substrato p/ Neutral 02	6,10 E-02	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Substrato p/ Neutral 03	9,06 E-01	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia Elétrica	3,65 E-05	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Agente Neutralizante	8,97 E-03	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO}   market for   Alloc Def, U	Medição em campo

Fonte: Autor (2020)

### C) Unidade III: Processo de digestão anaeróbia em Reator de Fluxo Ascendente

O quinto processo da Biorrefinaria proposta consta de um tratamento anaeróbio, em reator de fluxo ascendente e manta de lodo. Processos anaeróbios são amplamente utilizados no tratamento de efluentes industriais, pois possuem considerável eficiência na remoção de matéria orgânica, a baixo custo de energia elétrica e investimentos iniciais de capital, ao mesmo tempo que produz biogás, que após tratado pode ser utilizado para fins energéticos.

Neste modelo de biorrefinaria, o reator UASB projetado possui volume útil de 130 L, sendo operado a uma taxa de carga orgânica de 4 kgDQO/m<sup>3</sup>.dia, tempo de detenção hidráulica (TDH) de 2,5 dias, vazão de alimentação de 50 L/dia, conforme trabalhos prévios de Souza (2014). Com esta estratégia de operação, foi possível obter eficiência de remoção de DQO de 78 % e uma produção de biogás de 1451 LBiogás/mês em concentração de metano de 85%, de acordo com os trabalhos de bancada de Souza (2014). A Tabela 4.5 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de digestão anaeróbia do substrato neutralizado.



Tabela 4. 5 Inventário do processo de digestão anaeróbia do substrato neutralizado.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Efluente Anaeróbio	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Biogás	6,96 E-04	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Substrato Neutralizado	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia Elétrica	3,78 E-02	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Emissões			
Metano (fuga)	1,45 E-05	Methane, in Air	Balanço de massa
Gás Carbônico (fuga)	7,00 E-06	Carbon Dioxide, in Air	Balanço de massa

Fonte: Autor (2020)

O sistema de alimentação do reator UASB contou com uma bomba do tipo dosadora acoplada a um timer, para controlar seu acionamento. Com vazão de alimentação de 1,86 L/h, a bomba funcionava 5 min a cada hora, para garantir o TDH de 2,55 dias supracitado. Considerando-se que a vazão de alimentação seria baixa o suficiente para não garantir a velocidade ascensional recomendada pela literatura, foi instalada uma bomba para recirculação interna, funcionando 24 h por dia, todos os dias da semana.

Com base nessa estratégia de operação do sistema anaeróbio, foi possível calcular a demanda de energia total requerida, com base na potência e no tempo de funcionamento das bombas. Considerando-se que a bomba de alimentação funcionava apenas 5 min a cada hora passada, que a bomba de recirculação interna funcionava ininterruptamente e que a potência das bombas dosadoras era de 81 W, a energia elétrica total requerida foi de 63,18 kWh, para 1 mês de operação do sistema.

### Tratamento do Biogás

Na etapa de tratamento anaeróbio foi gerado biogás com concentração 75 % em CH<sub>4</sub> e 25 % CO<sub>2</sub>, valores semelhantes ao encontrado nos trabalhos de Souza et al (2014), que trabalharam também com efluentes do processamento de tilápia do Nilo e encontraram concentrações de metano em biogás superiores a 70 %.

No sentido de aumentar o poder calorífico do biogás, foi realizado um tratamento por meio de borbulhamento do gás em solução de soda cáustica 4%, seguindo-se a experiência prévia, em escala de laboratório, descrita em Carioca *et al.* (2016). Após o tratamento, o biogás obtido apresentou 96% de concentração em

metano, 4% em concentração de CO<sub>2</sub> e não foram detectadas concentrações de H<sub>2</sub>S e NH<sub>3</sub>. O gás obtido no processo, então pode ser classificado como biometano, conforme portaria da Petrobras (ANP, 2017), podendo ser utilizado como gás natural veicular (GNV) ou como gás de cozinha, por exemplo. A quantidade de NaOH necessária para a completa remoção de CO<sub>2</sub>, foi tomada a partir da estequiometria de reação entre o CO<sub>2</sub> e NaOH, com a formação de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. A Tabela 4.6 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de purificação do biogás e obtenção de biometano. A Tabela 4.6 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de purificação do biogás e obtenção de biometano.

Tabela 4. 6 Inventário do processo de purificação do biogás e obtenção de biometano.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biometano (96%)	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Solução Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8,14 E+00	Criada pelo Usuário	Balanco de massa
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biogás	1,33 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Solução NaOH	7,81 E+00	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO}   market for   Alloc Def, U	Medição em campo

Fonte: Autor (2020)

### Remoção de sólidos do efluente do tratamento anaeróbio

Antes da etapa de cultivo de microalgas, fez-se necessário a remoção de sólidos sedimentáveis do efluente do sistema anaeróbio. A saída de sólidos nesses sistemas está associada a perdas de lodo de baixa capacidade de aclimação às condições do sistema.

O procedimento de remoção de sólidos consistiu em etapa de sedimentação e raspagem do fundo do tanque decantador. Dessa maneira, o material obtido consistia em água e sólidos sedimentáveis. A análise de sólidos sedimentáveis em cone Imhoff foi tomado para avaliar a eficiência na remoção de sólidos sedimentáveis.

A Tabela 4.7 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de purificação do biogás e obtenção de biometano.

Tabela 4. 7 Inventário do processo de purificação do biogás e obtenção de biometano.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Efluente para cultivo	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Sedimentáveis	5,22 E-03	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Solução Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	4,25 E-03	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia Elétrica	5,99 E-04	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Efluente anaeróbico	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo

Fonte: Autor (2020)

#### D) Unidade IV: Cultivo, Colheita e Secagem da Biomassa Microalgal

##### Processo de Cultivo de Biomassa Microalgal

O efluente anaeróbico, após sedimentação de sólidos, foi encaminhado ao sistema de cultivo (fotobiorreatores de placa plana), servindo de meio de cultura para a produção de biomassa de microalgas, onde não foi acrescentado qualquer fertilizante comercial. Nesse sistema, CO<sub>2</sub> oriundo da combustão do biometano pode ser aproveitado para crescimento celular, evitando-se emissão para atmosfera.

A combustão do biometano gera, estequiometricamente, 2,24 kgCO<sub>2</sub>, enquanto a biomassa produzida (2 kg), com crescimento mixotrópico, fixa 1,96 kgCO<sub>2</sub>. Dessa maneira, o residual de gás carbônico não fixado (0,28 kg) é emitido para a atmosfera.

A energia elétrica demandada no cultivo foi para injeção de gás carbônico na massa líquida e a recirculação interna do sistema, para 10 dias de cultivo. Dessa maneira, para a produção de 2 kg de biomassa seca, em cultivo mixotrópico, é necessária a injeção de 6,54 kgCO<sub>2</sub> na massa líquida. Isso pode ser explicado pelo fato de que, em sistemas abertos, o máximo de eficiência de transferência de massa entre o CO<sub>2</sub> em fase gasosa para a massa líquida não ultrapassar 30 % (LI, S.; LUO, S.; GUO R. *et al.*, 2013) Essa eficiência é notadamente importante, uma vez que é com base na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e a massa de ar a ser bombeada que é possível determinar-se, teoricamente, a potência do soprador a ser utilizado. (ÇENGEL, 2011)

Neste contexto, o fotobiorreator projetado foi operado com fotoperíodo e injeção de ar durante 12 h por dia (CARIOCA *et al.*, 2016). Para o cálculo do inventário, dois sopradores do tipo monofásico foram adotados (para os 17 fotobiorreatores): um com potência de 175 W (vazão de 200 L/min) e o outro com potência de 112 W (vazão de 83 L/min). Nessas condições, a energia elétrica necessária para o bombeamento foi de 103,32 kWh em 1 mês de operação, no sistema modelado.

Outro fator importante, é promover a condição ideal de concentração de CO<sub>2</sub> dissolvida na massa líquida de cultivo. Adesanya *et al.* (2014) reportaram que altas concentrações de CO<sub>2</sub> dissolvido tem promovido a inibição do crescimento celular, especialmente em fotobiorreatores. Como estratégia de controle operacional foi utilizada a recirculação interna da água do cultivo, por meio de bombas dosadoras, onde cada bomba possuía 81 W de potência nominal. Considerando-se 17 fotobiorreatores com ciclos de recirculação interna próprios de 12 h, a energia elétrica calculada foi de 495,72 kWh em 1 mês de operação. Assim sendo, o consumo de energia elétrica para a operação mensal do sistema de cultivo foi de 599,04 kWh.

A Tabela 4.8 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de cultivo de biomassa microalgal em fotobiorreator de placa plana.

Tabela 4. 8 Inventário do processo de cultivo de biomassa microalgal em fotobiorreator de placa plana.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa Cultivada	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Efluente para cultivo	9,99 E-01	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica	3,58 E-01	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
CO <sub>2</sub> de combustão	1,34 E-03	Criada pelo Usuário	Estequiometria
Emissões			
CO <sub>2</sub> (emissão p/ o ar)	1,68 E-04	Carbon Dioxide, in Air	Balanço de massa

Fonte: Autor (2020)

### Processo de Sedimentação de Biomassa Microalgal

A etapa de colheita (separação) de biomassa é tradicionalmente a de maior consumo de energia em todo o processo, uma vez que a biomassa não excede 5%

da massa total do sistema. Dessa maneira, sempre é importante uma etapa de concentração de biomassa antes de processos de separação sólido-líquido de consumo intensivo de energia elétrica, como, por exemplo, a secagem (em estufa com circulação forçada de ar, por centrifugação, em *spray dryer*, por filtração etc.). (KASSIM *et al.*, 2019)

Dessa maneira, diversas estratégias de concentração são utilizadas industrialmente como, por exemplo, a coagulação/floculação e a sedimentação (KASSIM *et al.*, 2019). Para que não fossem utilizados reagentes químicos, a microalga *Nannochloropsis* sp., foi deixada em repouso, para que pudesse se sedimentar, concluindo o processo em torno de 24h, aproximadamente.

Nesse processo, biomassa concentrada pode ser coletada a partir do fundo do tanque sedimentador, e o sobrenadante é água de reúso a ser transferida do sistema, por bombeamento, para reservação. A Tabela 4.9 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de sedimentação de biomassa microalgal.

Tabela 4. 9 Inventário do processo de sedimentação de biomassa microalgal.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa sedimentada	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Água de reúso 01	1,57 E+01	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biomassa cultivada	1,67 E+01	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica	2,00 E-02	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização

Fonte: Autor (2020)

### Colheita de biomassa microalgal e obtenção de água de reúso – Eletroflotação

O sistema de eletroflotação, com capacidade de 40 L, foi construído em aço, e eletrodos de aço inox, interligados a uma fonte de alimentação 220 V. Operando em 30 V e 1,2 A, o consumo de energia elétrica calculado para o eletrofloculador foi de 0,20 kWh para 1 mês de operação. A Tabela 4.10 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de eletrofloculação de biomassa microalgal.

O sistema projetado foi capaz de concentrar em 5 vezes o teor de biomassa na corrente, elevando-a para 100 g/L aproximadamente (medida em termos de sólidos suspensos totais). O resultado deste processo foi biomassa em pasta, uma mistura

de água, microalga e bolhas de ar. Como resultado do processo, tem-se a segunda água de reúso e a pasta de microalga.

Tabela 4. 10 Inventário do processo de eletrofloculação de biomassa microalgal.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa em pasta	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Água de reúso 02	4,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biomassa sedimentada	5,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica	1,00 E-02	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização

Fonte: Autor (2020)

### Secagem da Biomassa Microalgal

Após os processos de sedimentação e eletroflotação, a operação foi finalizada com a secagem da biomassa em estufa com circulação forçada de ar (potência de 1100 W). A biomassa em pasta era transferida para bandejas de aço inox e submetida ao processo de secagem por 12 h, a 50 °C. Após esse processo, a biomassa seca era coletada, pesada e armazenada. A Tabela 4.11 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de secagem de biomassa microalgal.

Tabela 4. 11 Inventário do processo de eletrofloculação de biomassa microalgal.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa seca	1,00 E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biomassa em pasta	1,00 E+01	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica	6,60 E+00	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Emissões			
Água (evaporação)	9,00 E+00	Water	Balço de massa

Fonte: Autor (2020)

#### 4.1.2. Inventário de Ciclo de Vida da Biorrefinaria de Terceira Geração com Aproveitamento de Esgotos Domésticos – Rota Tecnológica C3

A terceira rota avaliada neste estudo consistiu em se utilizar esgoto doméstico para a produção de biomassa microalgal. Notadamente, esgotos domésticos e efluentes do processamento de pescados como efluentes de características diferentes, unidades de processos constantes nas rotas C2, que se



relacionavam com as vísceras de tilápia, não estarão presentes na rota C3. Os dados levantados para esta rota foram obtidos a partir de reator UASB em escala de laboratório (4 L) e fotobiorreator placa plana (100 L)

#### A) Unidade I: Tratamento Anaeróbio e Remoção de Sólidos

A Unidade contou com um reator UASB de bancada (4 L) operando com TDH de 8 h. O consumo de energia elétrica foi calculado por meio da potência da bomba (81 W) pelo seu tempo de funcionamento, obtendo-se 60 kWh, aproximadamente. Vale salientar que este sistema contava com uma bomba de recirculação funcionando 24 h por dia para garantir a velocidade ascensional sugerida por Chernicharo (2007).

Como saídas desse sistema, teve-se a fuga de biogás de 3 % (Maranduba *et al.* 2016), constituindo-se emissões para a atmosfera; biogás, para o sistema de produção de biometano e efluente anaeróbio para cultivo de biomassa microalgal. A Tabela 4.12 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de tratamento anaeróbio da rota C3.

Tabela 4. 12 Inventário do processo de tratamento anaeróbio da rota C3.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Efluente Anaeróbio	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Biogás	8,25E-06	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Energia Elétrica	1,66E-01	Electricity, medium voltage (BR)   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Esgoto pré-tratado	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Emissões			
Metano (fuga)	1,17E-07	Methane, in Air	Balanço de massa
CO <sub>2</sub> (fuga)	1,38E-07	Carbon Dioxide, in Air	Balanço de massa

Fonte: Autor (2020)

Esta unidade teve como objetivo promover a remoção de sólidos sedimentáveis presentes no efluente anaeróbio, adequando o efluente ao cultivo de biomassa em fotobiorreator. O sistema, semelhante ao utilizado na rota C2, consistia em um recipiente no qual o efluente permaneceu em repouso para promover a sedimentação de material particulado.

A Tabela 4.13 resume os principais resultados obtidos para o processo de remoção de sólidos sedimentáveis do efluente do tratamento anaeróbio. Vale ressaltar

que esta unidade recebeu a contribuição do efluente gerado no sistema de tratamento do biogás, uma solução  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  de neutralização.

Tabela 4. 13 Inventário do processo de tratamento anaeróbio da rota C3.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Efluente para cultivo	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Sólidos sedimentáveis	1,41E-02	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Efluente anaeróbio	1,01E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Solução $\text{Na}_2\text{CO}_3$	1,98E-03	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica	2,81E-03	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização

Fonte: Autor (2020)

## B) Unidade II: Tratamento do Biogás

Esta unidade objetivou o tratamento do biogás produzido na Unidade I, para a obtenção de biometano. Consistiu em um frasco de 1 L de capacidade com 700 g de NaOH 50% (calculado via estequiometria da reação de neutralização entre NaOH e  $\text{CO}_2$ ), em que o biogás era borbulhado e o biometano medido em cilindro graduado. O biometano obtido no processo apresentava 96 % em metano e 4% em  $\text{CO}_2$ , analisado por cromatografia gasosa conforme Souza *et al.* (2014) A Tabela 4.14 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de tratamento do biogás, na rota C3.

Tabela 4. 14 Inventário do processo de tratamento do biogás, na rota C3.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biometano	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Solução $\text{Na}_2\text{CO}_3$	4,63E+02	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biogás	1,95E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Solução NaOH	4,62E+02	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO}   market for   Alloc Def, U	Balanco de massa

Fonte: Autor (2020)



### C) Unidade III: Cultivo, Colheita e Secagem da Biomassa Microalgal

#### Processo de Cultivo de Biomassa de Microalgas

A produção de biomassa foi desenvolvida em fotobiorreator de placa plana de 100 L, com bomba de recirculação interna e soprador para injeção de CO<sub>2</sub> atmosférico. A demanda total de carbono para o crescimento celular foi determinada por meio da composição da microalga como sendo 3,39 kg para 1,73 kg de biomassa, sendo que 50 % tem origem inorgânica e os outros 50 % origem orgânica (carbono orgânico dissolvido). Dessa maneira, a energia consumida calculada pelo sistema de bombeamento é de 126 kWh e para o sistema de recirculação interna é de 116,64, conforme cálculo estabelecido na rota e C2. A Tabela 4.15 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de cultivo de biomassa microalgal, na rota C3.

Tabela 4. 15 Inventário do processo de cultivo de biomassa microalgal, na rota C3.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa cultivada	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Energia elétrica	6,79E-01	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Efluente para cultivo	9,95E-01	Criada pelo Usuário	Medição em campo
CO <sub>2</sub> de combustão	1,09E-05	Criada pelo Usuário	Balanço de massa
Entradas Conhecidas da Natureza			
CO <sub>2</sub> atmosférico	4,76E-03	Carbon Dioxide, in Air	Balanço de massa

Fonte: Autor (2020)

#### Processo de Sedimentação de Biomassa

O processo de sedimentação teve como objetivo fundamental a concentração de biomassa, otimizando o dimensionamento do eletroflotador e recuperação de água de reúso. Este processo foi realizado conforme os procedimentos adotados na rota C2, com a sedimentação ocorrendo ao longo de 24 h. Após esse período, as microalgas sedimentadas são transferidas para o eletroflotador e a água de reúso encaminhada para o tanque de armazenamento. A Tabela 4.16 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de sedimentação de biomassa microalgal, na rota C3.

Tabela 4. 16 Inventário do processo de sedimentação de biomassa microalgal, na rota C3.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa sedimentada	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Água de Reúso 01	6,15E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biomassa cultivada	7,15E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica	2,00E-02	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização

Fonte: Autor (2020)

### Processo de Eletroflotação de Biomassa Microalgal

Conforme descrito, a eletroflotação tem a função de reduzir o teor de água da biomassa antes desta ser enviada para a secagem, promovendo-se considerável redução no consumo de energia elétrica bem como recuperação de água para reúso. Nesse sistema, apenas 0,20 kWh de energia são necessários e operação do equipamento é realizada por 10 min em cada batelada.

O sistema experimental utilizado foi exatamente o mesmo constante na rota C2: eletroflotador fabricado em aço e eletrodos em aço inox. Neste equipamento, foi possível concentrar a biomassa em 5 vezes, quantificado em termos de sólidos suspensos totais. A Tabela 4.17 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de eletroflotação de biomassa microalgal, na rota C3.

Tabela 4. 17 Inventário do processo de eletroflotação de biomassa microalgal, na rota C3.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa em pasta	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Água de Reúso 02	4,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biomassa sedimentada	5,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica	2,00E-02	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização

Fonte: Autor (2020)

## Processo de Secagem de Biomassa Microalgal

Conforme os procedimentos da rota C2 descritos, o processo de secagem da biomassa produzida foi realizado em estufa com circulação de ar forçada (1100 W de potência) durante um período de 12 h. O consumo de energia elétrica foi determinado por meio da potência do equipamento pelo tempo de sua utilização, totalizando 13,20 kWh.

A Tabela 4.18 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de secagem de biomassa microalgal, na rota C3.

Tabela 4. 18 Inventário do processo de secagem de biomassa microalgal, na rota C3.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa seca	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biomassa em pasta	5,50E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica	7,63E+00	Electricity, medium voltage (BR)   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Emissões			
Água	4,50E+00	Water	Balanço de massa

Fonte: Autor (2020)

### 4.1.3. Inventário de Ciclo de Vida da Produção de Biomassa Microalgal com a Utilização de Fertilizantes Comerciais – Rota Tecnológica C0

A metodologia convencional de produção de biomassa de microalgas adotada em todo o mundo é com utilização de fertilizantes comerciais. A dosagem de nutrientes é realizada com base na composição da microalga utilizada e a fonte de carbono é o gás carbônico atmosférico, em um cultivo dito autotrófico.

Neste trabalho, conforme abordado, basicamente, três etapas são necessárias para a obtenção da biomassa microalgal seca: o cultivo, concentração e secagem de biomassa. Água nova é utilizada como insumo na primeira batelada do processo e, depois, apenas a recomposição de massa de água (*make up*) é necessária para repor a água evaporada no processo de secagem. A seguir são descritos os inventários associados a cada etapa do processo de obtenção de biomassa da rota tecnológica C0.

### A) Cultivo de Biomassa de Microalgas

Para o cultivo de *Nannochloropsis* sp. foram utilizados nitrogênio fertilizante, potássio ( $K_2O$ ), fósforo ( $P_2O_5$ ) e  $CO_2$  atmosférico, em proporções estequiométricas da composição química da microalga e em condições autotróficas. Não foi utilizada luz artificial para a condução dos experimentos e o cultivo permaneceu por 10 dias, conforme estratégia adotada nas rotas C2 e C3 apresentadas. Houve recirculação de água a partir dos processos de sedimentação e centrifugação para a economia de água do processo. Após os 10 dias de cultivo, acrescentava-se novamente os fertilizantes comerciais (NPK), na proporção estequiométrica mencionada, e água de reposição (perdida no processo de secagem).

O consumo de energia elétrica necessária para o funcionamento do fotobiorreator foi calculado conforme a metodologia adotada nas rotas tecnológicas anteriores, porém, sem a necessidade de recirculação de massa fluida. A eletricidade requerida para que o sistema funcionasse por 30 dias, 12 h/dia foi de 64,8 kWh, com um soprador de ar de 175 W de potência.

A Tabela 4.19 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do

Tabela 4. 19 Inventário do processo de produção de biomassa microalgal, na rota C0.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa Cultivada	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Água nova	9,58E-01	Tap Water, at user {RoW}   Market for   Alloc Def, U	Medição em campo
Água (make up)	2,44E-02	Tap Water, at user {RoW}   Market for   Alloc Def, U	Medição em campo
Nitrogênio	6,88E-04	Nitrogen fertilizer, as N {GLO}   Market for   Alloc Def, U	Calculado conforme composição da microalga
Potássio	8,84E-05	Potassium fertilizer, as K2O {GLO}   Market for   Alloc Def, U	Calculado conforme composição da microalga
Fósforo	2,10E-04	Phosphate fertilizer, as P2O5 {GLO}   Market for   Alloc Def, U	Calculado conforme composição da microalga
Energia elétrica	2,12E-01	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Entradas Conhecidas da Natureza			
$CO_2$ atmosférico	1,64E-02	Carbon Dioxide, in Air	Calculado conforme composição da microalga

Fonte: Autor (2020)

## B) Etapa de Concentração de Biomassa e Recuperação de Água

### Etapa de Sedimentação de Biomassa de Microalgas

Após o cultivo de biomassa, uma etapa de sedimentação faz-se necessária para se retirar parte do volume de água presente e reduzir o consumo de energia elétrica na etapa de centrifugação. O processo consiste em deixar o sistema em repouso, durante 24 h. O volume do decantador foi calculado com base no tempo de detenção hidráulico de 24 h desejado e na vazão afluyente ao equipamento. Ao final do processo, a água sobrenadante é encaminhada de volta para o tanque de cultivo e a biomassa sedimentada é encaminhada para a centrífuga.

A Tabela 4.20 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de sedimentação de biomassa microalgal, na rota C0.

Tabela 4. 20 Inventário do processo de produção de sedimentação de biomassa microalgal, na rota C0.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa sedimentada		Criada pelo Usuário	Medição em campo
Água de recirculação 01		Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biomassa cultivada		Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica		Electricity, medium voltage (BR)   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização

Fonte: Autor (2020)

### Etapa de Centrifugação de Biomassa de Microalgas

Mesmo após remoção de grande volume de água durante o processo de sedimentação, ainda é necessária uma etapa posterior para a remoção máxima de água para a etapa de secagem. O processo industrial comumente empregado para este fim é a centrifugação, em que a concentração de biomassa pode ser cinco vezes maior ao final do processo.

A Tabela 4.21 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de centrifugação de biomassa microalgal, na rota C0. A água recuperada

neste processo retorna para o cultivo de biomassa, enquanto a pasta de microalga é encaminhada para a secagem.

Tabela 4. 21 Inventário do processo de produção de centrifugação de biomassa microalgal, na rota C0.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa centrifugada	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Água de recirculação 02	4,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biomassa sedimentada	5,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica	2,30E-01	Electricity, medium voltage (BR)   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização

Fonte: Autor (2020)

### C) Etapa de Secagem de Biomassa

A secagem é a última etapa do processo. Biomassa centrifugada é enviada para uma estufa com circulação forçada de ar (1100 W de potência), onde permanece por 12 h à 50 °C. Ao final do processo é obtido microalga em pó que pode ser armazenado para utilização futura.

A Tabela 4.22 mostra o inventário com os fluxos de entrada e saída do processo de secagem de biomassa microalgal, na rota C0. Neste processo, foram obtidos 2,55 kg de biomassa a um gasto de energia elétrica de 6,60 kWh.

Tabela 4. 22 Inventário do processo de secagem de biomassa microalgal, na rota C0.

Saídas Conhecidas para a Esfera Tecnológica			
Materiais/Energia	Valor/UR	Simapro	Origem dos dados
Biomassa seca	1,00E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica			
Biomassa centrifugada	3,92E+00	Criada pelo Usuário	Medição em campo
Energia elétrica	2,59E+00	Electricity, medium voltage (BR)   market for   Alloc Def, U	Calculado com base na potência e tempo de utilização
Emissões			
Vapor d'água	2,92E+00	Water	Balanço de massa

Fonte: Autor (2020)

## 4.2. Avaliação de Impacto Ambiental – Caracterização das Rotas Tecnológicas

### 4.2.1. Mudanças Climáticas

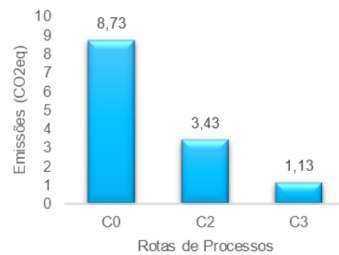
Szulejko *et al.* (2017) afirmam que a preocupação com as mudanças climáticas inevitavelmente transcende as fronteiras nacionais e que se torna obrigatório tomar-se decisões de diminuir as emissões de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo que se deve fomentar o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes energeticamente.

O método de avaliação de impacto ambiental ReCiPe cataloga 95 substâncias responsáveis por mudanças climáticas, em que o fator de caracterização é  $CO_{2eq}$  (com valor arbitrado igual a 1). Nesse método, são exemplos de substâncias responsáveis por mudanças climáticas: metano (fóssil e biogênico), óxido nitroso, dióxido de carbono, CFCs etc. (PRÉ CONSULTANTS, 2014).

A rota de processos C0 apresentou emissões de 8,73 kg  $CO_{2eq}$  por kg de biomassa microalgal seca obtida, enquanto a rota C2 e C3 obtiveram 3,43 e 1,13 kg  $CO_{2eq}$ , respectivamente. Tais diferença entre as emissões de gases de efeito estufa pode ser encontradas no uso intensivo de produtos químicos e energia elétrica, na rota C0, em especial.

O Gráfico 4.2.1 apresenta os valores de emissões obtidos para as três rotas tecnológicas aqui avaliadas. A utilização de efluentes de tratamento dos resíduos do pescado e de esgotos domésticos foi responsável pela redução das emissões em 60,71 % e 87,10 %, nas rotas, C2 e C3, respectivamente.

Gráfico 4.2. 1 Emissões de  $CO_{2eq}$  para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.



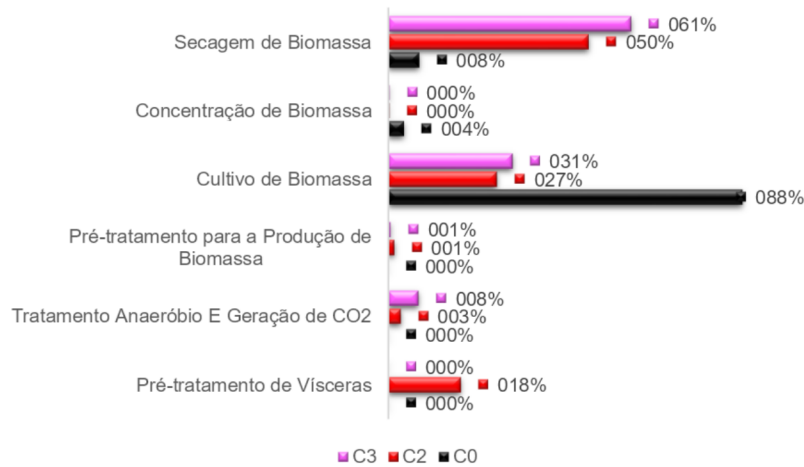
Fonte: Autor (2020)



Nesta categoria de impacto ambiental, pode ser observado que a etapa de cultivo de biomassa microalgal, na rota C0, é a que mais contribui para mudanças climáticas, com percentual de 88,43 %, contra 3,85 % da etapa de concentração (sedimentação + centrifugação) e 7,71 % da etapa de secagem. Por outro lado, a etapa de secagem de biomassa foi a que mais impactou nas rotas C2 e C3, com 50 % e 60,61 %, respectivamente. Ainda pode ser mencionado que nessas rotas, a etapa de cultivo de biomassa contribuiu de forma relevante para esta categoria com participações de 27,12 % e 30,98 %, respectivamente.

O Gráfico 4.2.2 mostra uma comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal para as três rotas avaliadas neste estudo. Observa-se que, na rota C2, as etapas de cultivo e secagem de biomassa respondem por 77,12 % das emissões globais de CO<sub>2eq</sub>, enquanto na rota C3, o percentual é de 91,59 %. Ainda na rota C2, a etapa de pré-tratamento das vísceras (para a produção de CO<sub>2</sub>, por via anaeróbia) contribui de forma importante (18,03 %), sendo a etapa de cocção das vísceras a de maior emissão de CO<sub>2eq</sub>, com 11,67 %.

Gráfico 4.2.2 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Mudanças Climáticas.

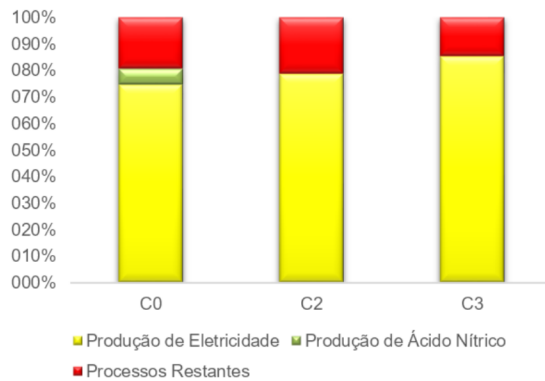


Fonte: Autor (2020)



Conforme o Gráfico 4.2.3, os processos de geração de eletricidade e calor foram, notadamente, os que mais contribuíram para as emissões de CO<sub>2eq</sub>, com 74,78 %, 78,77 % e 85,37 %, para as rotas C0, C2 e C3, respectivamente. Nessa categoria de processos, teve importante peso a utilização de energia da matriz energética brasileira, em especial a hidrelétrica, com participações 38,82 %, 40,90 % e 44,32 %, para as rotas C0, C2 e C3 respectivamente. A diferença entre os percentuais apresentados nas 3 rotas avaliadas pode ser explicada pela maior utilização de produtos químicos na rota C0, que considera, para efeitos de modelagem, o fertilizante NPK como sendo produzido em diferentes regiões do mundo (média global), com maior utilização de energia na indústria de energia produzida por meio de carvão proveniente da China e da Índia.

Gráfico 4.2. 3 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Mudanças Climáticas.



Fonte: Autor (2020)

Na rota C0, ainda podemos mencionar os impactos relativos à produção de químicos utilizados para o cultivo da biomassa (NPK), com 7,0 %, em especial para a produção de ácido nítrico, insumo para a produção de nitrogênio fertilizante. Vale salientar que os bancos de dados do *Ecoinvent* consideram o nitrogênio na forma de fertilizante como um mix de 3 produtos principais: o nitrato de cálcio, nitrato de cálcio e amônia e nitrogênio composto, sendo o ácido nítrico insumo para a produção dos 3 produtos químicos citados e o principal responsável pelas emissões de CO<sub>2eq</sub>, nesta categoria de processos.

Nas rotas, C2 e C3, dada a menor utilização de produtos químicos, a fabricação de produtos químicos processos responderam com contribuições apenas marginais (0,09 e 0,08 %, respectivamente), quando comparadas aos valores de emissões globais de CO<sub>2eq</sub>, conforme pode ser acompanhado no Gráfico 4.2.3.

Quanto à categoria “Processos Restantes”, esta contribui com percentuais de 19,23 %, 21,14 % e 14,54 % para as rotas C0, C2 e C3 respectivamente, na categoria mudanças climáticas. Os processos restantes englobam atividades que contribuem com menos de 1 % de todo o CO<sub>2eq</sub> da respectiva rota de processo considerada.

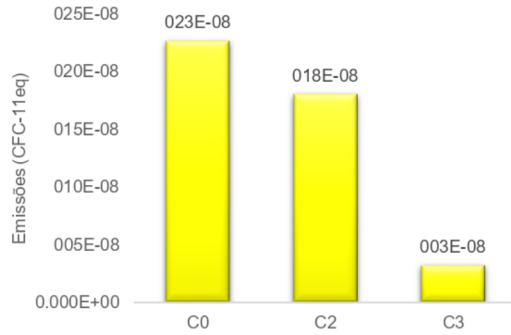
#### **4.2.2. Depleção da Camada de Ozônio**

A camada de ozônio tem a função primordial de proteger a superfície da Terra contra os raios ultravioletas emitidos pelo sol, sendo que 90 % do ozônio encontra-se na estratosfera e os 10 % restantes na troposfera. (ANWAR *et al.*, 2016)

Diversas substâncias oriundas de atividades humanas são responsáveis pela degradação da camada de ozônio, dentre elas podem ser citados, os clorofluorcarbonos (CFC), compostos nitrogenados e bromados etc. O método de avaliação de Impacto ambiental ReCiPe cataloga 25 substâncias responsáveis pela degradação da camada de ozônio, sendo o fator de caracterização o CFC – 11 equivalente (CFC-11eq), com peso igual a 1. Segundo o ReCiPe, o composto que mais contribui para esta categoria de impacto ambiental é o bromotriflúor-metano (Halon 1301), com poder de depleção da camada de ozônio 12 vezes maior que o CFC. (PRÉ CONSULTANTS, 2014)

A rota C0 apresentou emissões de  $2,27 \times 10^{-7}$  kg CFC-11eq / kg de biomassa microalgal seca, valor este superior às emissões provocadas pela rota C2, mesmo esta requerendo maior número de etapas de processamento de materiais. Já comparando-se com a rota C3, houve redução de 7 vezes nas emissões de CFC-11eq uma vez que nenhum processamento além do tratamento anaeróbio foi requerido para o esgoto doméstico. O Gráfico 4.2.4 apresenta o comparativo dos valores obtidos para as emissões de CFC – 11 eq nas 3 rotas de processos aqui avaliadas.

Gráfico 4.2. 4 Emissões de CFC – 11eq para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.



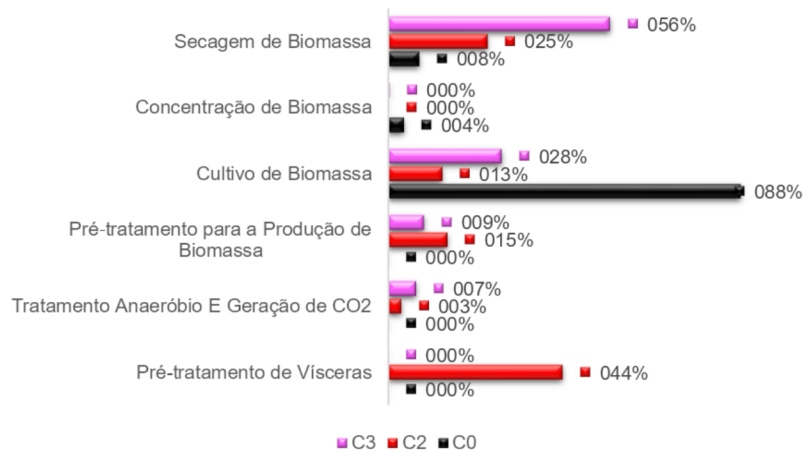
Fonte: Autor (2020)

Quanto à categoria depleção da camada de ozônio, observa-se que a etapa de cultivo sozinha responde por 88,33 % das emissões de CFC-11<sub>eq</sub> de todo o processo de produção de biomassa microalgal, na rota C0. As etapas de concentração e secagem de biomassa respondem por 3,89 e 7,78 %, restantes.

Por outro lado, na rota C2, a etapa de pré-tratamento das vísceras de tilápia apresenta a maior emissão percentual de CFC-11<sub>eq</sub>, com 43,62 %. A etapa de pré-tratamento visa condicionar as vísceras ao tratamento anaeróbio, dessa maneira, um processo de neutralização com soda cáustica comercial faz-se necessário para ajuste do pH do efluente pós-cocção às condições operacionais do reator UASB. Nesse contexto, o processo de neutralização representa 36,51 % das emissões totais de CFC<sub>eq</sub>.

O segundo processo que mais impacta na camada de ozônio na rota C2 é a de secagem, com 24,82 %, o pré-tratamento para o cultivo de biomassa, com 14,76 % e o cultivo, com 13,46 %. Juntas essas etapas respondem por 53,04 % das emissões totais de CFC-11<sub>eq</sub>. O Gráfico 4.2.5 mostra uma comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção da Camada de Ozônio.

Gráfico 4.2.5 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção da Camada de Ozônio.

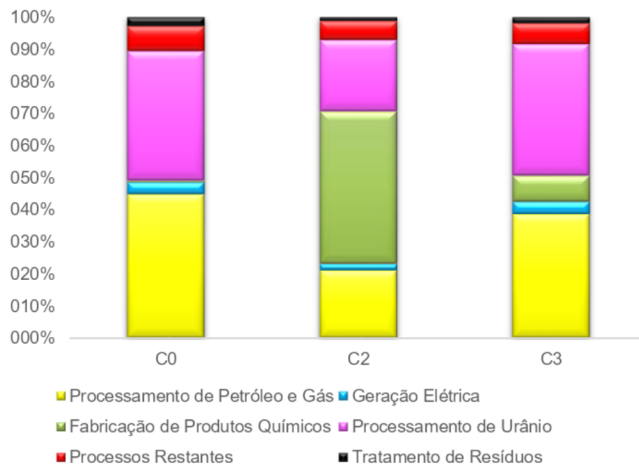


Fonte: Autor (2020)

Para a rota C3, percentualmente, a secagem e o cultivo são as principais etapas de produção de biomassa microalgal seca que impactam a camada de ozônio. Juntas essas duas etapas respondem por 84,01 % do tal de emissões de CFC-11<sub>eq</sub>, enquanto as etapas de pré-tratamento para a produção de biomassa e o tratamento anaeróbio contribuíram com 8,90 % e 6,90 %, respectivamente.

Conforme o Gráfico 4.2.6, na rota C0, a categoria de processos que mais contribui para a depleção da camada de ozônio, com 44,98 %, é o processamento de petróleo e gás, seguido pelos processos de enriquecimento de urânio, com 40,40 % de contribuição. Vale ressaltar que a matriz energética brasileira tem importante parcela de contribuição de energia gerada pela queima de combustíveis fósseis (gás e óleo combustível) e em usina nuclear, processos esses com emissões de importantes quantidades de Halon 1301, fluoreto de hidrogênio, CFC-114 e HCFC-22, para a atmosfera.

Gráfico 4.2. 6 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção da Camada de Ozônio.



Fonte: Autor (2020)

Enquanto a rota de processos C0 apresentou contribuição marginal para a fabricação de produtos químicos (0,44 %), a rota C2 apresentou expressiva contribuição para a depleção da camada de ozônio, com 47,62 %, notadamente, devido à produção de soda cáustica por via eletroquímica (célula de diafragma e tecnologia de membranas), com 35,53 %.

Semelhantemente à rota de processo C0, a rota C3 também apresentou o processamento de petróleo e gás (emissões de Halon - 1301) e os processos de enriquecimento de urânio (emissões de CFC – 114) como processos importantes para a depleção da camada de ozônio com percentuais 38,75 e 40,94 %, respectivamente.

As diferenças expressivas de percentuais entre as rotas C0, C2 e C3 estão no fato de que na rota C3 existe uma maior utilização de processo de enriquecimento de urânio a 4,2 %, enquanto, na rota C2, foi utilizado menos energia proveniente de petróleo e gás *on-shore* (50 % menos) e na rota C0 houve importante contribuição de CFC-11<sub>eq</sub> proveniente da produção de petróleo e gás *onshore*.

Contribuições para as emissões de CFC-11<sub>eq</sub> também foram encontradas no tratamento de resíduos (cobre oriundo de linhas de transmissão de energia), com

2,73 , 1,10 e 1,79 % (C0, C2 e C3, respectivamente) e geração elétrica (via gás de carvão), em termelétricas, com 3,71, 1,92 e 3,84 % (C0, C2 e C3, respectivamente).

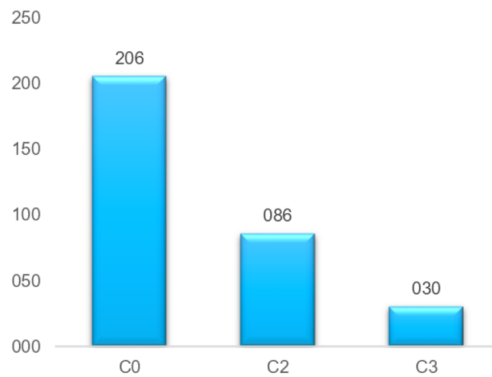
#### 4.2.3. Depleção Hídrica

O problema da escassez hídrica, casado com os desafios do aquecimento global são as maiores questões ambientais da sociedade atual, em especial em um cenário de crescimento populacional e econômico. (GOSLING; ARNELL, 2016). Desde 2009, especialistas em avaliação de ciclo de vida vêm considerando a pegada hídrica como critério de avaliação do desempenho ambiental de produto, incluindo o pensamento da cadeia de suprimento no gerenciamento da água, realizando um elo entre consumo e disponibilidade hídrica (HOEKSTRA, 2016).

Esta é uma questão de preocupação, uma vez que o crescimento populacional mundial, com elevação dos padrões de consumo, expansão de atividade agropecuária e as variações espacial e temporal da disponibilidade hídrica tem feito com que 4 bilhões de pessoas no mundo venham enfrentando escassez de água severa. (MEKONNEN e HOEKSTRA, 2016)

Conforme o Gráfico 4.2.7, a rota C0 foi responsável pela depleção de 205,6 m<sup>3</sup> de água por cada kg de biomassa microalgal seca produzida, enquanto nas rotas C2 e C3 houve consumo de 85,62 e 30,35 m<sup>3</sup>, respectivamente.

Gráfico 4.2. 7 Depleção hídrica para as 3 rotas tecnológicas avaliadas em m<sup>3</sup>.

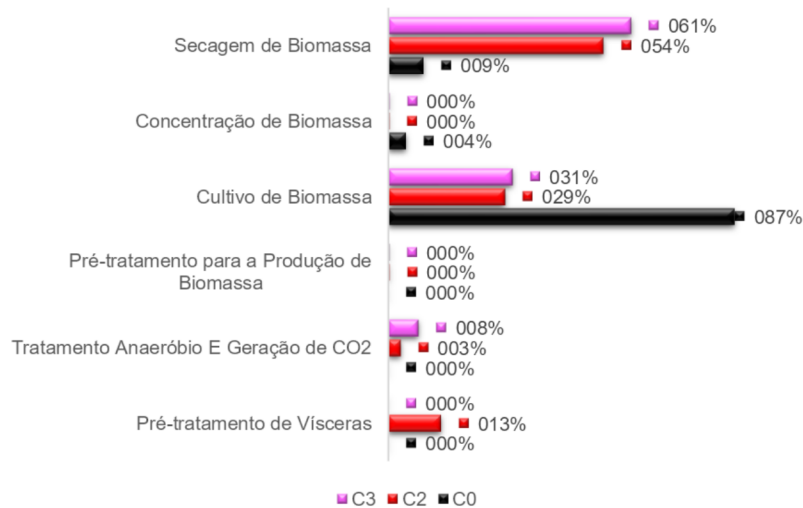


Fonte: Autor (2020)

Para esta categoria de impacto ambiental, a etapa de cultivo de biomassa foi a que mais exerceu pressão sobre os recursos hídricos na rota C0, com 86,79 % de toda a demanda de água para se processar 1 kg de biomassa microalgal seca, dado uso intensivo de produtos químicos e eletricidade para o cultivo de biomassa. O processo de secagem respondeu por 8,81 % da demanda hídrica enquanto as operações de concentração de biomassa contribuíram, nesse sistema, com 4,40 %.

Conforme o Gráfico 4.2.8, por outro lado, nas rotas C2 e C3, a etapa de secagem de biomassa foram as que mais contribuíram para a depleção hídrica, uma vez que não houve a utilização de fertilizantes NPK para o crescimento microalgal. Somadas as etapas de cultivo e secagem, um percentual de 83,15 e 91,94 % são obtidos nas rotas C2 e C3. Ainda com relação à rota C2, 13,17 % da demanda hídrica encontra-se na etapa de pré-tratamento de vísceras de tilápia, sendo 10,0 % para o processo de cocção (onde se demanda bastante energia).

Gráfico 4.2.8 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção Hídrica.



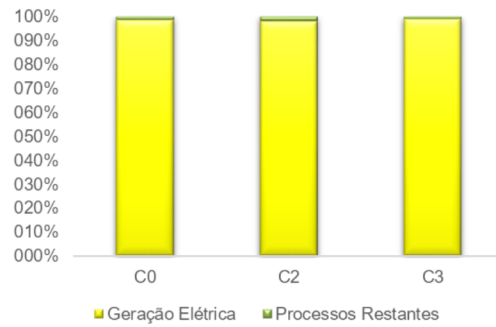
Fonte: Autor (2020)

Nesta categoria de impacto ambiental, indubitavelmente, a geração de energia elétrica é o processo responsável por praticamente toda a depleção hídrica em todas as rotas avaliadas. Esse fato se deve à matriz energética brasileira com

importante contribuição de eletricidade oriunda de hidrelétricas. Os percentuais de contribuição para cada rota foram: 98,80, 98,26 e 99,14 %, para C0, C2 e C3, respectivamente.

O Gráfico 4.2.9 mostra a comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção Hídrica.

Gráfico 4.2. 9 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção Hídrica.



Fonte: Autor (2020)

#### 4.2.4. Depleção Fóssil

O crescimento econômico mundial depende da sustentável exploração de recursos minerais, dessa maneira, a depleção de recursos fósseis torna-se questão importante em um cenário de crescimento econômico e populacional em nível mundial (KLINGLMAIR, SALA e BRANDÃO, 2014).

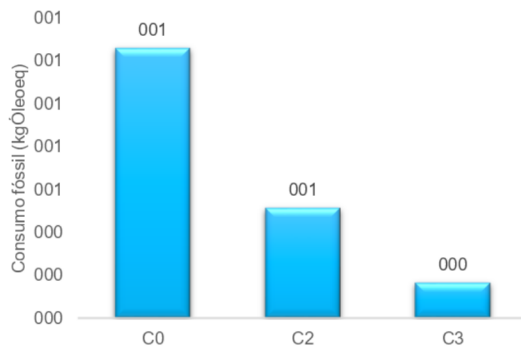
Ao se abordar a questão de recursos fósseis, deve-se lembrar que os principais recursos são exatamente os insumos para a geração de energia (calor e eletricidade): carvão, petróleo e gás. Nesse contexto, a geração de energia limpa torna-se um fator de preocupação global, a partir da premissa da limitação dos recursos fósseis a longo prazo e a emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes, como os particulados e precursores de chuva ácida. (RAMÍREZ-ISLAS, 2020). Diversos países, então, têm proposto regulamentações, programas de pesquisa e incentivos para o desenvolvimento de tecnologias limpas, como eólica, solar e a utilização de resíduos para fins energéticos (FEURTEY, E. *et al.*, 2015).



O método de avaliação de impacto ambiental ReCiPe enumera 34 matérias-primas fósseis, dentre elas o carvão, energia (de diversas origens como óleo, carvão, gás natural etc.), gás natural, metano e óleo cru ( $\text{kgÓleo}_{\text{eq}}$ ), que é o fator de caracterização para esta categoria de impacto (PRÉ CONSULTANTS, 2014).

A rota de produção de biomassa microalgal seca C0 apresentou maior impacto sobre os recursos fósseis, notadamente, pela maior demanda de energia elétrica. No total, para cada 1 kg de biomassa seca obtida, a rota C0 consumiu 1,26  $\text{kg Óleo}_{\text{eq}}$ , contra 0,51 e 0,17  $\text{kg Óleo}_{\text{eq}}$ , das rotas C2 e C3, respectivamente. O Gráfico 4.2.10 apresenta o consumo de recursos fósseis para as 3 rotas de processos aqui avaliadas.

Gráfico 4.2. 10 Consumo de recursos fósseis para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.



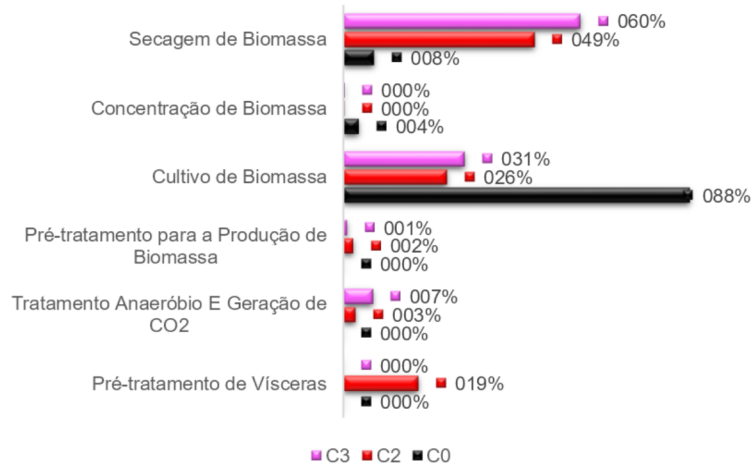
Fonte: Autor (2020)

O Gráfico 4.2.11 exibe uma comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal seca para as rotas C0, C2 e C3 para a categoria depleção fóssil, onde pode ser notado que as etapas que mais contribuem para a depleção de recursos fósseis são o cultivo e a secagem de biomassa nas rotas C2 e C3 e o cultivo de biomassa na rota C0. Pode ainda ser observado que, na rota C2, o pré-tratamento das vísceras responde por 19,08 % da depleção fóssil, em que os processos de neutralização (6,25 %) e cocção (11,06 %) são os mais importantes, dada a utilização de soda cáustica e eletricidade, respectivamente.

Vale ser observado que as etapas de secagem de biomassa (C0), concentração de biomassa (C0, C2 e C3), pré-tratamento para a produção de

biomassa (C0, C2 e C3) e o tratamento anaeróbio (C2) contribuíram de forma mínima para a depleção fóssil. Isso pode ser explicado pela menor utilização de energia elétrica e químicos nessas respectivas etapas de processos.

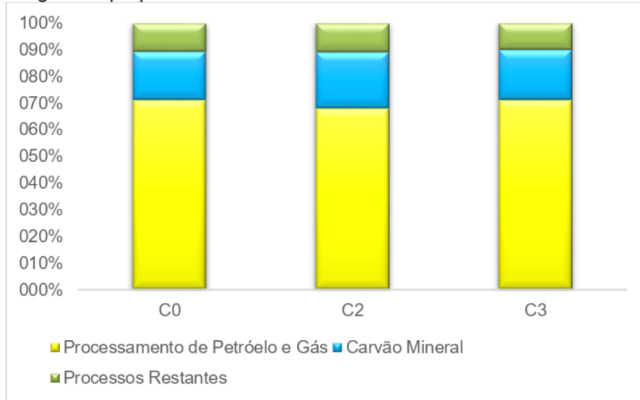
Gráfico 4.2. 11 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção Fóssil.



Fonte: Autor (2020)

Quando investigados os processos que mais impactam na depleção fóssil, pode-se observar que a depleção de recursos fósseis é advinda principalmente da utilização de energia elétrica de origem fóssil: petróleo e gás (71,20, 67,99 e 71,15 %, para C0, C2 e C3, respectivamente) e carvão (18,15, 21,20 e 18,84 %, respectivamente) em diversas regiões do mundo. Isso explica o porquê as etapas de maior consumo de energia elétrica exercerem maior pressão sobre esta categoria de impacto ambiental. O Gráfico 4.2.12 mostra uma comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção Fóssil.

Gráfico 4.2. 12 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Depleção Fóssil.



Fonte: Autor (2020)

#### 4.2.5. Ocupação de Terras Aráveis

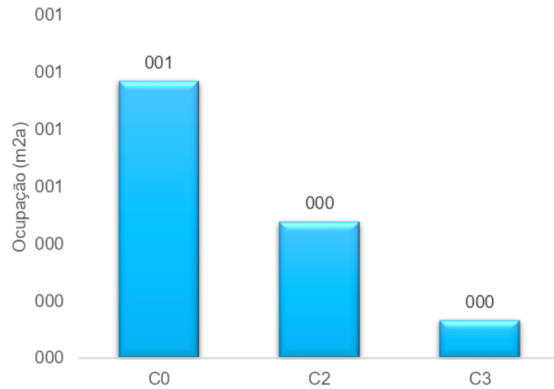
O crescimento populacional e econômico mundial tem provocado a transformação de áreas rurais em áreas urbanas, fenômeno este acontecendo em diversas regiões do mundo, como na África, na Ásia e na América Central (van Vliet; Eitelberg; Verburg, 2017). O fenômeno da urbanização, cada vez mais intenso, compete com a utilização da terra para outros fins como, por exemplo, para agricultura e pecuária (LI et al, 2016; LIU, *et al.*, 2017).

O método de avaliação de impacto ambiental ReCiPe enumera diversas categorias de ocupação de terras aráveis, como por exemplo, ocupação para: extração mineral, florestas (intensiva e extensiva), área industrial, pastagens etc. (PRÉ CONSULTANTS, 2014).

A ocupação de terras aráveis foi mais pronunciada na rota de processo C0 com uma demanda de 0,97 m<sup>2</sup>a, por kg de biomassa microalgal seca produzida, valor este 2 vezes maior que na rota C2 (0,48 m<sup>2</sup>a) e para a rota C3 (0,13 m<sup>2</sup>a).

O Gráfico 4.2.13 apresenta uma comparação entre as demandas por terras aráveis nas três rotas de processos avaliadas. A não utilização de produtos químicos e um menor consumo de energia elétrica foram os responsáveis pela redução de 50 % e 86 % na demanda por terras aráveis nas rotas C2 e C3, respectivamente.

Gráfico 4.2. 13 Ocupação de Terras Aráveis para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.



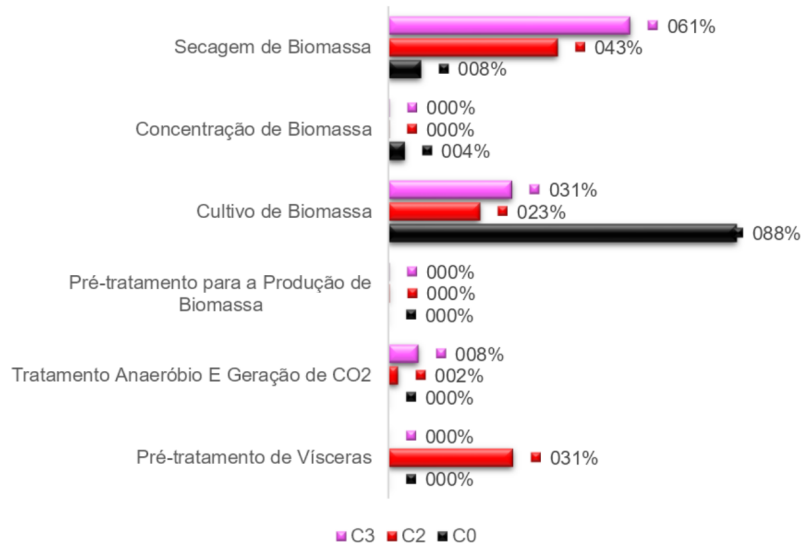
Fonte: Autor (2020)

Para esta categoria de impacto ambiental, a etapa de cultivo de biomassa, na rota C0, é a mais impactante com 95,38 % do impacto total. Por outro lado, as etapas de pré-tratamento das vísceras (31,38 %) e secagem de biomassa (42,55 %) demandam maior percentual de terras aráveis, na rota C2, contra 60,83 % da etapa de secagem e 31,09 % do cultivo de biomassa, na rota C3.

As vísceras de tilápia são submetidas à trituração e à cocção, para que seja possível a recuperação de óleo e gordura, subprodutos de valor comercial. Essas duas etapas são responsáveis por demandarem os maiores percentuais por terras aráveis em todo o processo de pré-tratamento, com 11,04 % e 15,06 %, devido à utilização de energia elétrica.

Conforme apresentado no Gráfico 4.2.14, as etapas de pré-tratamento de vísceras e secagem de biomassa, na rota C2, respondem por 73,93 % de demanda total por terras aráveis. Por outro lado, as etapas de cultivo e secagem contribuem juntas com 91,92 % da demanda total, em C3.

Gráfico 4.2. 14 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Ocupação de Terras Árveis.



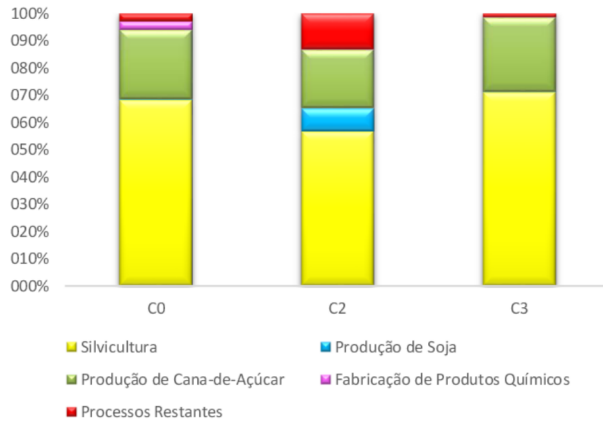
Fonte: Autor (2020)

Diversos processos demandam terras aráveis e dependem de rota para rota de produção de biomassa seca. O Gráfico 4.2.15 apresenta uma comparação entre os diversos processos que demandam terras aráveis, para as 3 rotas estudadas neste trabalho. A atividade de silvicultura é responsável pela maior demanda por terras aráveis nas 3 rotas, respondendo por 68,26 % em C0, 56,76 % em C2 e 71,11 % em C3. A madeira produzida na atividade de silvicultura é utilizada para a construção das instalações industriais de produção de produtos químicos e também seus resíduos são insumos para a produção de eletricidade de alta voltagem e calor, além disso, sabão é produzido a partir de óleo de palma e de coco, nos respectivos cenários.

Foi identificado que o cultivo de cana-de-açúcar também contribui para a ocupação de terras aráveis com percentuais de 25,55, 21,48 e 27,45 %, para C0, C2 e C3, respectivamente. Cana-de-açúcar é utilizada para geração de eletricidade, em especial, para a produção de álcool, que é utilizado, principalmente, como combustível veicular.

Com relação ao cultivo de soja, esta relaciona-se com a produção de sabão, utilizado, principalmente, na rota C2, uma vez que o óleo de soja também é utilizado como insumo neste processo, segundo o banco de dados do *Ecoinvent*. As contribuições do cultivo de soja para a ocupação de terras aráveis foram de 0,20, 8,44 e 0,03 % para as rotas C0, C2 e C3, respectivamente.

Gráfico 4.2. 15 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Ocupação de Terras Aráveis.



Fonte: Autor (2020)

Quanto à fabricação de produtos químicos, apenas contribuições marginais foram detectadas com percentuais de contribuição de 3,12, 0,02 e 0,03 % para as rotas C0, C2 e C3, respectivamente. A maior porcentagem de contribuição em C0, deve-se à utilização de nitrogênio fertilizante oriundo de processos de compostagem, em uma média global.

#### 4.2.6. Formação de Material Particulado

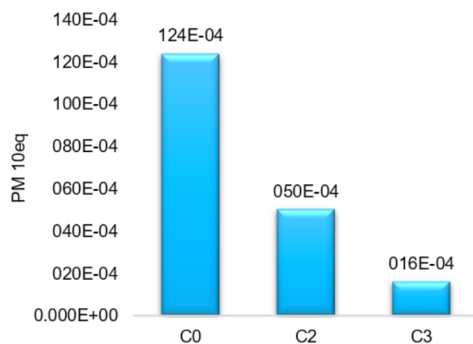
O crescimento exacerbado das grandes cidades, de áreas industriais, da frota de veículos aliado à redução de áreas verdes urbanas (árvores), tem feito com que a qualidade do ar nessas regiões tenha piorado nas últimas décadas. Dentre os

diversos poluentes de presença constante nessas regiões pode ser citado o material particulado de diâmetro não superior a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ). Esse poluente é constituído de partículas sólidas e líquidas que flutam no ar e podem penetrar no sistema respiratório, causando diversos problemas à saúde do indivíduo. O grau de dano à saúde depende da natureza, da composição, da forma das partículas e das condições meteorológicas (MUKHERJEE e AGRAWAL, 2017).

No método ReCiPe para a avaliação de impactos ambientais, diversas substâncias estão catalogadas como material particulado de até 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Dentre essas substâncias podem ser citadas: amônia, óxidos de enxofre e nitrogênio e particulados menores que 2,5  $\mu\text{m}$  (PRÉ CONSULTANTS, 2014).

A formação de material particulado está intimamente relacionada à matriz energética considerada nos inventários e à utilização de insumos cuja produção apresenta emissão de particulados. Neste sentido, a rota C0 apresentou as maiores emissões de material particulado, com  $1,24 \times 10^{-2}$   $\text{PM}_{10\text{eq}}$ , enquanto a rota C3, com  $1,60 \times 10^{-3}$   $\text{PM}_{10\text{eq}}$ , apresentou as menores emissões. A não utilização de produtos químicos e eletricidade foram responsáveis por uma redução de 59,44 e 87,10 %, na formação de material particulado quando comparados à rota C0. O Gráfico 4.2.16 mostra um comparativo para Formação de Material Particulado para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.

Gráfico 4.2. 16 Formação de Material Particulado para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.



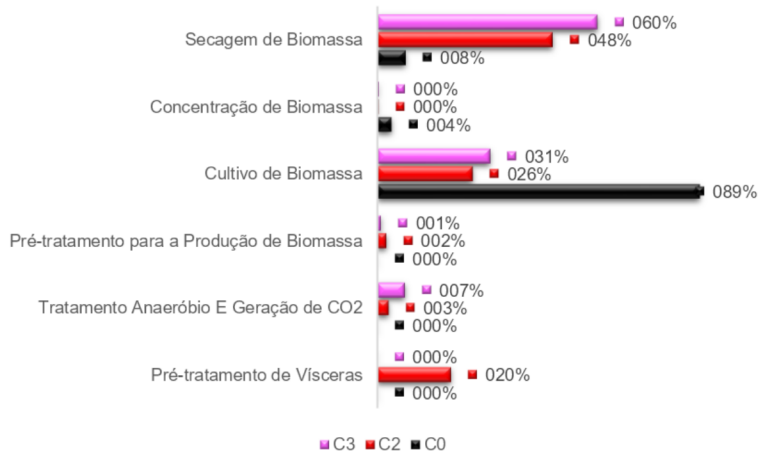
Fonte: Autor (2020)

Conforme o Gráfico 4.2.17, 88,51 % de toda a formação de material particulado encontra-se na etapa de cultivo, na rota C0, enquanto a etapa de secagem de biomassa contribui com 7,66 % e a concentração de biomassa com 3,83 %. Por outro lado, a etapa de secagem é a mais importante para a formação de material particulado, com 48,11 % e 60,41 %, para as rotas, C2 e C3, respectivamente.

Observa-se que na rota C2, as categorias de secagem, cultivo e pré-tratamento das vísceras de tilápia respondem por 94,33 % de todo impacto ambiental formação de material particulado, notadamente, pelo fato de serem estes os processos que mais consomem eletricidade nas fronteiras do sistema. Já na rota C3, as etapas de secagem e cultivo de biomassa respondem por 91,29 %, certamente, por estes processos envolverem maior demanda de energia elétrica, semelhantemente, à rota C2.

Demais processos como concentração de biomassa (C0, C2 e C3) e pré-tratamento para a produção de biomassa (C2 e C3) contribuíram de forma marginal para a formação de material particulado. Deve ser mencionado que no processo de pré-tratamento das vísceras de tilápia dois processos se destacam, a neutralização, com percentual de 6,15 % e a cocção com 11,33 %, perfazendo um total de 17,48 % de toda a formação de material particulado.

Gráfico 4.2. 17 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Material Particulado.



Fonte: Autor (2020)

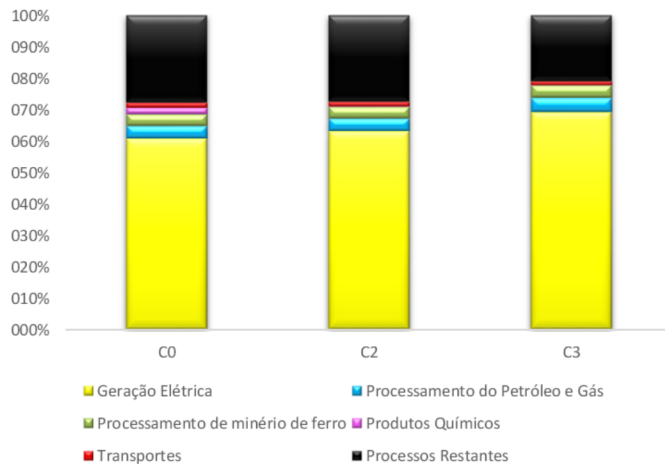


O Gráfico 4.2.18, traz o perfil de contribuição de processos para as rotas C0, C2 e C3 para a categoria formação de material particulado. Observa-se a expressiva contribuição de processos de geração elétrica em todas as rotas tecnológicas de produção de biomassa aqui avaliadas, em especial aquelas originadas da queima de carvão mineral (linhito e antracito) e óleo combustível.

Na rota C0, 60,88 % da formação de material particulado provém da utilização de energia fóssil, enquanto em C2 e C3, esse percentual situa-se em 63,22 % e 69,34 %. Como principais processos de geração elétrica e que são responsáveis por emissões de matéria particulada podem ser citados a queima de carvão (linhito), com percentuais acima de 35 %, e a queima de óleo combustível, com percentuais acima de 15 %, nas 3 rotas de processos avaliadas.

Processos de mineração (ferro utilizado para a construção de rede de distribuição de energia elétrica), transportes (queima de combustíveis fósseis), e processamento de petróleo e de gás natural (com emissões de dióxido de enxofre e compostos orgânicos voláteis (NMVOC)), contribuíram de forma minoritária em todas as rotas de produção de biomassa seca, aqui avaliadas, com percentuais de, respectivamente, 3,60, 1,57 % e 4,05 % para C0; 3,66, 1,49 e 4,06 % para C2 e 3,95, 1,25 e 4,44 % para C3.

Gráfico 4.2. 18 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Material Particulado

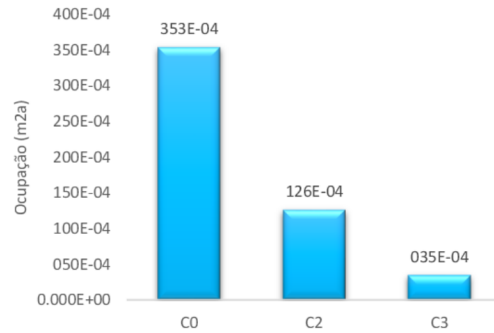


Fonte: Autor (2020)

#### 4.2.7. Ocupação de Áreas Urbanas

Pelo Gráfico 4.2.19, a rota de processo C3, com menor utilização de energia elétrica e de uso de produtos químicos, foi responsável por uma demanda por áreas urbanas 10 vezes menor que a rota C0 e 3,6 vezes menor que a rota C2 ( $1,26 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{a}$ ).

Gráfico 4.2. 19 Ocupação de Áreas Urbanas para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.



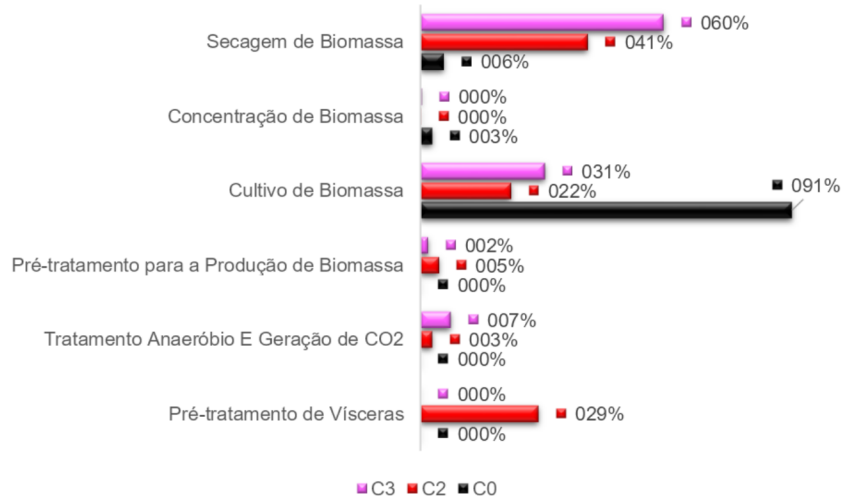
Fonte: Autor (2020)

Nesta categoria de impacto, praticamente toda a demanda por áreas urbanas está concentrada no cultivo de biomassa, na rota C0, com 91,39 % de demanda de área. As operações de concentração e de secagem de biomassa contribuíram de forma mínima para esta categoria de impacto com contribuições de 2,87 e 5,74 %, respectivamente. Por outro lado, na rota C2, 41,10 % da demanda por áreas urbanas estão concentradas na etapa de secagem e, na rota C3, 59,83 %.

Conforme o Gráfico 4.2.20, enquanto, na rota C0, a demanda por áreas urbanas encontra-se concentrada em uma única etapa do processo de obtenção de biomassa microalgal seca, na rota C2, pela necessidade de pré-processamento de vísceras de tilápia, a demanda de área é diluída entre três etapas de processamento: secagem (41,10 %), pré-tratamento de vísceras (29,00 %) e cultivo de biomassa microalgal (22,29 %). Juntas, essas etapas contribuem para a demanda total de áreas urbanas com 92,39 %. Vale salientar que na etapa de pré-tratamento de vísceras de tilápia, as etapas de neutralização (11,77 %) e cocção (11,26 %), contabilizam, juntas, 23,03 % da demanda total, para esta categoria de impacto, notadamente, pelo consumo de produtos químicos e eletricidade, respectivamente.

Demais processos, como concentração de biomassa (C0, C2 e C3), pré-tratamento para a produção de biomassa (C0, C2 e C3) e o tratamento anaeróbio e produção de CO<sub>2</sub> (C0 e C3), contribuíram com percentuais não superiores a 5 % para a demanda de áreas urbanas, nas respectivas rotas estudadas.

Gráfico 4.2. 20 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Ocupação de Áreas Urbanas.



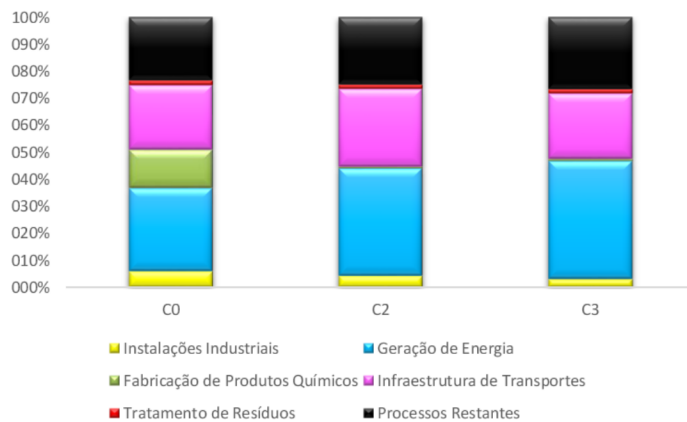
Fonte: Autor (2020)

De acordo com o Gráfico 4.2.21, nota-se que a pressão por áreas urbanas é fortemente influenciada pela demanda de produtos químicos, infraestrutura rodoviária e a matriz energética local. Na rota C0, 30,92 %, as principais demandas por áreas urbanas encontram-se em processos que alimentam a geração elétrica, dentre as quais podemos citar: áreas para a extração de carvão mineral (11,42 %), para silvicultura (14,06 %), em que parte da energia elétrica, a nível mundial, é oriunda da queima de resíduos de madeira e para a irrigação de plantações de cana-de-açúcar (1,22 %), no Brasil. Áreas para construção de rodovias e ferrovias (infraestrutura de transportes) contribuem com percentual importante de 23,95 %, em especial a construção de rodovias. A fabricação de produtos químicos foi responsável por demanda de área de 14,21 %, em especial, para a produção de ácido fosfórico, para a produção de fertilizante fosfato (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Por fim, a área para construção de

instalações industriais para a fabricação de produtos químicos foi responsável por uma demanda de 5,83 % do impacto total.

Para o caso das rotas C2 e C3, a não utilização de fertilizantes NPK como nutrientes faz com que a maior demanda por áreas urbanas seja pela construção de rodovias e ferrovias, 28,89 % e 24,36 %, respectivamente. Dessa demanda total, a maior demanda por áreas urbanas é para a construção de rodovias (em especial na Suíça), 25,33 %, em C2, e 21,73 %, em C3. Outra contribuição importante para estas 2 rotas de produção de biomassa seca é a operação de minas de carvão em diversas regiões do mundo (em especial na China e na Índia) com 17,03 % e 14,76 % para C2 e C3, respectivamente.

Gráfico 4.2. 21 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Ocupação de Áreas Urbanas.



Fonte: Autor (2020)

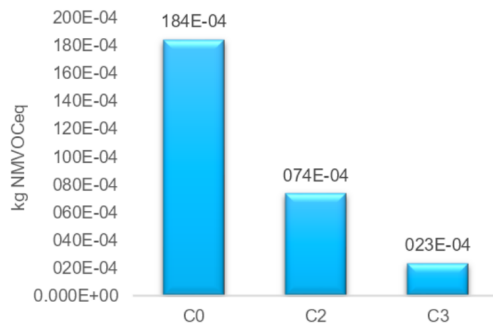
#### 4.2.8. Formação de Oxidantes Fotoquímicos

No método de avaliação de impactos ambientais ReCiPe, 138 substâncias são catalogadas como formadoras de oxidantes fotoquímicos, sendo o fator de caracterização compostos orgânicos voláteis (kg NMVOC). Dentre as substâncias que constam nessa categoria de impacto, podem ser citadas, os óxidos de nitrogênio e de enxofre, metano, monóxido de carbono, acetona, etano etc., sendo o 1,3,5-

trimetilbenzeno o composto de maior contribuição para a formação de oxidantes fotoquímicos.

Seguindo-se o comportamento das categorias de impacto ambiental apresentadas, a rota C0 apresentou maior formação de oxidantes fotoquímicos que as demais rotas tecnológicas de produção de biomassa microalgal seca. Na rota C0 houve a formação de  $1,84 \times 10^{-2}$  kg NMVOCeq por kg de biomassa seca contra  $7,36 \times 10^{-3}$  e  $2,33 \times 10^{-3}$  kg NMVOCeq, em C2 e C3, respectivamente. Houve, portanto, reduções de 2,5 e 3,2 vezes, em C2 e C3, respectivamente, na formação de oxidantes fotoquímicos quando comparados à rota de processo C0. O Gráfico 4.2.22 mostra um comparativo para a Formação de Material Particulado para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.

Gráfico 4.2. 22 Formação de Material Particulado para as 3 rotas tecnológicas avaliadas



Fonte: Autor (2020)

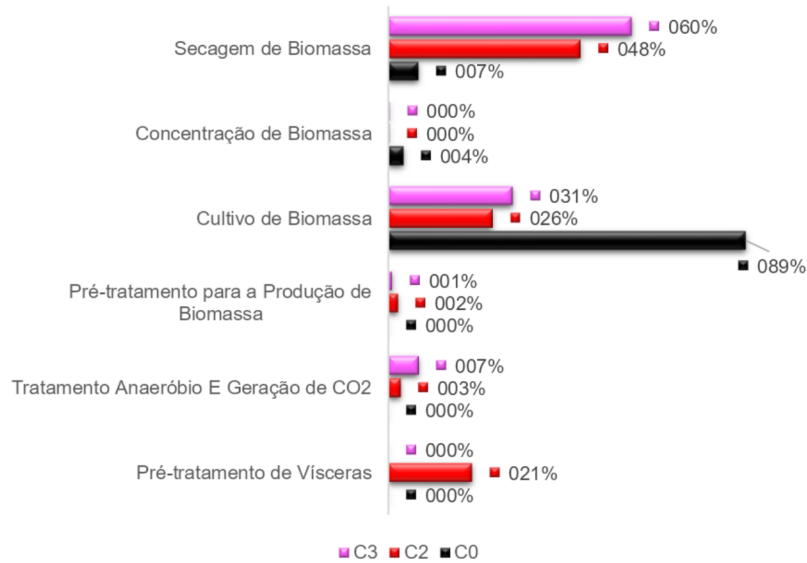
Quanto à formação de oxidantes fotoquímicos, a rota C0 apresentou maior contribuição percentual na etapa de cultivo de biomassa, etapa esta que respondeu por 88,78 % de todo o impacto. Já a etapa de secagem foi a principal responsável pela formação de oxidantes fotoquímicos em C2 e C3, com percentuais de 47,74 % e 60,42 %, respectivamente.

Conforme o Gráfico 4.2.23, pode ser notado que enquanto praticamente toda a formação de oxidantes fotoquímicos está concentrada em uma única etapa do processo de obtenção de biomassa microalgal seca, na rota C0, as etapas de secagem e cultivo de biomassa, nas rotas C2 e C3, são os principais processos contribuintes, somando, juntas, 73,63 % e 91,30 %, respectivamente. Ainda na rota

C2, pode ser citado o processo de pré-tratamento de vísceras de tilápia (com 20,77 %), em especial, a etapa de cocção com 11,49 %, dada ao alta demanda por eletricidade.

Processos como concentração de biomassa (C0, C2 e C3), pré-tratamento para a produção de biomassa (C2 e C3) e tratamento anaeróbio e geração de CO<sub>2</sub> (C2), não ultrapassaram os percentuais de 5 % de contribuição, comparados ao total de cada respectiva rota de processo de produção de biomassa microalgal seca.

Gráfico 4.2. 23 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Oxidantes Fotoquímicos.



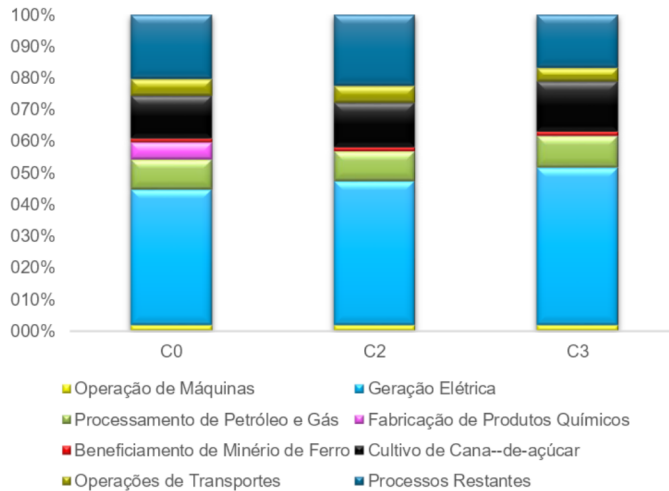
Fonte: Autor (2020)

A formação de oxidantes fotoquímicos está diretamente atrelada a utilização de produtos químicos, à matriz energética local, às atividades de transportes e aos processos e utilização de derivados de petróleo em toda a cadeia de processos do sistema.

Conforme apresentado no Gráfico 4.2.24, a geração elétrica foi a categoria de processos que mais contribuiu para a formação de oxidantes fotoquímicos (com a emissão de diversos compostos orgânicos como, por exemplo, etano, pentano, etc.

óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono etc.) com percentuais de 42,90 % (C0), 45,57 % (C2) e 49,72 % (C3). Vale salientar que a parcela mais importante de contribuição para a formação de oxidantes fotoquímicos é do processo de produção de energia elétrica a partir da queima de óleo combustível, com 16,41, 17,02 e 19,26 %, respectivamente, para C0, C2 e C3.

Gráfico 4.2. 24 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Oxidantes Fotoquímicos.



Fonte: Autor (2020)

As atividades de cultivo de cana-de-açúcar contribuem com percentuais importantes para a formação de oxidantes fotoquímicos (13,62, 14,11 e 15,97 % para C0, C2 e C3, respectivamente) em especial pela emissão para o ar de metano biogênico (cerca de  $2,86 \times 10^{-4}$  kg CH<sub>4</sub> / kg de cana-de-açúcar cultivada) e monóxido de carbono biogênico (cerca de 0,03 kg CO / kg de cana-de-açúcar cultivada).

Processos de refino de petróleo e gás contribuem com percentuais de 9,57, 9,38 e 10,06 %, para, respectivamente, C0, C2 e C3. Esses processos são responsáveis por emissões de diversas substâncias que provocam a formação de oxidante fotoquímicos, como, por exemplo: butano, etano, dióxido de carbono, metano, propano etc.

A fabricação de produtos químicos contribuiu com números relevantes apenas na rota C0 de produção de biomassa microalgal seca, com 5,34 %, notadamente, pela produção de ácido nítrico (insumo para a produção de nitrogênio fertilizante), enquanto esse percentual foi de apenas 0,08 % para as rotas C2 e C3. Durante a produção de ácido nítrico, são emitidos, dentre outras substâncias, óxidos de nitrogênio, cerca de  $4,71 \times 10^{-3}$  kg / kg de  $\text{HNO}_3$  produzido.

Processos de transportes contribuíram de forma semelhante para as 3 rotas tecnológicas avaliadas com porcentagens de 5,18, 5,28 e 4,19 %, para C0, C2 e C3, respectivamente. Devido à queima de combustíveis fósseis, em especial, o diesel, são emitidas para a atmosfera diversos poluentes, como por exemplo, butano, dióxido e monóxido de carbono, etano, metano fóssil etc. todas com potencial de formação de oxidantes fotoquímicos, na atmosfera.

Por fim, o beneficiamento de ferro, para a indústria, em especial, processos de sinterização, são responsáveis pelas discretas emissões de substâncias com potencial de formação de oxidantes fotoquímicos 1,14, 1,18 e 1,28 % para as rotas C0, C2 e C3, respectivamente. Durante o processo de sinterização do ferro, é utilizada bastante energia, na forma de eletricidade e na forma de coque de petróleo, sendo emitidas, então, diversas substâncias como, por exemplo, dióxido e monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio, para a atmosfera.

#### **4.2.9. Radiação Ionizante**

Grande parcela da produção mundial de energia elétrica provém de usinas nucleares. Esse é um fator a ser considerado, dada a importância dos efeitos da radiação ionizante emitida por combustíveis nucleares e, sem dúvidas, pelos acidentes que aconteceram ao longo dos anos em diversas regiões do mundo.

A radiação ionizante apresenta diversos efeitos no meio ambiente, desde a mudança da composição microbiológica local até a ocorrência de anomalias com mais alta frequência, como por exemplo, albinismo parcial, má formação de membros em seres humanos, tumores, estresse oxidativo etc. (NAZIR et al, 2018).

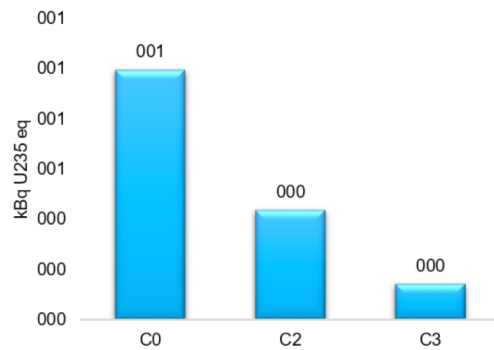
No método de avaliação de impacto ambiental ReCiPe, estão enumerados diversos isótopos radioativos, onde pode-se citar os isótopos de carbono, antimônio, céσιο, cobalto, hidrogênio (trítio), iodo, chumbo, plutônio, urânio, dentre outros. O fator



de caracterização para esta categoria de impacto ambiental é o quilobecquerel (kBq), ou seja, 1000 desintegrações de radionuclídeo por segundo (PRÉ CONSULTANTS, 2014).

Quanto à categoria Radiação Ionizante, a rota de processos C0 foi a responsável pela maior emissão de radiações, dada sua maior demanda por eletricidade e produtos químicos. Enquanto na rota C0 foram emitidas 0,99 kBq U235eq, as rotas de processos C2 e C3 foram responsáveis pela emissão de 0,44 e 0,14 kBq U235eq apenas, respectivamente. O Gráfico 4.2.25 mostra um comparativo entre as Emissões de Radiação Ionizante para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.

Gráfico 4.2. 25 Emissões de Radiação Ionizante para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.



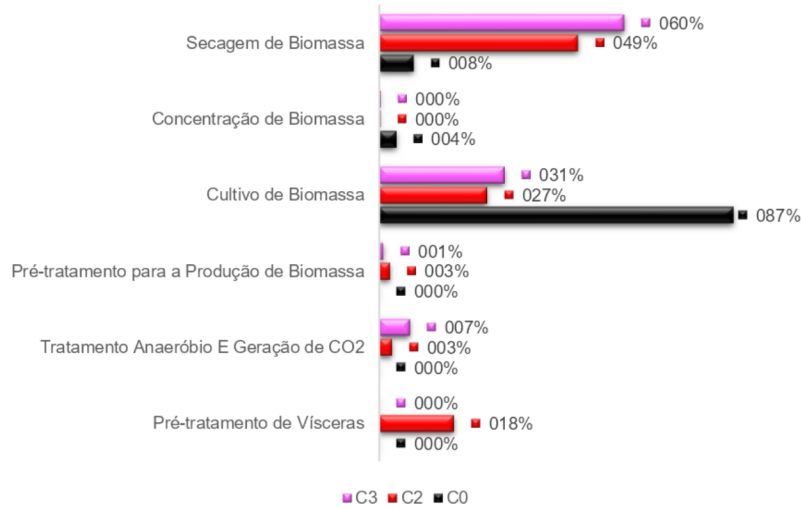
Fonte: Autor (2020)

Processos que emitem radiação ionizante estão relacionados, neste contexto, às atividades de geração elétrica. Neste sentido, as etapas de processos, em todas as rotas, com maior consumo de energia elétrica foram as mais importantes por contribuir com a emissão de radiação ionizante. Na rota C0, 87,35 % de toda emissão de radiação ionizante está concentrada na etapa de cultivo de biomassa microalgal, enquanto 49,05 % estão na etapa de secagem de biomassa, em C2, e 60,38 %, C3.

O Gráfico 4.2.26, ilustra uma comparação percentual entre as etapas das 3 rotas de processos por este estudo avaliadas. Observa-se que as etapas de cultivo e secagem de biomassa figuram como as mais importantes em relação à emissão de radiação ionizante, nas rotas C2 e C3. Juntas essas etapas somam 75,65 %, na rota C2, e 91,24 % em C3.

Outra etapa importante no processo de produção de biomassa microalgal, na rota C2, é da de pré-tratamento da biomassa, pela alta demanda de energia na etapa de cocção e de uso de soda cáustica na etapa de neutralização. Esses dois processos juntos respondem por 17,29 % de toda radiação ionizante, da rota C2.

Gráfico 4.2. 26 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Radiação Ionizante



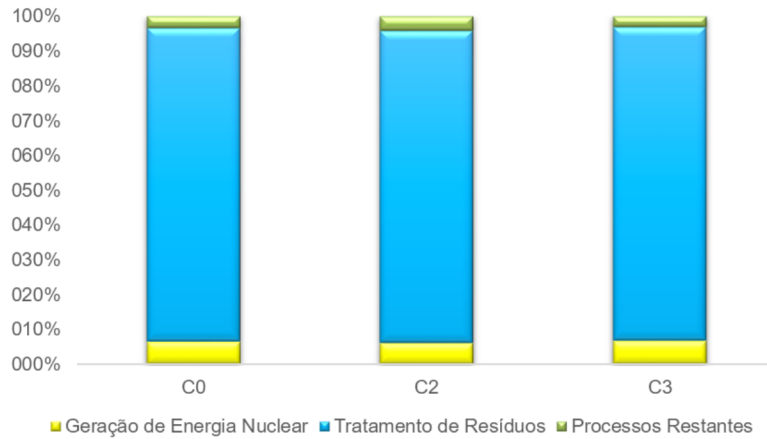
Fonte: Autor (2020)

De acordo com o Gráfico 4.2.27, o principal processo que contribui para emissão de radiação ionizante é o tratamento de resíduos nucleares com percentuais de 90,16 (C0), 89,79 % (C2) e 90,26 % (C3). Nesse contexto, o tratamento dos resíduos gerados durante a moagem do urânio constitui a principal contribuição para a emissão de radiação ionizante, nas 3 rotas de processos aqui avaliadas, com percentuais de 71,85 % (C0), 72,49 % (C2) e 72,83 % (C3), em uma média global. Outros processos de tratamento de resíduos que podem ser citados são: o tratamento de resíduos de baixa emissão radioativa, na Suíça, com 11,17, 10,08 e 10,20 %, para C0, C2 e C3, respectivamente; e o tratamento de combustível nuclear gasto, responsável por 7,14, 7,22 e 7,23 %, em diversas regiões do mundo, para C0, C2 e C3, respectivamente.

Durante o tratamento dos resíduos, diversos radionuclídeos são emitidos para o meio ambiente, onde podemos citar:

- Para o ar: carbono 14; radônio 222; iodo 129; partículas  $\alpha$ ; cádmio etc.
- Para a água: tório 230; urânio 234; urânio 235; urânio 238; rádio 226; célio 137; trítio etc.

Gráfico 4.2. 27 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Formação de Radiação Ionizante.



Fonte: Autor (2020)

A produção de energia elétrica nuclear, via tecnologia de reator d'água em alta pressão, também contribuiu com a emissão de radiação ionizante com percentuais de 6,45, 6,09 e 6,70 % para as rotas C0, C2 e C3, respectivamente.

#### 4.2.10. Acidificação Terrestre

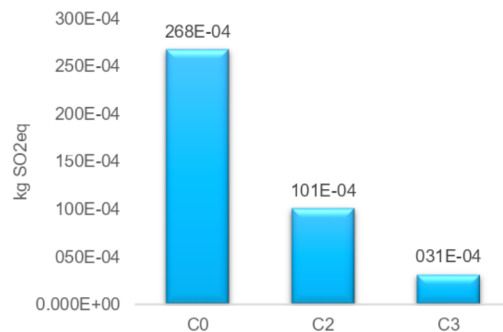
A acidificação terrestre acontece devido a deposição de constituintes ácidos (precursores ácidos) que impactam na superfície da terra como a chuva, neve, particulados, gases e vapor. Hoje, sabe-se que a emissão para a atmosfera de precursores ácidos como os óxidos de enxofre e de nitrogênio, provenientes de atividades humanas (como geração de energia em termelétricas por meio da queima de carvão), favorece a formação de chuva ácida, sendo responsável por diversos

problemas ambientais e econômicos como a acidificação do solo, a deterioração da biota, a corrosão etc. (BURNS et al., 2016; DU et al., 2017; LAWRENCE et al., 2015).

O método de avaliação de impacto ambiental ReCiPe engloba uma classe de compostos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e a amônia ( $\text{NH}_3$ ). O fator de caracterização adotado nesta categoria de impacto ambiental é o  $\text{kg SO}_{2\text{eq}}$  e a substância com maior potencial para a formação de chuva ácida é a amônia (potencial duas vezes maior que os óxidos de enxofre) (PRÉ CONSULTANTS, 2014).

Neste estudo, a produção de 1 kg de biomassa seca pela rota C0 foi responsável pela emissão de  $2,68 \times 10^{-2}$  kg  $\text{SO}_{2\text{eq}}$ , valor este 2,7 e 8,6 vezes maior que as emissões liberadas na rota C2 e C3, respectivamente. O Gráfico 4.2.28 mostra um comparativo entre as Emissões de  $\text{SO}_{2\text{eq}}$  para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.

Gráfico 4.2. 28 Emissões de  $\text{SO}_{2\text{eq}}$  para as 3 rotas tecnológicas avaliadas.



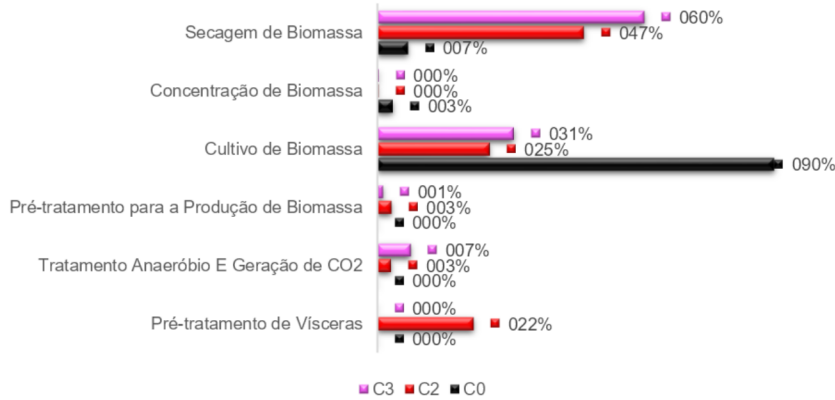
Fonte: Autor (2020)

De acordo com o Gráfico 4.2.29, semelhantemente às demais categorias de impacto ambiental, a etapa de cultivo de biomassa detém praticamente todo percentual de contribuição para a acidificação terrestre, na rota de processos C0, enquanto as etapas de secagem dividem os percentuais de maiores contribuições com a etapa de cultivo nas rotas C2 e C3. Enquanto o processo C0 concentra 89,66 % do  $\text{SO}_{2\text{eq}}$  emitido por esta rota na etapa de cultivo, as etapas de secagem e cultivo de biomassa juntas somam 71,93 % e 91,03 % dos impactos nas rotas C2 e C3, respectivamente. Ainda com relação ao processo C2, os processos que compõem o pré-tratamento das vísceras (armazenamento, trituração, cocção e neutralização) somam juntas 21,66 % de contribuição para todo  $\text{SO}_{2\text{eq}}$  emitido, sendo as etapas de

coçção (11,02 %) e neutralização (7,07 %) as mais importantes, dadas a alta demanda de energia elétrica e soda cáustica, respectivamente.

Na rota C0, as etapas de concentração e secagem de biomassa somaram juntas 3,45 % apenas, enquanto as etapas de concentração, pré-tratamento para a produção de biomassa e tratamento anaeróbio contribuíram com apenas 6,41 % e 8,97 %, para as rotas C2 e C3, respectivamente.

Gráfico 4.2. 29 Comparação entre as etapas de produção de biomassa microalgal nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Acidificação Terrestre.



Fonte: Autor (2020)

De acordo com o Gráfico 4.2.30, os processos que contribuem para a emissão de  $SO_{2eq}$  estão intimamente ligados à geração elétrica e à fabricação de produtos químicos. Nesse contexto, processos de geração de energia elétrica contribuem de forma significativa com percentuais de 50,12 % (C0), 57,83 % (C2) e 62,32 % (C3) para acidificação terrestre. Diversos processos de geração elétrica emitem para a atmosfera substâncias com potencial para acidificação terrestre, dentre os quais podem ser citados: queima de carvão (linhito e antracito) e de gás natural e de resíduos de madeira. Porém, destaque especial é dado à geração elétrica oriunda da queima de óleo combustível que representa 50 % de todas as emissões de substâncias. Em todos esses processos, há emissões de dióxido e monóxido de carbono e de óxidos de enxofre e de nitrogênio.

O processamento de gás natural, utilizado em processos de geração de calor e eletricidade, contribuiu com percentuais importantes nas rotas C2 e C3, com 9,25 % e 9,74%, respectivamente, enquanto na rota C0, 8,50 % em uma média global.

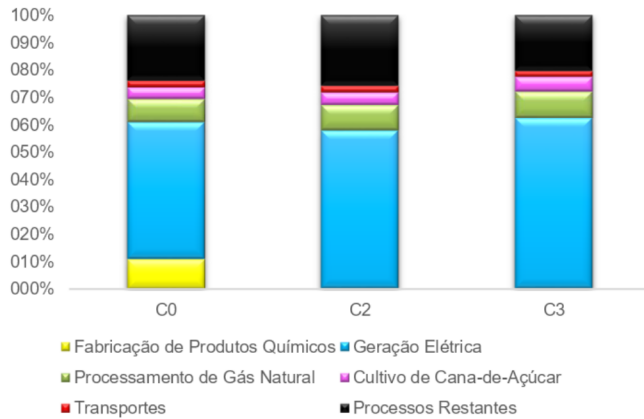
A fabricação de produtos químicos teve contribuição importante apenas na rota C0, com percentual de 10,94 %, com impactos diluídos entre a produção de nitrogênio fertilizante (2,51 %), ácido nítrico (6,84 %) e amônia (1,59 %). O ácido nítrico e a amônia são insumos para a produção de fertilizante nitrogenado, em especial, para o nitrato de cálcio e o nitrato de cálcio e amônia, sendo que, em todos esses processos, existe emissão de óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre (no caso da produção de amônia, apenas) e amônia (substância com maior potencial para acidificação terrestre).

Para o caso do cultivo de cana-de-açúcar, existem emissões de amônia ( $2,49 \times 10^{-4}$  kgNH<sub>3</sub> / kg cana de açúcar cultivada) e óxidos de nitrogênio ( $4,42 \times 10^{-6}$  kgNO<sub>x</sub> / kg cana de açúcar cultivada). Os percentuais de contribuição do processo de cultivo de cana-de-açúcar são de 4,17 %, 4,58 e 5,29 % para as rotas C0, C2 e C3, respectivamente.

Operações de transportes de materiais entre diversas regiões via navios transoceânicos também foi responsável por uma parcela de contribuição para a acidificação terrestre. Os percentuais foram de 2,34, 2,38 e 2,06 % para as rotas C0, C2 e C3, respectivamente.

Combustíveis de navios são reconhecidamente óleos de menor qualidade, oriundos do refino de petróleo. Tais óleos são originados da etapa de destilação, destilação à vácuo (com teor de enxofre podendo chegar a 2,5 %) e desasfaltação. Esses óleos não são submetidos a etapas posteriores do refino dos derivados do petróleo como, por exemplo, o craqueamento térmico, o craqueamento catalítico, dessulfurização, desnitração e desmetalização, apresentando maior teor de contaminantes como enxofre, nitrogênio e metais pesados, não sendo possível sua utilização em carros comuns. Todavia, tais óleos possuem elevado poder calorífico, sendo aproveitado como combustíveis industriais e de navios. (ÍNDIO, 2014). Dessa maneira, existem diversas substâncias com potencial para acidificação terrestre que podem ser emitidas para a atmosfera, a saber: amônia e óxidos de nitrogênio e enxofre, a partir da queima de combustíveis fósseis.

Gráfico 4.2. 30 Comparação entre as contribuições de processos nas rotas C0, C2 e C3, para a categoria Acidificação Terrestre.



Fonte: Autor (2020)

Geralmente, os processos de obtenção de biomassa microalgal envolvem as etapas de lavagem e desinfecção de equipamentos, preparação dos meios de cultivo, cultivo, concentração e secagem de biomassa. A etapa de desinfecção pode ser realizada com autoclavagem ou adição de produtos químicos, de acordo com a utilização futura da biomassa microalgal (microalgas cultivadas para fins nutracêuticos exigem rigoroso cuidado com a desinfecção, enquanto as destinadas para a produção de biocombustíveis, apenas a lavagem dos equipamentos faz-se necessária). Já, a etapa de cultivo pode ser realizada em uma ou duas etapas, conforme o componente a ser extraído. Assim, o cultivo de biomassa para a extração de compostos de alto valor agregado (proteínas, pigmentos, ácidos graxos poli-insaturados) pode envolver uma etapa estresse, para que se possa obter maior concentração daqueles compostos de interesse. Por fim, a etapa de concentração (colheita) da biomassa pode ser realizada por meio de diversas tecnologias como a sedimentação natural, a floculação ou flotação (com a adição de produtos químicos) e/ou centrifugação. Diversos estudos vêm apontando, recentemente, a eficiência da eletroflotação como um método eficiente para a pré-concentração de biomassa microalgal para posterior centrifugação ou mesmo secagem.

De acordo com o propósito da microalga cultivada, a etapa de secagem é dispensável, como é o caso de biomassa utilizada para a extração de lipídios para a

produção de biodiesel, que é realizada com solventes, sendo o processo feito com a biomassa úmida. No mais, pode ser enfatizado que o consumo de energia elétrica na etapa de secagem aumenta com o maior teor de umidade microalgal obtida na etapa de colheita da biomassa.

Estudos recentes também vêm relatando a promissora utilização de efluentes domésticos e industriais como meios de cultivo na obtenção de biomassa microalgal, notadamente, para a produção de biocombustíveis. Nesse sentido, a etapa de produção de meio de cultivo faz-se desnecessária, uma vez que todos os nutrientes provêm do efluente líquido.

Nesse contexto, diversas configurações de processos são possíveis para a obtenção de biomassa microalgal, dependendo da fonte de nutrientes, das estratégias de cultivo (aberto ou fechado, em *raceways* ou fotobiorreatores, com ou sem iluminação artificial), do propósito da microalga cultivada etc. Assim sendo, impactos ambientais diversos são possíveis, conforme as diversas possibilidades de tecnologias disponíveis.

Neste trabalho, 3 rotas diferentes de produção de biomassa foram estudadas, com estratégias de produção microalgal diferentes, do ponto de vista da obtenção de nutrientes e necessidade ou não de pré-tratamento da matéria-prima.

A Tabela 4.23 resume os processos que mais impactaram em cada categoria de impacto ambiental por cada rota de processos de produção de biomassa microalgal seca. Pode ser observado que a geração elétrica é a categoria de processos que mais impacta o meio ambiente, em 6 das 10 categorias de impacto ambiental avaliadas neste trabalho.



Tabela 4. 23 Processos que mais impactaram em cada categoria de impacto ambiental por cada rota de processos de produção de biomassa microalgal seca.

Categorias de Impacto Ambiental	Geração Elétrica			Produtos Químicos			Processam Petr. E Gás			Proc. De Urânio			Tratament de Resid.			Silvicultura		
	C0	C2	C3	C0	C2	C3	C0	C2	C3	C0	C2	C3	C0	C2	C3	C0	C2	C3
Mudanças Climáticas	■	■	■															
Depl. Da Cam. De Ozônio				■						■								
Depleção Hídrica	■	■	■															
Depleção Fóssil							■	■	■									
Ocupação de Terras Aráveis																■	■	■
Form. Mat. Particul.	■	■	■															
Ocupação Áreas Urbanas	■	■	■															
For. de Oxidantes Fotoquímicos	■	■	■															
Radiação Ionizante													■	■	■			
Acidificação Terrestre	■	■	■															

Fonte: Autor (2020)

Isso se deve ao fato da utilização intensiva de produtos químicos (principalmente na rota C0) e da utilização de energia de origem fóssil (petróleo, gás natural e carvão mineral), de acordo com os trabalhos de Lopes (2018).

Também pode-se afirmar que as etapas de obtenção de biomassa microalgal seca que mais contribuíram para as diversas categorias de impactos ambientais foram exatamente as que demandaram maiores valores de eletricidade ou uso de produtos químicos. Dessa maneira, o cultivo e secagem de biomassa foram as etapas de processos chave para que se possa diminuir os impactos ambientais globais do processo de obtenção de biomassa microalgal seca.

Nesse contexto, diversos autores desenvolveram estudos de avaliação de ciclo de vida da produção de biomassa microalgal ou da produção de biodiesel de óleo de microalgas, no sentido de se avaliar os *hotspots* da produção de biomassa e tentar entender as influências do número e do tipo de processos (métodos de cultivo, colheita, secagem, extração de componentes etc.) nos impactos ambientais.

Ye *et al.* (2018) realizaram ACV da produção de tabletes de *spirulina* em escala industrial. No processo por eles modelado, a microalga era cultivada em meio de cultura sintético (uma vez que a microalga era pra fins nutracêuticos), em *raceways* de ambiente fechado, coletada por meio de filtração e seca por meio de secadores do tipo *spray dryers*. Foi observado que a utilização de eletricidade de origem fóssil foi a maior responsável pelas emissões de poluentes, em todas as categorias de impacto ambiental por eles avaliados.

López *et al.* (2014) realizaram ACV da produção do carotenoide vermelho astaxantina de microalga em escala de laboratório e em escala piloto. As etapas de processos por eles avaliados foram: preparação dos meios de cultivo (macro e micronutrientes), esterilização do fotobiorreator do tipo *airlift*, cultivo, centrifugação e secagem (*spray dryers*) e a extração do carotenoide. Os autores relataram contribuições para impactos ambientais oriundas da utilização de eletricidade e de produtos químicos em todas as categorias de impactos ambientais por eles avaliadas, tanto para a escala de laboratório como para a escala piloto.

Schneider *et al.* (2018) também realizaram ACV da produção de microalga. Porém, a técnica de cultivo foi em *raceway* utilizando-se esgotos domésticos como

fonte de nutrientes. Em seus estudos, foram avaliadas diversas estratégias para o cultivo (aeração por airlift ou pás giratórias), para a colheita da biomassa (eletrofloculação, coagulação, filtração ou centrifugação) e secagem (forno ou sol). Novamente, os resultados apontaram maiores impactos nas etapas onde eram utilizados quantidade superiores de produtos químicos e eletricidade e que as técnicas de aeração utilizada por eles não apresentaram diferenças significativas entre si, apesar de terem contribuído em todas as categorias de impacto ambiental avaliados por eles.

Kumar *et al.* (2018) realizaram uma ACV avaliando a demanda de energia primária e a eficiência de captura de CO<sub>2</sub> em cultivos em raceway e fotobiorreator do tipo airlift. Foi encontrado que o fotobiorreator do tipo airlift demandou 3 vezes mais energia primária e que para se obter sequestro de CO<sub>2</sub> superior às emissões globais do sistema deveria se aumentar a produtividade em biomassa em 7 vezes, evidenciando a prerrogativa de que as estratégias e as tecnologias envolvidas no cultivo de biomassa interferem de forma decisiva para maiores ou menores impactos ambientais.

Neste trabalho, as etapas de produção de biomassa microalgal seca contaram com pré-tratamento para a obtenção de efluente para cultivo de biomassa (rota C2, apenas), cultivo em fertilizantes do tipo NPK (rota C0) ou em efluentes (rotas C2 e C3) em fotobiorreator do tipo placa, colheita de biomassa (centrifugação em C0, sedimentação e eletroflotação, em C2 e C3) e secagem (em estufa com circulação interna de ar, em todas as rotas avaliadas).

Observa-se que processos que demandam energia elétrica em maior intensidade são responsáveis por maiores impactos ambientais. Dessa maneira, as etapas de cultivo e secagem de biomassa sempre estiveram entre as principais etapas de processos em emissões de poluentes.

Quanto à etapa de cultivo de biomassa realizada em fotobiorreator do tipo placa plana, este sistema demanda bastante energia para seu funcionamento, em especial para que se possa promover a recirculação interna da massa fluida e para a aeração do sistema. Conforme Adesanya *et al.* (2014) afirmam, fotobiorreatores devem ser dotados de sistemas de trocas gasosas para que altas concentrações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> não sejam atingidos no meio. Dessa maneira, um sistema de recirculação

deve funcionar durante 12 h por dia, momento em que o processo fotossintético ocorre. Cerca de 80 % de toda a energia gasta no processo de cultivo é destinado ao sistema de recirculação, no sistema avaliado neste trabalho.

Com relação ao tratamento anaeróbio, este foi realizado em reator do tipo UASB, com tempo de detenção hidráulica de 2,5 dias, certamente, tempo muito superior aos praticados por projetistas de estação de tratamento de esgotos. Isso se deve ao fato de que o substrato oriundo do processo de cocção ser rico em proteínas, vindo a formar amônia (livre ou na forma iônica), em meio anaeróbio, inibindo a etapa de metanogênese da digestão anaeróbia. Como resultado, baixas cargas orgânicas volumétricas (altos tempos de detenção hidráulica) devem ser aplicadas ao reator, conferindo-se, assim, baixa produção de biogás (CHAU e DAI, 2018; CHOWDHURY *et al.*, 2018). Conseqüentemente, menor energia elétrica pode ser recuperada no processo de combustão do biometano. De fato, apenas 2,35 kWh foram calculados para a obtenção de energia elétrica oriunda de biogás, não suprimindo, portanto, as necessidades energéticas do sistema, contrastando com os trabalhos de Collet *et al.* (2011) que obtiveram biogás a partir de microalgas para suprimento das necessidades de eletricidade da planta química avaliada por eles.

Um outro fator importante é a utilização de fertilizantes comerciais para fabricação do meio de cultivo para crescimento microalgal. Foi relatado por este estudo que, na rota C0, existiu importante contribuição em diversas categorias de impacto ambiental devido à fabricação de produtos químicos, em especial, à produção de nitrogênio fertilizante. Por outro lado, nas rotas C2 e C3, a utilização de efluentes foi responsável por importante redução na emissão de poluentes, em todas as categorias de impactos ambientais, concordando com diversos trabalhos similares (ARASHIRO, *et al.* 2018; CHOWDHURY e FREIRE, 2015; COLLET *et al.*, 2015) Assim, os impactos ambientais relativos ao uso de produtos químicos se restringiram à demanda de soda cáustica e de sabão, como agente neutralizante e de limpeza, respectivamente, em todo o sistema.

Deves ser mencionado que o cultivo de biomassa microalgal em efluentes, apesar de ser promissor para redução de impactos e custos operacionais, não apresenta a mesma produtividade em massa que cultivos em meios de cultura convencionais, devido, em especial, à maior turbidez da massa líquida. Foi relatado

por Almeida (2016) que a produtividade em massa de cultivos em efluentes foram até 3 vezes menores que em meios de cultura convencionais.

Neste trabalho, as rotas C2 e C3, apresentaram concentrações de biomassa consideravelmente inferiores ao cultivo em fertilizantes comerciais. Isso pode ser explicado pelo fato de que o sistema de cultivo utilizado não possuir automação. Sistemas de alta produtividade em biomassa são dotados de sensores para gases ( $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ ), pH, temperatura e nutrientes com o objetivo de manter todas as condições operacionais o mais próximo possível dos valores ótimos previstos em projeto.

## 5. CONCLUSÕES

Os processos mais impactantes durante a produção de biomassa microalgal seca foram a secagem e o cultivo, em todas as categorias de impacto avaliadas.

A utilização de efluentes do processamento de tilápia do Nilo e esgotos domésticos pré-tratados para a produção de biomassa microalgal reduziram as emissões em todas as categorias de impactos. Por possuir menos unidades de processos e utilização de produtos químicos, a utilização de esgotos domésticos se mostrou a de menor impacto ambiental em todas as rotas.

O estudo de ACV revelou que os impactos ambientais estudados estão relacionados com a matriz energética utilizada, indicando que, para a redução dos impactos ao meio ambiente, deve-se adotar matriz energética não fóssil em todas as unidades de processos.

A operação de planta piloto mostrou baixo rendimento em produção de biomassa microalgal (em termos de massa de microalga seca obtida por energia elétrica requerida) nas rotas C2 e C3 (em relação à rota C0) e alta demanda de energia nas etapas de cultivo e secagem. Uma estratégia a ser estudada é otimização da operação do fotobiorreator de placa plana (para que menos energia seja demandada na operação de recirculação interna do reator) e aumentar a produtividade de biomassa do sistema.

No sistema anaeróbio, elevada demanda de energia é requerida para em relação a sistemas de escala comercial. O processo poderia ser otimizado ao se promover a remoção de parte das proteínas na unidade de pré-tratamento de vísceras de tilápia. Também demonstrou-se que somente o biogás produzido pelo reator anaeróbio não supriu as necessidades de energia elétrica requeridas na planta piloto e nem de gás carbônico (via queima de biogás) necessária para o cultivo da biomassa microalgal.

## REFERÊNCIAS

- ADECE- Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará. Disponível em <http://www.adece.ce.gov.br/>. Acesso em 30 de novembro de 2018.
- ADESANYA, V. O. Life cycle assessment on microalgal biodiesel production using a hybrid cultivation system. **Bioresource Technology**, v. 163, p. 343–355, 2014.
- ALMEIDA, H. G. Aproveitamento de efluentes na produção de biomassa algal: produtividade e remoção de nutrientes. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2016.
- ALZATE, C. A. C. Fermentation, thermochemical and catalytic processes in the transformation of biomass through efficient biorefineries. **Catalysis Today**, v. 302, p. 61–72, 2018.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. **Resolução ANP Nº 685**, DE 29.6.2017 - DOU 30.6.2017
- ANWAR, F. Causes of Ozone Layer Depletion and Its Effects on Human: Review. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 6, p. 129-134, 2016.
- APHA, American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th ed. Washington DC, 2005.
- ARASHIRO, L. T. *et al.* Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. **Science of the Total Environment**, v. 622–623, p. 1118–1130, 2018.
- BICHOT, A. Understanding biomass recalcitrance in grasses for their efficient utilization as biorefinery feedstock. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 17, p. 707–748, 2018.
- BROMAN, G. I.; ROBERT, K. H. A framework for strategic sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v.140, p. 17-31, 2017.
- BURNS A. D. *et al.* Acid rain and its environmental effects: Recent scientific advances. **Atmospheric Environment**, v. 146, p. 1-4, 2016.
- CARIOCA, J. O. B.; BEZERRA, R. D. . Biotechnology for the Development of a Green Economy - Proceedings of the 16th **International Biotechnology Symposium and Exhibition**. 1. ed. Fortaleza-CE: UFC/IUPAC, v. 1. 943p, 2016.

- CARDONA, A. *et al.* Design strategies for sustainable biorefineries. **Biochemical Engineering Journal**, v. 116, p. 122–134, 2016.
- CHANDRA, R. *et al.* Algal biorefinery: A sustainable approach to valorize algal-based biomass towards multiple product recovery. **Bioresource Technology**, v. 278, p. 346–359, 2019.
- CHANDRA, R. A biorefinery approach for dairy wastewater treatment and product recovery towards establishing a biorefinery complexity index. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 1184 – 1196, 2018.
- CHAU, D. K.; DAI, T. T. The Effect of Hydraulic Retention Times and Loading Rates on the Removal of Pollutants from Fish Processing Wastewater by Anaerobic Process. **Journal of Food Science and Engineering**, v. 8, p. 237-240, 2018.
- CHEN, Y. *et al.* Waste biorefineries - integrating anaerobic digestion and microalgae cultivation for bioenergy production. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 50, p. 101–110, 2018.
- CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, Volume 5. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), Universidade Federal de Minas Gerais, 380 p, 2ª Edição, Belo Horizonte, 2007.
- CHERUBINI, F. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. **Energy Conversion and Management**, v. 51, p. 1412–1421, 2010.
- CHEW *et al.* Microalgae biorefinery: High value products perspectives. **Bioresource Technology**, v. 229, p. 53–62, 2017.
- CHOWDHURY, R.; FREIRE F. Bioenergy production from algae using dairy manure as a nutrient source: Life cycle energy and greenhouse gas emission analysis. **Applied Energy**, v. 154, p. 1112–1121, 2015.
- CHOWDHURY, R. *et al.* Effects of residence time on life cycle assessment of bioenergy production from dairy manure. **Bioresource Technology Reports**, v. 4, p. 57–65, 2018.
- COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. disponível em <http://portal.cogerh.com.br/>. Acesso em novembro de 2010.
- COGERH. Companhia De Gestão Dos Recursos Hídricos –. Inventário Ambiental do Açude Castanhão. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará. 2011.
- COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Avaliação Mensal Da Situação Dos Açudes. Governo do Estado do Ceará. Secretaria de Recursos Hídricos. 2019.



- COLLET, P. *et al.* Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 207–214, 2011.
- COLLET, P. *et al.* Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. **Applied Energy**, v.154, p. 1089–1102, 2015.
- ÇENGEL, Y.. Thermodynamics: An Engineering Approach, 7th Edition. **The McGraw-Hill Companies**, Inc., New York. 2011.
- DENHAM, F.C. *et al.* Environmental supply chain management in the seafood industry: past, present and future approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 82-90, 2015.
- DIETRICH, K. *et al.* Sustainable PHA production in integrated lignocellulose biorefineries. **New Biotechnology**, v. 49, p. 161–168, 2019.
- DNOCS - Departamento Nacional De Obras Contra As Secas. Açude Castanhão. Disponível em <https://www.dnocs.gov.br/barragens/castanhao/castanhao.html>. Acesso em 02/12/2019.
- DU, E. *et al.* Direct effect of acid rain on leaf chlorophyll content of terrestrial plants in China. **Science of the Total Environment**, v. 605–606, p. 764–769, 2017.
- EBC. Empresa Brasil de Comunicação. Governo federal investe R\$ 1,4 bilhão na transposição do São Francisco. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-11/governo-federal-investe-r-14-bilhao-na-transposicao-do-sao-francisco>. Acesso em 15/11/19.
- FAO. Food and Agriculture Organization. The State Of Food And Agriculture. 2017.
- FERNANDES, R. O. *et al.* Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 22, p. 11, 2017.
- FEURTEY, E. *et al.* Lessons learned in France and Quebec regarding financial and legal mechanisms to develop renewable energy: A hybrid model as an acceptable solution for onshore wind? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47 p. 34–45, 2015.
- FURLAN, E. Qualidade e processamento de pescado. **GEN Atlas**; 1a Edição 256p. ISBN 139788535276084. 2015.
- FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Calendário de Chuvas. 2019.
- FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Portal Hidrológico. 2020.
- GARCÍA *et al.* Evaluation of the dynamics of microalgae population structure and process performance during piggery wastewater treatment in algal-bacterial photobioreactors. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 120–126, 2018.

GLOBEFISH, Globefish Highlights: A Quarterly Update on world seafood markets. FAO/GLOBEFISH Highlights (04/2019), 2019.

GOSLING, S. N.; ARNELL, N. W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. **Climatic Change**, v. 134, p. 371–385, 2016.

GUAN, Q.; SAVAGE, P. E.; WEIB, C. Gasification of alga *Nannochloropsis* sp. in supercritical water. **J. of Supercritical Fluids**, v. 61, p. 139–145, 2012.

HÁK, T. *et al.* Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 565–573, 2016.

HERNANDEZ, E. M.; SAMSATLI, S. Biorefineries and the food, energy, water nexus - towards a whole systems approach to design and planning. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v.18, p.16–22, 2017.

HOEKSTRA, A. Y. A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 564–573, 2016.

IEA. IEA bioenergy Task 42 on biorefineries: co-production of fuels, chemicals, power and materials from biomass. In: Minutes of the third Task meeting, Copenhagen, Denmark, 25–26 March 2007 <<http://www.biorefinery.nl/ieabioenergy-task42/>>; 2008.

ÍNDIO, N. Processamento de Petróleo e Gás. Editora LTC. ISBN: 9788521626350, 2ª edição. 2014.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. (2015). Perfil básico municipal. Disponível em: <http://www.ipece.ce.gov.br/index.php/perfil-basico-municipal-2015>. Acesso em: jan. 2017.

JOKANOVIĆ, M. Neurotoxic effects of organophosphorus pesticides and possible association with neurodegenerative diseases in man: A review. **Toxicology**, v. 410, p. 125-131, 2018.

JOHNSTON *et al.* Freezing and refrigerated storage in fisheries. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAO Fisheries Technical Paper** – 340, Rome, 1994.

LACERDA, L. D. *et al.* Limnology of the largest multi-use artificial reservoir in NE Brazil: The Castanhão Reservoir, Ceará State. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 90, p. 2073-2096, 2018.

LAWRENCE, G. B. *et al.* Declining Acidic Deposition Begins Reversal of Forest-Soil Acidification in the Northeastern U.S. and Eastern Canada. **Environmental. Science & Technology**, v.49, p.13103–13111, 2015.

LEONG, W. *et al.* Third generation biofuels: A nutritional perspective in enhancing microbial lipid production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 950–961, 2018.

LEVY, K.; SMITH, S. M.; CARLTON E. J. Climate Change Impacts on Waterborne Diseases: Moving Toward Designing Interventions. **Current Environmental Health Reports**, v. 5, p. 272–282, 2018.

LI, M. *et al.* An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 1416–1434, 2019.

LI, S.; LUO, S.; GUO R. Efficiency of CO<sub>2</sub> fixation by microalgae in a closed raceway pond. **Bioresource Technology**, v. 136, p. 267–272, 2013.

LI, J. *et al.*, Assessment on the Impact of Arable Land Protection Policies in a Rapidly Developing Region. **International Journal of Geo-Information**, 2016, v. 5, p. 69, 2016.

LIU, Y. *et al.* Conversion from rural settlements and arable land under rapid urbanization in Beijing during 1985 – 2010, **Journal of Rural Studies**, v. 51, p. 141–150, 2017.

LOPES, A. C. Energy balance and life cycle assessment of a microalgae-based wastewater treatment plant: A focus on alternative biogas uses. **Bioresource Technology**, v. 270, p. 138–146, 2018.

LÓPEZ, P. P. Life cycle assessment of the production of the red antioxidant carotenoid astaxanthin by microalgae: from lab to pilot scale. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 332–344, 2014.

KASSIM, A.H. M. *et al.* Microalgal biomass production through phycoremediation of fresh market wastewater and potential applications as aquaculture feeds. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 3226–3242, 2019.

KHOO, C. G. *et al.* Algae biorefinery: Review on a broad spectrum of downstream processes and products. **Bioresource Technology**, v. 292, p. 121964, 2019.

KLINGLMAIR, M.; SALA, S.; BRANDÃO M. Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues. **International Journal Life Cycle Assessment**, v. 19, p. 580–592, 2014.

KUMAR, M. M. *et al.* Comparative life cycle assessment of microalgae-mediated CO<sub>2</sub> capture in open raceway pond and airlift photobioreactor system. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, p. 2357–2364, 2018.

Maranduba, H. L. *et al.* Improving the energy balance of microalgae biodiesel: Synergy with an autonomous sugarcane ethanol distillery. **Energy**, v. 115, p. 888 – 895, 2016.

- MARTINEZ, F.; Orus, M. I. Interactions between Glucose and Inorganic Carbon Metabolism in *Chlorella vulgaris* Strain UAM 1011. **Plant Physiol**, v. 95, p. 1150-1155, 1991.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA; A. Y. Four billion people facing severe water scarcity. **Sustainability**, v. 2, e1500323, 2016.
- MOHAN, S. V. *et al.* Can circular bioeconomy be fueled by waste biorefineries — A closer look. **Bioresource Technology Reports**, v.7, p. 100277, 2019.
- MCCLELLANDA, S.C., *et al.* Type and number of environmental impact categories used in livestock life cycle assessment: A systematic review. **Livestock Science**, v. 209, p. 39-45, 2018.
- MOTA, F. A.S.; Costa Filho, J.T.; Barreto, G.A. The Nile tilapia viscera oil extraction for biodiesel production in Brazil: An economic analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 108, p. 1-10, 2019.
- MPA- Ministério da Pesca e Aquicultura do Brasil Boletim Estatístico da Pesca e Aquicultura. 2014.
- MUKHERJEE, A.; AGRAWAL M. World air particulate matter: sources, distribution and health effects. **Environmental Chemistry Letters**, v. 15, p. 283–309, 2017.
- NARRON, R. H. *et al.*, Biomass pretreatments capable of enabling lignin valorization in a biorefinery process. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 38, p. 39-46, 2016.
- NAZIR, L. O. Long-term effects of ionizing radiation after the Chernobyl accident: Possible contribution of historic dose. **Environmental Research**, v. 165, p. 55–62, 2018.
- NIZAMI, A. S. *et al.* Waste biorefineries: **Enabling circular economies in developing countries**. **Bioresource Technology**, v. 241, p. 1101–1117, 2017.
- NOWAK, A. *et al.* Treatment efficiency of fish processing wastewater in different types of biological reactors. **Physics and Chemistry of the Earth**, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.09.007>. 2018.
- PEREIRA, T. A. S., *et al.* Key Climate Oscillation Factors Controlling Precipitation Variability during the Dry Season in Eastern Northeast Brazil: Study Case of Mundaú and Paraíba Do Meio River Basins. **Water**, v. 10(11), p. 1617, 2018.
- PORTAL BRASIL, Ministro da Pesca e Aquicultura fala sobre Plano Safra da Pesca, disponível em: <https://brasil.gov.br/zmi/economiaeemprego/> 2014/02/ministro-fala-sobre-plano-safra-da-pesca-e-aquicultura-1 acesso em 15 de maio de 2014.
- PRé CONSULTANTS. Recipe 2018 Version 1.11 December 2014. Disponível em <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads>. Acesso em 01.01.2020.

RAMÍREZ-ISLAS, M. E. *et al.* Environmental assessment of energy production from anaerobic digestion of pig manure at medium-scale using life cycle assessment. **Waste Management**, v. 102, p. 85-96, 2020.

RÍO, P. G., *et al.* Third generation bioethanol from invasive macroalgae *Sargassum muticum* using autohydrolysis pretreatment as first step of a biorefinery. **Renewable Energy**, v. 141, p. 728-735, 2019.

RODRIGUES E. T., *et al.* Environmental and human health risk indicators for agricultural pesticides in estuaries. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 150, p. 224-231, 2018.

ROMANÍ, A. *et al.* Combined alkali and hydrothermal pretreatments for oat straw valorization within a biorefinery concept. **Bioresource Technology**, v. 220, p.323–332, 2016.

SCHRYVER An M. *et al.* Uncertainties in the application of the species area relationship for characterisation factors of land occupation in life cycle assessment. **International Journal Life Cycle Assessment**, v.15, p.682–691, 2010.

SCHNEIDER, R. C. S. *et al.* Life cycle assessment of microalgae production in a raceway pond with alternative culture media. **Algal Research**, v. 32, p. 280–292, 2018.

SDA. Secretaria de Desenvolvimento Agrário do Estado do Ceará. Disponível em <https://www.ceara.gov.br/2019/11/29/em-dois-meses-projeto-de-peixamento-ja-distribuiu-um-milhao-de-alevinos-em-acudes-publicos/> 2019. Acesso em 02/12/19.

SDA. Secretaria de Desenvolvimento Agrário. Disponível em <https://www.sda.ce.gov.br/>. Acesso em 30.11.2019.

SAWATDEENARUNATA, C. *et al.* Decentralized biorefinery for lignocellulosic biomass: Integrating anaerobic digestion with thermochemical conversion. **Bioresource Technology**, v. 250, p.140–147, 2018.

SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS – SRH. Eixo de Integração Castanhão – Fortaleza. Síntese dos Estudos. Fortaleza: SRH. 2002.

SNIS. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE SANEAMENTO - 2014. Ministério das Cidades. Página Virtual. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em: jan. 2017.

SOUZA, E. G. Geração de biodiesel e biogás a partir dos resíduos do processamento de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2014.

SOUZA, E. G. *et al.* Segurança hídrica do reservatório Castanhão-CE: aplicação da matriz de sistematização institucional. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.22, p. 877-887, 2017.

SZULEJKO, J. E. *et al.* Global warming projections to 2100 using simple CO<sub>2</sub> greenhouse gas modeling and comments on CO<sub>2</sub> climate sensitivity factor. **Atmospheric Pollution Research**, v.8, p. 136-140, 2017.

van VLIET, J.; EITELBERG, D. A.; VERBURG, P. H. A global analysis of land take in cropland areas and production displacement from urbanization. **Global Environmental Change**, v. 43, p. 107–115, 2017.

WANG, C. *et al.* Reclamation of Fishery Processing Waste: A Mini-Review. **Molecules**, v. 24(12), p. 2234, 2019

WANG, Y. H. B. *et al.* Effects of Mechanical Pretreatments on Enzymatic Hydrolysis of Mixed Lignocellulosic Substrates for Biorefineries. **BioResources**, v.14(2), p. 4639-4652, 2019.

XUE *et al.* Assessing the spatial and temporal variability of bacterial communities in two Bardenpho wastewater treatment systems via Illumina MiSeq sequencing. **Science of the Total Environment**, v. 657, p.1543–1552, 2019.

YE C. *et al.* Life cycle assessment of industrial scale production of spirulina tablets. **Algal Research**, v. 34, p. 154–163, 2018.