

**PROJETO DE GRADUAÇÃO**  
**CARACTERIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA**  
**EXERGÉTICA E AMBIENTAL DA GERAÇÃO DE**  
**ELETRICIDADE A PARTIR DE BIOMASSA DE**  
**ALGAS**

Por,

**Bruno Lunardi Gonçalves**

**Jefferson de Souza**

**Brasília, 27 de novembro de 2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# CARACTERIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA EXERGÉTICA E AMBIENTAL DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE BIOMASSA DE ALGAS

POR,

**Bruno Lunardi Gonçalves**

**Jefferson de Souza**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

### **Banca Examinadora**

Prof. Armando de Azevedo Caldeira Pires, UnB/ENM  
(Orientador)

---

Prof. Eugênio Libório Feitosa Fortaleza, UnB/ENM

---

Prof. Bruno dos Santos Alves Figueiredo Brasil,  
Embrapa

---

Brasília, 27 de novembro de 2015

## **Agradecimentos**

*Meus agradecimentos são a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma com meu aprendizado durante a trajetória pela Engenharia Mecânica. Primeiramente, a Deus, por tudo o que Ele tem fornecido à minha vida. Seguindo-se, em especial, agradeço ao Professor Armando pelas oportunidades e confiança em meu trabalho e ao meu amigo Jefferson, que partilhou todo o árduo trabalho final comigo. Ademais, talvez as mais importantes contribuições tenham vindo do sustentáculo oferecido por meus pais, Maria Helena e Cristiano, e pela minha noiva, Izabella, que sempre auxiliaram a passar por todos os desafios do curso, "puxando a orelha" quando chegavam o desânimo e a preguiça e comemorando as boas realizações. Não menos importantes, agradeço ao Sr. Luiz (in memorian) e à Sra. Cirlei, que, já no início de minha infância, contribuíram, com seu carinho e amor de avós, significativamente para que eu me tornasse o que sou hoje. Por fim, agradeço ao Andersson, ao Gustavo, ao José Antônio, ao Pedro e ao Rafael pelos bons momentos partilhados durante o curso, principalmente pelas nossas partidas de Fifa e pelos inúmeros momentos de desespero, dos quais nunca me esquecerei.*

*Bruno Lunardi Gonçalves*

*Agradeço principalmente a Deus, por ter me iluminado e me concedido força e saúde durante a minha graduação, e a todos aqueles que, nestes últimos cinco anos, estiveram comigo nessa jornada duplamente estressante, dividida entre a Universidade de Brasília e o Cindacta I, onde trabalhei como Controlador de Tráfego Aéreo. Em um primeiro momento, gostaria de agradecer ao Professor Armando Caldeira, sem o qual este Projeto de Graduação não seria factível, assim como ao meu amigo e companheiro de Projeto Bruno Lunardi, que sempre esteve disposto a me ajudar emprestando suas excelentes anotações quando eram inevitáveis as perdas de aula devido às minhas obrigações laborais. Aos meus pais, Regina Célia (in memorian) e Tiburcio Donizete (in memorian), que até os meus dez anos, quando estiveram presentes, sempre me mostraram o caminho correto a ser seguido; assim como aos meus avós, Antônio Pedro (in memorian) e Maria Aparecida (in memorian), que, na falta daqueles, supriram todas as minhas necessidades, sempre com muita dedicação e amor; não menos importante, à minha irmã Franciele, que soube perfeitamente cumprir o papel de mãe substituta, sempre ouvindo meus desabafos e me fornecendo sábios conselhos; ao meu primo Alan, que tenho como irmão e sempre foi para mim exemplo de honestidade e esforço. À minha noiva, Dyone Karine, que, com muita paciência, sempre confiou e acreditou em mim. Aos meus amigos de moradia: Bruno Erse, Bruno Avelar e Diego Franco, os quais testemunharam muitos tempos difíceis e várias noites em claro por mim atravessadas. Por fim, aos amigos feitos graças à UnB: Andersson, Vanessa, Irina e Ito, que entendem perfeitamente quão difícil é a graduação em Engenharia Mecânica.*

*Jefferson de Souza*

## **CARACTERIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA EXERGÉTICA E AMBIENTAL DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE BIOMASSA DE ALGAS**

Diante da atual conjuntura mundial de aquecimento global, especialmente devido à crescente quantidade de gases de efeito estufa, têm-se buscado fontes de energia renovável. Nesse contexto, o presente trabalho tem foco nas microalgas, as quais se inserem como uma potencial alternativa para dirimir a emissão de CO<sub>2</sub> e gerar energia elétrica, pois tais organismos têm a capacidade de absorver carbono, da atmosfera ou de meios orgânicos, sintetizando compostos com alto poder calorífico, que podem ser queimados, em caldeiras, e gerar, assim, energia. Segue-se, então, por uma linha em que é feita uma revisão da literatura e do estado da arte acerca do tema em comento, a fim de obter uma suficiente quantidade de informação para poder optar pelo melhor conjunto de algacultura: espécies, meios de cultivo e de colheita/secagem, almejando-se à viabilidade financeira. De outra sorte, devem ser aplicados conceitos advindos da termodinâmica para realização de uma análise exergética e uma avaliação do ciclo de vida da geração de eletricidade a partir da biomassa de microalgas. Assim sendo, também é objetivo do estudo trabalhar em parceria com usinas sucroalcooleiras, por elas serem fontes de gás carbônico, devido ao processo de fermentação do melaço da cana, e terem como resíduo a vinhaça, que pode ser utilizada como fonte de nutrientes para as microalgas. O foco é trabalhar com a usina Jalles Machado S/A que, devido ao processo de cogeração de energia elétrica a partir da queima do bagaço de cana (ao qual será associada a biomassa de microalgas produzida), gera uma quantidade de dióxido de carbono superior a uma usina comum. Utilizando-se um meio de Guillard modificado, com 37,5% de vinhaça e 62,5% de água tratada, concluiu-se pela viabilidade exergética do cultivo da microalga *Chlorella vulgaris* em tanques *raceways* para fins de cogeração e pela razoabilidade do impacto ambiental, em que as microalgas contribuem como biorremediação da vinhaça utilizada, além de consumir CO<sub>2</sub> inorgânico da atmosfera.

Palavras-chave: Microalgas, Biomassa, Cogeração, Análise Exergética, Avaliação do Ciclo de Vida, Vinhaça.

**EXERGY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY CHARACTERIZATION OF THE ELECTRICITY GENERATION FROM ALGAE BIOMASS**

Given the current global warming situation in the world, mainly due to the rise of greenhouse gases concentration in the atmosphere, renewable energy sources have been sought. In this context, this work is focused on microalgae, which are a potential alternative to diminish the emission of CO<sub>2</sub> and generate electricity, as these organisms are capable of absorbing carbon, from the atmosphere or from organic media, synthesizing compounds with a high calorific power which can be burned in boilers and generate, thereby, electricity. It follows, then, for a line in which is made a review of the literature and prior art on the subject under discussion, in order to obtain sufficient information to be able to choose the best set of algacultura: species, cultivation medium and harvesting, aiming to the financial viability. Otherwise, concepts from Thermodynamics should be applied to hold an exergy analysis and a life cycle assessment of electricity generation from microalgae biomass. Therefore, it is also an objective of the study working in partnership with sugarcane mills, because they are sources of carbon dioxide, due to the process of sugarcane molasses fermentation, and because they have vinasse as residue, which can be used as a source of nutrients for microalgae. The focus is to work with the Jalles Machado S/A plant, which, due to the process of cogeneration of electricity from the burning of sugarcane bagasse, generates a higher amount of carbon dioxide than a common plant. Using a modified Guillard cultivation medium, with 37.5% of vinasse and 62.5% of treated water, it was concluded by exergy viability of the cultivation of microalgae *Chlorella vulgaris* in raceways ponds for cogeneration purposes and the reasonableness of the environmental impact, wherein the microalgae contribute to bioremediation of vinasse used, besides being an inorganic CO<sub>2</sub> consumer.

Keywords: Microalgae, Biomass, Cogeneration, Exergy Analysis, Life Cycle Assessment, Vinasse.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1. ESCOPO E OBJETIVOS DO TRABALHO	14
1.2. ESCLARECIMENTOS PROPEDEÚTICOS	16
1.2.1. MICROALGAS E SUA BIOMASSA	16
1.2.2. REGIÕES DE INSOLAÇÃO	18
1.2.3. FONTES DE CO <sub>2</sub>	19
1.2.4. CRÉDITO DE CARBONO E MERCADO DE CARBONO	20
1.2.5. BIORREFINARIAS	21
1.2.6. EXERGIA	23
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITOS APLICÁVEIS</b>	<b>25</b>
2.1. MICROALGAS E SUAS TECNOLOGIAS	25
2.1.1. SISTEMAS AUTOTRÓFICO, HETEROTRÓFICO E MIXOTRÓFICO DE CRESCIMENTO DE MICROALGAS	25
2.1.2. FIXAÇÃO DE CO <sub>2</sub>	27
2.1.3. CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIOREACTORES FECHADOS E ABERTOS	27
2.1.4. COLHEITA DA BIOMASSA DE MICROALGAS	31
2.1.5. ASPECTO ECONÔMICO PARA A PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS	34
2.1.6. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA À PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS (GRIMA ET AL., 2013)	36
2.1.7. EXPANSÃO DA ALGACULTURA E COMERCIALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS	38
2.1.8. AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE BIOCOMBUSTÍVEIS DE ALGAS – JUSTIFICAÇÃO DO USO DE BIOMASSA BRUTA	40
2.2. EXERGIA, MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	43
2.2.1. VISÃO GERAL	43
2.2.2. ENERGIA, IMPACTO AMBIENTAL, TERMODINÂMICA E MEIO AMBIENTE	45
2.2.3. EXERGIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	46
2.2.4. ECOLOGIA INDUSTRIAL E CONSERVAÇÃO DOS RECURSOS	48
2.2.5. ASPECTOS EXERGÉTICOS DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS	49
2.2.6. FERRAMENTAS PARA IMPACTO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE	50
2.2.7. EXERGIA COMO UM QUANTIFICADOR DE SUSTENTABILIDADE PARA FATORES DE PROCESSOS	52
2.2.8. EXERGIA E TRABALHO REVERSÍVEL	53
2.2.9. BALANÇO DE EXERGIA	56
2.3. BALANÇO DE ENERGIA E ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE ALGA EM LARGA ESCALA (SUDHAKAR ET AL., 2012)	58
2.3.1. BALANÇO DE ENERGIA E DE CARBONO	58
2.3.2. RAZÃO DE GANHO DE ENERGIA (RENDIMENTO, $\eta_{GLE}$ )	59
2.3.3. PARÂMETROS UTILIZADOS	60
2.3.4. RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONCLUSÕES OBTIDAS POR SUDHAKAR ET AL. (2012)	61
2.4. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (LCA) DE BIOCOMBUSTÍVEIS DE MICROALGAS	64
2.4.1. FASES DO CICLO DE VIDA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS	66
2.4.2. ANÁLISE DE IMPACTO AMBIENTAL	69

2.5.	CONSIDERAÇÕES ACERCA DA VINHAÇA COMO MEIO DE CULTIVO .....	70
<b>3.</b>	<b>USINA JALLES MACHADO .....</b>	<b>77</b>
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>81</b>
4.1.	ESCOLHA PELA PRODUÇÃO DE BIOMASSA SECA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CALDEIRAS.....	81
4.2.	CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS ACERCA DO PROBLEMA ESTUDADO .....	82
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>87</b>
5.1.	ANÁLISE ENERGÉTICA .....	87
5.2.	ANÁLISE EXERGÉTICA .....	89
5.3.	ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (AMBIENTAL) – LCA.....	101
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E PASSOS FUTUROS .....</b>	<b>110</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>112</b>
<b>8.</b>	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>120</b>
8.1.	BALANÇO RESPIROMÉTRICO E FIXAÇÃO DE CARBONO DE ALGAS INDUSTRIALMENTE IMPORTANTES.....	120
8.1.1.	FOTOSSÍNTESE .....	120
8.1.2.	FIXAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO PELAS MICROALGAS .....	122
8.1.3.	MERCADO DE CARBONO PARA TECNOLOGIAS EM MICROALGAS 124	
8.2.	PRODUÇÃO HETEROTRÓFICA DE ÓLEO DE ALGAS.....	125
8.3.	PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS A PARTIR DE BIOMASSA DE ALGAS POR PIRÓLISE RÁPIDA 128	
8.4.	SISTEMA DE LAGOA ABERTA PARA CULTIVO DE MICROALGAS .....	129
8.4.1.	INTRODUÇÃO .....	129
8.4.2.	MICROALGAS CULTIVADAS E SISTEMAS DE LAGOA ABERTA .....	131
8.4.3.	PROJETO DO REATOR E REGIME DE ILUMINAÇÃO.....	132
8.4.4.	TEMPERATURA, pH E ESTERILIZAÇÃO DO CULTIVO .....	133
8.5.	PROJETO DE FOTOBIOREATORES PARA ALGACULTURA.....	134
8.5.1.	INTRODUÇÃO .....	134
2.3.1.1	FATORES QUE INFLUENCIAM O CRESCIMENTO DE MICROALGAS E A SÍNTESE DA BIOMASSA COM ELEVADO PODER CALORÍFICO .....	135
8.6.	COLHEITA DA BIOMASSA DE MICROALGAS.....	136
8.6.1.	ESPECIFICIDADES ACERCA DOS MÉTODOS DE COLHEITA DE BIOMASSA DE MICROALGAS .....	136
8.7.	APLICAÇÕES PARA A BIOMASSA RESIDUAL.....	140
8.7.1.	PRINCIPAIS GARGALOS PARA A EXPANSÃO DA ALGACULTURA	141

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Perspectivas de Crescimento da Demanda Mundial de Energia Primária <sup>[1]</sup> .....	14
Figura 1.2. Matriz Energética Brasileira <sup>[2]</sup> .....	15
Figura 1.3. Contribuição Proporcional dos Principais Gases do Efeito Estufa Estimada desde a Era Pré-Industrial até o Presente <sup>[7]</sup> .....	15
Figura 1.4. Mapa com a Média Anual de Insolação Diária, em Horas (esq.) e com a Média Anual de Radiação Solar, em Unidades de MJ/m <sup>2</sup> .dia (dir.) .....	18
Figura 1.5. Fontes Humanas de Emissão de CO <sub>2</sub> <sup>[25]</sup> .....	19
Figura 1.6. Mapa de Concentração/Emissão de Dióxido de Carbono <sup>[26]</sup> .....	20
Figura 1.7. Representação do Conceito de Biorrefinaria <sup>[36]</sup> .....	22
Figura 1.8. Representação Esquemática para o Conceito de Exergia <sup>[36]</sup> .....	24
Figura 2.1. Nutrições Autotrófica (esq.), Heterotrófica (meio) e Mixotrófica (dir.) (Mohan et al., 2013) .....	26
Figura 2.2. Esquema para as Etapas da Algaicultura (Show et al., 2013) .....	31
Figura 2.3. Etapas Necessárias para o Fazimento de uma Análise de Custos do Processo de Produção de Microalgas (Grima et al., 2013) .....	34
Figura 2.4. Produção de Biocombustível de Microalgas .....	36
Figura 2.5. Custos para a Produção de Biocombustíveis a partir da Algaicultura .....	38
Figura 2.6. Roteiro Técnico-Econômico de Biocombustíveis de Microalgas (Lam et al., 2013) .....	41
Figura 2.7. Triângulo de Interdisciplinaridade Coberto pela Análise Exergética .....	43
Figura 2.8. Relação entre Impacto Ambiental, Sustentabilidade de um Processo e sua Eficiência Exergética .....	48
Figura 2.9. Volume de Controle com uma Entrada e uma Saída .....	53
Figura 2.10. Volume de Controle com Diversas Entradas e Saídas e Troca de Calor à Temperatura $T_i$ .....	57
Figura 2.11. Fases do Ciclo de Vida da Produção do Biodiesel .....	66
Figura 2.12. Digrama Simplificado Básico para a Produção de Alcool (Marques, 2012) .....	70
Figura 2.13. Instalação de Conversão de Etanol a partir de Matéria-Prima Celulósica: Componentes, Entradas e Saídas (Ramirez, 2013) .....	71
Figura 2.14. Lagoa de Vinhaça (esq.) e Canal de Distribuição de Vinhaça (dir.) .....	71
Figura 2.15. Composição Química da Vinhaça em Função do Tipo do Mosto (Marques, 2012) .....	72
Figura 2.16. Ciclo de Produção do Cultivo de Microalgas a partir de Integração com uma Usina Sucroalcooleira (Marques, 2012) (Embraer, 2011) .....	73
Figura 2.17. Crescimento de Microalgas em Diferentes Porcentagens de Vinhaça .....	74
Figura 2.18. Planejamento Fatorial para a Produção de Biomassa com a Utilização de Vinhaça .....	75
Figura 2.19. Produção de Bio-Óleo em Vinhaça Estudada pela Embrapa .....	76
Figura 3.1. Modelo de Produção Adotado pela Jalles Machado S/A .....	78
Figura 3.2. Modelo de produção adotado pela Jalles Machado S/A .....	80
Figura 4.1. <i>Microalgae Slurry</i> Retirada das Centrifugas <sup>[46]</sup> .....	85
Figura 4.2. Diagrama do Processo Estudado .....	86
Figura 5.1. Processos com Demandas de Eletricidade .....	87
Figura 5.2. Esquema Termodinâmico para o Entendimento do Sistema .....	89
Figura 5.3. Fluxos de Entrada e Saída Energética para o Processo Global de Cogeração por meio da Queima da Biomassa de Microalgas .....	90
Figura 5.4. Perdas Entrópicas em Cada Etapa .....	100
Figura 5.5. Diagrama de Fluxos de Sankey para o Processo de Produção da Biomassa Seca de Microalgas ( <i>Software e!Sankey</i> ) .....	101

Figura 5.6. Fluxos de Descargas e de Absorção/Não Emissão de CO <sub>2</sub> em Relação à Atmosfera .....	101
Figura 5.7. Balanços de CO <sub>2</sub> para os Processos com e sem Vinhaça e para a Combustão da Biomassa nas Caldeiras para Fins de Cogeração .....	109
Figura 8.1. Reação Tradicional da Fotossíntese.....	121
Figura 8.2. Localização dos Variados Componentes do Caminho de Biossíntese Lipídica em Células de Algas.....	122
Figura 8.3. Produtividade de Biomassa e de Óleo para as Culturas Fotoautotróficas (esq.) e Heterotróficas (dir.) (Sun et al., 2013).....	126
Figura 8.4. Diagrama de uma Unidade de Pirólise Rápida (Assmann et al., 2013).....	129
Figura 8.5. Diferentes Tipos de Lagoas Abertas <sup>[37]</sup> .....	131
Figura 8.6. Diferentes Espécies de Algas: <i>Chorella</i> (inf.), <i>Spirulina</i> (sup. dir.) e <i>Dunaliella</i> (sup. esq.) <sup>[38] [39]</sup> .....	132
Figura 8.7. Tela Plana (a), Tubulares Horizontais (b), Sacolas Plásticas (c), painéis verdes (d) e Sistemas Abertos (e) <sup>[40]</sup> .....	134
Figura 8.8. Efeitos da Intensidade Luminosa no Crescimento Fotoautotrófico das Microalgas .....	136
Figura 8.9. Mesa Vibratória <sup>[43]</sup> (esq.) e Microstrainer <sup>[44]</sup> (dir.).....	137
Figura 8.10. Processo de Floculação Química <sup>[45]</sup> .....	138
Figura 8.11. Esquema da Filtração de Biomassa de Microalgas (NAABB).....	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Vantagens e Desvantagens dos Sistemas Abertos e Fechados .....	29
Tabela 2.2. Prospecções e Limitações de Diversos Sistemas de Algacultura .....	30
Tabela 2.3. Parâmetro utilizados por Sudhakar et al. (2012), (Liaw, et al., 2010) .....	60
Tabela 2.4. Resultados para a Etapa do Cultivo.....	61
Tabela 2.5. Resultados para a Etapa do Processamento .....	61
Tabela 2.6. Resultados para a Etapa da Extração e da Esterificação .....	61
Tabela 2.7. Resultados Gerais Obtidos.....	62
Tabela 2.8. Balanço de Carbono para a Produção Dada, na Fase de Cultivo .....	62
Tabela 2.9. Balanço de Carbono para a Produção Dada, nas Fases de Extração e Esterificação .....	63
Tabela 5.1. Dados para a Avaliação Energética.....	88
Tabela 5.2. Parâmetros para a Avaliação do Sistema.....	91
Tabela 5.3. Dados Exergéticos para o Amplo Processo Estudado.....	91
Tabela 5.4. Energia, Entropia e Exergia de Cada Etapa.....	99
Tabela 5.5. Dados Ambientais para o Amplo Processo Estudado .....	102
Tabela 5.6. Energia, Entropia e Exergia de Cada Etapa.....	107
Tabela 8.1. Prospecções e Limitações de Diversos Sistemas de Algacultura .....	143
Tabela 8.2. Diversos Métodos para Colheita de Biomassa de Microalgas (Lam et al., 2013) .....	145

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$q$	Calor por unidade de massa	[kJ/kg]
$h$	Entalpia por unidade de massa	[kJ/kg]
$w$	Trabalho por unidade de massa	[kJ/kg]
$S$	Entropia específica	[kJ/kg]
$T$	Temperatura	[°C; K]
$b$	Exergia específica	[kJ/kg]
$E$	Energia	[kJ]
$E_a$	Energia gasta para desenvolvimento da microalga	
$E_b$	Energia gasta para colheita da microalga	
$E_c$	Energia gasta para desidratação da microalga	
$E_d$	Energia gasta para secagem da microalga	
$E_f$	Energia gasta para extração do óleo da microalga	
$E_g$	Energia gasta no processo de transesterificação	
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$P$	Pressão	[N/m <sup>2</sup> ]
$B$	Exergia	[kJ]
$x_1$	dependência da temperatura	
$x_2$	dependência da porcentagem de vinhaça	
$x_3$	dependência por intensidade luminosa	
$Ton$	Quantidade de biodiesel	[kg]
$CV$	Poder calorífico do biodiesel	[kJ/kg]
$B_{dest}$	Exergia destruída	[kJ]

## Símbolos Gregos

$\eta$	Eficiência	
--------	------------	--

## **Subscritos**

Out, e	Saindo do sistema ou volume de controle
in, i	Entrando no sistema ou volume de controle
o	Ambiente
max.	Máximo
min.	Mínimo
j	Espécie, componente
ef	Efetivo
ger	Gerado
gle	ganho líquido de energia
a	desenvolvimento das microalgas
b	colheita das microalgas
c	desidratação das microalgas
dest	Destruido
d	secagem das microalgas
f	extração do óleo das microalgas
g	processo de transesterificação
CIengine	motor de combustão por compressão

## **Siglas**

Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos da América
MMA	Ministério do Meio Ambiente
LCA	Avaliação do Ciclo de Vida
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
PBR	Fotobiorreatores fechados

tCO <sub>2</sub>	Tonelada de dióxido de carbono
CER	Certificação de emissões
ONG	Organização não governamental
VER	Verificação da Redução de Emissão
ONU	Organização das Nações Unidas
GWP	Potencial de Aquecimento Global
TAG	Triacilgliceróis
LCE	Eficiência de Conversão Luminosa
GEE	Gases de Efeito Estufa
EER	Razão de Eficiência Energética
CFC	Clorofluorcarboneto
EIA	Avaliação do Impacto Ambiental
SPI	Índice de processo sustentável
MFA	Análise de fluxo de materiais
REA	Razão de Energia Acumulada
ISO	Organização Internacional para Padronização
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
GWP	Potencial de Aquecimento Global
EROI	Retorno Energético no Investimento
ePBR	Fotobiorreator Ambiental
NER	Razão Líquida de Energia
NPK	Nitrogênio, Fósforo, potássio
DBO	Demanda Bioquímica
DQO	Demanda Química
SCP	Célula Protéica
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. ESCOPO E OBJETIVOS DO TRABALHO

Visa-se, com este Projeto de Graduação, a uma análise do ciclo de vida bem como a uma análise da eficiência exergética e ambiental do amplo processo de geração de energia elétrica a partir da queima de biomassa de microalgas. Para isso, o meio de cultura utilizará frações de vinhaça, o resíduo líquido das plantações canavieiras da usina Jalles Machado, a qual integrará o estudo de caso.

Hodiernamente, a matriz energética mundial é fortemente baseada na utilização de fontes não renováveis, provenientes, principalmente, de origem mineral e fóssil. A Figura 1.1 representa a divisão do cenário energético atual, bem como uma projeção para o futuro, com base em uma procura energética calculada em milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep):

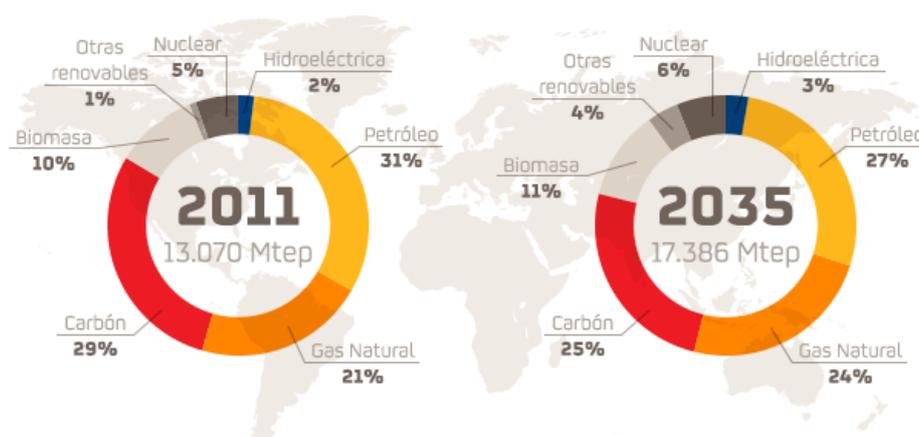


Figura 1.1. Perspectivas de Crescimento da Demanda Mundial de Energia Primária <sup>[1]</sup>

Da figura, percebe-se que a origem fóssil responde por mais de 75%, em ambos os cenários, da proveniência da energia primária mundial. Associando-se essa percepção ao fato de que essas matrizes apresentam-se como finitas, surge a necessidade de desenvolvimento de energias renováveis, mormente para mitigar essa dependência energética de uma fonte esgotável.

Trazendo-se para uma conjuntura mais próxima, vê-se que, conforme demonstrado na Figura 1.2, a matriz energética brasileira é composta, precipuamente, pela fonte hidráulica, com tendências à diversificação:

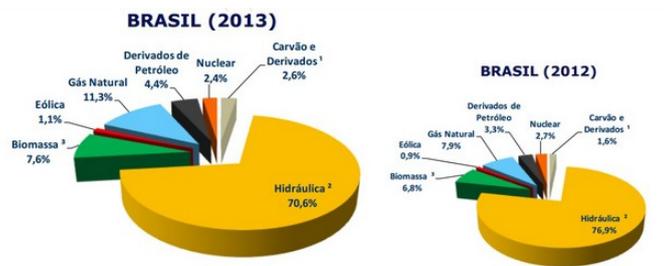


Figura 1.2. Matriz Energética Brasileira [2]

Apesar do caráter renovável da fonte hidráulica, ela traz inúmeros problemas: inundação de grandes áreas (o que pode, inclusive, contribuir para a intensificação do efeito estufa, já que a biomassa vegetal, quando submersa, pode desprender o seu carbono acumulado para a atmosfera [3]); os inúmeros prejuízos à diversidade de fauna e flora locais; o possível deslocamento de populações nativas e outros.

Ademais, outro problema substancial decorrente de matriz energética monopolar, especialmente em se tratando de matriz hídrica, é a sua intrínseca dependência do regime de chuvas: no biênio 2014-15, por exemplo, o Brasil vivencia uma das maiores secas de sua história recente, o que levou ao decréscimo do nível de reservatórios hidrelétricos a patamares inutilizáveis para fins de geração de energia elétrica, o que acarretou inúmeros problemas de racionamento de utilização de eletricidade [4]. Nesse diapasão, surge a efetiva necessidade do desenvolvimento de alternativas de energias renováveis e limpas.

Como outro fator impulsionador a esse desenvolvimento, tem-se a recente preocupação com a produção de gases de efeito estufa, responsáveis pelo aquecimento global em proporções muito mais acentuadas do que o aquecimento natural terrestre. Nesse sentido, a Figura 1.3, do Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas de 2007, ilustra a contribuição dos principais gases de efeito estufa:

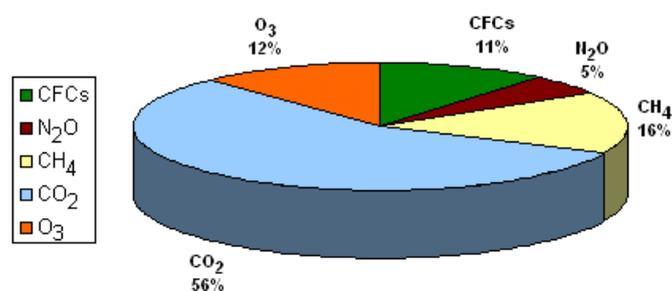


Figura 1.3. Contribuição Proporcional dos Principais Gases do Efeito Estufa Estimada desde a Era Pré-Industrial até o Presente [7]

Com vistas a amenizar a problemática de dependência de matriz monopolar, bem como de contornar os elevados níveis de emissão de gases estufa, vê-se que uma possível solução é o investimento em biomassa renovável. Quando se considera a utilização desta como nova matriz energética, pode-se pensar em processos com carbono-neutro (quando as emissões da ampla produção e consumo energético são igualadas ao sequestro de carbono realizado durante o cultivo das variedades vegetais) ou com baixo carbono-positivo (em comparação aos mecanismos convencionais de produção e utilização de energia e combustível), o que se torna bastante plausível, sobretudo quando, à luz da Figura 1.3, percebe-se que o gás com maior contribuição para o efeito estufa é o carbônico – o principal composto sequestrado durante a produção da biomassa vegetal ou de algas.

De acordo com a análise realizada pela Empresa de Pesquisa Energética (Figura 1.2), percebe-se um crescimento de 12% da importância de tal fonte dentro da matriz energética brasileira, o que acaba por demonstrar o início da preocupação nacional com a diversificação desta. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA) <sup>[8]</sup>, a biomassa é uma forma indireta de aproveitamento da energia solar: ocorre a conversão da radiação solar em energia química por meio da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos.

O Brasil, por possuir condições naturais e geográficas favoráveis à produção de biomassa, pode assumir posição de destaque no cenário mundial na produção e no seu uso como recurso energético. Por sua situação geográfica, o País recebe intensa radiação solar ao longo do ano – o que é a fonte de energia fundamental para a produção de biomassa, quer para alimentação, quer para fins agroindustriais.

É neste cenário que se insere a discussão a ser promovida neste Projeto de Graduação: utilização de biomassa de microalgas para a geração de eletricidade.

## **1.2. ESCLARECIMENTOS PROPEDÊUTICOS**

### **1.2.1. MICROALGAS E SUA BIOMASSA**

Inicialmente, podem-se conceituar algas como aqueles organismos que possuem clorofila como seu principal pigmento fotossintético e que carecem de um envoltório celular em torno de suas células reprodutivas (Pandey et al., 2014), sendo responsáveis pela produção de metade do oxigênio atmosférico<sup>[22]</sup>.

Elas apresentam uma composição bioquímica (carboidratos, proteínas, lipídios e ácidos graxos) bastante diversificada, podendo estar relacionada à natureza de cada espécie, aos fatores ambientais da região onde o cultivo é realizado, bem como ao sistema de cultivo utilizado (sendo os dois principais as lagoas aeradas abertas e os fotobiorreatores fechados) (Pandey et al., 2014).

O cultivo de microalgas (algacultura) apresenta elevada produtividade de biomassa seca, podendo gerar safras diárias, tendo-se em vista a grande taxa de crescimento dos microrganismos. Uma característica bastante interessante das microalgas é o fato de elas apresentarem grande eficiência fotossintética, além de fixarem CO<sub>2</sub> em grandes volumes: como apresentam uma taxa fotossintética bastante mais elevada do que as plantas, as algas absorvem, durante o seu crescimento, mais dióxido de carbono do que aquelas (Pandey et al., 2014).

Uma característica limitante diz respeito à necessidade de uma fonte de carbono limpo (quando se pensa em instalações autotróficas – que são a maioria –, o próprio dióxido de carbono). Nesse escopo, surge a praticidade de promover a instalação das fazendas de algas em locais próximos às fontes de emissão do gás referido (como tanques de fermentação em usinas sucroalcooleiras): mais do que mera praticidade, trata-se de uma condição de viabilidade econômica, já que seria muito oneroso transportar o gás carbônico por longas tubulações até a região das algas. Além disso, para a realização da fotossíntese, uma condição determinante é a disponibilidade de elevada radiação solar: são preferíveis regiões de elevada insolação. Esses são os dois fatores que, em princípio, devem ser contrapostos para a escolha do local ideal de implantação das algaculturas (Pandey et al., 2014).

Por outro lado, o fato de as algas não precisarem de água potável para crescimento (sendo, inclusive, cultivadas em águas de lavagem de suínos ou em águas de detritos urbanos, funcionando como um verdadeiro método de purificação), aliado à ideia de que a fotossíntese por elas realizada pode se estender entre um e dez dias, representa uma relevante característica positiva da utilização de biomassa de algas quando comparada àquela proveniente das fontes de biocombustível de primeira geração (Pandey et al., 2014).

Nesse sentido, o cultivo das algas pode ocorrer de duas formas principais: em ambientes abertos (lagoas de produção) ou em ambientes fechados (fotobiorreatores fechados). Apesar de estes apresentarem um maior custo inicial, a sua produtividade é muito mais elevada, sobretudo porque, com o isolamento do exterior, torna-se mais fácil manter as condições ideais de pH, temperatura e de nutrientes necessários ao desenvolvimento da alga, além de serem menos susceptíveis à contaminação ambiente do que os sistemas abertos. Além disso, outra vantagem preponderante diz respeito à ideia de que os tubos são expostos à radiação solar em toda a sua superfície, enquanto as lagoas de algas são expostas apenas pela parte superior. Outrossim, nas lagoas abertas, apesar do fato de elas serem extremamente rasas, ainda pode ocorrer uma densificação superficial de algas, o que pode levar à interrupção da passagem de radiação solar às águas (e algas) pouco mais profundas. Dessa forma, o crescimento das algas é muito mais acentuado em ambientes fechados do que em ambientes abertos (Pandey et al., 2014).

Como uma primeira ideia acerca dos custos, Briggs <sup>[23]</sup> entende que, para a instalação das fazendas de algas, é necessário um capital de \$80,000 por hectare; e, para a sua manutenção, \$12,000 por hectare. Fazendo-se uma simples conta para os gastos globais para a produção de biocombustível por meio de microalgas com vistas a atender a demanda de todos os EUA por combustíveis fósseis, com

os rendimentos previstos pelo relatório do DOE, o autor chega à conclusão de que são necessários \$308 bilhões para a construção das fazendas, além de um orçamento anual de \$46,2 bilhões para a sua manutenção. Nesse diapasão, comparando os dados aos valores gastos com importações anuais de combustíveis (\$100-\$150 bilhões), chega-se à conclusão de que valeria a pena investir na produção de biocombustível por meio da extração lipídica das microalgas, sobretudo com o argumento de independência energética.

### 1.2.2. REGIÕES DE INSOLAÇÃO

A elevada insolação é um fator determinante para a seleção da localidade para a implantação das fazendas de algacultura, já que a radiação solar é um dos elementos essenciais para a realização da fotossíntese por parte das microalgas. Nesse sentido, de acordo com o Atlas Solarimétrico do Brasil [24], percebe-se que as áreas localizadas no Centro-Oeste do Brasil apresentam valores da radiação solar diária média anual praticamente comparáveis às regiões de melhores resultados do mundo. Além disso, as variações sazonais para o Centro-Oeste são baixas, o que pode implicar importantes vantagens técnicas e econômicas dos sistemas solares instalados nesta região. Também pode ser deduzido, das cartas de isolinhas de radiação solar, que o um dos menores índices de nebulosidade (maior índice de radiação Solar) se concentra na parte central do Brasil (nas proximidades de Goianésia), onde as influências da costa marítima, da Zona de Convergência Intertropical e dos sistemas Frontais do Sul são menores. A Figura 1.4, retirada do Atlas Solarimétrico referido, mostra o mapa com a média anual de insolação diária, em horas, e com a média anual de radiação diária, em MJ/m<sup>2</sup>.dia:

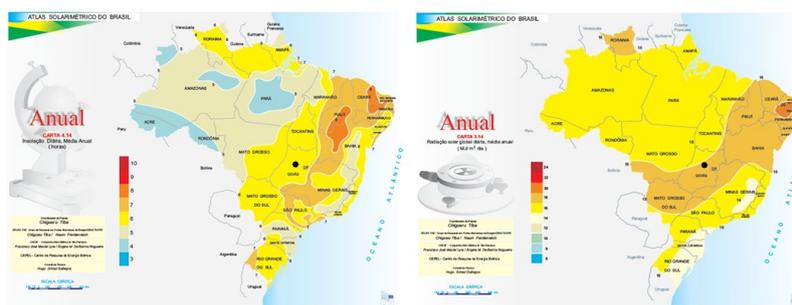


Figura 1.4. Mapa com a Média Anual de Insolação Diária, em Horas (esq.) e com a Média Anual de Radiação Solar, em Unidades de MJ/m<sup>2</sup>.dia (dir.)

Nesse sentido, a ideia para o estudo de caso a ser realizado também apresenta insolação satisfatória: a indústria de álcool e açúcar Jalles Machado, em Goianésia, cidade situada pouco a oeste do Distrito Federal. Dessa forma, percebe-se que, em princípio, a insolação não representa gargalo

para a conjuntura considerada, bem como a disponibilidade de carbono, seja em sua forma inorgânica (dióxido de carbono proveniente das unidades de fermentação) ou em sua forma orgânica (proveniente da vinhaça).

### 1.2.3. FONTES DE CO<sub>2</sub>

Inicialmente, a Figura 1.5 ilustra as parcelas de contribuição da ação humana para a emissão de dióxido de carbono:

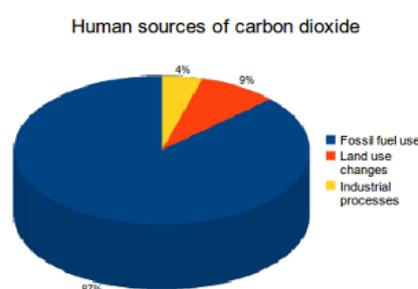


Figura 1.5. Fontes Humanas de Emissão de CO<sub>2</sub> [25]

Na medida em que muitas plantas de geração de energia elétrica utilizam fontes fósseis como materiais combustíveis, a percepção de que a grande parcela das fontes humanas de dióxido de carbono é proveniente da utilização, em nível amplo, de combustíveis fósseis coaduna-se ao interesse de propor a utilização de uma matéria-prima (biomassa de algas) com carbono-neutro, já que as microalgas conseguem sequestrar mais carbono atmosférico do que a queima de sua biomassa produz (por esse escopo, seria uma espécie de carbono-negativo, mas, quando se considera o processo como um todo, especialmente em relação à manufatura dos equipamentos necessários, vê-se que se trata de uma geração neutra).

De maneira semelhante à análise de insolação, tentou-se encontrar um mapa detalhado com a concentração de dióxido de carbono em nível nacional. A Figura 1.6 foi a mais adequada:

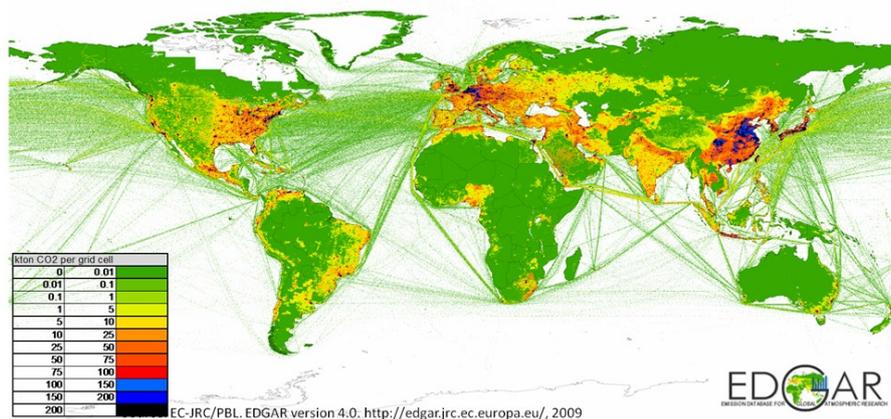


Figura 1.6. Mapa de Concentração/Emissão de Dióxido de Carbono [26]

Dessa forma, percebe-se que a instalação de fazendas de algacultura nas proximidades da usina proposta para o estudo de caso (em Goianésia) é possível, sobretudo no que tange à disponibilidade de carbono inorgânico (além de haver a vinhaça como fonte de carbono orgânico). Obviamente, fala-se, aqui, em disponibilidade de carbono inorgânico na atmosfera, mas é sabido que o carbono inorgânico que realmente será utilizado no estudo será aquele diretamente proveniente das unidades fermentadoras da usina, não sendo necessário, portanto, haver disponibilidade atmosférica: na verdade, a disponibilidade atmosférica apenas é realmente interessante quando se pensa no período de entressafra, em que a usina fica quase integralmente parada para a limpeza e a manutenção.

#### 1.2.4. CRÉDITO DE CARBONO E MERCADO DE CARBONO

Outro aspecto de suma importância para a completa discussão do problema proposto diz respeito ao Mercado de Carbono (Protocolo de Kyoto [32] na Eco-Rio 92), o qual tinha como objetivo central a limitação ou a redução das emissões de gases de efeito estufa, a qual passa a ter um valor econômico. A partir de convenção feita em tal marco, uma tonelada de dióxido de carbono passa a corresponder a um crédito de carbono, o qual pode ser negociado no mercado internacional. O crédito consiste em uma unidade comercial, com objetivos monetários, sendo que seu valor varia diariamente, pois sua atribuição de valor é dada por fatores externos. No Brasil, a compra e venda de créditos é dada por meio de leilões promovidos pela BM&FBovespa, sendo as transações realizadas em ambientes eletrônicos. Para essa comercialização dos créditos, utiliza-se o processo de *cap and trade*, responsável direto pela limitação de emissão de gases nocivos ao ambiente. Como uma ideia valorativa, em 18/3/2015, a Bovespa fechou com a cotação de 6,79 euros (aproximadamente, em cotações do dia, R\$ 23,63 ou US\$ 7,36) para cada tCO<sub>2</sub> (cada crédito de carbono) [33].

Entretanto, como há outros gases, igualmente contribuintes para o efeito estufa, o mercado de carbono não se restringe apenas ao CO<sub>2</sub>: a partir do conceito de "carbono equivalente", os demais gases podem ser convertidos para o gás carbônico, de modo a também serem negociados (há uma verdadeira comparação entre o potencial de aquecimento global do gás em estudo em relação ao dióxido de carbono). Três são os mecanismos de mercado, além das ações de caráter nacional e dos esforços de redução individuais: comércio de emissões – países com limites de emissões sobrando (aquelas que foram devidamente autorizadas, mas não foram utilizadas) podem vender o excesso para aqueles que emitam acima do limite–; implementação conjunta – de maneira flexível e com eficiência em custo, possibilita que um país possa atingir suas metas de redução, enquanto o país hospedeiro se beneficia de investimentos estrangeiros e transferência de tecnologia–; mecanismo de desenvolvimento limpo – países não signatários do Protocolo podem reduzir a emissão de gás carbônico, gerando reduções certificadas de emissões (CER – unidade emitida pelo agente fiscalizador para a tCO<sub>2</sub> de benefício ao ambiente), as quais podem ser convertidas em termos de crédito de carbono, abrindo-se o leque para a comercialização deste com países signatários.

Dessa forma, o Protocolo de Kyoto representa o chamado mercado regulado (*compliance*), no qual os países apresentam metas de reduções a serem cumpridas de forma obrigatória. De outra sorte, existe, também, o mercado voluntário, em que empresas, ONGs, instituições, governos ou cidadãos reduzem, voluntariamente, as emissões de gases estufa, o que é suficiente para gerar os créditos de carbono por meio da verificação da redução de emissão (VER), os quais podem ser auditados e computados por sistemas independentes da ONU. É neste escopo do mercado voluntário que se insere a vantagem econômica proveniente da redução da emissão de gases estufa de uma usina sucroalcooleira associada à fazenda de microalgas.

Outrossim, não é apenas a não emissão da tonelada de gás carbônico que gera o crédito de carbono (positivo): o seu sequestro da atmosfera também é suficiente para gerar <sup>[34]</sup>. Isso é de suma importância, porque a biomassa de microalgas apresenta uma característica muito particular: a quantidade de gás estufa sequestrada do ambiente para a sua produção é maior do que aquela liberada durante a sua queima. Isso implica a situação de que, além de gerar créditos de carbono por meio da não emissão, as "usinas sucroalcooleiras autossuficientes" gerariam créditos por meio do sequestro do dióxido de carbono atmosférico necessário à produção da biomassa referida. A comercialização destes créditos no mercado regulado pode gerar importantes ganhos econômicos à usina estudada.

### **1.2.5. BIORREFINARIAS**

Consoante definição dada pela Embrapa<sup>[35]</sup>, "biorrefinaria é uma instalação que integra processos de conversão de biomassa em biocombustíveis, insumos químicos, materiais, alimentos, rações e energia. O objetivo de uma biorrefinaria é otimizar o uso de recursos e minimizar os efluentes,

maximizando os benefícios e o lucro. As biorrefinarias integram diversas rotas de conversão – bioquímicas, microbianas, químicas e termoquímicas – em busca do melhor aproveitamento da biomassa e da energia nela contida".

Os conceitos de biorrefinaria e da química verde enfocam o aproveitamento da biomassa de modo que se tenham cadeias de valor similares àquelas dos derivados do petróleo, mas com menor impacto no meio ambiente, agregando valor à cadeia produtiva. A otimização do uso da biomassa busca a utilização de sistemas integrados (matérias-primas, processos, tecnologias, produtos e resíduos) sustentáveis, de acordo com parâmetros técnicos que levam em conta, entre outros aspectos, os balanços de massa e de energia, o ciclo de vida, o desenvolvimento socioeconômico regional, a geração e o consumo dos produtos e serviços de forma distribuída e a mitigação da emissão de gases do efeito estufa. Os produtos químicos desenvolvidos a partir de coprodutos e resíduos são os que possuem maior potencial de agregação de valor às cadeias produtivas da biomassa, em função da participação estratégica da indústria química no fornecimento de insumos e produtos finais a diversos setores da economia, como o petroquímico, farmacêutico, automotivo, construção, agronegócio, cosméticos, etc. Nas biorrefinarias, de forma geral, haverá produtos de grande volume e de baixo valor econômico unitário (como, por exemplo, os biocombustíveis). Em contrapartida, haverá também produtos de pequeno volume, mas de alto valor agregado (como especialidades químicas, aditivos, etc.) [35]. A Figura 1.7 ilustra esquematicamente o ideal por trás das biorrefinarias:

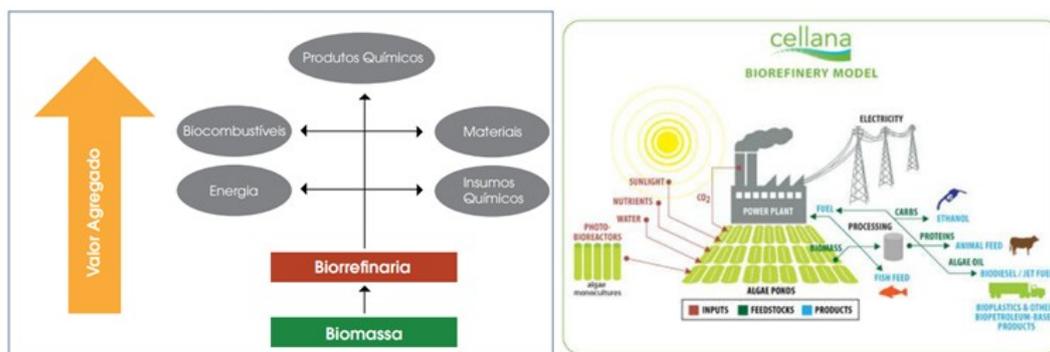


Figura 1.7. Representação do Conceito de Biorrefinaria [36]

No caso do presente trabalho, como se convencionou pela queima da biomassa seca de microalgas com fins de geração de energia elétrica, o conceito de biorrefinaria de microalgas não se faz muito aplicável (claro é que a própria usina sucroalcooleira representa uma grande biorrefinaria, na medida em que se visa à máxima utilização eficiente de todos os recursos e rejeitos de cada etapa do processo – ao atual processo produtivo da Jalles Machado, seria acrescida uma nova etapa, a de produção de biomassa seca de microalgas com vistas a aumentar a geração de eletricidade por parte da usina). Nesse sentido, importante é frisar que a escolha pela queima da biomassa (bruta) de microalgas se deu em virtude da viabilidade econômica para a usina Jalles Machado: não faria sentido, sob a óptica

econômica, a indústria investir grandes montantes em rotas de geração dos subprodutos da biomassa (conceito de biorrefinaria), mas, sim, utilizar sua já existentes caldeiras (que queimam o bagaço da cana para geração de eletricidade) para também queimar a biomassa de microalga, com vistas a aumentar a geração energética.

### **1.2.6. EXERGIA**

A exergia de um sistema pode ser considerada toda a energia disponível que pode ser utilizada em um processo, ou seja, é o potencial de trabalho útil de uma determinada quantidade de energia em determinado estado (Çengel et al., 2007). Dessa forma, do ponto de vista termodinâmico, a exergia, ou disponibilidade energética, de um sistema nada mais é do que o trabalho máximo que se pode obter levando-se o sistema ao estado de equilíbrio com o ambiente ao redor.

De acordo com a primeira lei da Termodinâmica, a energia não pode ser destruída durante um processo, podendo apenas ser transformada em uma forma diferente da anterior. Todavia, a exergia pode ser destruída durante um processo, mormente devido às irreversibilidades, gerando um acréscimo de entropia, podendo tais irreversibilidades ser vistas como "energia que poderia ter sido convertida em trabalho, mas que não foi", tendo servido apenas para o aumento de entropia do ambiente.

Ou seja, um balanço de energia, baseado na primeira lei da Termodinâmica, pode ser um caminho na determinação de como a energia está sendo utilizada em uma operação de realização de trabalho ou de conversão da forma de energia. Entretanto, tal balanço não provê informação a respeito da quantidade de exergia que está sendo degradada durante o processo, não sendo, portanto, suficiente para qualificar ou quantificar a energia utilizável que está fluindo pelo sistema, saindo em forma de produtos ou sendo desperdiçada.

De acordo com Dincer et al. (1999), é possível descrever algumas características a respeito da exergia: um sistema em completo equilíbrio com o ambiente não possui exergia, ou seja, se não há nenhuma diferença de pressão, temperatura ou concentração, por exemplo, não existe nenhuma força motora para o processo; a exergia de um sistema é aumentada quanto maior for a diferença do sistema para o ambiente – assim sendo, uma porção de água quente possui maior exergia no inverno do que no verão, por exemplo (a exergia, portanto, não depende somente do estado do sistema ou do fluxo, mas também do ambiente ao redor); quando a energia perde sua qualidade, significa que a exergia foi destruída, pois esta é a parte útil daquela, a parte que possui valor econômico (ou outro valor de interesse).

Alguns pontos que destacam a importância da exergia e sua utilização podem ser fornecidos, especificamente, pela análise exergetica, a qual é um método e uma ferramenta importante para: combinar e aplicar os princípios da conservação de massa e conservação da energia conjugados à segunda lei da Termodinâmica para projetar e analisar a energia de um sistema; melhorar a eficiência

do uso da energia e outros recursos, identificando as eficiências que se aproximam da ideal, assim como os locais, tipos e verdadeiras magnitudes das perdas; revelar quando (e o quanto) é possível projetar sistemas mais eficientes por meio da redução das deficiências dos sistemas existentes; abordar e reduzir o impacto do tipo da fonte de energia e outros recursos de utilização sobre o meio ambiente; identificar se um sistema contribui para atingir um desenvolvimento sustentável.

Sabe-se que a análise exergética é uma forte ferramenta para as análises de engenharia, já que, para o desenvolvimento e a caracterização de um projeto, deve ser levada em consideração uma técnica razoável e eficiente a um custo baixo, prevalecendo não somente os objetivos técnicos, econômicos e legais, mas também objetivos éticos, ecológicos e sociais (Dincer et al., 1999).

Dessa forma, a avaliação de um ciclo de vida exergético é o método que melhor se enquadra nos objetivos de preservação ambiental e utilização mais eficiente das fontes de energia (Dincer et al., 1999), sendo aquele a ser utilizado neste Projeto de Graduação. Nesse diapasão, a Figura 1.8 ilustra, esquematicamente, o conceito de exergia, em que esta pode ser entendida como o máximo trabalho disponibilizado por um estado de energia, em que há perdas não energéticas devidas às irreversibilidades do processo, as quais representam o conceito de entropia:

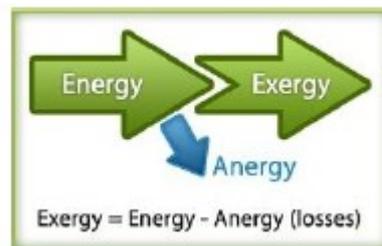


Figura 1.8. Representação Esquemática para o Conceito de Exergia <sup>[36]</sup>

# 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITOS APLICÁVEIS

## 2.1. MICROALGAS E SUAS TECNOLOGIAS

Nesta seção, discutem-se alguns dos principais conceitos aplicáveis às microalgas, sendo seus importantes detalhamentos e especificações feitos no Apêndice deste Projeto de Graduação.

### 2.1.1. SISTEMAS AUTOTRÓFICO, HETEROTRÓFICO E MIXOTRÓFICO DE CRESCIMENTO DE MICROALGAS

A proeminência dos biocombustíveis de microalgas é especialmente devida à possibilidade de independência energética, à neutralidade de carbono, à renovabilidade, à abundante disponibilidade, à maior eficiência de combustão e à maior biodegradabilidade (Mohan et al., 2013). Dessa forma, a produção de microalgas vem ganhando aceitação por causa de sua potencial viabilidade econômica e de sua sustentabilidade ambiental quando comparada aos biocombustíveis provenientes de produções agrícolas (Chisti, 2008).

A acumulação de compostos ricos em energia é o primeiro passo para a biossíntese lipídica nas microalgas – há, aqui, uma variação importante entre as células autotróficas (geram seu próprio carbono, por meio da fotossíntese, convertendo fontes físicas (luz) e químicas ( $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ) de energia em carboidratos) e as heterotróficas (apenas assimilam o carbono externo). O procedimento mais comum para o cultivo de microalgas é o modo autotrófico, sendo a grande vantagem do processo a produção de óleo nas algas às expensas do  $\text{CO}_2$  atmosférico, o que implica um ganho ambiental bastante elevado, sendo, portanto, o maior interesse neste trabalho. Por sua vez, o cultivo foto-heterotrófico consegue evitar as limitações causadas pela dependência luminosa, as quais são a maior obstrução para o aumento de escala dos PBRs de microalgas autotróficas. No mesmo sentido, o cultivo heterotrófico também se apresenta como mais adequado quando o meio de emprego forem as águas residuais (Mohan et al., 2013).

Nesse diapasão, o cultivo de microalgas pode ser realizado por processo autotrófico, heterotrófico, mixotrófico e foto-heterotrófico. No escopo da cultura autotrófica, as microalgas utilizam a radiação solar como fonte de energia e carbono inorgânico ( $\text{CO}_2$ , por exemplo) como fonte de carbono, para formar energia química por meio da fotossíntese. Diferentemente, o cultivo heterotrófico é realizado quando a espécie de microalga utiliza carbono orgânico como fonte de energia e de carbono (em ausência ou presença de energia luminosa). O processo mixotrófico ocorre quando a microalga, sob

fotossíntese, utiliza como fonte de carbono para o seu crescimento compostos orgânicos e  $\text{CO}_2$  (ela reutiliza o dióxido de carbono gerado durante a sua respiração celular – e, como utiliza compostos orgânicos também, o crescimento da biomassa não é limitado pela energia luminosa). A cultura mixotrófica apresenta uma redução na fotoinibição e um aumento das taxas de crescimento em relação aos dois métodos anteriores. Por sua vez, o cultivo foto-heterotrófico ocorre quando a microalga requer radiação solar quando utiliza compostos orgânicos como fonte de carbono (Mohan et al., 2013). A Figura 2.1 ilustra, esquematicamente, as principais diferenças de comportamento intracelular para nutrições autotrófica, heterotrófica e mixotrófica:

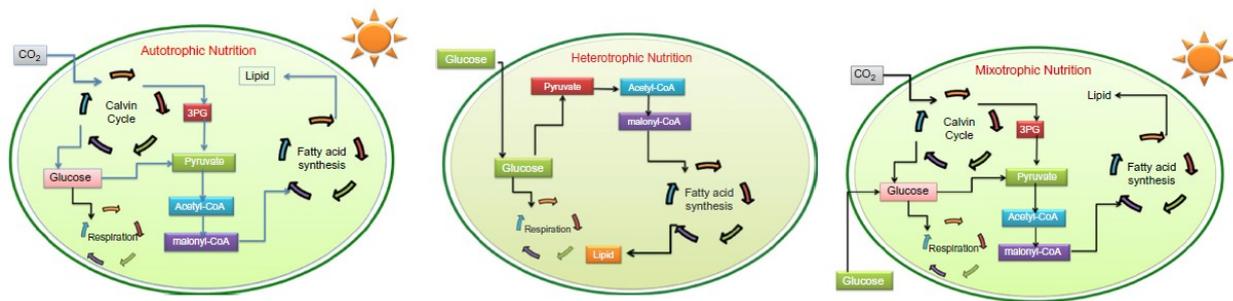


Figura 2.1. Nutrições Autotrófica (esq.), Heterotrófica (meio) e Mixotrófica (dir.) (Mohan et al., 2013)

De acordo com Mohan et al. (2013), o sistema autotrófico é o mais comum para o crescimento de microalgas para a produção de bio-óleo, especialmente porque, caso fossem usadas as fontes orgânicas, haveria um custo muito elevado para a produção de alga com baixo valor agregado (dificilmente haveria a compensação financeira). Além disso, o autor cita o aspecto de que a redução de emissão de  $\text{CO}_2$  (buscando-se uma emissão líquida nula) seria mais facilmente alcançada caso houvesse uma conversão direta em biocombustíveis a partir de um substrato de dióxido de carbono. Dessa forma, o método ideal para a reutilização do  $\text{CO}_2$  advindo dos gases da fermentação na usina Jalles Machado seria o crescimento fotoautotrófico das microalgas (Mohan et al., 2013). Assim, apesar de o crescimento heterotrófico das microalgas ser mais rápido do que o autotrófico, caso se considere o viés de viabilidade econômica, bem como de impacto ambiental, opta-se por este em detrimento daquele.

Entretanto, como a sugestão para este Projeto de Graduação consiste na utilização da vinhaça (rica em carbono orgânico) como um dos componentes para o meio de cultivo, o sistema a ser escolhido é o mixotrófico: com retirada de carbono inorgânico do dióxido de carbono proveniente das unidades fermentadoras da usina Jalles Machado e de carbono orgânico da vinhaça. Tal meio de operação contribui para reduzir a fotoinibição do crescimento, aumentar a taxa de desenvolvimento da biomassa, além de haver diminuição do potencial degradante da vinhaça e de haver significativa captura do gás carbônico inorgânico.

### **2.1.2. FIXAÇÃO DE CO<sub>2</sub>**

As fontes de CO<sub>2</sub> para o cultivo de microalgas são o atmosférico, aquele proveniente dos gases de combustão industrial e aquele quimicamente fixado na forma de carbonatos solúveis (Costa et al., 2013), sendo que um quilograma de biomassa seca de algas utiliza por volta de 1,83 kg de CO<sub>2</sub> (Brennan e Owende, 2010). A concentração de gás carbônico deve ser precisamente controlada, porque é um fator limitante para a produção da biomassa a partir de microalgas: se houver baixa disponibilidade do gás (seja pela fonte utilizada, seja pelo sistema de mistura ineficiente), ocorrerá uma limitação nutritiva para o crescimento adequado; por outro lado, se houver gás em excesso, ocorrerá uma redução no pH, o que pode inibir o crescimento de algumas espécies de microalgas (Wang et al, 2012).

Costa et al. (2013) corroboram com a escolha de posicionamento da algacultura em região adjacente a unidades fermentadoras de usinas sucroalcooleiras ao afirmar que tanques abertos podem ter fonte limitada de carbono, devido à baixa transferência de massa. Segundo ele, o simples borbulhamento de CO<sub>2</sub> pode não ser suficientemente efetivo, porque o tempo de vida (residência) da bolha pode ser muito curto, de modo que ela seja perdida na atmosfera. Nesses casos, então, precisaria-se de uma alta concentração do gás livre a ser mantida por meio de injeção direta dos gases de combustão das usinas de energia.

Ainda segundo Costa et al. (2013), o controle do momento de injeção de CO<sub>2</sub> é feito por meio do pH, já que a biofixação do gás pode ser majorada quando se mantém um ambiente alcalino – tal configuração acelera a absorção do gás por meio das reações de hidratação do CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, das reações ácido-base para formação do ânion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Nesse sentido, o sistema de controle da injeção do gás é do tipo liga-desliga: quando o pH excede determinado valor de referência (torna-se alcalino), tem-se o fornecimento do gás.

### **2.1.3. CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIOREATORES FECHADOS E ABERTOS**

De acordo com Yen et al. (2013), um dos maiores obstáculos que impede a comercialização de biocombustível proveniente de microalgas é o alto custo dos PBRs e a alta demanda de serviços auxiliares ou de entrada de energia intensiva durante o processo. Os sistemas abertos podem ser divididos naqueles de água natural (lagoas e lagos) e naqueles artificiais (tanques e contêineres), sendo extremamente susceptíveis de contaminação resultante da livre troca gasosa entre o ambiente e o sistema de cultivo. De acordo com Yen et al. (2013), a Tabela 2.1 apresenta vantagens e desvantagens

para cada sistema (deve-se sempre ter em mente que os tanques abertos, apesar de serem claramente mais precários do que os sistemas fechados, são mais vantajosos para a produção de extratos com menor valor agregado, como é o caso da biomassa queimada integralmente, sem separação de compostos mais valiosos comercialmente – então, por causa do custo e da simplicidade técnica, além da facilidade para o alcance da larga escala, aqueles são mais comuns do que estes para presente aspirações).

Apesar de o sistema de tanque simples (circular com misturador central rotativo) ser bastante simples, ele tem um inconveniente notório: o ambiente ao redor dos tanques não está completamente sob controle (na verdade, está bem pouco controlado). Não obstante, trata-se do método mais utilizado para a produção industrial de microalgas. Os *raceways*, por sua vez, apresentam, em sua maioria, uma profundidade de água de 15-20cm, além de usarem as rodas de pás como mecanismo de mistura e de elevação das microalgas, o que propicia um melhor controle ambiental do que os tanques simples, de modo a serem os dispositivos abertos mais utilizados (Yen et al., 2013).

Os sistemas fechados (aqueles PBRs que não apresentam troca gasosa ou de contaminantes direta entre o cultivo e o ambiente externo), por seu alto custo, apenas são justificáveis para produção de componentes com alto valor agregado. A Tabela 2.2 representa limitações e prospecções de diversos sistemas de algacultura (Yen et al., 2013).

Um PBR vertical de coluna é composto por vidro ou acrílico, de modo a permitir a penetração luminosa. Um sistema de aspersor de gás é colocado no fundo do reator, de modo a converter o gás de entrada em minúsculas bolhas, as quais são suficientes para funcionar como mecanismo misturador (normalmente, não são utilizados mecanismos de agitação física), bem como transferir CO<sub>2</sub>, remover o O<sub>2</sub> produzido. Por sua vez, um PBR de placa plana é aquele que recebe insolação de ambos os lados, além de apresentar um sistema de agitação por aeração. Por último, o PBR tubular horizontal é o mais utilizado em níveis comerciais, apresentando tubos com pequeno diâmetro, com vistas a possibilitar a adequada penetração luminosa. A característica mais significativa deste sistema é o aumento do tempo do ar dentro do reator, o que promove maior dissolução do CO<sub>2</sub>, ou seja, maior eficiência na injeção do gás.

Tabela 2.1. Vantagens e Desvantagens dos Sistemas Abertos e Fechados

<b>Parâmetro</b>	<b>Tanques Abertos (Raceways)</b>	<b>Sistemas Fechados de Fotobiorreatores</b>
Risco de Contaminação	Extremamente Alto	Baixo
Espaço Requerido	Alto	Baixo
Perdas de Água (Evaporação)	Muito Altas	Quase Nenhuma
Perdas de CO <sub>2</sub>	Altas	Quase Nenhuma
Qualidade da Biomassa	Insensível	Sensível
Variabilidade Quanto às Diversas Espécies de Algas	Restrita a Poucas Espécies	Alta, Quase Abarcando Todas as Espécies de Microalgas
Flexibilidade de Produção	Praticamente Nenhuma	Alta
Reprodutibilidade dos Parâmetros de Produção	Baixa; Dependência dos Fatores Externos	Possível com Algumas Tolerâncias
Controle do Processo	Baixo	Alto
Padronização	Impossível	Possível
Dependência Climática	Altíssima; Produção Impossível Durante Chuvas	Insignificante; Permite Produção Durante Mau Tempo
Período de Atingimento da Produção Líquida após Início ou Interrupção	Longo: 6-8 Semanas	Curto: 2-4 Semanas
Concentração de Biomassa Durante a Produção	Baixa: 0,1 a 0,2 g/L	Alta: 2 a 8 g/L
Eficiência dos Processos de Tratamento	Baixa: Lenta e com Altos Fluxos Volumétricos	Alta: Rápida e com Baixos Fluxos Volumétricos
Necessidade de Limpeza	Não	Sim
Investimento de Capital	Baixo	Elevado

Tabela 2.2. Prospecções e Limitações de Diversos Sistemas de Algalicultura

Sistemas		Prospecções	Limitações
<b>Aberto</b>	Tanques	Relativamente econômico, fácil de limpar após a cultura, sendo bom para grandes algaculturas	Pequeno controle das condições de cultura, dificuldade em mantê-la por longos períodos, baixa produtividade, ocupa grandes áreas, limitado a poucas espécies de algas, já que as culturas são facilmente contaminadas
	<i>Raceways</i>	Pode ser operado de modo contínuo	Necessita de uma alta razão área/volume, além de alta potência da roda de pás girante para evitar a precipitação
<b>Fechado</b>	PBRs Verticais de Coluna	Alta transferência de massa, boa mistura com baixos esforços cisalhantes, baixo consumo de energia, alto potencial de escalabilidade, facilidade em esterilizar, reduz a fotoinibição, bom para imobilização de algas e a foto-oxidação	Pequena área de iluminação superficial, construção com materiais sofisticados, estresse para a algacultura
	PBR de Placa Plana	Alta área de iluminação superficial, transformável para culturas externas, bom para imobilização de algas, alta produtividade de biomassa, relativamente barato, facilidade de limpeza, pouco acúmulo de oxigênio	Reprodução em larga escala requer muitos compartimentos e materiais de suporte, dificuldade em controlar a temperatura do cultivo, crescimento na parede e possibilidade de esforço hidrodinâmico em algumas células
	PBRs Tubulares Horizontais	Alta área de iluminação superficial, transformável para culturas externas, produtividade de biomassa razoavelmente boa e relativamente barato	Gradientes de pH, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> dissolvidos ao longo dos tubos, entupimentos ou incrustações, crescimento na parede e requer grandes áreas

## 2.1.4. COLHEITA DA BIOMASSA DE MICROALGAS

De modo propedêutico, é sabido que as algas, de forma geral, são responsáveis por pouco mais de 50% da fotossíntese realizada a nível planetário. Além disso, estudos indicam que a fixação de CO<sub>2</sub> nas algas apresenta ordem de magnitude uma ou duas vezes maior do que nas plantas terrestres (Show et al., 2013). Outras previsões, bastante otimistas, relatam que o consumo anual mundial de gasolina pode ser satisfeito com um cultivo de 121.000 hectares de microalgas em sistemas abertos, ou, de forma mais promissora, de 58.000 hectares de microalgas em sistemas fechados (Chisti, 2008). Nesse cenário de síntese de biomassa a partir de microalgas, a etapa da colheita se insere de modo significativo, até mesmo por ser aquela etapa que encarece sobremaneira o processo, levando-o a ser, por vezes, negligenciado como uma alternativa viável para a substituição dos combustíveis fósseis. Essa colheita, de modo bastante resumido, é feita por meio da separação da biomassa de microalgas do meio de suporte, com o conseqüente processamento, como desidratação, secagem, a própria extração do óleo e o seu fracionamento. A Figura 2.2 representa esquematicamente os processos de cultivo, colheita e processamento para a produção de biomassa de microalgas:

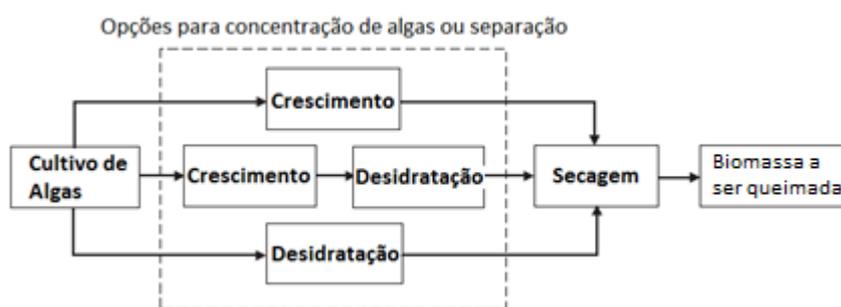


Figura 2.2. Esquema para as Etapas da Algacultura (Show et al., 2013)

Obviamente, as próprias características da microalga cultivada e o estado de seu desenvolvimento afetam significativamente a escolha da tecnologia a ser empregada na colheita, bem como a sua efetividade. De um modo geral, deseja-se um cultivo com alta concentração celular, porque a separação das microalgas, especialmente quando dispostas espaçadamente na suspensão, é muito complicada, já que as superfícies celulares das microalgas costumam ter carga negativa, além do excesso de substâncias poliméricas extracelulares, características que corroboram para a manutenção da estabilidade no estado de dispersão (Show et al., 2013). Então, dado que as concentrações de biomassa de microalgas são geralmente baixas na suspensão, apesar do desejo de não o serem, a colheita pode ser um processo extremamente oneroso.

Apesar de ser sabido que a carga superficial aumenta a estabilidade da suspensão, estudos apontaram que existe um nível ótimo de carregamento por ozonização, em que a coagulação das

microalgas é máxima, facilitando, assim, a separação das células do próprio meio de cultivo. As microalgas geralmente apresentam carga negativa superficial, especialmente derivada da ionização de grupos funcionais orgânicos da parede celular das algas, bem como da adsorção seletiva de íons do meio de cultura (concentração iônica do meio), do pH e de outras condições ambientais (Show et al., 2013). Nesse sentido, baseando-se na teoria da estabilidade de suspensões coloidais, as interações entre as partículas são regidas por diversas forças eletrostáticas de repulsão e de atração (van der Waals). Dessa forma, surge uma força eletrostática resultante a ser sobrepujada para que seja possível a coagulação das células, a qual pode ser minorada ou atacada pela própria energia cinética das células.

Para o estudo da sedimentação das microalgas, deve ser considerada a lei de Stokes para a atuação gravitacional, nos seguintes termos simplificados: a célula da microalga deve ser considerada como um objeto esférico que sedimenta em um meio viscoso contínuo, governado por sua força gravitacional para baixo, contrabalançada por seu empuxo (encarara-se, simplificado, como o atrito) para cima. Caso a microalga "desça" pela ação de seu próprio peso gravitacional, uma velocidade terminal de sedimentação é alcançada quando as forças friccionais adicionadas ao empuxo equivalem à força gravitacional. De fato, esse modelo simplificado é bastante mais complexo quando se estuda a algacultura, sobretudo por haver fatores como a mobilidade celular, os escoamentos turbulentos dentro dos tanques, as estratificações causadas pelo vento e pela temperatura e os próprios escoamentos induzidos pelo sistema misturador. Como própria decorrência do princípio de Stokes, o aumento da velocidade de sedimentação é causado, sobretudo, pelo aumento das dimensões celulares, especialmente quando se consideram eventuais agregados formadores de corpos maiores (Show et al., 2013).

A colheita da biomassa, por definição, consiste na retirada desta do meio de cultura, fase que, segundo Costa et al. (2013), responde por 20-30% do custo total da produção da biomassa. De modo geral, os custos desta operação são relativamente altos, especialmente devido à baixa concentração inicial de biomassa e ao fato de que as células são carregadas negativamente, além do fato de haver um excesso de matéria orgânica, o que contribui para a sua estabilidade em um estado disperso (Brennan e Owende, 2010). Obviamente, a seleção do método ideal de colheita depende das especificidades de cada espécie, mas, regra geral, este é composto por duas etapas: separação da biomassa de microalga do meio de cultivo e concentração de biomassa com remoção dos excessos do meio (Costa et al., 2013). A seguir, são dispostos alguns dos principais métodos para o fazimento da colheita:

- a) Sedimentação por gravidade: é o método mais utilizado para a colheita de biomassa de microalgas de plantas de tratamento de águas residuais, especialmente por causa do elevado volume de trabalho, bem como a reduzida quantidade de biomassa formada. Dessa forma, *a priori*, a sedimentação deve ser o mecanismo utilizado para a produção de biomassa, já que esta, sem qualquer tipo de separação, enquanto destinada à queima em caldeiras, apresenta

menor valor agregado. Além disso, esse método só pode ser aplicado para microalgas de mais elevado diâmetro (acima de 70  $\mu\text{m}$ ), como a *Spirulina*. Por fim, para aumentar a eficiência do processo de sedimentação, geralmente se utiliza a floculação (agentes floculantes) – inclusive, eles devem ser utilizados para a produção da biomassa.

- b) Floculação: trata-se da primeira etapa de praticamente qualquer colheita, já que visa à agregação das microalgas, aumentando o tamanho dos particulados, processo que é possibilitado pela adição de floculantes, já que as microalgas apresentam uma carga negativa superficial, o que serve como mecanismo de repulsa à agregação. Os floculantes mais comuns são o sulfato e o cloreto de alumínio, além do cloreto férrico.
- c) Centrifugação: utilização da aceleração centrípeta para a separação das microalgas do meio de cultivo, podendo ser aplicada a qualquer espécie de microalga. Entretanto, a centrifugação apresenta algumas desvantagens: a alta força gravitacional pode alterar a estrutura celular; a biomassa de microalgas frágeis requer uma pequena velocidade de centrifugação; o sal contido na cultura de microalgas pode levar à corrosão dos equipamentos; um processo em larga escala requer equipamentos muito dispendiosos.
- d) Filtração: é um processo de separação especialmente destinado para grandes microalgas, como a *Spirulina*, sendo insatisfatório para as microalgas pequenas, como a *Chlorella*. A filtração é um método de simples operação e construção, bem como de baixo investimento, apresentando, porém, a precípua limitação de reduzir a permeabilidade do fluxo durante o processo, devido à própria idealização do método de absorver e concentrar os compostos na membrana superficial.
- e) Flotação: bolhas de ar ou gás são direcionadas às partículas sólidas, de modo a levá-las à superfície do líquido. A sua principal vantagem é a possibilidade de capturar as grandes e as pequenas microalgas, a depender dos métodos de flotação por ar dissolvido (bolhas de 10-100  $\mu\text{m}$ ) ou flotação por ar disperso (bolhas de 700-1.500  $\mu\text{m}$ ).
- f) Eletroforese: um campo elétrico direciona as microalgas à parte externa da solução. Alguns dos principais benefícios dessa técnica dizem respeito a compatibilidade ambiental, versatilidade, eficiência energética, segurança e seletividade, mas o elevado custo mitiga o emprego do método em larga escala.

Por sua vez, o processo de secagem é uma das maiores limitações da produção de baixo custo de biocombustíveis de microalgas. Repetindo-se o tradicional conhecimento, a escolha do processo de secagem depende de cada espécie de microalga, mas, de modo geral, o processo de desidratação aumenta a vida útil da biomassa, bem como a do produto final. Alguns dos métodos mais utilizados incluem a secagem por pulverização, em tambor, por congelamento ou ao sol (Costa et al., 2013). Entretanto, a secagem ao sol não é eficiente para transformar a biomassa úmida em pó útil, bem como a secagem por pulverização não é economicamente viável para a produção de biocombustíveis (produtos de baixo valor).

## 2.1.5. ASPECTO ECONÔMICO PARA A PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS

Apesar do mercado já bastante sedimentado para alguns produtos derivados de microalgas, sobretudo aqueles com alto valor agregado (química fina, farmacêuticos, nutracêuticos e alimentação), os mercados de grande escala, como o de energia, têm o potencial para absorver enormes quantidades de biomassa de microalgas – estimam-se quantias da ordem de  $10^7$  toneladas por ano –, mas o preço da biomassa nesses mercados é bastante reduzido (em torno de \$ 0,01 – 0,70/kg), razão pela qual o custo da produção de microalgas deve ser bastante minorado para o atendimento do mercado energético (Chisti, 2008).

Para a avaliação do custo de produção de biomassa de microalgas por meio de qualquer processo, é necessário conhecer o fluxograma completo deste em detalhes, incluindo a lista de equipamentos (e seus tamanhos), a quantidade de matéria-prima e a demanda energética. Na abordagem do estudo feito por Grima et al. (2013), a Figura 2.3 sumariza os passos necessários para definir as maiores contribuições para o custo de produção, quais sejam: depreciação, matérias-primas e utilidades, trabalho e supervisão. O custo total de produção é calculado como a soma da depreciação e dos custos diretos de produção (os demais, supramencionados). A partir do diagrama de blocos do processo (uma abordagem conceitual), o seu fluxograma detalhado pode ser definido baseado na capacidade de produção e nos parâmetros cinéticos das diferentes unidades de operação utilizadas. O fluxograma permite conhecer o tipo e o tamanho dos equipamentos necessários, bem como os balanços de massa e energia do processo global.

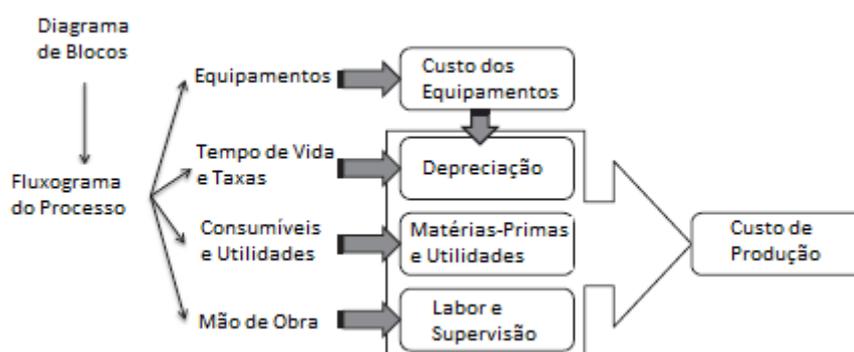


Figura 2.3. Etapas Necessárias para o Fazimento de uma Análise de Custos do Processo de Produção de Microalgas (Grima et al., 2013)

O custo dos equipamentos principais pode ser obtido com os fornecedores ou, alternativamente, com referências bibliográficas ou bancos de dados. A partir dessa informação, o capital total fixado é calculado, com base na multiplicação pelo correspondente fator de Lang apropriado para a natureza do

item. O valor desse fator é disponível para uma grande variedade de processos, incluindo aqueles envolvendo o cultivo de microalgas. A depreciação, a seu turno, não inclui somente a amortização do capital fixado, que é função do tempo de vida estimado, mas também dos impostos sobre propriedade e compras, além de seguros (Grima et al., 2013).

Os custos de produção direta incluem as matérias-primas, as utilidades, o trabalho e outros (supervisão, manutenção, taxas, contingências e etc.). A quantidade de matéria-prima requerida é calculada pelo balanço de massa, de acordo com o especificado no fluxograma, enquanto o consumo de utilidades é calculado a partir do uso de potência (o custo da energia pode variar, o que demanda uma análise mais apurada) e de água dos processos. O custo relativo às matérias-primas deve incluir o transporte para a unidade produtora, bem como os valores de mercado oferecidos pelos fornecedores (Grima et al., 2013).

Nesse diapasão, como já discutido, a água é um importante fator para a produção de biomassa de microalgas, de modo que o seu custo deve ser precisamente determinado. O custo da água é uma função direta de sua qualidade (água do mar, água salobra, água doce ou água residual) e do volume utilizado. Além disso, o custo do tratamento das águas residuais provenientes de efluentes da instalação também deve ser incluído. Para facilitar a interpretação dos dados e aumentar a organização, a demanda energética para bombear a água para dentro/fora da instalação deve ser separada da demanda para promover a circulação dentro dos tanques ou dos PBRs (Grima et al., 2013).

Por sua vez, o labor consiste nos trabalhadores necessários para operar corretamente o processo, bem como os custos gerais de supervisão e gestão, além de manutenção, taxas e contingências. Esse custo varia bastante de acordo com as qualificações profissionais e com a localidade da instalação (Grima et al., 2013).

Seguindo a metodologia qualitativamente proposta, é possível determinar o custo de produção de biomassa de microalgas para qualquer instalação. Além disso, o custo de produção para qualquer outra escala pode ser aproximado com a equação (1), também proposta por Grima et al. (2013):

$$\text{Custo}_B = \text{Custo}_A * \left( \frac{\text{Tamanho}_B}{\text{Tamanho}_A} \right)^{0,85} \quad (1)$$

O expoente de 0,85 é considerado apropriado (sem explicações adicionais sobre a metodologia utilizada para encontrá-lo, tendo sido, provavelmente, fruto de um estudo estatístico). Entretanto, a equação não é válida para mudanças muito abruptas de escala, porque determinadas tecnologias podem ser viáveis em uma escala, mas podem não estar disponíveis na outra. Dessa forma, um fator de expansão máximo de 10 é considerado aceitável, sem necessidade de revisão tecnológica. Quando se

deseja uma expansão maior do que esta, ela deve ser resolvida por meio da multiplicação do número de unidades (Grima et al., 2013).

O autor aplica sua metodologia a diversos estudos de caso, desde produção de biomassa de alto valor agregado, até aquela de baixo valor, utilizada para a produção de biocombustíveis, sendo, portanto, de interesse para o presente trabalho. De forma bastante resumida, será feita uma análise do estudo proposto pelo autor, com vistas à futura aplicação para o caso concreto em análise, que será a verificação da viabilidade de utilização de tanques abertos *raceway* de microalgas para produção de biomassa (a ser queimada nas caldeiras pré-existentes na própria usina), sendo a disposição feita em associação à usina sucroalcooleira Jalles Machado.

### 2.1.6. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA À PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS (GRIMA ET AL., 2013)

Apesar das expectativas bastante promissoras, para que as microalgas se tornem uma realidade no mundo dos biocombustíveis, elas precisam demonstrar a sustentabilidade de sua produção, além do fato de serem produzidas, em larga escala, em preços comparativamente baixos às fontes tradicionais, como soja, milho e palmeira. Como já discutido, para produzir biocombustíveis de microalgas hábeis a competirem em mercados mundiais de energia, é necessário minimizar as entradas de energia e de nutrientes, bem como seus custos, além de otimizar o rendimento da algacultura e desenvolver rotas adequadas de transformação que permitam a valorização de toda a biomassa, de acordo com o conceito de biorrefinaria.

Para a produção da biomassa, a utilização de águas residuais é requerida como fonte de nutrientes (nitrogênio e fósforo), bem como a utilização de gases de combustão como fonte de carbono (CO<sub>2</sub> livre), o que resulta em uma água purificada e em demais benefícios obtidos por meio do seu processo de tratamento. A Figura 2.4 ilustra o diagrama de bloco do processo de produção de biocombustíveis a partir de microalgas, utilizando águas residuais e gases de combustão:

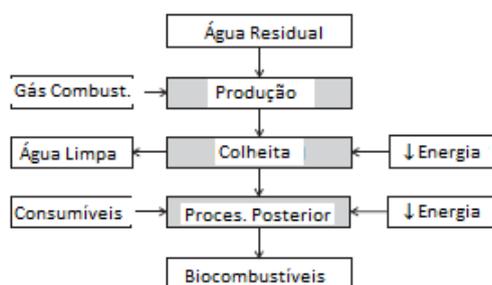


Figura 2.4. Produção de Biocombustível de Microalgas

De acordo com Chisti (2008), caso fosse utilizada a biomassa de microalgas apenas para a produção de biodiesel, estar-se-ia descartando em torno de 70-80% de todo o conteúdo celular, de modo que, com vistas a viabilizar financeiramente o processo, faz-se atrativa a utilização da biomassa residual para produção de outros compostos (sejam biocombustíveis, sejam (preferencialmente) compostos de maior valor agregado). Qualquer que seja o caminho de transformação para a produção de biocombustíveis a partir da biomassa de microalgas, é claro que a etapa produtiva deve ser positiva em termos do balanço energético, além de ser barata – um limite superior de \$ 0,5/kg é aceito pela literatura.

Partindo-se para o estudo concretamente realizado pelo autor, foi utilizada uma instalação de 100 ha, consistente em tanques reatores *raceway* com razão volume/área superficial de 0,2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, operados continuamente com 0,2 L/dia. O consumo energético dedicado à mistura é de 2 W/m<sup>3</sup>, enquanto o consumo de energia de 0,1 KWh/m<sup>3</sup> é assumido para a colheita (com uma etapa de floculação e sedimentação seguida por uma etapa de centrifugação). A utilização de matérias-primas puras (CO<sub>2</sub> e fertilizantes) foi considerada, sendo a produtividade de biomassa de 20 g/m<sup>2</sup>.dia assumida para o ano inteiro (a literatura cita um valor de produtividade anual de biodiesel de cerca de 35.000 L/ha.ano). Com tais dados e entrada, um custo de produção de \$ 1,12/kg foi alcançado, sendo a maior parte devida à utilização de matérias-primas puras, precipuamente o gás carbônico. A Figura 2.5 ilustra, de modo bastante esquemático, as conclusões aferidas no que tange à importância de cada um dos gastos no processo de produção de biocombustíveis a partir da algacultura (Grima et al., 2013).

A segunda maior contribuição para o custo total, como se percebe na Figura 2.5, é decorrente da depreciação, especialmente quanto aos custos dos equipamentos para a colheita. No que diz respeito aos custos com a própria manutenção da instalação, ele é sobretudo representado pelo consumo energético necessário para a operação do tanque e para a colheita, sendo o custo com demanda de água desprezível, apesar da taxa de evaporação anual de 30.000 m<sup>3</sup>/ha.

A partir de todos esses dados, conclui-se que, para reduzir os custos com a produção de biomassa, com vistas a chegar próximo ao objetivo de \$ 0,5/kg, é mandatório aumentar a eficiência no uso de CO<sub>2</sub>, ou substituir o gás puro por gases de combustão. Além disso, a água limpa pode ser substituída por água residual, dirimindo o uso de fertilizantes. Com essas condições, o custo se reduz a interessantes \$ 0,55/kg. Esse custo se eleva a \$ 0,70/kg quando se consideram PBRs fechados e a \$ 1,30/kg quando se consideram tanques abertos, sobretudo devido à sua baixa produtividade (Grima et al., 2013).

Para que se sobreponham estes custos, entretanto, precisa-se melhorar a produtividade do sistema, aproximando-a de valores máximos teóricos, os quais somente foram demonstrados sob condições totalmente controladas e em pequena escala. Portanto, aumentar a produtividade para 40 g/m<sup>2</sup>.dia ou para 60 g/m<sup>2</sup>.dia reduziria os custos de produção para, respectivamente, \$ 0,21/kg e \$ 0,14/kg. Recentemente, foi reportado que, para ser competitiva com petróleo a \$ 100/barril, a biomassa (com

40% de lipídio) deve ser produzida a \$ 0,16/kg, caso não se considere nenhuma utilização posterior da biomassa residual (ou a \$ 0,25/kg caso se considerem créditos nos nutrientes existentes nos resíduos).

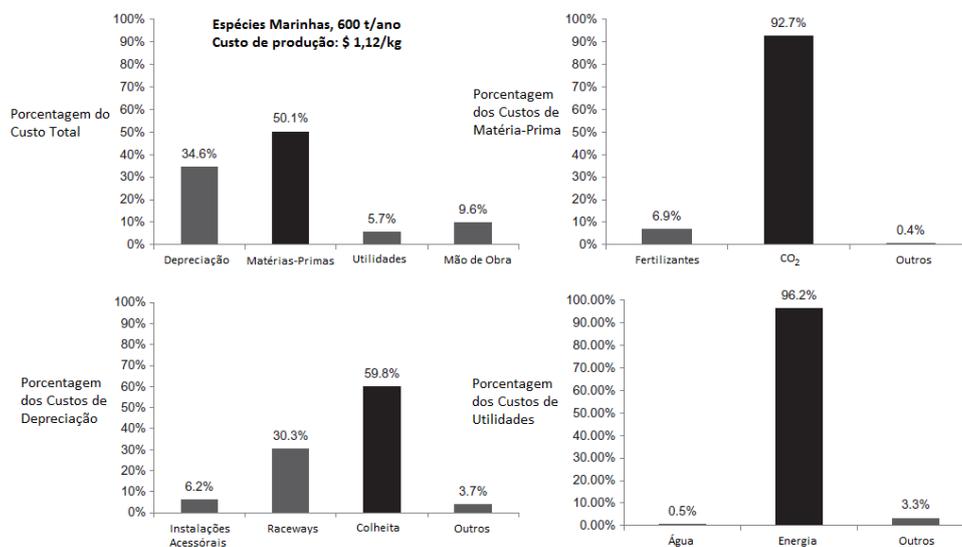


Figura 2.5. Custos para a Produção de Biocombustíveis a partir da Algacultura

Destarte, para se sobrepor por este gargalo da produção de biomassa de microalgas para produção de energia, é essencial desenvolver sistemas de PBRs mais produtivos, reduzindo sobremaneira os seus custos. O projeto e a otimização da operação para os tanques *raceway* abertos vêm começando a melhorar a eficiência do sistema a partir de conhecimentos básicos: caracterização da dinâmica de fluidos e da transferência de massa. Na literatura, é aceito que o investimento em PBRs deve ser menor do que \$ 50/m<sup>2</sup> para que haja uma produção econômica do biocombustível. Nesse sentido, o custo dos tanques *raceway* abertos não passa de \$ 13/m<sup>2</sup> (com tudo incluso, à exceção, é claro, das máquinas para a colheita, que são bastante caras – em torno de \$ 48/m<sup>2</sup> para tanques abertos ou \$ 66/m<sup>2</sup> para PBRs tubulares), o que demonstra o seu potencial de aplicabilidade para o objetivo almejado.

Então, a partir dos dados relatados por Grima et al. (2013), conclui-se que, embora as microalgas ainda não sejam produzidas em larga escala para propósitos energéticos, os avanços recentes permitem o otimismo de esperar que o processo seja desenvolvido, sustentável e economicamente, nos próximos 5 ou 10 anos.

### 2.1.7. EXPANSÃO DA ALGACULTURA E COMERCIALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Desde que as perspectivas positivas para o cultivo de microalgas para a produção de biocombustíveis começaram a ser amplamente deliberadas na literatura, a pesquisa ativa recente e o

seu desenvolvimento têm impulsionado essa indústria para fronteiras mais próximas da ampliação e da comercialização. Não obstante, o balanço de energia em todas as fronteiras do sistema de biocombustíveis de algas não é claramente observado, especialmente devido à disponibilidade limitada de plantas de cultivo comercial para avaliação técnica (Lam et al., 2013). Baseando, portanto, em diversas avaliações de ciclo de vida (LCA) para a produção de biocombustíveis de microalgas, a maioria dos estudos infelizmente revela um balanço negativo em suas avaliações, especialmente quando as algas são cultivadas em PBRs fechados (Lam et al., 2013). Embora alguns parâmetros importantes (rendimento da biomassa, produtividade de lipídios, taxa de crescimento específico) assumidos para os estudos de LCA tenham sido baseados predominantemente em resultados de escala laboratorial (podendo ser considerados irrelevantes para a produção em larga escala), eles dão uma base para a visualização e a identificação de problemas relacionados ao balanço de energia em biocombustíveis de microalgas. Dessa forma, como um resultado desses estudos preliminares, várias medidas de precaução podem ser sugeridas para melhorar a eficiência de conversão de energia de produção de biocombustíveis de microalgas antes de se iniciar a fase de comercialização.

Nesse diapasão, a razão de eficiência energética (EER) é normalmente utilizada como um indicador para balizar a eficiência de conversão energética de todo o sistema de produção de biocombustível. A razão é definida como aquela do total de energia extraído em relação ao total de energia de entrada, em que uma razão maior do que um designa uma energia líquida gerada positiva. Há diversos resultados para a EER de diferentes fontes, de todas as gerações de biocombustíveis, mas eles não são muito congruentes, especialmente devido à sua dependência em relação às condições de contorno assumidas para o cálculo (que variam na literatura). De qualquer forma, uma tendência global dos dados encontrados nas referências utilizadas mostra que o biodiesel derivado de microalgas é bem menos eficiente do que aquele derivado das plantações terrestres (como a soja).

Como dito, entretanto, é verdade que a EER depende muito das condições ambientais aplicadas ao cultivo, de modo que existem relatos de algaculturas extremamente mais eficientes do que a produção de óleo a partir de plantações terrestres (dependendo do tipo de PBR utilizado, da incidência solar e da disponibilidade de nutrientes), mas, enquanto todas as plantações terrestres apresentam uma EER superior à unidade, há alguns cultivos de microalgas que chegam a ínfimos valores de 0,07 (o que demonstra a extrema variabilidade dos dados) (Lam et al., 2013).

Dessa forma, os resultados indicados na literatura não garantem uma saída de energia positiva na utilização de microalgas para a produção de biodiesel e, pior, indicam que pode haver uma produção de biocombustível altamente insustentável. Ademais, os valores encontrados para a EER na literatura ainda são otimistas, já que a possibilidade de utilização de águas residuais contaminadas como fonte de nutrientes (em princípio, isso aumentaria a EER, mas, quando comparada às demais características negligenciadas nos estudos, a sua importância é quase nenhuma), a extração e a eficiência da transesterificação não foram tão bem apontadas nos estudos de LCA (Lam et al., 2013).

## 2.1.8. AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE BIOCOMBUSTÍVEIS DE ALGAS – JUSTIFICAÇÃO DO USO DE BIOMASSA BRUTA

À parte da perspectiva de balanço energético, a viabilidade econômica, associada às inovações tecnológicas, representa um papel importante na garantia de sucesso na produção de biocombustíveis de algas em escala comercial. Baseando-se nas suposições idealistas de que as algas crescem a uma taxa muito elevada (requerem menos do que dez dias para chegar à região de crescimento estacionário) e que conseguem acumular alto conteúdo lipídico (30-70%) dentro das células, o biodiesel resultante deve ser competitivo (ou, pelo menos, apresentar-se de modo semelhante) com o preço do diesel proveniente de petróleo.

De acordo com estudos de Chisti (2008), o óleo recuperado a partir da biomassa de microalgas cultivadas em PBRs fechados custaria aproximadamente \$ 2,80/L, assumindo-se uma biomassa com 30% de óleo e que o processo de recuperação contribuiria com 50% do custo total do processo global. Em comparação ao atual preço do diesel no Brasil (R\$ 2,89/L, em abril de 2015), bem como à luz da cotação do dólar de R\$ 3,00/\$ 1,00, percebe-se que o preço do biocombustível em estudo seria quase o triplo da atual conjuntura. A seu turno, para termos uma ideia de preços de outros biocombustíveis, Wang et al. (2012) informa o custo do biodiesel proveniente de outras fontes renováveis: \$ 1,35/L (óleo de soja) e \$ 0,73/L (óleo residual de frituras). Obviamente, tem-se a lacuna temporal para a evolução tecnológica em relação ao estudo do autor, o que contribuiu, certamente, para reduzir o custo da produção, mas, de modo geral, para que a alternativa se torne viável para os consumidores (muito provavelmente, apesar de todo o cunho ambiental, os consumidores não gostarão de pagar muito mais por um biocombustível em detrimento de um combustível fóssil), devem ser utilizadas microalgas que consigam acumular 70% de óleo em sua biomassa, o que seria suficiente para reduzir o preço para compatíveis \$ 0,72/L.

A Figura 2.6 ilustra a projeção do desempenho técnico-econômico dos biocombustíveis de microalgas para o futuro, bem como a atual fase:

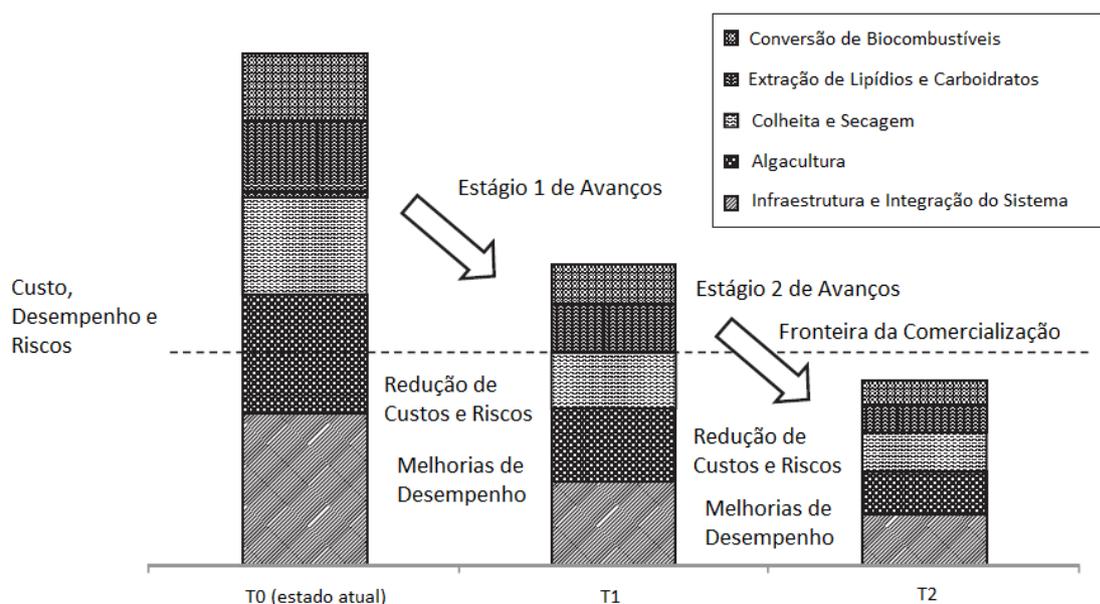


Figura 2.6. Roteiro Técnico-Econômico de Biocombustíveis de Microalgas (Lam et al., 2013)

Pode-se observar que o atual cenário ainda está muito distante do ponto de comercialização, predominantemente devido ao alto custo de investimento e às tecnologias prematuras. Entretanto, com as tecnologias emergentes e a inovação progressiva devido aos esforços governamentais vão pavimentar o desenvolvimento verdadeiro futuro (próximo) para os biocombustíveis de microalgas com custos de produção acessíveis. Todos os problemas que envolvem a cadeia de suprimentos de biocombustíveis de microalgas, como fontes de nutrientes, sistemas de algacultura, colheita, secagem e conversão, devem ser resolvidos para que se atinja a fronteira de comercialização e a viabilidade econômica.

Ainda de acordo com uma simples análise da Figura 2.6, pode-se perceber que, caso o interesse seja a produção da biomassa, para sua queima e geração de energia elétrica (como no caso deste Projeto de Graduação), eliminar-se-ia, diretamente, boa parte dos custos de produção (extração de lipídios e conversão de biocombustíveis), de modo que a viabilidade econômica estaria mais próxima de ser alcançada.

De acordo com Lam et al. (2013), o custo da produção de biocombustíveis a partir de microalgas é definido como a soma de custos operacionais e de capital, subtraídos das receitas derivadas de todos os coprodutos, como mostrado na equação (2):

$$C_{\text{produção}} = \sum_i C_{\text{capital}, i} + \sum_j C_{\text{operacional}, j} - \sum_k C_{\text{coprodutos}, k} \quad (2)$$

O custo de capital geralmente é relacionado a um gasto feito em única vez, como o custo da terra, de prédios, de equipamentos (PBRs, secadores, filtros) e de infraestrutura, tratando-se da maior

importância quantitativa em todo o custo produtivo. Estudos apontam (Lam et al., 2013) que os custos de capital contribuem com 91% do custo total de produção em tanques abertos, e com 94,7% em PBRs fechados, sendo que o custo de capital total para estes sistemas é 153,8% superior ao custo naqueles sistemas (ou seja, os PBR fechados são vistos como um investimento de alto risco para a expansão de escala produtiva). Além disso, o custo de manufatura do PBR fechado contribui com 52,7% dos custos de capital do sistema, o que representa mais de 12,7 vezes o custo de manufatura dos tanques abertos.

Por outro lado, o custo operacional é associado aos gastos contínuos e diários, como energia (para operar todo o sistema) (responde, juntamente com o gasto de água, por 9,2% do custo total operacional), matéria-prima (nutrientes (2,5%, juntamente com a disponibilidade de CO<sub>2</sub>) e água), taxas de manutenção e custos de trabalho (88,3%). Fica claro que a melhor forma de reduzir os custos operacionais seria a redução dos custos laborais, o que pode ser alcançado por meio da maior automação de todo o processo.

No que tange à comparação entre tanques abertos (*raceways*) e PBRs fechados, aqueles apresentam 32,7% a menos de custo operacional do que estes, especialmente devido à facilidade operacional e ao menor consumo de energia. O grande gasto energético em um PBR fechado é devido, sobretudo, à necessidade de instalação de grandes bombas que garantam a circulação e a suficiente mistura das algas. Quanto ao consumo de água, a sua significância econômica é menor do que a do consumo energético, mas a sua utilização exacerbada macula o cunho sustentável da produção de biocombustível a partir de microalgas. Devido à constante evaporação diária, o consumo de água em tanques abertos é entre 3,3 e 6,7 vezes superior àquele em PBRs fechados (Lam et al., 2013).

Os coprodutos que podem ser derivados da biomassa residual de biomassa de microalga após a extração lipídica, por sua vez, são, principalmente, os carboidratos, os quais podem ser um excelente substrato para a digestão anaeróbica ou para o processo de fermentação para a produção de biometano e bioetanol, respectivamente. Estes coprodutos podem ser desviados para o uso na fazenda de algacultura, com vistas a reduzir a carga de energia, ou podem ser vendidos como combustíveis energéticos. Entretanto, vale a pena frisar que, para garantir a geração dos coprodutos referidos, custos adicionais de capital e de operação serão criados (no pior cenário, esses gastos mitigariam todos os ganhos, já que o processo de conversão de carboidratos de algas para estes coprodutos apresenta baixa eficiência). No caso deste Projeto de Graduação, como a biomassa bruta será queimada nas caldeiras, não se fala em extração de coprodutos para a cadeia de produção, já que não há qualquer separação dentre todos os compostos da biomassa.

## 2.2. EXERGIA, MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

### 2.2.1. VISÃO GERAL

É claro que a produção, a transformação, o transporte e o uso de energia impactam o ambiente terrestre, sendo os impactos ambientais associados às emissões térmicas, químicas e nucleares, consequências necessárias para o fornecimento de benefícios aos seres humanos. Simultaneamente, preocupações a respeito das atividades não sustentáveis humanas têm sido expressas, e esforços estão surgindo na direção de progressos em metodologias de desenvolvimento sustentável.

A ligação entre desenvolvimento sustentável e uso de recursos energéticos tem grande importância para as sociedades. Para atingir o desenvolvimento sustentável, é necessária a utilização eficiente dos recursos energéticos. Nesse escopo de utilização mais eficiente dos recursos, tem-se o método da exergia, ficando clara a ligação direta da exergia com energia e meio ambiente, relacionando-se, ainda, ao desenvolvimento sustentável.

A diminuição do impacto da utilização de recursos energéticos por meio do aumento na eficiência do uso é uma das principais abordagens encontradas no estudo da exergia. Por extensão, uma vez que esses temas são essenciais para alcançar o desenvolvimento sustentável, a exergia fornece base para o desenvolvimento de metodologias globais para a sustentabilidade. Ou seja, a exergia é uma medida eficaz do potencial de uma substância, ou forma de energia, de impactar o meio ambiente. Uma compreensão completa de exergia e as percepções decorrentes de tal são fundamentais ao cientista ou ao engenheiro da área de sistemas de energia e ambiente.

Dincer et al. (2007) consideram exergia a confluência entre energia, meio ambiente e desenvolvimento sustentável, conforme ilustrado na Figura 2.7:

Exergia, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

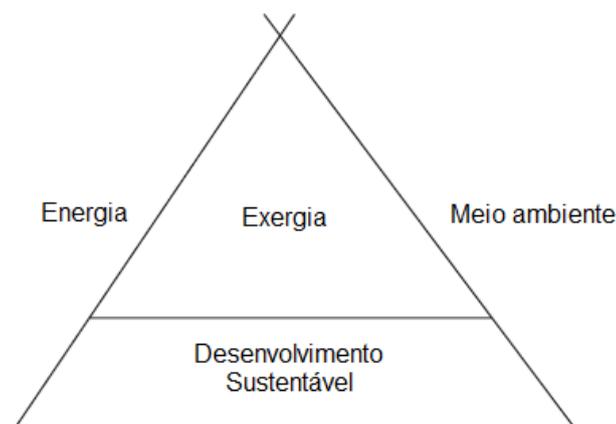


Figura 2.7. Triângulo de Interdisciplinaridade Coberto pela Análise Exergética

Muitos problemas ambientais são causados devido à produção, à transformação e ao uso de energia. Áreas de preocupação com o meio ambiente em que a energia desempenha papel importante podem ser identificadas: acidentes ambientais, poluição hídrica e marítima, uso devastador da terra, radiação e radioatividade, eliminação de resíduos sólidos, poluentes atmosféricos perigosos e preocupação com a qualidade do ar, descarte de ácidos, destruição da camada de ozônio e mudanças climáticas. Não obstante nas décadas de 70 e 80 as políticas de energia estivessem preocupadas com as questões econômicas, novos assuntos, como o de combustíveis limpos, novas tecnologias energéticas com alta eficiência, receberam um aumento de atenção nas últimas décadas.

A mudança climática global, incluindo o aquecimento global, refere-se à contribuição do aquecimento da Terra devida ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e outros gases na atmosfera: eles retêm o calor irradiado pela superfície do Planeta. As emissões de CO<sub>2</sub>, que são fruto, principalmente, da queima de combustíveis fósseis, correspondem a cerca de 50% da influência antropogênica no efeito estufa. Outros gases provenientes de atividades industriais e domésticas contribuem para o aumento da temperatura da Terra, como o CH<sub>4</sub>, os CFC's, os halogêneos e os óxidos nitrosos. A maioria dos cientistas e pesquisadores concorda que as emissões de gases de efeito estufa estão levando ao aquecimento global e que, caso as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa continuem a aumentar como as tendências atuais de consumo de combustíveis fósseis sugerem, a temperatura da Terra pode aumentar de 2 a 4 °C ainda neste século (Dincer, et al. 2007).

A solução mais vistosa para uma significativa mudança do panorama energético mundial realmente consiste na utilização de energias renováveis e tecnologias energéticas avançadas. Todavia, ainda há barreiras que impedem um movimento em direção à implementação de tais tecnologias. A maior obstaculização diz respeito aos seguintes aspectos:

- Ausência ou limitada demanda dos consumidores por produtos de energia renovável e de processos avançados;
- Falta de aceitabilidade social de novas tecnologias de energia renovável;
- Falta de estruturas organizacionais adequadas;
- Falta de experiência na indústria e organismos de investigação e falta de experiência coordenada;
- Falta de infraestrutura necessária para reciclagem, recuperação e reutilização de materiais e produtos;
- Falta de instalações;
- Falta de taxas elétricas diferenciadas para incentivar o uso de eletricidade nos horários fora do pico;
- Incertezas nos regulamentos e normas governamentais;
- Informação e conhecimento limitado de opções;
- Limitações técnicas;

- Má gestão de recursos humanos;
- Objetivos nacionais mal coordenados ou ambíguos, relacionados à energia e ao meio ambiente;
- Restrições financeiras.

## **2.2.2. ENERGIA, IMPACTO AMBIENTAL, TERMODINÂMICA E MEIO AMBIENTE**

De acordo com a ONU, o setor de energia deve atender um amplo programa de proteção da atmosfera de dois modos principais: aumentando a eficiência energética e mudando para sistemas energéticos ambientalmente saudáveis. As áreas estudadas para a realização do programa de proteção da atmosfera são: transição de energia; aumento da eficiência energética e consequente aumento na eficiência exergética; fontes de energia renovável; sistemas de transporte sustentáveis. Com isso, um grande programa de eficiência energética seria um importante meio de redução das emissões de CO<sub>2</sub>, especialmente porque as atividades seriam acompanhadas de medidas de redução de combustíveis fósseis na matriz energética, desenvolvendo fontes de energia alternativas.

Para controlar a poluição, de forma geral, ações de melhorias eficientes precisam ser apoiadas por avanços em tecnologias ou substituição de combustíveis. Medidas para aumentar a eficiência energética podem reduzir o impacto ambiental por meio da redução de perdas de energia. Com a utilização do método da exergia, as atividades de aumento da eficiência energética se tornam mais facilmente realizáveis, conduzindo a uma redução nas perdas, de modo a alcançar uma segurança energética ambientalmente aceitável e a uma redução nas emissões.

Tribus e McIrvine (1971) sugerem que a realização de análise exergética dos processos naturais que ocorrem na Terra poderia formar uma base para o planejamento ecologicamente correto, pois indicaria a perturbação causada pelas mudanças de larga escala. Três relações entre exergia e impacto ambiental são (Rosen e Dincer, 1999):

1. A entropia é fundamentalmente uma medida de caos, e a exergia, de ordem. Um sistema de elevada entropia é mais caótico ou desordenado do que um de baixa entropia. Em relação ao mesmo ambiente, a exergia de um sistema ordenado é maior do que a de um caótico;
2. A degradação dos recursos encontrados na natureza é uma forma de degradação ambiental. Kestin (1980) define um recurso como um material, encontrado na natureza ou criado artificialmente, que está em estado de desequilíbrio com o ambiente, explicitando que esse recurso possui exergia como consequência do desequilíbrio. Duas características principais dos recursos são valorizadas: composição e reatividade. Duas abordagens principais existem para reduzir o impacto ambiental associado à degradação dos recursos: aumento da eficiência, o que preserva a exergia por meio da diminuição da sua quantidade necessária para um

processo, com uma conseqüente redução no impacto ambiental; uso de exergia de recursos externos – a Terra é um sistema aberto, sujeito a um fluxo de entrada de exergia do Sol, de modo que a degradação do meio ambiente pode ser reduzida tomando vantagem de tal abertura, utilizando-se a radiação solar (em vez de degradar recursos encontrados na natureza para suprir as demandas humanas). Isso não seria possível se a Terra fosse um sistema fechado, o que a tornaria cada vez mais degradada e com alta entropia;

3. A exergia associada ao desperdício pode ser vista como um potencial danoso ao meio ambiente: a exergia dos resíduos, por não estar em equilíbrio estável com o meio ambiente, representa um grande potencial de causar mudanças. Apesar de, em alguns casos, as mudanças serem benéficas (pode acontecer, por exemplo, um aumento na razão de crescimento de peixes e plantas nas proximidades de reservatórios de água utilizada para refrigeração de usinas térmicas), a emissão de exergia na forma de substâncias provenientes de chaminés, por exemplo, pode, na maioria das vezes, reagir e entrar em equilíbrio com o meio ambiente, prejudicando o ciclo de vida de sistemas biológicos. Outro ponto importante é que as emissões de exergia para o meio ambiente podem interferir na entrada líquida de exergia via radiação solar para a Terra (emissões de CO<sub>2</sub> e outros gases de efeito estufa podem afetar a radiação refletida e recebida pelo Planeta).

### **2.2.3. EXERGIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

O desenvolvimento sustentável foi definido pela Comissão Brundtland como "o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades". A Comissão observou que a sua definição contém dois conceitos-chave: necessidades, ou seja, imprescindibilidades essenciais das pessoas no mundo, e limitações, o que significa barreiras impostas pelo estado da tecnologia e da organização social sobre a capacidade do meio ambiente para atender as presentes e futuras necessidades (Dincer et al., 1999).

Recursos energéticos são necessários para o desenvolvimento social e sustentável, que requer um fornecimento energético sustentavelmente viável a um custo razoável, causando nenhum ou mínimo impacto ambiental. É claro que a energia proveniente de combustíveis fósseis, que são finitos, não possui características necessárias para a sustentabilidade, enquanto outras formas de energia possuem qualidades necessárias para sustentabilidade. As mudanças técnicas e econômicas previstas como necessárias à sustentabilidade, a longo prazo, geralmente incluem acentuadas reduções no uso de combustíveis fósseis, com intuito de minimizar o perigo da mudança climática global. Na presente proposta, a alternativa para os combustíveis fósseis consiste na biomassa de microalgas, com vistas à queima em caldeiras e à conseqüente geração de energia elétrica.

A sustentabilidade, a seu turno, pode ser definida em termos de capacidade de suporte do ecossistema, sendo descrita com modelos de consumo de energia e de recursos de entrada e saída. Então, a sustentabilidade torna-se um estado econômico em que as demandas colocadas sobre o meio ambiente, as pessoas e o comércio podem ser satisfeitas sem redução da capacidade do ambiente de fornecer para as gerações futuras. Os limites sustentáveis relatados sobre os materiais e débitos da sociedade podem ser definidos da seguinte maneira (Dincer et al., 1999):

- As taxas de utilização de recursos renováveis não devem exceder as suas taxas de regeneração;
- As taxas de uso de recursos não renováveis não devem exceder as taxas nas quais os substitutos renováveis são desenvolvidos.
- As taxas de emissões de poluentes não deve exceder a correspondente capacidade de assimilação do ambiente.

A diversidade de opções de energia é umas das razões pela qual a exergia desempenha um papel importante no contexto do desenvolvimento sustentável. Podem-se citar vários fatores-chave para que o desenvolvimento seja sustentável:

- Deve satisfazer as necessidades e aspirações da sociedade;
- Deve ser ambientalmente e ecologicamente amigo;
- Recursos suficientes (naturais e humanos) devem estar disponíveis.

Cornelissen (1997) salienta que um elemento importante para a obtenção de um desenvolvimento sustentável é a utilização de uma análise exergética. É sabido que a energia nunca pode ser perdida durante um processo: ela apenas muda de forma, de acordo com a primeira lei da Termodinâmica. Todavia, a exergia pode ser perdida, especialmente devido às irreversibilidades internas: para a obtenção do desenvolvimento sustentável, é necessário que as perdas de exergia sejam minimizadas. Ademais, os efeitos ambientais associados às emissões e ao esgotamento de recursos podem ser expressos em termos de indicadores fundamentados em análises exergéticas, que se baseiam em princípios físicos. Outro ponto importante a ser lembrado é que o desenvolvimento sustentável também inclui viabilidade econômica, de modo que os métodos relacionando exergia e economia também reforçam a ligação entre análise exergética e desenvolvimento sustentável.

Os objetivos da maioria das técnicas de análise existentes integrando exergia e economia incluem a determinação da alocação adequada dos recursos econômicos, de modo a otimizar o projeto e a operação de um sistema e a sua viabilidade econômica e rentabilidade.

A Figura 2.8 ilustra a relação entre exergia, sustentabilidade e impacto ambiental: a sustentabilidade aumenta com o aumento da eficiência exergética, enquanto o impacto ambiental aumenta com o decréscimo da eficiência exergética.

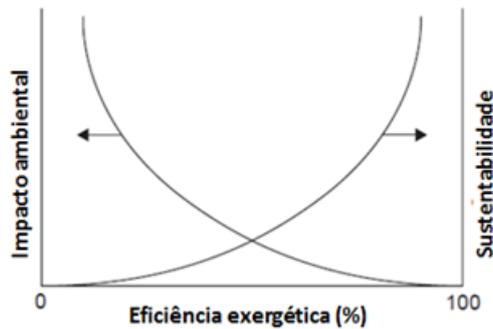


Figura 2.8. Relação entre Impacto Ambiental, Sustentabilidade de um Processo e sua Eficiência Exergética

## 2.2.4. ECOLOGIA INDUSTRIAL E CONSERVAÇÃO DOS RECURSOS

Relacionado ao tema de ecologia industrial e à conservação de recursos, Connelly and Koshland (2001) sugeriram que a evolução do ecossistema segue diretamente os princípios da primeira e da segunda lei da termodinâmica. Propuseram quatro estratégias, que desvinculam o consumo da degradação: cascata dos resíduos, ciclo dos recursos, aumento de eficiência exergética e uso de exergia renovável.

A cascata dos resíduos pode ser descrita em termos termodinâmicos como o uso das saídas de um ou mais processos como entradas para outro processo que requer menor exergia. Tal estratégia reduz o consumo de duas maneiras: reduzindo a razão de perdas exérgicas causadas pela dissipação do potencial utilizável das perdas e reduzindo a necessidade de refinar recursos virgens. A cascata dos resíduos reduz a procura por outros recursos, sendo uma importante estratégia de conservação destes, apesar de não se evitarem inteiramente as emissões de resíduos exérgicos, não podendo, portanto, ser uma forma cíclica de recursos. No escopo do presente projeto, a ideia da cascata dos resíduos é intrinsecamente relacionada à utilização da vinhaça como parte do substrato de cultivo, especialmente porque esta é um resíduo da produção sucroalcooleira.

De acordo com a estratégia do ciclo dos recursos, para reduzir as emissões a partir do final de uma cascata de resíduos (ou da saída de um processo único) e devolvê-los ao topo de uma cascata de recursos, a exergia removida de um recurso durante o consumo deve ser devolvida à fonte. O processo de perda de exergia por meio do consumo seguido pelo retorno da exergia à fonte é a base do ciclo dos recursos. Tal estratégia não pode eliminar o esgotamento, pois, de acordo com a segunda lei, toda a transferência de exergia em processos reais (irreversíveis) é acompanhada pela perda de exergia, devida à criação de entropia. Portanto, em processos reais, a taxa global de esgotamento dos recursos irá exceder a taxa de perdas de exergia no processo de consumo cujos resíduos sejam reciclados.

Para o aumento da eficiência exergetica, uma maneira para reduzir o esgotamento dos recursos associados à estratégia da ciclagem é reduzir as perdas que acompanham a transferência de exergia dos recursos consumidos. A eficiência exergetica pode ser definida como a razão entre a exergia de saída pela exergia de entrada, e as perdas exergeticas podem ser definidas como a diferença entre a exergia na entrada na saída. Em comparação à eficiência energética, a eficiência exergetica pode ser pensada como uma medida mais significativa de eficiência, pois é responsável por aspectos quantitativos e qualitativos dos fluxos de energia, além de a eficiência exergetica fornecer uma medida absoluta de eficiência, que é responsável por limitações de primeira e segunda lei. Atualmente, as limitações tecnológicas e econômicas para ganhos de eficiência não permitem que a eficiência exergetica se aproxime da unidade. Muitos processos industriais operam em baixas eficiências, e é amplamente reconhecido que grandes margens para a melhoria da eficiência, muitas vezes, continuam à fronteira da utilização. No entanto, mesmo que a eficiência exergetica pudesse ser de 100%, o esgotamento dos recursos associados ao consumo ainda não seria eliminado: para uma desvinculação total de consumo e esgotamento, é necessário que os recursos possam fornecer exergia sem serem consumidos.

A quarta estratégia relata um uso de exergia renovável, ou seja, para completar a desvinculação de consumo e esgotamento, é necessário que a exergia utilizada para atender o consumo seja derivada de fontes renováveis de exergia (a eletricidade gerada pela fonte solar ou pelo cultivo sustentável de matéria-prima para biomassa é um exemplo disso).

### **2.2.5. ASPECTOS EXERGÉTICOS DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

A avaliação do ciclo de vida, ferramenta analítica importante utilizada para avaliar o peso ambiental de produtos e os vários estágios do seu ciclo de vida, visa melhorar ou otimizar os processos, de modo a consumir menor quantidade de recursos e produzir menos emissões e resíduos. Para atingir alguns objetivos relacionados à sustentabilidade, existem algumas soluções parciais, conhecidas como soluções de fim de linha, que minimizam os impactos, como estações de tratamentos de águas residuais, utilização de filtros e purificadores. Todavia, essas soluções parciais apenas transferem a localização do problema da água para o solo e outros lugares. A análise exergetica parece ser um instrumento importante para a melhoria de processos, alterando suas características e não fornecendo apenas soluções parciais, alcançando processos mais sustentáveis, sendo importante que os recursos energéticos sejam renováveis.

Os atributos de tecnologias de energias renováveis são consideravelmente diferentes daqueles para tecnologias tradicionais, baseadas em combustíveis fósseis. Tecnologias de energias renováveis podem oferecer um custo-benefício e alternativas ambientalmente benéficas em relação aos sistemas convencionais de energia. De acordo com Dincer (2000), alguns benefícios implicados pelos sistemas de conversão de energia baseados em energias renováveis são:

- São independentes do custo de combustíveis fósseis, que tende a aumentar de forma significativa ao longo do tempo. Desse modo, as estimativas podem ser feitas de forma confiável para sistemas de energias renováveis, sendo que eles podem ajudar a reduzir o esgotamento de recursos não renováveis de energia a nível mundial;
- Não causam degradação ambiental excessiva e, assim, podem colaborar com a solução dos problemas ambientais. O uso generalizado de sistemas de energias renováveis certamente reduz os níveis de poluição;
- São muitas vezes vantajosos em países em desenvolvimento, já que há uma expectativa de crescimento da demanda energética nestes.

Por outro lado, os recursos energéticos renováveis têm algumas características que podem levar a certa problemática, que pode ser contornada utilizando soluções técnicas e econômicas. Alguns problemas, de acordo com Dincer (2000), podem ser citados:

- Desafios econômicos;
- Geralmente, as fontes de energias renováveis são difusas;
- As fontes não são totalmente acessíveis;
- As fontes, às vezes, são intermitentes (variam sazonalmente);
- As fontes variam de maneira regional.

Os benefícios gerais de tecnologias de energias renovável não são, muitas vezes, bem compreendidos, levando-se a uma tácita avaliação de que essas tecnologias são menos rentáveis do que as tradicionais. Todos os benefícios, em se tratando de energia renovável, devem ser considerados e avaliados minuciosamente.

Um grande desafio para as energias renováveis é levá-las para um mercado confiável a um preço que seja competitivo com aquele das energias provenientes de combustíveis fósseis, sem interromper as economias locais. Uma vez que a utilização das energias renováveis, muitas vezes, envolve a consciência das necessidades percebidas, por vezes, uma mudança de estilo de vida e planejamento é essencial para o desenvolvimento de programas de intercâmbio de informações, educação e formação eficazes.

## **2.2.6. FERRAMENTAS PARA IMPACTO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE**

De uma maneira geral, um sistema energético deve ser projetado para trabalhar de modo a atender diferentes expectativas ambientais e sociais. Algumas ferramentas, de acordo com Lundin et al. (2000) e Tangsubkul et al.(2002), estão disponíveis e são descritas e detalhadas a seguir:

- Avaliação do ciclo de vida (LCA): ferramenta analítica, importante para avaliar o impacto ambiental dos produtos nas várias fases do seu ciclo de vida, ou seja, a LCA examina os produtos desde a fonte da sua concepção até sua extinção. Tal ferramenta pode ser aplicada para projetar um sistema de energia e seus subsistemas com vistas a cumprir os critérios de sustentabilidade em todas as etapas do ciclo de vida, sendo um instrumento de contabilidade ambiental muito importante;
- Avaliação do impacto ambiental (EIA): ferramenta ambiental utilizada na avaliação do potencial impacto ambiental de uma atividade proposta. A informação obtida pode ajudar na tomada de uma decisão sobre uma atividade proposta representar ou não quaisquer impactos ambientais adversos. Este artifício avalia o nível de impactos sobre o ambiente e fornece recomendações para minimizá-los.
- Pegadas ecológicas: ferramenta de contabilidade que permite estimar o consumo dos recursos e assimilar as exigências dos resíduos de uma população humana ou de uma economia, definida em termos do correspondente uso produtivo da terra;
- Índice de processo sustentável (SPI): medida de sustentabilidade de um processo de produção de mercadorias. É calculado a partir da área total necessária para fornecer a matéria-prima, processar energia (derivada de energia solar), prover instalações e infraestrutura e descartar os resíduos. A unidade de medida é o  $m^2$  de terreno;
- Análise de fluxo de materiais (MFA): ferramenta de contabilidade dos materiais, que pode ser utilizada para acompanhar o movimento de elementos de preocupação ao longo de um sistema com limite especificado. Pode ser adaptada, ainda, para realizar um estudo comparativo entre as alternativas para alcançar opções ambientalmente saudáveis;
- Avaliação de risco: ferramenta com a qual se pode estimar a probabilidade de potenciais impactos e o grau de incerteza do dano, bem como a probabilidade de ocorrência. É bastante importante, pois, uma vez que a gestão de uma empresa tenha sido informada sobre o nível de risco envolvido em uma atividade, a decisão de saber se esse risco é aceitável pode ser tomada subsequentemente;
- Análise exergetica: exergia é a qualidade de um fluxo de energia ou matéria que representa a parte útil daquelas. A conversão de energia em trabalho ou em um processo é geralmente conduzida pelo consumo de energia de qualidade. Verifica-se que a utilização do conceito de exergia para estimar o consumo dos recursos físicos pode melhorar a qualidade dos dados necessários à avaliação do ciclo de vida (LCA).

A aproximação termodinâmica de projeto e a avaliação do ciclo de vida representam as entradas econômicas e ecológicas e os serviços, além dos impactos das emissões. Essa aproximação está relacionada à exergia, de modo que a análise exergetica é popular para aumentar a eficiência termodinâmica de processos industriais, apesar de ignorar as entradas ecológicas e o impacto das emissões. Tais deficiências da análise exergetica têm sido superadas por meio da combinação dela com a LCA e com análise energética, a qual é uma aproximação popular para analisar e modelar

ecossistemas, sendo toda energia necessária para o ecossistema produzir um recurso. A aproximação resultante conecta sistemas ecológicos aos sistemas de engenharia.

### **2.2.7. EXERGIA COMO UM QUANTIFICADOR DE SUSTENTABILIDADE PARA FATORES DE PROCESSOS**

A exergia possui várias qualidades, que fazem dela um apropriado quantificador comum de sustentabilidade de um processo (Sciubba, 2001). Entre as qualidades referenciadas a respeito de exergia, citam-se:

- Exergia é uma propriedade extensiva cujo valor é determinado unicamente pelos parâmetros do sistema e do ambiente de referência.
- Se um fluxo passa por qualquer combinação de trabalho, de calor ou de interações de produtos químicos com outros sistemas, a mudança de sua exergia expressa não só a quantidade de trocas energéticas, mas também a qualidade delas.
- Desde que um estado químico de referência é selecionado como o reflexo do ambiente químico típico real sobre a Terra, a porção química da exergia de uma substância pode ser avaliada. A exergia de uma substância, tal como um minério ou um combustível fóssil, é conhecida quando a composição e as condições termodinâmicas da substância e do ambiente no local de extração são conhecidas. A exergia química de uma substância é zero quando está em equilíbrio com o ambiente, e aumenta à medida que o seu estado se desvia do estado ambiente.
- O valor de um produto de um processo, expresso em termos de "uso de consumo de recursos," pode ser obtido por adição, à exergia, das entradas originais de todas as contribuições devido às diferentes correntes que foram utilizadas no processo.
- Se for necessário que um fluxo de efluentes de um processo não tenha impacto sobre o meio ambiente, ele deve ser levado a um estado de equilíbrio termodinâmico, como estado de referência, antes de ser descarregado no meio ambiente. A quantidade mínima de trabalho necessária para realizar essa tarefa é, por definição, a exergia da corrente do fluido residual. Por esta razão, muitos sugerem que a exergia de um efluente é uma medida correta do seu potencial de custo ambiental.

Alguns pesquisadores (Sciubba, 2001) propuseram que um valor de exergia, ligado ao produto de um processo, é definido como a soma do teor de exergia cumulativa do produto e o de reciclagem exérgica, necessário para permitir que o processo tenha impacto zero sobre o meio ambiente. Na literatura, ainda se encontram as seguintes sugestões:

- Uma porção da exergia investida somada à exergia de um fluxo sobre consideração pode ser atribuída ao fluxo, permitindo ao processo ser 'carregado' com a exergia física e investida dos seus efluentes.
- Se uma formulação viável existe para converter as restantes externalidades não energéticas (trabalho e capital) em termos exergéticos, a sua entrada equivalente em qualquer processo pode ser adicionada à exergia investida de cada fluxo. O fluxo de exergia equivalente ao trabalho talvez possa ser estimado por meio de recursos de atribuição de um valor para a hora de trabalho, calculado como a razão entre as entradas exergéticas anuais totais em uma sociedade ou região pelo número total de horas de trabalho geradas no mesmo período de tempo. Da mesma forma, o fluxo de exergia equivalente a um fluxo de capital talvez possa ser calculado por meio da atribuição de um valor de recurso para a unidade monetária, calculado como a razão entre a entrada anual total em uma sociedade ou região pela circulação monetária total (por exemplo, em termos do produto interno bruto, ou vendas totais no varejo, ou outra medida financeira diferente), no mesmo período de tempo.

Em suma, considera-se como desenvolvimento sustentável o elo entre quatro fatores: ambiente, economia, sociedade e recursos energéticos.

## 2.2.8. EXERGIA E TRABALHO REVERSÍVEL

De acordo com Silvio de Oliveira (2013), o conceito de exergia pode ser introduzido usando o conceito de trabalho reversível, sendo o balanço de exergia uma combinação linear da entropia e do balanço de energia. O autor desenvolve, ainda, a análise exergética para processos e casos simples, que acontecem em sistemas estáveis, em volumes de controle com uma entrada e uma saída, sendo negligenciadas as energias potenciais e cinéticas e os efeitos de campos elétricos e magnéticos. Um exemplo de volume de controle é ilustrado na Figura 2.9:

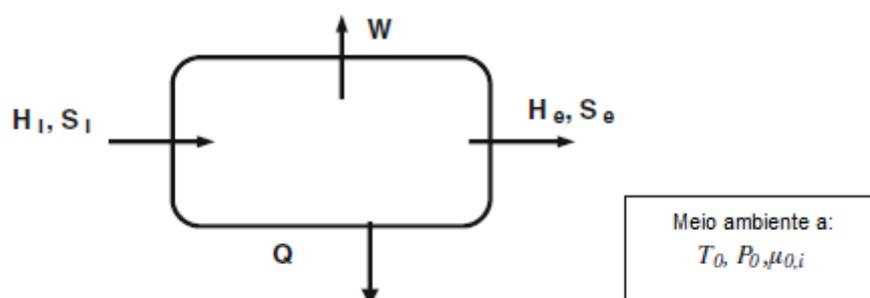


Figura 2.9. Volume de Controle com uma Entrada e uma Saída

As equações (3) e (4) apresentam o balanço de energia e de entropia por unidade de massa que flui através das fronteiras do volume de controle na entrada (i) e na saída (e):

$$q = h_e - h_i + w \quad (3)$$

$$S_e - S_i = \int \frac{\delta q}{T} + S_{ger} \quad (4)$$

Para o volume de controle ilustrado, é pertinente questionar qual é o trabalho máximo que pode ser retirado a partir de um estado termodinâmico dado nas seções de entrada e de saída. Tal trabalho máximo é determinado de acordo com as seguintes condições:

- ◆ Todo processo dentro do volume de controle é reversível;
- ◆ O trabalho máximo que pode ser gerado usando o calor rejeitado pelo volume de controle é aquele obtido considerando uma máquina de Carnot operando entre  $T_i$  e  $T_e$ , sendo  $T_0$  a temperatura do ambiente onde o volume de controle está inserido.

A determinação do trabalho máximo é feita considerando outro volume de controle, que contém o volume de controle precedente e a máquina de Carnot. Este novo volume de controle é atravessado pelo mesmo fluxo de massa, e  $q_0$  é o calor rejeitado da máquina de Carnot. Os balanços de energia e de entropia para este novo volume de controle são dados pelas equações (5) e (6):

$$q_0 = h_e - h_i + w_{max} \quad (5)$$

$$S_e - S_i = \frac{q_0}{T_0} \quad (6)$$

Manipulando-se as equações (5) e (6), obtém-se a equação (7):

$$w_{max} = h_i - h_e - T_0(S_i - S_e) \quad (7)$$

Ou seja, o termo  $h_i - h_e - T_0(S_i - S_e)$  caracteriza um potencial máximo para realizar trabalho entre os estado de entrada e saída fornecidos.

O desenvolvimento pode, ainda, ser tomado a partir de uma condição original, em que há processos irreversíveis dentro do volume de controle, bem como valores originais de trabalho ( $w$ ) e calor ( $q$ ). Neste caso, o trabalho máximo poderia ser obtido de maneira similar, incluindo uma

máquina de Carnot que opera por meio do uso de  $q$  e do rejeito de  $q'_0$  para o meio ambiente. Para uma máquina reversível, pode-se escrever:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_{T_i}^{T_e} \left( \frac{\delta q}{T} \right) + \int \left( \frac{\delta q'_0}{T_0} \right) \quad (8)$$

Tomando-se a expressão para o balanço de entropia para o volume de controle original com a máquina de Carnot:

$$S_e - S_i = \frac{q'_0}{T_0} + S_{ger} \quad (9)$$

Também é possível escrever o balanço de energia para a região que engloba a máquina reversível e o volume de controle original:

$$q'_0 = h_e - h_i + w + w_{mr} \quad (10)$$

Na equação (10), o trabalho específico para a máquina de Carnot, levando em consideração que o calor tem sinais diferentes para o calor-motor do volume de controle, é:

$$w_{mr} = q - q'_0 \quad (11)$$

Substituindo-se  $q'_0$  e  $w_{mr}$ , tem-se que:

$$T_0(S_e - S_i) - T_0 S_{ger} = h_e - h_i + w + q\eta_{mr} \quad (12)$$

Em que:

$$w_{mr} = q\eta_{mr} \quad (13)$$

Nessa orientação, a equação (10) pode ser escrita conforme a equação (14):

$$h_i - h_e - T_0(S_i - S_e) = w + q\eta_{mr} + T_0S_{ger} \quad (14)$$

Com:

$$\eta_{mr} = 1 - \frac{T_0}{q} \int_{T_i}^{T_e} \left( \frac{\delta q}{T} \right) \quad (15)$$

É evidente que, conforme descrito pela equação (14), o termo  $[h_i - h_e - T_0(S_i - S_e)]$  também caracteriza um potencial para realizar trabalho. Os processos irreversíveis são reduzidos ao produto  $T_0S_{ger}$ , que são irreversibilidade. Eventualmente, este potencial é completamente destruído, como ocorre em processos dissipativos.

### 2.2.9. BALANÇO DE EXERGIA

Uma combinação linear de entropia e balanço de energia fornece:

$$[h_i - h_e - T_0(S_i - S_e)] = w + q \left[ 1 - \frac{T_0}{q} \int_{T_i}^{T_e} \frac{\delta q}{T} \right] + T_0S_{ger} \quad (16)$$

No caso em que todos os processos dentro do volume de controle forem reversíveis, o volume de controle interage apenas com o meio ambiente, e o fluxo de massa na seção de saída está em equilíbrio termodinâmico com o meio ambiente ( $h = h_0$  e  $S = S_0$ ). Assim, a equação (16) se transforma na expressão de máximo trabalho reversível associado ao estado de entrada do volume de controle:

$$[h_i - h_e - T_0(S_i - S_e)] = w + q \left[ 1 - \frac{T_0}{q} \int_{T_i}^{T_e} \frac{\delta q}{T} \right] = w_{max} \quad (17)$$

Este trabalho máximo reversível é chamado de exergia específica da vazão da seção de entrada do volume de controle:

$$b = [h_i - h_0 - T_0(S_i - S_0)] \quad (18)$$

Vale a pena notar que a exergia específica é uma função de propriedades de dois estados termodinâmicos: o estado em que a vazão mássica está em equilíbrio termodinâmico com as componentes do ambiente e aquele estado em que ela estaria em tal equilíbrio. Neste sentido, a exergia específica é uma propriedade termodinâmica especial, função de dois estados termodinâmicos, e o seu valor fornece o máximo potencial para realizar trabalho.

Ainda à luz dos estudos de Silvio de Oliveira (2013), tem-se uma breve análise de um volume de controle, para uma situação geral, em que há várias entradas e várias saídas, ocorrendo trocas de calor a uma temperatura  $T_j$ , estado de regime instável e controle de volume deformável, conforme ilustrado na Figura 2.10:

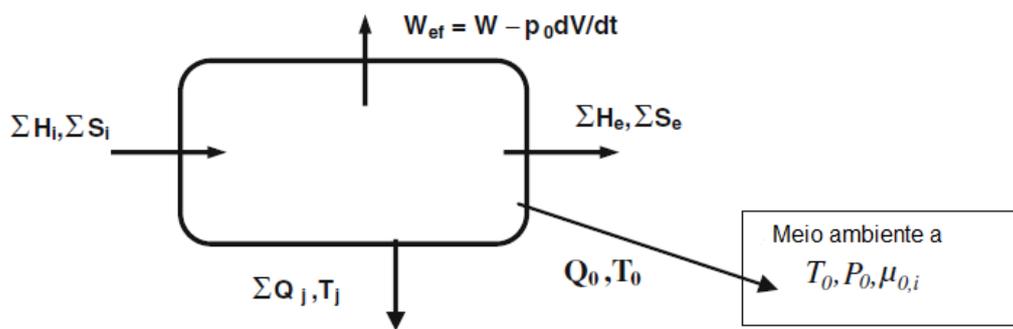


Figura 2.10. Volume de Controle com Diversas Entradas e Saídas e Troca de Calor à Temperatura  $T_i$

A combinação linear do balanço de energia e entropia fornece:

$$\frac{d}{dt}(E+P_0V - T_0S) = \frac{d}{dt}B = \sum_j(1 - \frac{T_0}{T_j})Q_j - W_{ef} + \sum_i m_i(h_i - T_0s_i) - \sum_e m_e(h_e - T_0s_e) - T_0S_{ger} \quad (19)$$

A equação (19) é composta dos seguintes termos:

- Razão da variação de exergia do volume de controle:  $\frac{d}{dt}(E+P_0V - T_0S)$ ;
- Variação da taxa do fluxo de exergia entre as seções de entrada e saída do volume de controle:  $\sum_i H_i - \sum_e H_e - T_0(\sum_i S_i - \sum_e S_e)$ ;
- Taxa de exergia associada à taxa de transferência de calor (máximo trabalho que pode ser realizado por uma máquina de Carnot operando entre  $T_j$  e  $T_0$ , recebendo  $Q_j$  a  $T_j$  e rejeitando calor para o ambiente que está à temperatura  $T_0$ ):  $Q_j(1 - \frac{T_0}{T_j})$ ;

- Taxa de exergia pura: taxa do efetivo trabalho realizado ou recebido pelo volume de controle:  $w_{ef}$ ;
- Taxa de exergia destruída ou taxa de irreversibilidades (taxa de trabalho disponível destruído devido a processos irreversíveis que ocorrem dentro do volume de controle):  $B_{dest} = T_0 S_{ger}$ .

A equação (19) pode ser considerada como a lei da degradação da exergia: ela permite quantificar a redução da capacidade de trabalho de um dado processo de conversão de energia causada pela ocorrência de irreversibilidades. Como consequência, é possível concluir que a capacidade para realizar trabalho não é conservativa, sendo tal capacidade reduzida sempre que ocorrer qualquer processo de irreversibilidade dentro do volume de controle analisado.

### **2.3. BALANÇO DE ENERGIA E ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE ALGA EM LARGA ESCALA (SUDHAKAR ET AL., 2012)**

Sudhakar et al. (2012) realizaram um estudo cujo o objetivo era elaborar a avaliação do ciclo de vida do processo de produção do biodiesel proveniente de microalgas em larga escala e identificar os esforços empreendidos em pesquisas para fazer com que esse processo de produção fosse ambientalmente sustentável. Todo o estudo foi baseado em estimativas de produção de microalga em larga escala, em leis e processos termodinâmicos e na literatura acadêmica.

De acordo com os autores, a energia total de entrada em todo o processo fornece a energia total necessária para o ciclo de produção de biodiesel a partir da microalga, sendo considerada a energia total de entrada do volume de controle; a energia de saída do volume é aquela obtida considerando o poder calorífico do biodiesel e a quantidade de biodiesel produzida.

O estudo dos autores será utilizado como parâmetro para a obtenção de dados técnicos para o presente estudo, com a devida adequação dos dados do biodiesel para os dados da biomassa bruta, pós-secagem.

#### **2.3.1. BALANÇO DE ENERGIA E DE CARBONO**

Quando há conversão de energia de uma forma para a outra, a segunda lei da termodinâmica dita que determinada quantidade será perdida, ou seja, em sistemas reais, sempre há irreversibilidades. Um dos fatores que deve ser levado em consideração na produção de biocombustíveis (biomassa, no caso) é a diferença entre a energia líquida, que pode ser obtida considerando o produto entre o poder calorífico específico do biocombustível e a quantidade, em unidade de massa, produzida (energia de

saída,  $E_{out}$ ), e a energia gasta durante todo o processo produtivo (energia de entrada,  $E_{in}$ ): tal fator é então o Ganho Líquido de Energia (GLE):

$$GLE = E_{out} - E_{in} \quad (20)$$

Outrossim, como é sabido, as microalgas necessitam de dióxido de carbono para a sua sobrevivência e para a produção do lipídio. O balanço de dióxido de carbono retirado do que seriam emissões para atmosfera pode ser feito levando-se em consideração a quantidade do gás requisitada pela alga e a quantidade emitida durante todo o processo produtivo. Assim sendo, o  $CO_2$  reduzido é a diferença entre aquela e esta.

### 2.3.2. RAZÃO DE GANHO DE ENERGIA (RENDIMENTO, $\eta_{GLE}$ )

A eficiência energética dos biocombustíveis pode ser analisada encontrando a razão do ganho de energia, definida como a razão entre a energia líquida que pode ser gerada com o biocombustível (biomassa, no caso) (Energia de saída,  $E_{out}$ ) e o total de energia gasto no processo produtivo (Energia de entrada,  $E_{in}$ ):

$$\eta_{GLE} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (21)$$

$$E_{in} = E_a + E_b + E_c + E_d + E_f + E_g \quad (22)$$

Explicitando-se os termos:

- $E_a$  = Energia gasta para desenvolvimento da microalga;
- $E_b$  = Energia gasta para colheita da microalga;
- $E_c$  = Energia gasta para desidratação da microalga;
- $E_d$  = Energia gasta para secagem da microalga;
- $E_f$  = Energia gasta para extração do óleo da microalga (não considerada para o caso concreto, em que se queima a biomassa seca de microalga);
- $E_g$  = Energia gasta no processo de transesterificação (não considerada para o caso concreto, em que se queima a biomassa seca de microalga).

Outrossim:

$$E_{out} = CV * Ton * \eta_{CI \text{ Engine}} \quad (23)$$

Em que:

- CV = poder calorífico do biodiesel (KJ/KG) (no caso, o poder calorífico da biomassa seca);
- Ton = Quantidade de biodiesel (Kg) (no caso, a quantidade de biomassa seca);
- $\eta_{CI \text{ Engine}} = 0,20$ , é o rendimento médio de um motor de combustão por compressão (no caso, a eficiência energética da caldeira da usina Jalles Machado, bem como quaisquer eficiências de transmissão de energia elétrica diretamente associadas à rede elétrica).

### 2.3.3. PARÂMETROS UTILIZADOS

Os vários parâmetros tomados por Sudhakar et al. (2012) para o referido estudo são listados na Tabela 2.3:

Tabela 2.3. Parâmetro utilizados por Sudhakar et al. (2012), (Liaw, et al., 2010)

Estágio	Entradas	Valores	Unidades
Crescimento	Consumo de diesel	10	L/ha
	Consumo de eletricidade	41.404	kWh/ha
Desidratação da alga	Consumo de eletricidade	30.788	kWh/ha
Extração do lipídio da alga (não considerado para o caso em estudo)	Gás Natural	141.994	MJ/ha
	Consumo de eletricidade	12.706	kWh/ha

### 2.3.4. RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONCLUSÕES OBTIDAS POR SUDHAKAR ET AL. (2012)

Os resultados obtidos com relação à avaliação do balanço líquido de energia da produção de microalgas em larga escala em lagoas são demonstrados a seguir (alguns resultados aplicáveis também foram utilizados para o estudo do presente Projeto de Graduação, sempre à luz de ser necessária uma adequação entre a produção de biodiesel e a produção, de interesse, de biomassa seca – para isso, considera-se que todas as rotas da produção da biomassa também integram a produção do biodiesel, sendo que aquela não apresenta as etapas de extração lipídica e de transformação do óleo):

Tabela 2.4. Resultados para a Etapa do Cultivo

Cultivo da alga		Unidades
Volume de diesel utilizado no processo de desenvolvimento da alga	10,00	L/ha·ano
Poder calorífico do diesel convencional	44.800	kJ/kg
Densidade do Diesel	0,832	kg/L
Massa de diesel utilizada no processo de desenvolvimento da alga	8,32	Kg
Energia proveniente do Diesel	372,74	MJ/ha·ano
Energia elétrica utilizada no processo de desenvolvimento da alga	41.404,0 ou 149.054,4	kWh ou MJ
Consumo total de energia (Soma da energia proveniente do diesel e da energia elétrica)	149.427,1	MJ

Tabela 2.5. Resultados para a Etapa do Processamento

Processamento da biomassa (desidratação e secagem)		Unidades
Energia elétrica utilizada para Secagem e desidratação	30.788,0 ou 110.836,8	kWh ou MJ

Tabela 2.6. Resultados para a Etapa da Extração e da Esterificação

Extração e esterificação		Unidades
Consumo de energia elétrica na moagem	12.706,0 ou 45.741,6	kWh ou MJ
Consumo de biogás	141.994,0	MJ
Consumo total de energia na extração e esterificação	187.735,6	MJ

Tabela 2.7. Resultados Gerais Obtidos

Energia disponível no Biodiesel obtido		Unidades
Quantidade em massa de biodiesel produzido	40.000,00	kg/ha·ano
Poder calorífico do biodiesel	37.800	kJ/kg
Energia total disponível do biodiesel	1.512.000,0	MJ

É possível avaliar a energia líquida obtida subtraindo o valor obtido na última linha da Tabela 2.7 dos valores constantes nas últimas linhas das tabelas 2.4, 2.5 e 2.6. Nestas condições, Sudhakar et al. (2012) obtiveram a energia gerada líquida disponível ao fim do processo: 1.064.000,46 MJ/ hectare·ano.

É possível, também, obter um balanço de carbono da produção de microalgas em larga escala em lagoas:

Tabela 2.8. Balanço de Carbono para a Produção Dada, na Fase de Cultivo

Cultivo da alga		Unidades
Volume de diesel utilizado no processo de desenvolvimento da alga	10,00	L/ha·ano
Densidade do Diesel	0,832	kg/L
Massa de diesel utilizada no processo de desenvolvimento da alga	8,32	kg/há
Quantidade de dióxido de carbono por unidade de massa de diesel queimado	185,150	L/kg
Quantidade de dióxido de carbono emitida devido à quantidade de diesel utilizada	1.540,45	L
Densidade do $CO_2$	1,842	kg/m <sup>3</sup>
Quantidade em massa de $CO_2$ emitido devido à queima do diesel	0,28	kg/ha·ano
Carbono emitido devido ao uso de energia elétrica (Valor estimado considerando energia elétrica proveniente de termelétricas)	33.123,50	kg/ha·ano
Quantidade total em massa de $CO_2$ emitido no processo de desenvolvimento da microalga	33.123,78	kg/ha·ano
Dióxido de carbono retido pelas microalgas		Unidades
Consumo de $CO_2$ por grama de microalga cultivada	1,80	G

Consumo de $CO_2$ por Hectare, considerando produção de microalga de 91000 Kg/Hectare.Ano	163.800,00	kg/ha·ano
Processamento da biomassa		Unidades
Massa de $CO_2$ emitida devido ao uso de energia elétrica no processo de desidratação (Valor estimado considerando energia elétrica proveniente de termelétricas)	24.630,00	kg/ha·ano

Tabela 2.9. Balanço de Carbono para a Produção Dada, nas Fases de Extração e Esterificação

Extração e esterificação		Unidades
Massa de $CO_2$ emitida devido ao uso de energia elétrica no processo de moagem (Estimado considerando energia elétrica proveniente de termelétricas)	10.164,80	kg/ha·ano
Massa de $CO_2$ emitida devido ao consumo de gás natural durante a extração e esterificação	4.685,80	kg/ha·ano
Total em massa de $CO_2$ emitido durante processo de extração e esterificação	14.850,60	kg/ha·ano

De acordo com os dados obtidos e expostos nas tabelas 2.7 a 2.9, é possível obter o balanço de dióxido de carbono: para isso, é necessário que se subtraia o valor total em de dióxido de carbono emitido pelo total, em massa, de dióxido de carbono absorvido pelas microalgas. Desta forma, obtém-se o valor de -91.195,7 kg/ha·ano: tal resultado possui sinal negativo, pois informa que o gás provocador do efeito estufa está sendo retido pelas microalgas.

O estudo, de acordo com os autores, avalia o balanço de energia e de carbono de um processo de obtenção de biodiesel a partir de microalgas que não existe em escala industrial devido ao fato de alguns problemas tecnológicos ainda permanecerem sem solução visível. Ainda, consoante os autores, métodos mais refinados para colheita, extração de lipídios e transesterificação, além de avanços na tecnologia dos biorreatores podem, seguramente, melhorar o balanço de energia da produção do biodiesel e torná-la comercialmente viável. Em um último estágio, a reciclagem e deposição da biomassa residual fornece uma grande oportunidade para ganho em energia, visto que a biomassa residual possui várias aplicações úteis. Outra conclusão obtida a ser citada é que a avaliação do ciclo de vida se mostra como uma importante e relevante ferramenta para mensurar e comparar novas tecnologias para o balanço de energia e impacto ambiental.

Obviamente, tal estudo não corresponde àquele a ser desenvolvido neste projeto de graduação, mas serve como um parâmetro de embasamento teórico, apresentando alguns objetivos em comum e resultados e dados técnicos muito importantes para a correta avaliação exergética e ambiental.

## **2.4. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (LCA) DE BIOCOMBUSTÍVEIS DE MICROALGAS**

Devem-se, sistematicamente, avaliar as novas formas de produção de energia com uma perspectiva de análise de ciclo de vida (LCA). Conforme Soulliere (2014), a avaliação do ciclo de vida (LCA) é uma ferramenta conhecida por avaliar um produto ou um serviço durante toda sua vida, ou seja, partir do berço até o túmulo, sendo utilizada na tomada de decisões por engenheiros, executivos, autoridades reguladoras governamentais e acadêmicos, olhando para o esgotamento de recursos, para o consumo de energia e para as emissões de substâncias de todos os processos necessários para atingir a produção e a utilização do combustível; em segundo lugar, a avaliação de diversos impactos ambientais, não somente o potencial de aquecimento global ou a produção líquida de energia. A LCA é uma metodologia ISO desenvolvida com o objetivo de permitir a detecção de transferência de poluição de uma etapa à outra ou de um tipo de impacto ambiental a outro (Collet et al., 2011).

No que tange aos biocombustíveis de terceira geração, dentro da qual o biodiesel de microalgas se insere (por analogia, também se pode inserir a biomassa de microalgas nessa categoria), trata-se de uma tecnologia ainda bastante rudimentar, sendo necessários diversos aspectos de evolução tecnológica para a produção comercial do combustível. Nesse sentido, é necessário avaliar o desempenho ambiental esperado desse potencial sistema de geração de eletricidade, com vistas a detectar os gargalos tecnológicos e determinar quais processos devem ser otimizados prioritariamente, sempre com o fim primordial de produzir uma fonte renovável e limpa de energia de modo ambientalmente amigável. Entretanto, sempre se deve ter em conta que a metodologia LCA sofre uma severa limitação para o presente escopo: como inexistem produções em escala comercial de biomassa de microalgas, utilizam-se extrapolações laboratoriais para descrever o sistema produtivo.

Na execução de uma avaliação de ciclo de vida, há fronteiras definidas do sistema para mostrar quais fluxos estão sendo contabilizados, mostrando ainda onde o processo se inicia e termina. As fronteiras de um sistema e suas condições de contorno costumam variar de um estudo para outro, de modo a apresentar resultados diferentes. Ademais, a LCA utiliza uma unidade funcional particular para o produto ou serviço em investigação. Com isso, para uma aceitável e efetiva comparação entre estudos, é necessário que as suas unidades funcionais utilizadas sejam compatíveis, já que elas são a principal característica da LCA. Neste sentido, é possível que os resultados da LCA sejam avaliados contra projetos anteriores ou outros projetos, sendo utilizados, ainda, para avaliar diferentes configurações dentro do mesmo ramo, que executa a mesma função ou produz produtos equivalentes.

Collet et al. (2011) descrevem que o critério de seleção é uma definição clara da unidade funcional, sendo o conceito de unidade funcional a principal característica da LCA, que permite comparações relevantes e justas entre estudos ou entre diferentes opções tecnológicas. A partir da análise de 15 diferentes trabalhos a respeito de avaliações de ciclo de vidas da produção de

microalgas, Collet et al. (2011) chegaram à conclusão de que há duas unidades funcionais geralmente avaliadas: produção de biomassa ou produção de bioenergia. Dentro de bioenergia, três vetores são considerados: éster metílico; metano e eletricidade. O metano e o éster metílico são facilmente armazenáveis, ao contrário da eletricidade. Existe também uma importante unidade funcional na maioria dos estudos: a produção de biodiesel como a saída de energia primária a partir de microalgas. A quantidade de biodiesel produzido é descrita em diferentes unidades, que podem ser volume, massa e conteúdo energético. Ainda de acordo com Collet et al. (2011), não há um consenso sobre os valores do conteúdo energético do biodiesel, e a descrição do conteúdo energético não está harmonizada, pois é feita tanto em função do poder calorífico inferior quanto do poder calorífico superior. Essas diversidades de unidades funcionais podem levar a diversas fronteiras e perímetros para a avaliação do ciclo de vida.

Um *framework* da LCA é importante para avaliar cada configuração com as mesmas unidades funcionais e define como os dados são coletados e analisados. O *framework* agiliza o processo de avaliação do ciclo de vida, pois reduz o prazo de conclusão da LCA. Além do mais, o *framework* cria um roteiro consistente para o usuário, reduzindo as lacunas de dados e as incertezas que o cercam, gerando fluxogramas distintos, fronteiras definidas e unidades funcionais, permitindo a ele concentrar suas análises em níveis superiores, uma vez que as bases já estão desenvolvidas (Soulliere, 2014).

Consoante Soulliere (2014), o *framework* LCA é desenvolvido para uma execução rápida da avaliação do ciclo de vida, pois utiliza referências e unidades funcionais estabelecidas, além de configurações-padrão. Assim, criar um *framework* de uma análise de ciclo de vida (LCA) consiste em identificar os estágios de vida, baseado em informações acadêmicas e da indústria atual, priorizando o foco da LCA.

De acordo com a metodologia LCA, uma vez que a unidade funcional, o perímetro de estudo e o sistema tenham sido definidos, cada processo incluído no perímetro deve ser caracterizado em termos de entradas e saídas técnicas, consumo de energia e recursos e emissões ao ambiente. Como já explicado, devido à lacuna de dados industriais acerca da transformação de algacultura, o inventário de dados compilados nos estudos realizados até hoje é baseado em extrapolações de resultados em escala laboratorial, em adaptação de processos similares utilizados em condições diferentes ou com diferentes matérias-primas e em modelagens.

A categoria das entradas refere-se a qualquer produto ou serviço exigido em algum ponto do processo de cultura das microalgas ou também no processo de transformação. Inclui materiais utilizados para construir sistemas de cultivo, fertilizantes e reagentes químicos, eletricidade utilizada e, ainda, calor necessário na planta. Ao final, a energia e os fertilizantes são os insumos mais influentes no desempenho ambiental e no equilíbrio energético.

Em algumas publicações, entretanto, o consumo total de energia e de calor é completamente suprido pela produção interna a partir da microalga, tanto por digestão anaeróbica (da biomassa ou do "bolo de óleo" (*oilcake*)), quanto por combustão direta da biomassa ou dos resíduos extraídos. Outro

ponto bastante importante é o fato de que se deve levar em conta o consumo energético para se ter uma perspectiva acerca do potencial de aquecimento global da produção de bioenergia a partir de microalgas.

As demandas por nutrientes dependem da espécie e do grau de estresse a que a alga é submetida (o estresse é de suma importância para o armazenamento lipídico). Por isso, os estudos apresentam uma grande variabilidade quanto às quantidades demandadas de nutrientes (de nitrogênio e fósforo, principalmente), bem como nos métodos de provê-las à cultura: apenas com a adição de águas residuais; por fertilizantes químicos (maioria dos estudos); por reciclagem dos produtos resultantes da digestão anaeróbica dos "bolos de óleo". Da mesma forma do que a demanda energética, a demanda por nutrientes pode ter importantes consequências no balanço ambiental da produção energética a partir de microalgas. Por outro lado, pode-se levantar a dúvida sobre a confiabilidade na utilização de águas residuais como fonte de nutrientes, sobretudo pelo seu teor bastante sazonal: em determinadas épocas, a água é ricamente nutritiva; porém, em outras, seu poder nutritivo decresce substancialmente.

#### 2.4.1. FASES DO CICLO DE VIDA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS

Soulliere (2014) desenvolveu uma pesquisa para avaliar, em um quadro de Análise de Ciclo de Vida, o desempenho e sustentabilidade da produção de biodiesel a partir de microalgas. De acordo com a pesquisadora, as várias configurações de produção consistem basicamente nas fases de vida de: cultivo, colheita, extração e síntese. Um diagrama dos estágios de vida é demonstrado na Figura 2.11. As fases demonstradas na figura são: fase de cultivo; fase de colheita; fase de extração e fase de síntese.

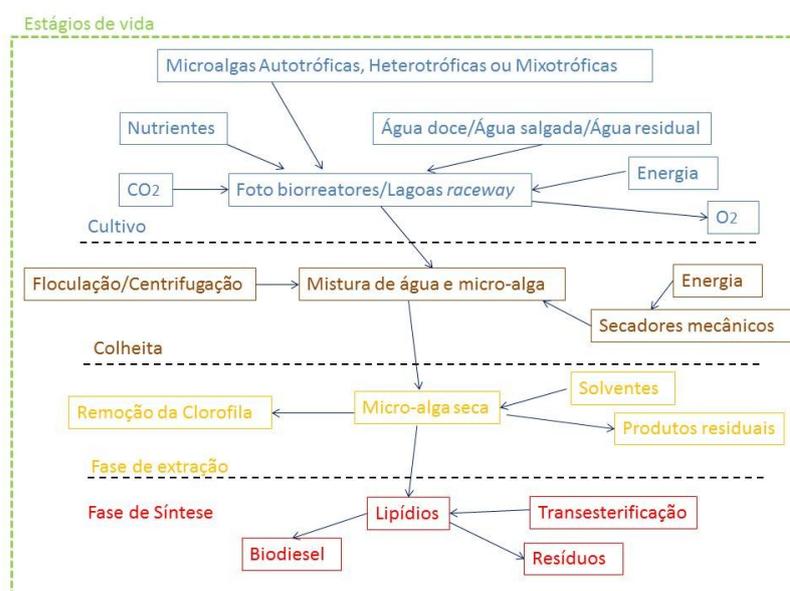


Figura 2.11. Fases do Ciclo de Vida da Produção do Biodiesel

A fase de cultivo está associada à produção de lipídios e ao crescimento de algas. As variáveis dentro da fase de cultivo consistem em cultivo local, espécie de microalgas, modo de crescimento, fonte de dióxido de carbono, fonte de nutrientes e fonte de água.

Os projetos de cultivo mais comuns são dados em lagoas *raceway* ou em fotobiorreatores (Jiang et al., 2011). Aqueles podem ser feitos de concreto ou simplesmente cavados no chão, podendo ser recobertos por um revestimento plástico feito de polietileno de alta densidade ou por PVC, enquanto estes, no geral, permitem a intensificação da cultura, podendo produzir mais biodiesel por hectare quando comparado ao sistema *raceway* (Jiang et al., 2011). A escolha do projeto de cultivo depende de variáveis locais, tais como: intensidade de luz; condições climáticas; terras disponíveis; disponibilidade de água e até mesmo do tipo de indústrias nas proximidades.

A escolha do meio de crescimento independe da escolha do sistema de cultivo, podendo ser em: água doce (opção mais cara, todavia, sempre requerida, ainda que para, apenas, estabilizar a salinidade no meio); água salobra, água do mar (interessante por ser ilimitada, já que uma das grandes preocupações para a geração da bioenergia de microalgas é a própria utilização demasiada de recursos hídricos); águas residuais, podendo ser de escoamento animal ou agrícola (Johnson et al., 2010), sendo fonte de água e de nutrientes (todavia, a biomassa residual de microalgas crescidas neste meio não pode ser utilizada para algumas aplicações posteriores, como alimentação). Com relação à utilização de fertilizantes comerciais, também é uma opção mais cara, que poderia dificultar muito a viabilidade econômica. (Jiang et al., 2011). No lugar de água doce, poderia ser utilizada água residual, com carbono, nitrogênio e fosfato como complemento. As águas residuais podem ser de escoamento animal ou de escoamento agrícola (Johnson et al., 2010), sendo o interesse deste Projeto principalmente neste, materializado pela utilização da vinhaça.

A composição mineral, a razão C/N e a taxa de crescimento das microalgas variam naturalmente de acordo com as condições ambientais de luz, temperatura, disponibilidade de nutrientes e intensidade de estresse. Como já visto, a redução da disponibilidade de nitrogênio aumenta a concentração lipídica, mas isso ocorre em detrimento da taxa de divisão celular, que se torna menor – consequentemente, há menor produtividade de biomassa (para isso, sugere-se um crescimento da microalga em duas etapas: a primeira seria com alta disponibilidade de nitrogênio, de modo que o microrganismo atingisse uma alta taxa de crescimento e um considerável tamanho; a fase seguinte seria de privação de nitrogênio, de modo que o conteúdo lipídico armazenado fosse aumentado). Essas condições operacionais (e consequente taxa de crescimento) variam muito nos estudos acerca das microalgas, sendo realmente difícil depreender alguma tendência.

Em prosseguimento, as microalgas são bastante tolerantes às diversas fontes possíveis de CO<sub>2</sub> (de gás comprimido e purificado a gases de combustão de usinas de energia associadas), com o simples requisito de manutenção de um pH adequado ao crescimento. Entretanto, a eficiência da dissolução e a habilidade da microalga de consumir o gás variam muito de acordo com os sistemas de cultivo. Quanto à utilização dos gases de combustão, tem-se o problema de baixa concentração de CO<sub>2</sub> (entre 5

e 15%) e de não serem conhecidos os impactos a longo prazo de sua utilização. Além disso, a injeção destes gases no meio de crescimento sem um enriquecimento prévio ou sem uma compressão requer a posterior compressão de grandes volumes de gás, o que reduz a eficiência do sistema de injeção. Dessa forma, há um claro *trade-off* energético entre a prévia purificação e as injeções de gases. Quanto às emissões ao ambiente, é inevitável impedir a emissão em tanques *raceway* abertos, em virtude da baixa eficiência do sistema de injeção e da natural evaporação no meio de crescimento.

Existem numerosas configurações possíveis para a fase de cultivo, mas nem todas possuem avaliação do ciclo de vida disponível. Um quadro de avaliação de ciclo de vida, conforme já ressaltado, pode ser comparado a outro, permitindo aos desenvolvedores tomar decisões, utilizando-se de critérios mais relevantes, por uma configuração em detrimento à outra.

A fase de colheita envolve a remoção das microalgas da água, podendo ter um custo elevado e ser lenta. As microalgas, além de serem removidas da água, são secadas como preparação à fase de extração (Sathish et al., 2012). Dois processos são mais comumente utilizados na separação das microalgas da água: centrifugação e floculação.

Durante a centrifugação, danos podem ser causados às paredes celulares das microalgas, devidos às forças de cisalhamento ocorridas por causa das altas velocidades de rotação (Chen et al., 2010), sendo um método caro e lento para colheitas grandes, sendo preferida em colheitas em pequena escala. Por sua vez, a floculação ocorre quando partículas menores se aglutinam para criar aglomerados maiores de microalgas, que sedimentam, para serem recolhidos (Chen et al., 2010).

O passo seguinte à colheita das algas é a secagem, sendo duas técnicas usualmente empregadas: secadores solares e secadores mecânicos. A secagem ao ar (solar) possui custo mais efetivo em termos de eficiência energética, porém o processo demanda mais tempo para ser completado (Sathish et al., 2012). Técnicas de extração molhada estão sendo desenvolvidas, tornando, em um futuro não muito distante, desnecessária a secagem, o que traria uma economia líquida de tempo, energia e custo.

O conteúdo de biomassa final seca antes da produção de biocombustível é altamente dependente dos processos de transformação, de concentração e de secagem (do processo global de colheita, incluindo o condicionamento da biomassa). A ideia que domina os estudos é baseada na prévia concentração da biomassa por meio de uma etapa de floculação/sedimentação. Um ponto importante para essa etapa seria a determinação da velocidade de sedimentação e a razão de biomassa sobrenadante, mas, de qualquer forma, a concentração da lama de algas após a sedimentação não é alta o suficiente para fazer o processamento posterior de modo eficiente, de modo que é necessária a utilização do clássico método de concentração: a centrifugação (pensa-se em centrífugas espirais, que são as menos consumidoras de energia). Por fim, para a etapa de secagem, é muito interessante a utilização da radiação natural solar, de modo a diminuir a "pegada energética" do processo.

As etapas de extração e de síntese não são aplicáveis ao caso estudado neste Projeto de Graduação, na medida em que se tem o interesse de realizar a queima da biomassa seca diretamente nas caldeiras

existentes na usina Jalles Machado, juntamente com o bagaço de cana, para que não sejam necessárias adequações técnicas ao aparato já existente no local.

## 2.4.2. ANÁLISE DE IMPACTO AMBIENTAL

Uma das determinações da metodologia LCA é ligar todos os fluxos econômicos e ambientais a um fluxo de referência da unidade funcional. No entanto, vários processos que levam à produção da unidade funcional também podem produzir vários outros produtos (coprodutos). Esse fato dificulta um o tratamento desses processos multifuncionais, mas há duas metodologias possíveis para a sua correta consideração: alocação ou substituição. A abordagem alocativa consiste em distribuir a carga ambiental dos processos iniciais entre todos os coprodutos do processo multissaiada. Essa distribuição deve ser baseada nos critérios mais sensíveis, como massa, valor econômico e conteúdo energético dos produtos. Por sua vez, a opção de expansão perimétrica (substituição) consiste em adicionar o coproduto à unidade funcional. As normas ISO para a LCA estipulam que este método deve ser preferido em detrimento daquele sempre que possível. Entretanto, quando a substituição não é possível, a alocação energética deve ser preferida para aqueles processos que levam à produção de energia.

O balanço energético de todo o processo é de suma relevância, porque, obviamente, deseja-se um sistema que crie mais energia do que utilize para a produção daquela. As publicações utilizam diferentes sistemas para avaliar o desempenho energético do processo: *razão líquida de energia* (NER), definida como a razão de energia produzida em relação à consumida (de maneira direta) (foco na tecnologia do sistema em si); *razão de energia acumulada* (REA), que verifica como a energia de entrada foi produzida e qual a quantidade de energia primária utilizada para a produção dessa energia de entrada (inclui o efeito do ambiente tecnológico do sistema de produção).

A maioria dos estudos também avalia o potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa em adição ao balanço de energia. Além desse óbvio impacto ambiental, a norma ISO também determina o estudo de outros (que quase não é realizado em nenhum estudo): depleção abiótica, potencial de acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, toxicidade marinha, oxidação fotoquímica, radiação ionizante, uso da terra, toxicidade à água doce e toxicidade terrestre. Na maioria dos trabalhos, as mudanças climáticas são avaliadas com os fatores de caracterização do IPCC por um horizonte temporal de 100 anos (IPCC, 2006). As diferenças de escolhas de fronteiras, de simplificações do modelo e dos métodos de avaliação do impacto podem gerar resultados extremamente díspares quando ao potencial de aquecimento global (GWP) e ao retorno energético no investimento (EROI), mitigando a possibilidade de comparar quaisquer resultados estudados (um baixo EROI leva a um alto GWP). Outro ponto importante para as diversidades nos resultados, como já discutido, é o modo de lidar com os coprodutos: de tão diferentes

que são, há estudos que, inclusive, relatam impacto climático negativo (o sistema fixa mais gases de efeito estufa do que emite).

## 2.5. CONSIDERAÇÕES ACERCA DA VINHAÇA COMO MEIO DE CULTIVO

O advento da produção de biocombustíveis em fazendas de alga possibilita uma relação de simbiose com usinas de cana-de-açúcar. As microalgas se alimentam, principalmente, de dióxido de carbono (carbono inorgânico), sendo que a abundante biomassa de cana queimada em caldeiras, em associação à incidência solar privilegiada no Brasil, faz da utilização de algas em usinas de cana uma possibilidade de conversão de emissões de GEE em biocombustível (Carvalho, 2014).

Quando ocorre a transformação do mosto em vinho e deste em etanol, tem-se a formação da vinhaça, que é um líquido de grande demanda biológica de oxigênio: a vinhaça (vinhoto, restilo ou calda de destilaria) é, então, o resíduo líquido da destilação do vinho, tendo um elevado poder eutrofizante, sendo rica nos íons NPK – sódio, fósforo e potássio, os quais são essenciais para a algacultura. A Figura 2.12 ilustra de um diagrama simplificado básico para a produção de álcool, com especial ênfase dada à origem da vinhaça.

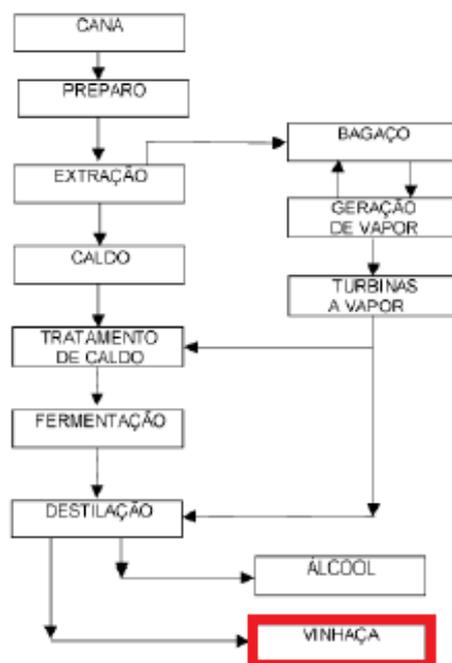


Figura 2.12. Diagrama Simplificado Básico para a Produção de Álcool (Marques, 2012)

Visão mais detalhada do ciclo produtivo da cana-de-açúcar pode ser vista na Figura 2.13:

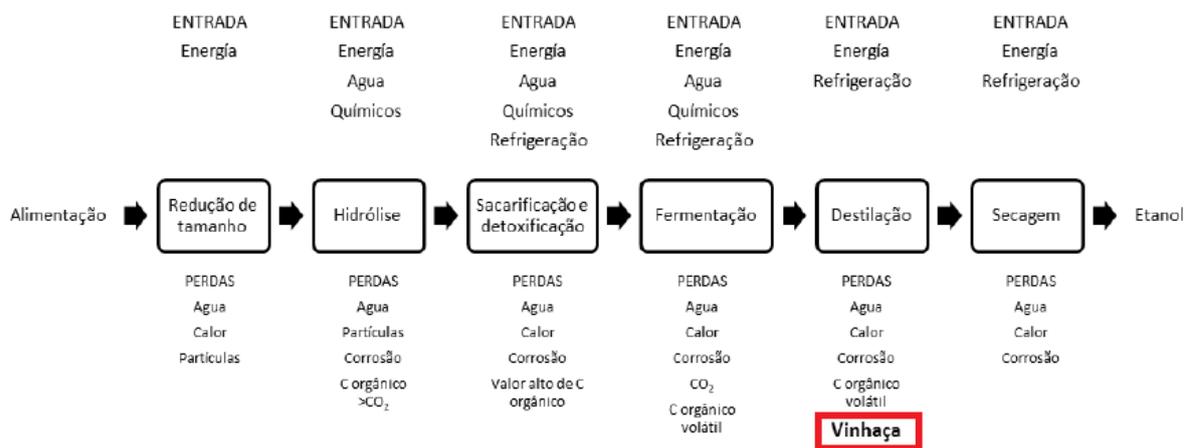


Figura 2.13. Instalação de Conversão de Etanol a partir de Matéria-Prima Celulósica: Componentes, Entradas e Saídas (Ramirez, 2013)

Entende-se a vinhaça como o maior poluidor dentre os efluentes gerados no processo de cultivo da cana-de-açúcar, sendo produzidos entre 10 e 18 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido (Carvalho, 2014). Dessa forma, Carvalho (2014) sugere que o Brasil, atualmente, responde por cerca de 40% da produção mundial de etanol, com cerca de 25 bilhões de litros anuais, o que implica, pelo menos, a produção de 250 bilhões de litros de vinhaça. O volume da vinhaça resultante da etapa da destilação é inversamente proporcional à concentração de etanol no final da fermentação. Dessa forma, esforços para assegurar o elevado teor de etanol são capazes de reduzir o volume de vinhaça, melhorando, assim, o consumo de energia e a capacidade de destilação.

A grande quantidade de vinhaça formada durante o processo operativo da usina sucroalcooleira é, em geral, armazenada em lagoas de vinhaça, para que, então, haja uma destinação ao campo por meio de caminhões dispersores ou de canais de distribuição de vinhaça na plantação, como exibido na Figura 2.14:



Figura 2.14. Lagoa de Vinhaça (esq.) e Canal de Distribuição de Vinhaça (dir.) (Carvalho, 2014)

Sabe-se que algumas usinas vêm implantando biodigestores especificamente projetados para converter a vinhaça diretamente em energia elétrica, mas a destinação amplamente mais utilizada é a fertirrigação, a qual reduz a demanda por adubos orgânicos e minerais, devido à elevada concentração de nutrientes no vinhoto. Entretanto, mesmo com essa destinação, é necessário tomar um cuidado especial com a quantidade empregada de vinhaça, pois também é sabido que, apesar de suas boas propriedades nutritivas, o excesso de vinhaça gera poluição dos corpos aquáticos (aquíferos ou de rios vizinhos) e a salinização/mineralização do solo, o que implica a redução da produtividade de safras posteriores (Carvalho, 2014).

A composição da vinhaça depende de diversos fatores, como a qualidade da matéria-prima, as características e o modo de operação das colunas de destilação. Mas, de modo geral, o resíduo apresenta concentrações importantes de sais minerais, matéria orgânica e água, o que o torna altamente agressivo ao meio ambiente (em decorrência do elevado potencial poluidor) e de difícil disposição (já que é produzida em grandes volumes) (Carvalho, 2014). A vinhaça possui elevados níveis de demandas química e bioquímica (DBO e DQO) de oxigênio, bem como um pH ácido, que varia entre 3,5-4,9, e uma temperatura de descarga bastante alta (em torno de 90 °C). A sua intrínseca carga orgânica causa a proliferação de microrganismos que consomem o oxigênio dissolvido na água (caso lançada diretamente em leitos aquíferos), destruindo a flora e a fauna aquáticas e dificultando o aproveitamento das fontes de abastecimento de água potável (Carvalho, 2014). Devido à sua elevada carga orgânica, o seu poder de poluição se equipara a cerca de cem vezes o poder poluente do esgoto doméstico (Marques, 2012).

A classificação da vinhaça é feita segundo os componentes do mosto, ou seja, melação, caldo ou misto (melação + caldo), sendo a composição de cada classe representada na Figura 2.15:

Parâmetros	Melação	Caldo	Misto
pH	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
Temperatura (°C)	80 – 100	80 – 100	80 – 100
DBO (mg l <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	25.000	6.000 – 16.500	19.800
DQO (mg l <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Sólidos totais (mg l <sup>-1</sup> )	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg l <sup>-1</sup> )	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg l <sup>-1</sup> )	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg l <sup>-1</sup> )	450 – 1610	150 – 700	480 – 710
Fósforo (mg l <sup>-1</sup> )	100 – 290	10 – 210	9 – 200
Potássio (mg l <sup>-1</sup> )	3.740 – 7.830	1.200 – 2.100	3.340 – 4.600
Cálcio (mg l <sup>-1</sup> )	450 – 5.180	130 – 1.540	1.330 – 4.570
Magnésio (mg l <sup>-1</sup> )	420 – 1.520	200 – 490	580 – 700
Sulfato (mg l <sup>-1</sup> )	6.400	600 – 760	3.700 – 3.730
Carbono (mg l <sup>-1</sup> )	11.200 – 22.900	5.700 – 13.400	8.700 – 12.100
Relação C/N	16 – 16,27	19,7 – 21,07	16,4 – 16,43
Matéria orgânica (mg l <sup>-1</sup> )	63.400	19.500	3.800
Subs. Redutoras (mg l <sup>-1</sup> )	9.500	7.900	8.300

Figura 2.15. Composição Química da Vinhaça em Função do Tipo do Mosto (Marques, 2012)

De acordo com Carvalho (2014), percebe-se que as diversas alternativas de disposição da vinhaça que vêm sendo estudadas e implantadas até o presente momento não foram desenvolvidas com o objetivo de se alcançar a forma mais econômica de aproveitar o resíduo, mas sim como a forma menos

custosa de dispor dele. Justifica: a fertirrigação exige gastos com transporte; a concentração para a queima não é eficiente sob a óptica energética; a produção de célula proteica (SCP – *single cell protein*) apresenta um custo de instalação muito alto.

Então, a grande ideia consiste em utilizar a vinhaça, resíduo muito rico em carbono orgânico e em sais minerais, como substrato potencial para o desenvolvimento de meios de cultivo de microalgas, especialmente aquelas linhagens genéticas capazes de crescer em um cultivo mixotrófico (fixação de gás carbônico e aproveitamento de carbono orgânico dos efluentes da produção) em meios derivados do resíduo referido, reduzindo DBO e DQO e aproveitando o teor energético do resíduo, aproximando-se do conceito de biorrefinaria. Inclusive, este é um dos objetivos precípuos do projeto Bioalgoil, junto ao CNPq. Após essa redução do potencial orgânico da vinhaça, ela deixa de ser enquadrada como agente poluidor, podendo ser descartada *in natura* nos corpos aquáticos, o que significa dizer que o cultivo microalgal é uma fonte de biorremediação do resíduo (Carvalho, 2014). A Figura 2.16 ilustra o ciclo de produção do cultivo de microalgas a partir de integração com uma usina sucroalcooleira:

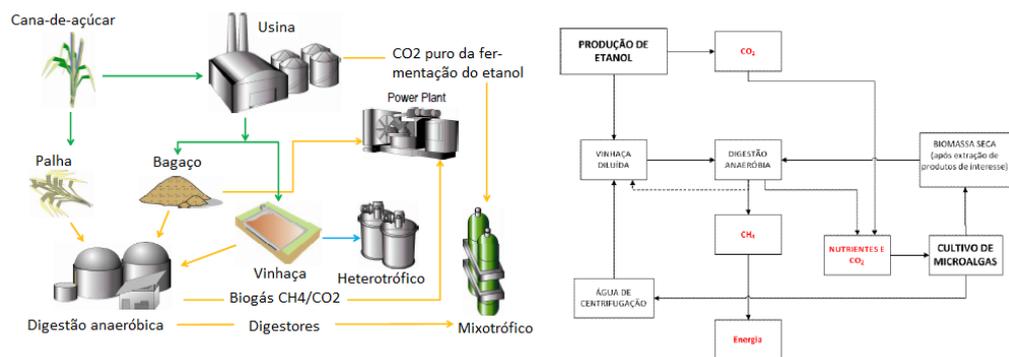


Figura 2.16. Ciclo de Produção do Cultivo de Microalgas a partir de Integração com uma Usina Sucroalcooleira (Marques, 2012) (Embraer, 2011)

Então, a ideia é realmente fechar o ciclo de produção da microalga: ela é cultivada em efluente de reator anaeróbico (vinhaça tratada) e, após a colheita devida, este meio pode ser utilizado para diluir a própria vinhaça, facilitando um posterior novo processo de tratamento anaeróbico; a biomassa, após seca e devidamente utilizada para os fins de interesse, pode ser utilizada na alimentação de reatores anaeróbicos, que posteriormente tratarão a vinhaça. Dessa forma, a digestão da vinhaça com a biomassa gera gás carbônico, que também pode ser utilizado para o crescimento do cultivo, além da produção de metano, como fonte alternativa de energia renovável (Marques, 2012).

Como a fonte de nutrientes consiste em um dos principais componentes para a formação do custo de produção de microalgas em larga escala (alguns dos principais limitantes são os custos de produção envolvidos na composição do meio e na disponibilidade de água), a utilização da vinhaça, após o seu

devido tratamento anaeróbico, é considerada como uma opção viável, sobretudo porque a iniciativa poderá agregar valor ao processo de tratamento (Marques, 2012). Em relação aos custos totais de produção, os gastos com gás carbônico e nutrientes para o meio de cultura (pelo menos 10% de nitrogênio e 1% de fósforo) podem representar cerca de 50% de todos os custos produtivos (Chisti, 2008) (ainda sem considerar os gastos energéticos para a produção dos fertilizantes requeridos). Dessa forma, é nesse contexto que se insere a utilização de lagoas de microalgas com meio parcialmente composto de vinhoto como uma forma de produção de biomassa e de tratamento de águas residuárias, de modo a reduzir, significativamente, os custos envolvidos no preparo do meio de cultivo.

Facilmente perceptível é o fato de a vinhaça apresentar uma importante limitação física em relação ao cultivo: ela apresenta uma coloração muito escura, o que pode implicar uma fotoinibição para o cultivo, especialmente daquelas algas dispostas em posições mais profundas do tanque. Por essa razão, o cultivo deve ser em vinhaça bastante diluída, de modo que a sua coloração seja menos acentuada, caminhando para a translucidez, que é bastante benéfica à algacultura. Outra característica indesejável diz respeito ao pH acentuadamente ácido, já que aquele ideal para a algacultura é o neutro, o que implica a necessidade de diluir a vinhaça.

Em outro estudo, Vieira (2013) avaliou a suplementação da vinhaça ao meio de cultivo em diferentes proporções (10%, 15%, 20% e 25%), obtendo resultados bastante satisfatórios, porque a vinhaça apresenta características para o desenvolvimento da microalga, havendo condições para a obtenção do cultivo mixotrófico com a vinhaça, devido à presença de sua carga orgânica e à alta produção celular. A proporção de vinhaça que obteve o melhor crescimento foi com a suplementação de 10%, em que se verificou uma excelente adaptação das células à nova composição do meio de cultivo. Com a adição de porcentuais maiores, verificou-se uma dificuldade no crescimento das células, devido ao excesso de materiais suspensos presente na vinhaça.

Ramirez (2013), por sua vez, apresenta a Figura 2.17 Figura 2.17 como sendo aquela resultante das diferentes porcentagens de vinhaça no cultivo para a produção de microalgas:

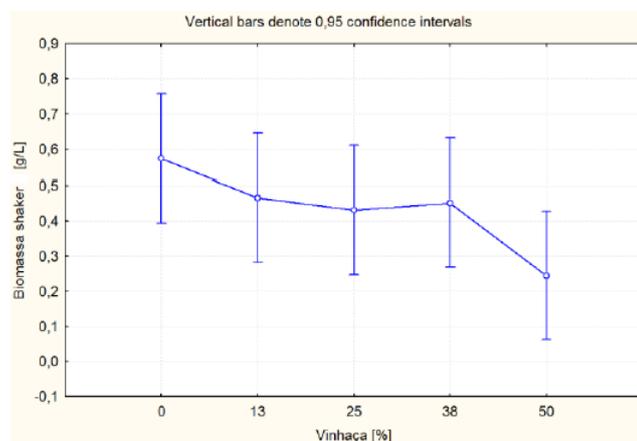


Figura 2.17. Crescimento de Microalgas em Diferentes Porcentagens de Vinhaça

Percebe-se que, em princípio, a aplicação da vinhaça é prejudicial ao cultivo, porque o cultivo em mistura vinhaça-água é menos eficiente, sob a óptica de produção de biomassa, do que aquele cultivo em água pura. Entretanto, tal constatação isolada não é interessante, sobretudo quando se avalia o cenário dos custos, já que a vinhaça torna a produção bastante mais econômica financeiramente. Ramirez (2013) ainda chega a uma equação que indica a quantidade de biomassa de microalgas gerada em função de fatores principais que influenciam o cultivo:

$$\text{Biomassa} \left[ \frac{\text{g}}{\text{L}} \right] = 0,488 + 0,1397x_1 + 0,157x_2 + 0,075x_1x_2 + 0,156x_1x_3 \quad (24)$$

Na equação (24),  $x_1$  representa a dependência da temperatura,  $x_2$  representa a dependência da porcentagem de vinhaça e  $x_3$  representa a dependência da intensidade luminosa (diretamente associada à proporção de vinhaça). À luz de tal equação, Ramirez (2013) gera os gráficos mostrados na Figura 2.18, evidenciando que maiores temperatura e intensidade luminosa implicam a maior produtividade de biomassa, que intrinsecamente associada à menor proporção de vinhaça:

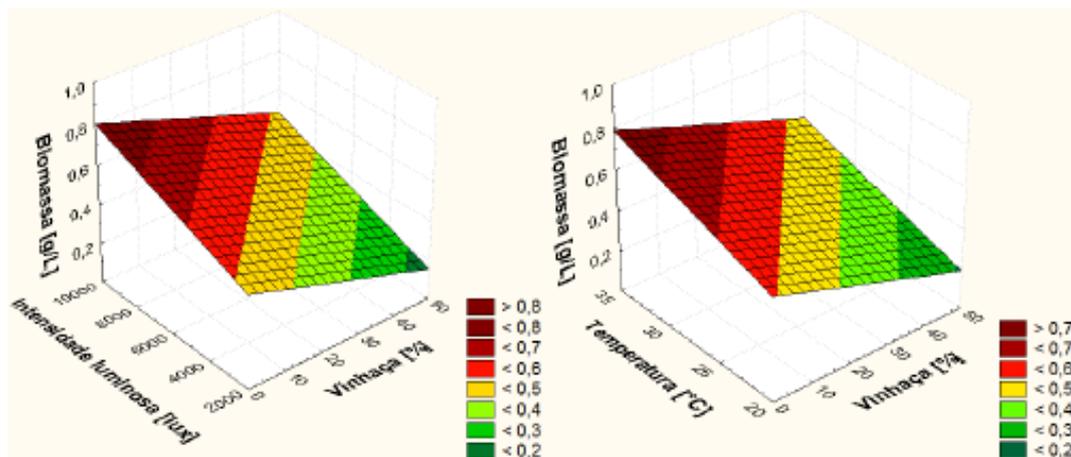


Figura 2.18. Planejamento Fatorial para a Produção de Biomassa com a Utilização de Vinhaça

Dessa forma, Ramirez (2013) conclui ser possível utilizar microalgas para o tratamento de vinhaça de etanol e, pela utilização dos macronutrientes presentes no efluente, produzir biomassa de microalga. Percebeu-se que a microalga é capaz de reduzir o DBO entre 95% e 98%, o nitrogênio entre 65,5% e 96% e o fósforo entre 98,4% e 99,9%, sendo observado que, até proporções de 40% de vinhaça, o cultivo ainda produzia biomassa de modo rentável.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa, também desenvolve pesquisas acerca da utilização de vinhaça como uma porção do meio de cultivo para as microalgas, como esquematicamente ilustrado na Figura 2.19:

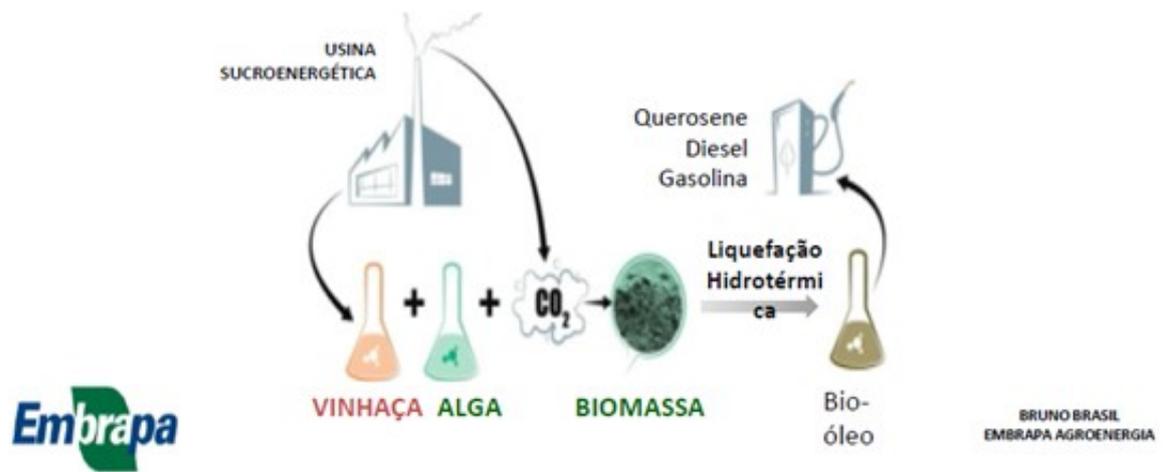


Figura 2.19. Produção de Bio-Óleo em Vinhaça Estudada pela Embrapa

### 3. USINA JALLES MACHADO

Por ser a vinhaça um resíduo do processamento industrial para obtenção do álcool, uma ótima fonte de sua produção está localizada no setor sucroalcooleiro, mais especificamente nas usinas produtoras de álcool e açúcar. Nesse contexto, vem ao escopo do Projeto a usina de Jalles Machado S/A, empresa que surgiu como uma destilaria de álcool carburante, e, a partir de 1993, iniciou uma nova fase, ao investir na extração de açúcar cristal e, desde 2003, também produz açúcar orgânico.

A usina Jalles Machado S/A, localizada na cidade de Goianésia, estado de Goiás, foi a primeira empresa do setor sucroalcooleiro brasileiro a efetivar a comercialização de créditos de carbono, possuindo o certificado do *Bureau Veritas Quality International* (BVQI), criado a partir da assinatura do Protocolo de Kyoto por parte do Brasil, que credencia a empresa a operar nesse mercado. A obtenção do referido certificado pela empresa somente foi possível devido ao programa de cogeração de energia elétrica por meio do bagaço de cana, enquadrando-se nas normas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) a fim de reduzir a emissão dos gases do efeito estufa.

Com respeito à cogeração de energia elétrica a partir do bagaço de cana, a Jalles Machado produz toda a energia que consome e vende a produção excedente, tendo sido a pioneira do estado de Goiás na implementação de tal sistema. Em termos comparativos, a central termelétrica da referida usina tem capacidade de produção de energia elétrica suficiente para atender uma cidade de 150 mil habitantes, com uma energia em torno de 40 MWh.

Vilela (2013) realizou uma avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar por meio do estudo de caso da usina Jalles Machado, sendo que a configuração mais adotada pelo Brasil (Figura 3.1) é o modelo de produção da Jalles Machado. Trata-se de uma destilaria de etanol anexa à usina de açúcar, o que traz grandes vantagens decorrentes da produção simultânea dos dois produtos.

Conforme ilustrado na Figura 3.1, as etapas para obtenção de etanol, do qual é provida a vinhaça, são a fermentação, a destilação, a retificação e, também, a desidratação para produção do etanol anidro.

A fermentação costuma durar entre 10 e 13 horas, após serem acrescidos leveduras e mel final ao mosto. Ocasionalmente, há arraste de etanol pelo CO<sub>2</sub>, havendo colunas lavadoras que recuperam o etanol arrastado. O vinho bruto é o produto das fermentações após passagens pelas dornas, obtendo teor de etanol entre 8 a 12%. Depois, o vinho bruto é filtrado e é, então, chamado de vinho centrifugado, que também apresenta de 8 a 12% de etanol (pode haver o incremento em 0,5 ponto percentual após a centrifugação). Após a passagem nas dornas, o vinho bruto é centrifugado, gerando dois produtos: o vinho centrifugado e o leite de levedura, o qual retorna ao processo. A levedura residual é comercializada após sua secagem (Vilela, 2013).

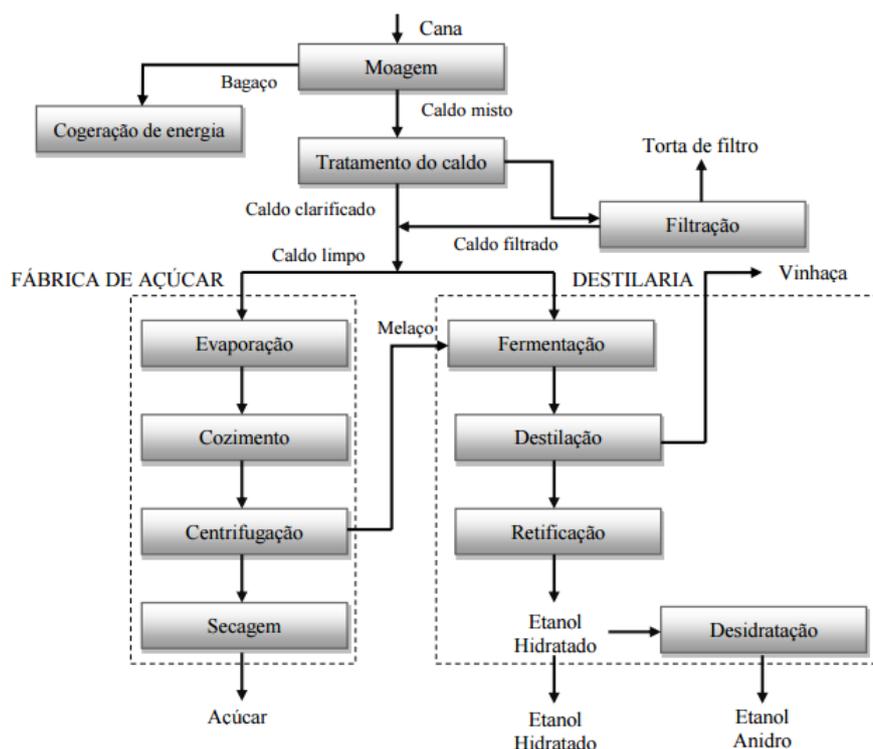


Figura 3.1. Modelo de Produção Adotado pela Jalles Machado S/A

No processo de síntese do etanol, são obtidos quatro produtos: o etanol em si, a vinhaça, a flegmaça e o óleo fúsel. A flegmaça e o óleo fúsel são compostos de alcoóis superiores e de outros subprodutos da fermentação. O etanol hidratado e anidro são produtos vendidos pela usina. A vinhaça surge após os processos de destilação e retificação do melação. A quantidade obtida gira em torno de 13 a 15 litros de vinhaça por litro de etanol, sendo utilizada completamente como fertilizante, devido à sua capacidade de substituir parte de alguns insumos agrícolas, como potássio e nitrogênio, além de outras matérias orgânicas provenientes de resíduos resultantes de operações industriais. Como a vinhaça sai do destilado a uma temperatura de 83 °C, é necessária a realização de resfriamento a uma temperatura cerca de 70% inferior à da saída do destilador, por meio de trocadores de calor, podendo, assim, ser lançada em uma grande reservatório, comumente denominado de piscina de vinhaça, para posteriormente ser bombeada para a lavoura de cana já misturada a matérias orgânicas (Vilela, 2013).

Além da vinhaça, outros rejeitos da produção de etanol que podem ser úteis na algacultura são águas residuais ricas em compostos orgânicos, que também são aproveitadas para fertilização do campo, após passarem por tratamento com utilização de ácido clorídrico 33% e hipoclorito de sódio.

Com relação à quantidade de dióxido de carbono, cuja concentração também é determinante para algacultura, Vilela (2013) avaliou oito cenários produtivos possíveis para a usina Jalles Machado, os quais foram arbitrados baseando-se em projetos em fase de avaliação para implantação futura por parte da empresa. Outrossim, as análises foram realizadas considerando emissões de gás carbônico, por ser o principal foco da empresa em seus projetos e certificações ambientais. Os cenários são:

- Cenário 1 – padrão atual: Moagem de cana na taxa de 573 toneladas por hora;
- Cenário 2 - projeto: Moagem de cana na taxa de 650 toneladas por hora;
- Cenário 3 – projeto: Moagem de cana na taxa de 573 toneladas por hora com produção de açúcar orgânico;
- Cenário 4 – projeto: Moagem de cana na taxa de 650 toneladas por hora com produção de açúcar orgânico;
- Cenário 5 – projeto: Moagem de cana na taxa de 573 toneladas por hora com utilização de palha na cogeração;
- Cenário 6 – projeto: Moagem de cana na taxa de 650 toneladas por hora com utilização de palha na cogeração;
- Cenário 7 – projeto: Moagem de cana na taxa de 573 toneladas por hora com produção de açúcar orgânico e utilização de palha na cogeração;
- Cenário 8 – projeto: Moagem de cana na taxa de 650 toneladas por horas com produção de açúcar orgânico e utilização de palha na cogeração.

Assim sendo, Vilela (2013) quantificou as emissões diretas e indiretas de gás carbônico associadas a todas as atividades do ciclo de vida, de forma a obter a pegada de carbono dos produtos finais. O autor utilizou a avaliação do ciclo de vida como ferramenta para cálculo do balanço de CO<sub>2</sub>, avaliando seu efeito sobre mudanças climáticas por tratar-se de um gás de efeito estufa, ou seja, foram obtidos resultados referentes ao GWP. Vilela (2013) desconsiderou a ínfima quantidade de outros gases emitidos incluídos nessa categoria (os principais são metano e óxidos nitrosos).

A Figura 3.2 mostra os balanços de CO<sub>2</sub> obtidos com a variação de cenário. É perceptível que o aumento na capacidade de moagem e o uso de palha na cogeração elevam as emissões, enquanto a produção de açúcar orgânico contribui para a redução de emissões comparativamente a cenários similares. A elevação de emissões citadas no primeiro caso está diretamente relacionada ao aumento da queima de biomassa na caldeira, e a redução citada no segundo caso deve-se à exclusão de insumos industriais para produção de açúcar orgânico, principalmente na etapa de tratamento do caldo, ou seja, consequência direta da não queima de diesel nos caminhões que transportam esses insumos. Esses argumentos se confirmam quando se observa, que dentre todos os cenários analisados, o que mais emitiu foi o aquele que utiliza palha em uma planta de moagem a 650 ton/h (cenário 6).

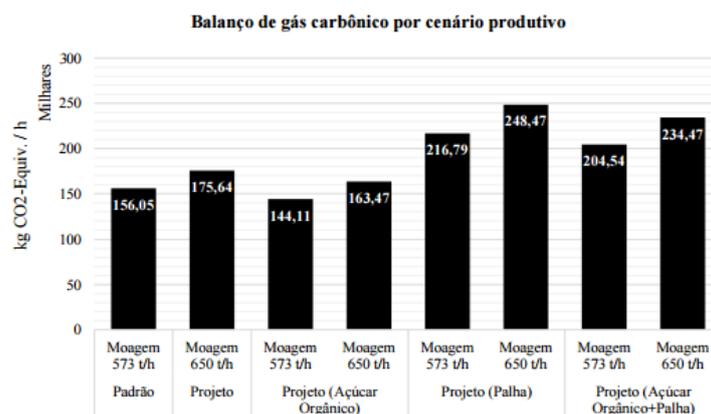


Figura 3.2. Modelo de produção adotado pela Jalles Machado S/A

De acordo com Vilela (2013), o uso da palha na cogeração de energia influenciou diretamente o aumento de emissões de gases de efeitos estufa, principalmente gás carbônico. No entanto, a quantidade de energia vendida pra a rede aumentou exponencialmente em relação ao cenário-padrão, fator diretamente relacionado ao aumento de receitas de venda de créditos de carbono. Considerando o grande potencial de elevação de lucro, o uso de palha na cogeração é uma alternativa interessante. Todavia, pode-se pensar em soluções que neutralizem o grande aumento de emissões em comparação à usina padrão: uma boa opção de solução seria o cultivo de algas capazes de absorver dióxido de carbono e produzir biomassa, também a ser queimada nas caldeiras.

Destarte, Vilela (2013) coaduna à tese defendida neste Projeto, segundo a qual a associação de algacultura à usina Jalles Machado, em suas etapas de fermentação e de geração de eletricidade (nas termelétricas), é uma opção bastante atraente, por gerar menores impactos ao ambiente e promover mais divisas econômicas à empresa.

## 4. METODOLOGIA

O problema estudado neste Projeto de Graduação terá suas análises energética, exergética e ambiental feita com base em dados colhidos da leitura da literatura especializada no estudo de microalgas para geração de energias renováveis. Tais dados, referentes ao arcabouço teórico das microalgas, serão associados aos dados específicos da usina Jalles Machado, relatados por Vilela (2013). A não utilização de dados experimentais diretamente obtidos se deve ao fato de que a Universidade de Brasília e as instituições parceiras ainda estão em fase de estudos preliminares acerca do tema, de modo que não é viável a utilização dos poucos dados gerados. Dessa forma, todos os dados técnicos utilizados para a análise realizada neste Projeto foram retirados de uma atenta leitura da bibliografia especializada, sendo todos os autores utilizados devidamente citados quando necessário.

### 4.1. ESCOLHA PELA PRODUÇÃO DE BIOMASSA SECA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CALDEIRAS

Inicialmente, impende salientar que o sistema proposto durante a primeira etapa deste Projeto de Graduação visava à produção de biodiesel a partir da biomassa de microalgas cultivadas em associação à usina sucroalcooleira Jalles Machado, com a utilização de parte de sua vinhaça residual como meio de cultivo. Entretanto, durante a defesa oral de tais considerações, suscitou-se a tese de que não seria atrativo, economicamente, à referida usina investir altos montantes para a produção do biocombustível, de modo que seria interessante realizar a modificação do produto final desejado (para tornar o estudo deste Projeto mais plausível e viável, podendo realmente tornar-se uma realidade para a usina).

As sugestões, muito oportunas, dadas pela banca examinadora referiram-se à produção de (i) biopetróleo cru, que seria vendido a refinarias próximas já existentes (na medida em que o biopetróleo teria um volume quase insignificante em relação ao petróleo fóssil, a refinaria não precisaria mexer em seu maquinário para utilizá-lo como fonte complementar na cadeia), ou (ii) biomassa seca de microalga, a ser queimada nas caldeiras existentes na própria usina Jalles Machado, juntamente com o bagaço e a palha da cana, com vistas a gerar maior volume de energia elétrica à rede, gerando ganhos financeiros e ambientais à usina.

As duas sugestões foram igualmente consideradas e pensadas durante o fazimento da continuação deste Projeto, no entanto foram encontradas diversas dificuldades de obtenção de dados acerca da produção de biopetróleo a partir de microalgas: apenas três das referências científicas utilizadas realmente discorrem acerca da produção de bio-óleo (*biocrude oil*) a partir de algas, sendo que elas utilizam fronteiras muito distintas para definir o sistema, tornando quase impraticável a comparação e

a verificação entre os dados – são utilizadas espécies diferentes, meios de cultivos, formas de colheita, secagem e extração também distintas.

Ademais, caso o interesse realmente fosse a produção do biopetróleo, a usina Jalles Machado ainda precisaria investir em muitas rotas durante o processo produtivo, o que poderia inviabilizá-lo sob a óptica econômica, o que, por outro lado, não aconteceria caso o produto final desejado fosse a biomassa seca de microalga: para obtê-la, bastaria investir nas etapas de cultivo, colheita e secagem, sem operações químicas muito relevantes.

Tais considerações, associadas ao fato de que foram encontradas diversas fontes de dados (comparáveis em termos de fronteiras e condições de contorno para o problema) para a solução almejada, levaram à conclusão de que, neste Projeto de Graduação, conforme coadunam Holanda et al., (2011), considera-se que as microalgas, por meio da queima de sua biomassa, podem gerar energia com eficiência, sendo uma alternativa sustentável para a geração de energia elétrica no Brasil. De acordo com tais autores, para cada tonelada de biomassa queimada, 8,12 MWh de energia elétrica são gerados – um poder calorífico bastante elevado, sobretudo dada a grande produtividade de biomassa seca de microalgas.

Um ponto que poderia ser arguido diz respeito ao investimento em novas caldeiras para a queima da biomassa de microalgas, já que, certamente, o ponto de operação para esse insumo seria diferente daquele para o bagaço da cana. Entretanto, de acordo com o sustentado por Holanda (2011), as caldeiras de queima de bagaço da cana podem, sim, ser utilizadas para a queima da biomassa seca de microalgas, sem necessidade de adaptações técnicas relevantes. Neste Projeto, como não foram encontradas outras referências acerca do tema, para que não seja realmente necessário proceder à mudança nas caldeiras já existentes na usina, pensou-se na utilização da biomassa algal em conjunto com o bagaço de cana: com este em maiores proporções, as eventuais alterações no maquinário seriam desnecessárias, já que a biomassa, em menores proporções, não resultaria em tanta diferença operativa.

## **4.2. CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS ACERCA DO PROBLEMA ESTUDADO**

Passada a justificativa da produção de biomassa seca de microalgas, a ser queimada em caldeiras para a geração de energia elétrica, pode-se passar escolhas feitas para o problema a ser estudado.

A microalga escolhida para o cultivo foi a *Chlorella vulgaris*, especialmente em virtude de ela ser a espécie mais estudada, apresentando maior volume de dados técnicos passíveis de serem utilizados neste Projeto de Graduação. Além disso, a referida cepa apresenta uma elevada taxa de crescimento, e uma alta capacidade de concentração lipídica (composto com alto poder calorífico, sendo, então, interessante para a queima em caldeiras) (Liang et al., 2009).

Quanto ao sistema de crescimento das microalgas durante a etapa de cultivo, escolheu-se o mixotrófico, em que o gás carbônico proveniente das unidades fermentadoras e da própria queima da biomassa nas caldeiras é utilizado como fonte inorgânica de carbono e o carbono existente na vinhaça consiste na fonte orgânica. Tal sistema de crescimento pareceu o mais adequado durante a elaboração deste Projeto, na medida em que é interessante, sob a óptica ambiental, reduzir a pegada de emissão de CO<sub>2</sub> da usina Jalles Machado (a etapa de fermentação gera uma grande pegada ecológica, enquanto libera grandes volumes de gases de efeito estufa para o ambiente), além de ser muito interessante reduzir os potenciais danosos da vinhaça, especialmente no que tange à DBO e à DQO, de modo que as microalgas serviriam como uma fonte de biorremediação para o resíduo da usina, o qual poderia, posteriormente, ser liberado para o ambiente sem tantos riscos ao solo e aos lençóis freáticos.

No que tange ao sistema de fornecimento de carbono para as microalgas, poder-se-ia arguir que a espécie selecionada não é voltada para o crescimento mixotrófico, sendo mais específica para o sistema autotrófico. Entretanto, de acordo com Liang et. al (2009), os resultados de taxa de crescimento e de acumulação lipídica são praticamente equivalentes nos dois métodos, sendo, inclusive, um pouco maiores no sistema mixotrófico, na medida em que a microalga não depende apenas da existência da fonte luminosa (o que só aconteceria durante o dia) para crescer, podendo ter um aumento de sua biomassa inclusive durante períodos de privação luminosa – ou seja, a microalga poderia utilizar o CO<sub>2</sub> (carbono inorgânico) em associação à radiação solar durante o dia e o carbono orgânico da vinhaça durante a noite, o que representaria um ganho nas taxas metabólicas, representando maior vantagem econômica e ambiental.

Quanto ao ambiente de cultivo e crescimento das microalgas, as opções consistiam, basicamente, em PBR fechados (com seus diversos formatos) ou em tanques abertos do tipo *raceway*. Apesar de aqueles apresentarem, notadamente, um desenvolvimento mais rápido e mais facilmente controlável, eles também demandam maiores investimentos financeiros iniciais mais altos e maiores gastos energéticos para a operação. Dessa forma, optou-se por cultivar as microalgas em lagoas abertas do tipo *raceway*, especialmente porque, na medida em que se utiliza a vinhaça como substrato para o meio de cultivo, não há tanta preocupação com a esterilidade do cultivo (a qual seria a maior vantagem aparente da utilização de PBR fechados). Ou seja, os tanques abertos foram escolhidos para diminuir a pegada ambiental da construção e da operação, além de possibilitar maior viabilidade econômica do investimento de capital a ser realizado pela usina Jalles Machado. As dimensões do tanque escolhido serão apresentadas na etapa de resultados.

No que tange, em sequência, à etapa de colheita, optou-se pela associação de três métodos em associação (em virtude, precipuamente, de essa ser a principal combinação descrita e analisada na literatura): i) adicionam-se compostos floculantes a todo o conteúdo do meio de cultivo (em tanque específico, diferente do tanque *raceway* de cultivo), de modo que as microalgas formem agregados de dimensões maiores; ii) esses agregados de maiores volume e massa tornam-se mais densos do que o meio de água e vinhaça, de modo que sedimentam ao fundo do tanque, possibilitando a retirada de

todo o líquido superior excedente (vinhaça e água); iii) retirado o volume excedente, resta um pequeno volume de água e vinhaça em associação ao sólido de microalgas, formando uma mistura heterogênea que pode ser colocada em centrífugas específicas, que retirarão o líquido excedente, formando uma pasta de biomassa de microalgas (*microalgae slurry*) nas paredes da centrífuga.

Sabe-se que a etapa de colheita, como já descrito neste Projeto, é a que apresenta maior consumo energético dentre toda a algacultura, sendo, por vezes, o processo que inviabiliza a produção algal em larga escala. Nesse sentido, a utilização do método da centrifugação, notadamente, diminui bastante a eficiência energética e exérgica do amplo processo de geração de eletricidade por meio da biomassa seca de microalgas. Por outro lado, também se sabe que a adição de compostos flocculantes pode aumentar a pegada ambiental do amplo processo referido. Entretanto, apesar desses aparentes problemas quanto à escolha realizada, ela pode ser justificada à luz de que, na literatura especializada, tal associação é a mais comumente descrita, em função, especialmente, de apresentar bom rendimento na separação entre a pasta de microalgas e o meio líquido de cultivo.

Dessa forma, a etapa de colheita pode ser determinante para as conclusões futuras acerca da viabilidade exérgica e ambiental da produção de microalgas para a cogeração de eletricidade em associação à usina sucroalcooleira Jalles Machado, sendo, possivelmente, um ponto susceptível de mudanças para futuros estudos, em que a tecnologia para o cultivo algal estará mais avançada e dados técnicos coerentes e confiáveis terão maior disponibilidade científica. Nesse sentido, é possível pensar na substituição, caso as conclusões deste Projeto sejam negativas quanto à proposta apresentada, das três etapas (floculação, sedimentação e centrifugação) pela colheita ultrassônica, apresentada pelo recente relatório do NAABB. Como não foram encontrados outros estudos que ratificassem os dados de tal relatório (consumo de 0,1 kWh/m<sup>3</sup> de meio de cultivo para a realização de toda a colheita), ele não foi utilizado na presente análise – além do fato de que, apesar de parecer bastante promissor, os dados foram coletados para cultivos em PBR fechados, de modo que pode haver alguma diferença quanto aos procedimentos realizados.

Passada a importante etapa da colheita, chega-se à última etapa do amplo processo de produção de biomassa seca de microalgas para fins de queima em caldeiras e de cogeração de energia elétrica: a secagem da pasta úmida retirada das centrífugas, representada na Figura 4.1:



Figura 4.1. *Microalgae Slurry* Retirada das Centrífugas <sup>[46]</sup>

A etapa da secagem da pasta úmida de microalgas também pode representar um importante gargalo energético e ambiental (consequentemente, financeiro) para o amplo processo estudado. Dessa forma, à luz das recomendações de Aikins et. al (2010), pensou-se em utilizar recursos que, *a priori*, teriam custo zero para a usina Jalles Machado: a secagem solar associada à secagem baseada na utilização dos gases quentes da combustão (seja da própria biomassa na caldeira, seja dos demais processos inerentes à usina).

Apesar de ser sabido que esses métodos demandam bastante tempo para serem completados, além de grandes áreas de insolação e/ou volume de gases quentes de combustão, eles foram escolhidos por apresentarem baixa (ou nula) demanda energética em relação às outras opções, corroborando, dessa forma, para o interesse de baixo impacto ambiental do processo. Além disso, a escolha pela secagem solar é plausível em um cenário em que a usina está localizada em uma área de grande insolação do Brasil, como já mostrado neste Projeto.

Quanto à etapa da queima, como já comentado neste Projeto, não se pretende fazer qualquer alteração tecnológica nas caldeiras existentes na usina Jalles Machado. Para isso, apesar de o autor Holanda (2011) ratificar a tese de que mudanças nas caldeiras destinadas à queima do bagaço não seriam necessárias, sugere-se a adição de porções de biomassa algal seca ao bagaço de cana misturado à palha (25% daquela e 75% destes, por exemplo – tais proporções precisariam de um estudo específico), com vistas a garantir que as propriedades da caldeira não precisem ser alteradas para o aproveitamento energético da biomassa de microalgas.

Destarte, após as etapas de cultivo, pré-colheita, colheita e secagem, obtém-se a biomassa seca desejada, apta a ser queimada nas caldeiras da usina Jalles Machado e a gerar, assim, energia elétrica à rede, representando importantes ganhos econômicos, energéticos e ambientais ao empreendimento.

Ou seja, de um modo bastante geral, a Figura 4.2 balizará as análises exergética e ambiental realizadas neste Projeto. Não é realizada uma análise detalhada da produção da vinhaça, assumindo-a apenas como um rejeito do processo de geração do álcool e uma entrada do processo de cultivo das microalgas (a análise detalhada acerca da produção de vinhaça no contexto da usina Jalles Machado é feita por Vilela (2013), sendo-lhe apenas retirados os dados necessários a este Projeto de Graduação):

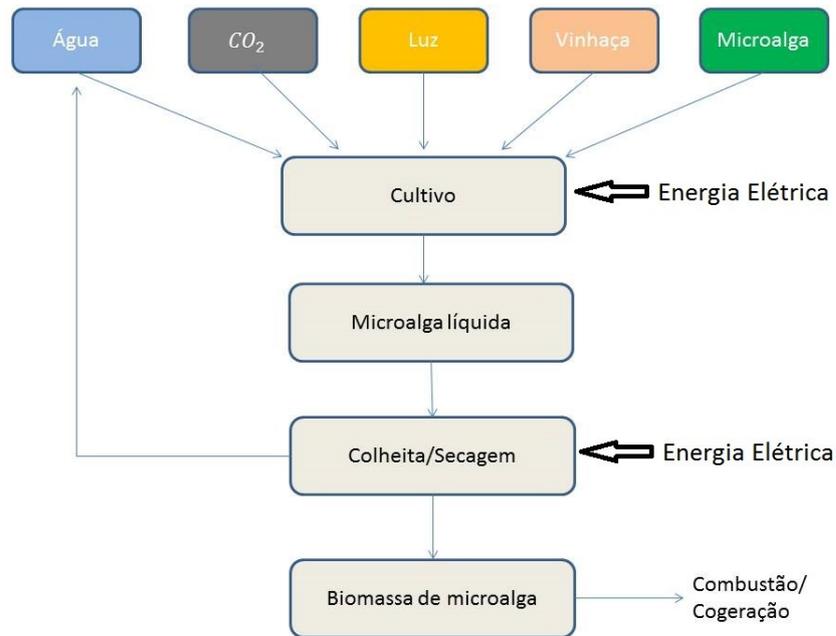


Figura 4.2. Diagrama do Processo Estudado

A análise exergética deve levar em consideração todas as entradas energéticas do processo, ao passo que a avaliação do ciclo de vida consiste em analisar as entradas e saídas de produtos com potencial danoso ao meio ambiente (neste caso, o parâmetro utilizado será a geração de CO<sub>2</sub> em todas as etapas do processo). A partir deste momento, serão apresentados os resultados e os memoriais de cálculo para cada uma das análises empreendidas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa, serão apresentadas as análises energética, exergética e de ciclo de vida (ambiental) para o amplo processo de produção de biomassa de microalgas com vistas à cogeração de energia elétrica por meio da queima do referido produto gerado.

### 5.1. ANÁLISE ENERGÉTICA

A análise energética, bastante simples, diz respeito aos gastos de energia elétrica no processo delimitado e à geração com a queima da biomassa nas caldeiras, resultando na razão líquida de energia (NER):

$$NER = \frac{\Sigma \text{TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA GERADO EM TODO O PROCESSO}}{\Sigma \text{TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA GASTO EM TODO O PROCESSO}} \quad (25)$$

Normalmente, para possibilitar a comparação entre diferentes estudos, o parâmetro NER é definido em termos específicos, ou seja, na quantidade de energia gerada e utilizada em termos de determinada quantidade de biomassa de microalgas (a unidade normalmente utilizada é [MJ/kg biomassa]). No intuito de saber se determinado processo apresenta vantagem energética, o parâmetro em comento deve ser maior do que a unidade.

Para a construção dessa análise, cabe, então, verificar quais são os processos que recebem e geram, diretamente, demandas de energia elétrica, devidamente elucidados na Figura 5.1:

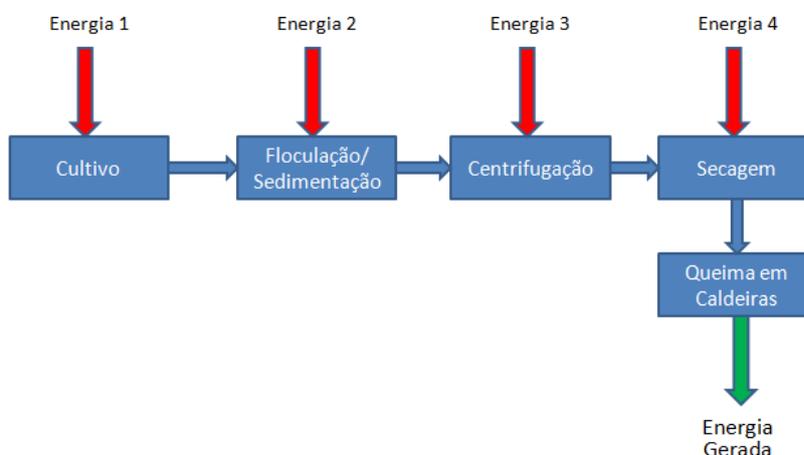


Figura 5.1. Processos com Demandas de Eletricidade

Todas as energias de entrada e a energia de saída (proveniente do poder calorífico da biomassa seca) são encontradas na análise de literatura. A Tabela 5.1 sumariza os principais resultados encontrados na análise, sempre sendo procuradas condições compatíveis às estudadas neste Projeto (todos os valores foram retirados dos cálculos realizados na etapa de avaliação exergetica, posteriormente apresentada no corpo deste Projeto):

Tabela 5.1. Dados para a Avaliação Energética

Dados para a Etapa de Cultivo (MJ/kg)	
Energia Elétrica + Combustível Fóssil (Gastos Energéticos Diretos Associados ao Cultivo)	0,225 MJ/kg (Energia Elétrica Cultivo) + 0,008 MJ/kg (Combustível Fóssil Cultivo) = <b>0,233 MJ/kg</b>
Dados para a Etapa de Colheita (Floculação, Sedimentação e Centrifugação) (MJ/kg)	
Energia Elétrica + Combustível Fóssil (Gastos Energéticos Diretos Associados à Colheita)	0,325 MJ/kg (Energia Elétrica Floculação) + 0,008 MJ/kg (Combustível Fóssil Floculação) + 0,028 MJ/kg (Energia Elétrica Sedimentação) + 0,104 MJ/kg (Energia Elétrica Filtração Vinhaça) + 0,205 MJ/kg (Energia Elétrica Centrifugação) = <b>0,670 MJ/kg</b>
Dados para a Etapa de Secagem (MJ/kg)	
Energia Elétrica (Gastos Energéticos Diretos Associados à Secagem)	<b>0,113 MJ/kg</b>
Dados para a Etapa de Queima da Biomassa Seca (MJ/kg)	
Energia Elétrica Gerada	- 0,001 MJ/kg (Eletrodo de Ignição da Caldeira) + 10,795 MJ/kg (Energia Elétrica Gerada na Cogeração) = <b>10,794 MJ/kg</b>

Com base na análise da Tabela 5.1, pode-se perceber que a energia elétrica consumida em todo o processo é equivalente a 1,012 MJ/kg, enquanto a energia total gerada é de 10,112 MJ/kg, o que retorna um NER de 10,62 (caso não se utilizasse a vinhaça, o NER seria de 11,89), o qual é um resultado bastante promissor – além de ser bem maior do que aqueles dispostos na literatura, que se dedica a estudar a produção de biodiesel em detrimento de biomassa para cogeração, ou seja, há uma demanda energética bastante mais elevada, sobretudo pelas etapas de extração lipídica e conversão por transesterificação.

## 5.2. ANÁLISE EXERGÉTICA

Feita a simples análise de consumo e geração de energia elétrica, pode-se passar a uma análise mais detalhada sob a égide da exergia, ou seja, da máxima energia útil, após as perdas entrópicas. Nesse sentido, a Figura 5.2 esquematiza como serão considerados os valores exergéticos a serem calculados:

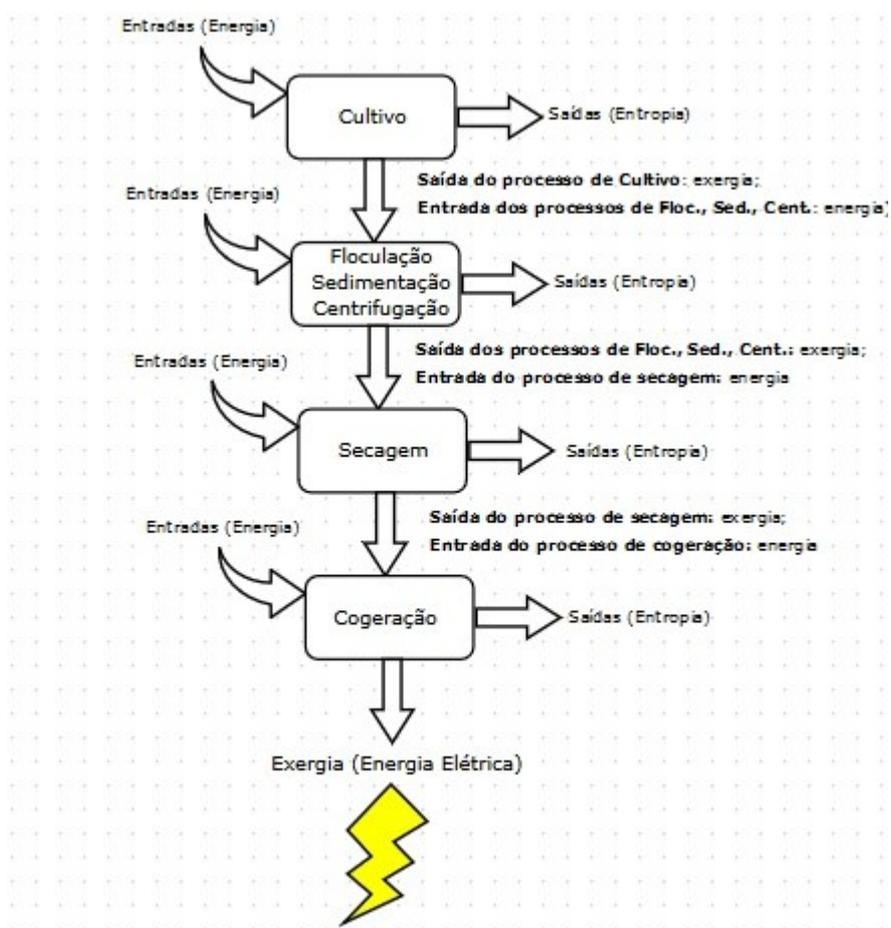


Figura 5.2. Esquema Termodinâmico para o Entendimento do Sistema

Tal figura deve ser entendida no sentido de que:

$$\text{Energia} - \text{Entropia (Anergia)} = \text{Exergia} \quad (26)$$

Tal entendimento norteia a construção de toda a Tabela 5.2, a qual apresenta todas as entradas de cada etapa (energia) e todas as saídas mais preponderantes (perdas entrópicas). Ou seja, a exergia de cada etapa deve ser entendida como o que é passado de uma etapa para a sua consequente – essa mesma passagem deve ser encarada como exergia para a etapa que a gerou (sua antecessora), mas

como uma entrada energética para a sua sucessora, como mostrado na Figura 5.2. Ao final de todas as entradas energética, perdas entrópicas e passagens úteis exergéticas, chega-se à exergia final, desejada para o processo estudado: a energia elétrica gerada com a cogeração dada pela queima da biomassa de microalgas.

À luz desse entendimento termodinâmico necessário, a Figura 5.3 esquematiza os principais fluxos de entrada (energia), saída (entropia) e de passagem de uma etapa a outra (exergia) do amplo processo estudado:

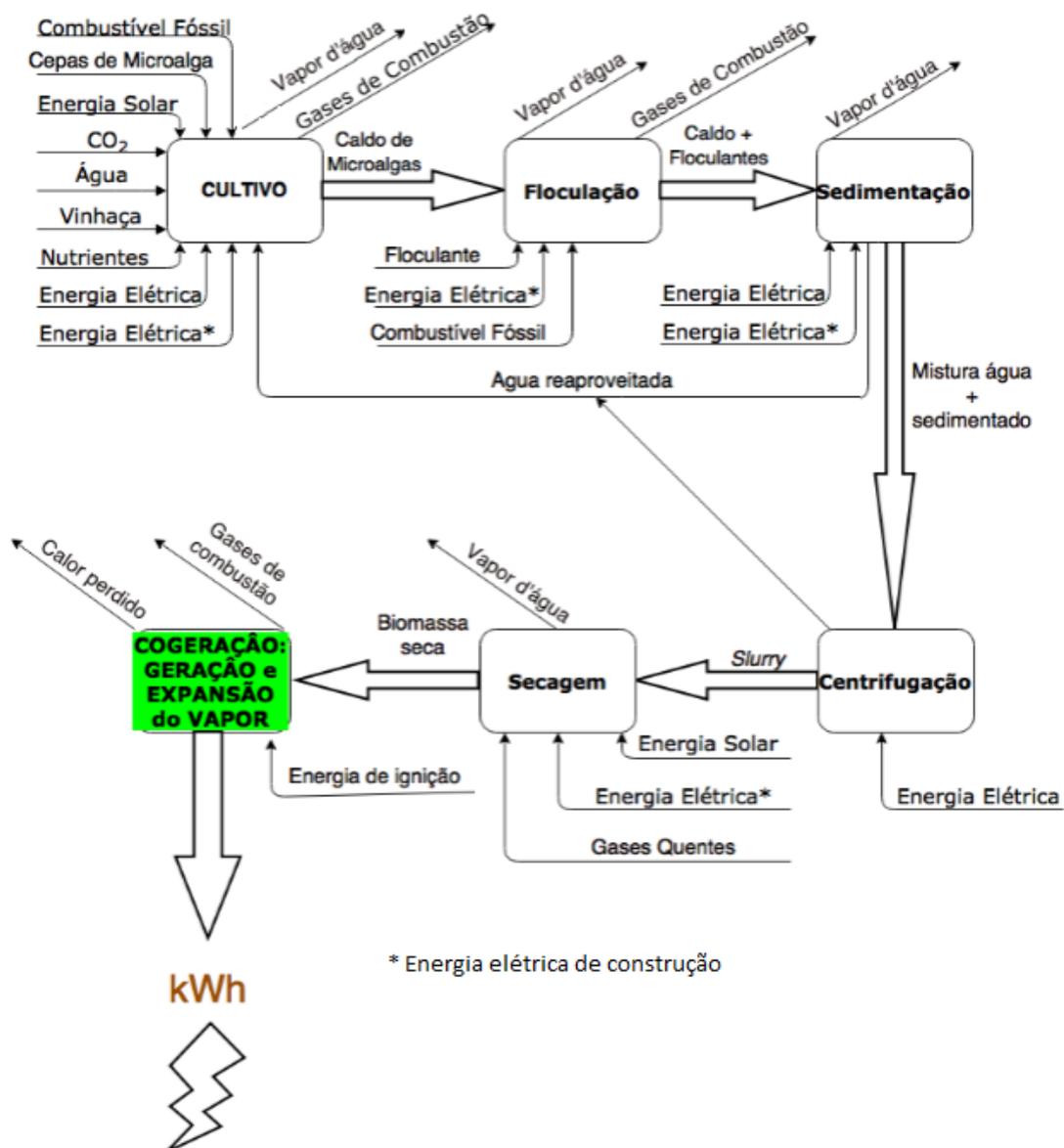


Figura 5.3. Fluxos de Entrada e Saída Energética para o Processo Global de Cogeração por meio da Queima da Biomassa de Microalgas

A Figura 5.3 ilustra os principais fluxos energéticos para a caracterização do sistema, de acordo com todas as entradas e saídas que carregam alguma energia, seja de forma térmica ou na forma de ligações e potenciais químicos. Nesse sentido, a Tabela 5.3 apresenta os principais dados exergéticos a serem considerados para a análise efetuada, sendo apresentadas todas as variáveis dispostas na Figura 5.3, com suas devidas explicações e dados numéricos calculados ou encontrados na literatura. Preliminarmente, entretanto, a Tabela 5.2 mostra as decisões de projeto mais relevantes para os cálculos efetuados:

Tabela 5.2. Parâmetros para a Avaliação do Sistema

Variável	Decisão
Tamanho dos Tanques <i>Raceway</i>	10,00m (Largura) x 100,00m (Comprimento) x 0,35m (Profundidade)
Quantidade de Tanques <i>Raceway</i>	10 Tanques, Totalizando 1 Hectare e 3500 m <sup>3</sup> de Cultivo
Dias de Produção	10 Dias
Porcentagem de Água/Vinhaça no Meio de Cultivo	62,5% de Água e 37,5% de Vinhaça, de acordo com a Figura 2.17
Tamanho do Tanque de Floculação/Sedimentação	10,00m (Largura) x 100,00m (Comprimento) x 3,50m (Profundidade)
Quantidade de Tanques de Sedimentação	1 Tanque

Tabela 5.3. Dados Exergéticos para o Amplo Processo Estudado

<b>CULTIVO</b>		
<b>ENTRADAS</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Combustível Fóssil	Utilizado para eventuais transportes necessários, especialmente com veículos automotores. Tal combustível apresenta uma exergia química associada.	10 LDiesel/haCultivo (Sudhakar et al., 2012) * 1 ha (decisão de projeto) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) * 0,832 kgDiesel/LDiesel (Sudhakar et al., 2012) * 44,8 MJ/kgDiesel (Sudhakar et al., 2012) = <b>0,008 MJ/kg</b>
Cepas de Microalga	As microalgas utilizadas também já possuem uma exergia química prévia ao cultivo, a depender de sua composição química.	[55% Proteína (Griffiths et al., 2008) * 19,228 kJ/gProteína <sup>[48]</sup> + 20% Carboidrato * 17,556 kJ/gCarboidrato + 20% Lipídio * 39,292 kJ/gGordura + 5% * 4,18 kJ/gÁgua] / 12 gBiomassa

		<p>Seca/gBiomassa inicial (taxa de crescimento de 12 vezes, considerando o cultivo durante 10 dias, de acordo com Griffiths et al., 2008) =</p> <p><b>1,846 MJ/kg</b></p>
Energia Solar	<p>A energia solar incidente (irradiada) é a principal fonte energética para o crescimento fotossintético das microalgas, de modo que também deve ser considerada na análise exergetica.</p>	<p>20 MJ/m<sup>2</sup>-dia (Atlas Solarimétrico) * 1 ha (decisão de projeto) * 10 dias (decisão de projeto) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m<sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) =</p> <p><b>44,174 MJ/kg</b></p>
CO <sub>2</sub>	<p>O CO<sub>2</sub> absorvido no cultivo também apresenta uma exergia química prévia, da própria ligação intra e intermolecular (já se considera um fluxo líquido entre o CO<sub>2</sub> total injetado e o CO<sub>2</sub> desprendido do cultivo, de modo que, aqui, tem-se aquele realmente absorvido pelas microalgas).</p>	<p>62% (Correção para Consumo Mixotrófico, Kumar et al., 2013) * 1,83 kgCO<sub>2</sub>/kg biomassa seca (Chisti, 2008) * 19,48 kJ/mol (Exergia Química Padrão, MIT <sup>[47]</sup>) * 44 gCO<sub>2</sub>/molCO<sub>2</sub> (Massa Molecular) =</p> <p><b>0,502 MJ/kg</b></p>
Água	<p>Neste quesito, inserem-se a energia elétrica necessária ao tratamento da água e a própria exergia química da molécula H<sub>2</sub>O.</p>	<p>62,5% * (100 mComprimento_ <i>Raceway</i> (decisão de Projeto) * 10mLargura * 0,35 mProfundidade) * 10 tanques (decisão de projeto) * 0,9 kJ/mol (Exergia Química Padrão, MIT <sup>[47]</sup>) * 18gH<sub>2</sub>O/molH<sub>2</sub>O (Massa Molecular)) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m<sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) =</p> <p><b>2,416 MJ/kg</b></p>
Vinhaça	<p>A vinhaça também possui uma exergia química associada – neste quesito, não foi considerada a energia térmica da vinhaça (que é notadamente retirada do destilo à uma temperatura muito elevada), já que se considerou que a exposição ao ambiente se deu em tempo suficiente para o equilíbrio térmico.</p>	<p>37,5% (Ramirez, 2013) * (100 mComprimento_ <i>Raceway</i> (decisão de Projeto) * 10mLargura * 0,35 mProfundidade) * 10 tanques (decisão de projeto) * 435,6 kJ/kgVinhaça (Pina, 2014) * 1,143 kgvinhaça/Lvinhaça (Camargo et al., 2009) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m<sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) =</p> <p><b>14,434 MJ/kg</b></p>

Nutrientes	Os nutrientes utilizados também apresentam uma exergia química associada.	0,624 MJ/kg (Cálculos realizados no software <i>MO Excel</i> com base nos nutrientes necessários à algacultura descritos vastamente na literatura, vide Jorquera et al., 2010)  (Caso Não Houvesse Vinhaça)  0,624 MJ/kg * 62,5% (Ramirez, 2013) = <b>0,390 MJ/kg</b>  (Já Que Há Vinhaça, a qual Também Supre Nutrientes)  (MIT <sup>[47]</sup> )
Energia Elétrica	Trata-se do consumo energético direto de todo o sistema de cultivo, necessário, principalmente, para a movimentação das rodas de pá do tanque <i>raceway</i> .	<b>0,225 MJ/kg</b>  (Jorquera et al., 2010)
Energia Elétrica*	Trata-se da energia elétrica necessária para a construção dos tanques <i>raceway</i> – todos os materiais necessários também são convertidos para um gasto energético direto.	
<b>SAÍDAS</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Radiação Solar Incidente Perdida	Trata-se das componentes de reflexão, PAR não absorvido, energia não utilizada, excesso de energia fotônica, energia (glicose) consumida para a respiração (Beal, 2012)	93% de Eficiência Fotossintética das Microalgas (Scott et al., 2010 e (Beal et al., 2012)) * 34,014 MJ/kg (Exergia Solar Irradiada Total) =  <b>41,082 MJ/kg</b>
Gases de Combustão	Trata-se da exergia (química e térmica) dos gases liberados quando da combustão do combustível fóssil referido.	(1 – 37%) ("Ineficiência" do Motor Diesel (Carvalho, 2011) * 0,093 MJ/kg (Exergia do Combustível Fóssil) =  <b>0,056 MJ/kg</b>
Vapor d'Água	Trata-se da quantidade de água evaporada do meio de cultivo, que é aberto ao ambiente (altamente susceptível à evaporação).	583,33 kgH <sub>2</sub> O_Evap./dia (Rogers et al., 2014) * 9,5 kJ/mol (Exergia Química Padrão, MIT <sup>[47]</sup> ) * 18 gH <sub>2</sub> O/molH <sub>2</sub> O (Massa Molecular) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo

		(decisão de projeto) = <b>0,068 MJ/kg</b>
O <sub>2</sub>	Trata-se do oxigênio liberado em função da própria realização da fotossíntese.	3,97 kJ/mol (Exergia Química Padrão, MIT <sup>[47]</sup> ) * 32 gO <sub>2</sub> /molO <sub>2</sub> (Massa Molecular) * 10 gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ·min (Chisti, 2008) * 3.500 m <sup>3</sup> (decisão de projeto) * 10 dias * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) = <b>1,381 MJ/kg</b>

### Passagem Cultivo – Floculação

Da etapa do cultivo para essa etapa de pré-colheita, passa o caldo de microalgas, ou seja, uma mistura aparentemente homogênea entre o meio de cultivo e as microalgas (um líquido notadamente de coloração esverdeada, como aquele muito comum em PBR fechados). A exergia associada a essa etapa é toda aquela associada às entradas do processo de cultivo subtraída de todas as suas saídas. Para a floculação, é considerada a existência de tanques de floculação rigorosamente iguais, em termos de área superficial, aos tanques *raceway* para o cultivo. Por outro lado, eles apresentam uma profundidade bastante mais elevada, o que diminui os gastos construtivos e aumenta a própria eficiência da etapa (haverá maior profundidade para ocorrer a floculação-sedimentação).

## FLOCULAÇÃO

### ENTRADAS

VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Floculante	Tal composto químico apresenta uma exergia química associada.	0,150 gNaOH/LCultivo (Ferriols et al., 2012) * 74,9 kJ/mol (Exergia Química Padrão, MIT <sup>[47]</sup> ) * 40 gNaOH/molNaOH (Massa Molecular) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) = <b>0,022 MJ/kg</b>
Energia Elétrica*	Trata-se da energia elétrica necessária para a construção dos tanques de floculação – todos os materiais necessários também são convertidos para um gasto energético direto.	<b>0,325 MJ/kg</b> (Jorquera et al., 2010)
Combustível Fóssil	Utilizado para eventuais transportes necessários, especialmente com veículos automotores. Tal combustível apresenta uma exergia química associada.	10 LDiesel/haCultivo (Sudhakar et al., 2012) 1 ha (decisão de projeto) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) * 0,832 kgDiesel/LDiesel (Sudhakar et al., 2012) * 44,8

		MJ/kg Diesel (Sudhakar et al., 2012) = <b>0,008 MJ/kg</b>
<b>SAÍDAS</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Gases de Combustão	Trata-se da exergia (química e térmica) dos gases liberados quando da combustão do combustível fóssil referido.	(1 – 37%) ("Ineficiência" do Motor Diesel (Carvalho, 2011) * 0,093 MJ/kg (Exergia do Combustível Fóssil) = <b>0,056 MJ/kg</b>
Vapor d'Água	Trata-se da quantidade de água evaporada do meio de cultivo associado aos flocculantes, que é aberto ao ambiente (altamente susceptível à evaporação).	583,33 kgH <sub>2</sub> O_Evap./dia (Rogers et al., 2014) * 9,5 kJ/mol (Exergia Química Padrão, MIT <sup>[47]</sup> ) * 18 gH <sub>2</sub> O/molH <sub>2</sub> O (Massa Molecular) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) = <b>0,068 MJ/kg</b>

### **Passagem Flocculação – Sedimentação**

Como se trata de uma divisão meramente didática para o processo amplo de cogeração, o fluxo entre os processos é do mesmo caldo microalgal anterior associado aos flocculantes, à exceção das novas perdas empreendidas.

Considera-se que o tanque de flocculação-sedimentação tenha as dimensões de 100m X 10m X 3,5m, ou seja, é dez vezes maior do que cada *raceway*. Para facilitar a análise, considera-se que sejam 10 *raceways*, de modo que apenas um tanque de flocculação-sedimentação seja necessário. Além disso, considera-se que o tempo de operação das bombas, para retirar água do tanque maior e enviar ao *raceway*, seja de 5 horas.

### **SEDIMENTAÇÃO**

#### **ENTRADAS**

VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Energia Elétrica	Trata-se do consumo energético direto para o funcionamento das bombas associadas (i) ao sistema de sedimentação, que promoverão o fluxo da água de reutilização para a etapa de cultivo e (ii) ao bombeamento da vinhaça para as piscinas de vinhoto existentes na usina Jalles Machado.	10 hp (Curva de Bombas) * 10 Dias * 5 horas/dia * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 10m * 100m * 0,35m * 10 tanques = <b>0,028 MJ/kg</b>
Energia Elétrica*	Trata-se da energia elétrica necessária para a construção dos tanques de sedimentação (que é o mesmo tanque do que o de flocculação) – todos os materiais necessários também são convertidos para um gasto energético	Já Considerado no Cálculo da Energia Elétrica* Utilizada na Etapa de Flocculação

	direto.	
Filtração da Vinhaça a Ser Descartada no Campo	Trata-se da energia demandada para filtrar a mistura água-vinhaça, de modo a separar a vinhaça da água, para que aquela seja destinada ao campo (com fins de fertirrigação).	<b>0,104 MJ/kg</b> (Sander et al., 2010)
<b>SAÍDAS</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Vapor d'Água	Trata-se da quantidade de água evaporada dos tanques de sedimentação, que são abertos ao ambiente (susceptíveis à evaporação).	Já Considerado no Cálculo do Vapor D'Água Perdido na Etapa de Flocculação
Água de Reaproveitamento ao Cultivo	Com a sedimentação, ocorre a nítida separação entre o aglomerado sedimentado de microalgas e a suspensão (quase cristalina) de água e floculantes. Essa água é, então, retirada do tanque de sedimentação, sendo bombeada para as estações de tratamento associadas à etapa de cultivo, de modo a diminuir o gasto de H <sub>2</sub> O no amplo processo estudado.	Volume de Água Reaproveitado = Tudo o Que Entrou – o Que Evaporou – o Que Sobra para a Centrifugação = 21.875 L – 1.175 L – 175 L (Glissen et al., 2013) = 20.525 L  Exergia Água de Entrada – Exergia Água Evaporada – Exergia Água que Permanece para a Centrifugação = <b>0,677 MJ/kg</b>
Vinhaça Tratada Destinada à Fertirrigação	Trata-se da vinhaça retirada do tanque de sedimentação, a qual será destinada aos campos de fertirrigação. De acordo com Ramirez (2013), o DBO e o DQO da vinhaça são reduzidos em, aproximadamente, 91,2% para situação de cultivo de microalga bastante semelhante à estudada neste Projeto.	37,5% (Ramirez, 2013) * (100 mComprimento_Raceway (decisão de Projeto) * 10mLargura * 0,35 mProfundidade) * 10 tanques (decisão de projeto) * 8,8% (Ramirez, 2013) * 435,6 kJ/kgVinhaça (Pina, 2014) * 1,143 kgvinhaça/Lvinhaça (Camargo et al., 2009) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) = <b>1,270 MJ/kg</b>
<b><u>Passagem Sedimentação – Centrifugação</u></b>		
A passagem inclui uma mistura heterogênea entre o aglomerado de microalgas (sedimentado) e uma pequena quantidade de água, que será retirada nas centrífugas.		
<b><u>CENTRIFUGAÇÃO</u></b>		
<b>ENTRADAS</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Energia Elétrica	Trata-se do consumo energético direto para o funcionamento das centrífugas,	<b>0,205 MJ/kg</b> (Sander et al., 2010)

	que são altamente intensivas energeticamente, e das bombas.	
<b>SAÍDAS</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Água de Reaproveitamento ao Cultivo	Com a centrifugação, ocorre o maior desprendimento de água da pasta de microalgas ( <i>slurry</i> ), sendo que essa quantidade pode ser novamente bombeada e enviada para as estações de tratamento associadas à etapa de cultivo, de modo a diminuir o gasto de H <sub>2</sub> O no amplo processo estudado.	80% (Eficiência de Retirada de Água (Dufour et al., 2012) * 175 L =  <b>0,001 MJ/kg</b>
<b><u>Passagem Centrifugação – Secagem</u></b>		
A passagem se refere a uma pasta úmida de microalgas ( <i>slurry</i> ), a qual deve ser secada para, posteriormente, ser utilizada com fins de cogeração de eletricidade.		
<b><u>SECAGEM</u></b>		
<b>ENTRADAS</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Energia Solar	Trata-se da radiação solar incidente capaz de retirar a umidade do <i>slurry</i> , deixando a biomassa seca e passível de utilização nas caldeiras e turbinas.	<b>0,001 MJ/kg</b>  (Weyer et al., 2010)
Gases Quentes	Os gases quentes provenientes da combustão carregam uma exergia térmica, a qual será utilizada para a secagem da biomassa.	Exergia da Água Evaporada – Exergia Solar – Irreversibilidades (Estimadas em 10%, de acordo com os Calores Específicos e Latentes da Biomassa (Oliveira, 2013) e da Água) =  <b>0,010 MJ/kg</b>
Energia Elétrica*	Trata-se da energia elétrica necessária para a construção das estruturas que possibilitarão a secagem pelos mecanismos solar e de passagem de gases quentes de combustão.	<b>0,113 MJ/kg</b>  (Estimativa de acordo com os outros dados para a mesma variável, sendo esta menor em virtude de a estrutura para a secagem ser bem mais diminuta do que todas as outras, já que o volume de biomassa a ser seca é bem menor)
<b>SAÍDAS</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Vapor d'Água	Trata-se da quantidade de água evaporada do <i>slurry</i> de microalgas, em função da própria retirada de umidade	20% (Dufour et al., 2012) * 175 kgH <sub>2</sub> O_Evap./10 dias (Rogers et al., 2014) * 9,5 kJ/mol (Exergia Química Padrão, MIT <sup>[47]</sup> ) * 18 gH <sub>2</sub> O/molH <sub>2</sub> O

	associada à secagem. Considera-se uma área de secagem de 100m <sup>2</sup> .	(Massa Molecular) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) * 10 dias = <b>0,004 MJ/kg</b>
--	---	--

### Passagem Secagem – Cogeração

Essa passagem envolve, enfim, o objetivo do trabalho – a biomassa seca a ser queimada nas caldeiras para fins de cogeração em turbinas a vapor.

Essa etapa não entra no escopo da análise exergética, servindo como mero comparativo.

## COGERAÇÃO

### ENTRADAS

VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Energia de Ignição da Caldeira	Além da óbvia entrada da própria biomassa seca, é necessário o uso de eletrodos de ignição para o acionamento da caldeira. Quanto à possível energia elétrica para a construção da calderaria e das turbinas, ela não se faz necessária, já que o intuito é a utilização da estrutura prévia da própria usina Jalles Machado	<b>0,001 MJ/kg</b> (Praticamente desprezível em função dos dados de funcionamento para os eletrodos de ignição <sup>[49]</sup> ).

### SAÍDAS

VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Gases de Combustão	Trata-se da exergia (química e térmica) dos gases liberados quando da combustão da própria biomassa microalgal.	Poder Calorífico – Energia Gerada
Calor Perdido	A caldeira possui uma eficiência intrínseca, liberando parte da energia máxima possível em forma de calor perdido para o ambiente.	<b>7,865 MJ/kg</b>
<b>Energia Elétrica Gerada na Cogeração</b>	<b>Trata-se do objetivo final de todo este Projeto.</b>	Poder Calorífico Inferior da Biomassa Seca de <i>Chlorella vulgaris</i> : 18,660 MJ/kg (Khanna et al., 2013)  89% ("Eficiência" da Caldeira (Vilela, 2013)) * 65% ("Eficiência" do Grupo Turbogenerador (Vilela, 2013)) * 18,660 MJ/kg = <b>10,795 MJ/kg</b>  Para uma Produção de 45,276 ton de

		Biomassa Seca (Produção com a Vinhaça) = 135.765 kWh Para uma Produção de 58,800 ton de Biomassa Seca (Produção sem a Vinhaça) = 176.318 kWh
--	--	---

De modo mais sintético, a Tabela 5.4 apresenta todas as variáveis termodinâmicas relevantes para cada etapa:

Tabela 5.4. Energia, Entropia e Exergia de Cada Etapa

PARÂMETRO	COM VINHAÇA	SEM VINHAÇA
<b>CULTIVO</b>		
Entradas Energéticas [MJ/kg]	63,995 (100,00%)	40,501 (100,00%)
Saídas Entrópicas [MJ/kg]	42,587 (66,55%)	32,836 (81,07%)
Passagens Exergéticas [MJ/kg]	21,408 (33,45%)	7,665 (18,93%)
<b>FLOCULAÇÃO</b>		
Entradas Energéticas [MJ/kg]	21,763 (100,00%)	8,013 (100,00%)
Saídas Entrópicas [MJ/kg]	0,124 (0,57%)	0,140 (1,75%)
Passagens Exergéticas [MJ/kg]	21,639 (99,43%)	7,873 (98,25%)
<b>SEDIMENTAÇÃO</b>		
Entradas Energéticas [MJ/kg]	21,779 (100,00%)	7,901 (100,00%)
Saídas Entrópicas [MJ/kg]	1,947 (8,94%)	1,083 (13,71%)
Passagens Exergéticas [MJ/kg]	19,832 (91,06%)	6,818 (86,29%)
<b>CENTRIFUGAÇÃO</b>		
Entradas Energéticas [MJ/kg]	20,037 (100,00%)	7,023 (100,00%)
Saídas Entrópicas [MJ/kg]	0,001 (0,01%)	0,002 (0,03%)
Passagens Exergéticas [MJ/kg]	20,036 (99,99%)	7,021 (99,97%)
<b>SECAGEM</b>		
Entradas Energéticas [MJ/kg]	20,160 (100,00%)	7,145 (100,00%)
Saídas Entrópicas [MJ/kg]	0,004 (0,02%)	0,005 (0,07%)
Passagens Exergéticas [MJ/kg]	20,156 (99,98%)	7,140 (99,93%)

PROCESSO GLOBAL		
<b>Entradas Energéticas [MJ/kg]</b>	<b>64,819 (100,00%)</b>	<b>41,206 (100,00%)</b>
<b>Saídas Entrópicas [MJ/kg]</b>	<b>44,663 (68,90%)</b>	<b>34,066 (82,67%)</b>
<b>Exergia Final Gerada para a Biomassa de Microalgas [MJ/kg]</b>	<b>20,156 (31,10%)</b>	<b>7,140 (17,33%)</b>

Pela Tabela 5.4, percebe-se que a eficiência exergética da geração de biomassa seca de microalgas para fins de cogeração é de 31,10% quando o meio de cultivo apresenta 37,5% de vinhaça e de 17,33% quando não se utiliza vinhaça para a composição do meio de cultivo (100% de água tratada e limpa). Tal diferença se deve à própria biorremediação realizada pelas microalgas quando o meio apresenta vinhaça (DBO e DQO altos), na medida em que o vinhoto apresenta uma exergia química bastante elevada. De modo mais esquemático, a Figura 5.4 mostra as perdas entrópicas percentuais de cada etapa

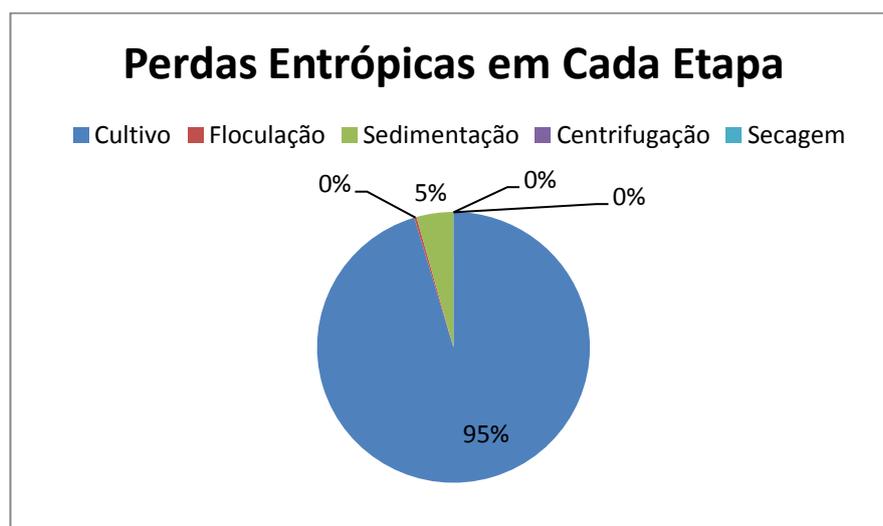


Figura 5.4. Perdas Entrópicas em Cada Etapa

Quanto à etapa de cultivo, a grande parcela de perda entrópica diz respeito à radiação solar não absorvida para fins energéticos pela microalga. Ademais, para fins de melhor compreensão do ciclo termodinâmico do amplo processo, a Figura 5.5 ilustra seu diagrama de fluxos de Sankey:

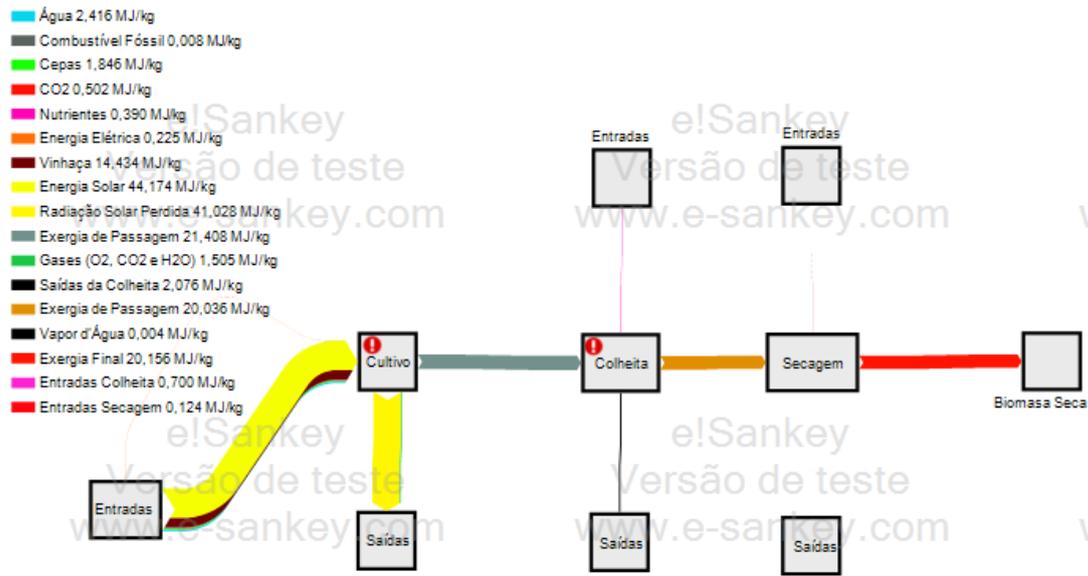


Figura 5.5. Diagrama de Fluxos de Sankey para o Processo de Produção da Biomassa Seca de Microalgas (Software e!Sankey)

### 5.3. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (AMBIENTAL) – LCA

Quanto à análise ambiental, semelhantemente à análise exergética, a Figura 5.6 esquematiza os principais fluxos de descargas e de absorção/não emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera:

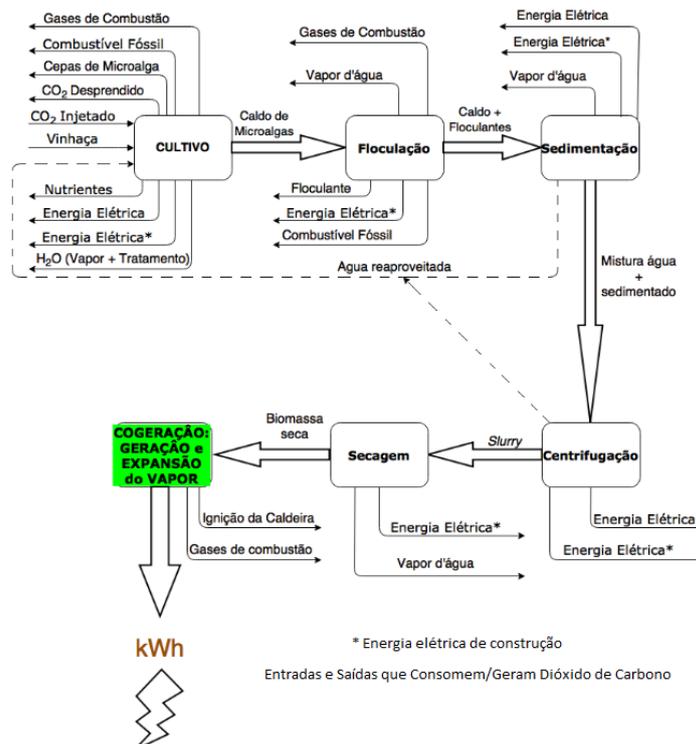


Figura 5.6. Fluxos de Descargas e de Absorção/Não Emissão de CO<sub>2</sub> em Relação à Atmosfera

A Figura 5.6 ilustra os principais fluxos de CO<sub>2</sub> para a caracterização do sistema, de acordo com todos os processos que, direta ou indiretamente, diminuem ou aumentam a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera. Nesse sentido, a Tabela 5.5 apresenta os principais dados ambientais a serem considerados para a análise efetuada, sendo apresentadas todas as variáveis dispostas na Figura 5.5, com suas devidas explicações e dados numéricos calculados ou encontrados na literatura:

Tabela 5.5. Dados Ambientais para o Amplo Processo Estudado

<b>CULTIVO</b>		
<b>DESCARGAS DE CO<sub>2</sub> PARA ATMOSFERA</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Combustível Fóssil	A obtenção do combustível fóssil gera emissões de CO <sub>2</sub> à atmosfera. Tal custo de obtenção é levado em consideração como gás emitido durante o cultivo.	130 kg de CO <sub>2</sub> /Tonelada de Óleo Produzida <sup>[51]</sup> * 10 litros/ha (Sudhakar et al., 2012) * 1 ha (decisão de projeto) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) * 0,832 kg de diesel/litro de diesel (Sudhakar et al., 2012) =  <b>0,023 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
Gases de combustão	CO <sub>2</sub> emitido devido à queima, propriamente dita, do combustível fóssil- transformação de energia química em térmica.	10 LDiesel/haCultivo (Sudhakar et al., 2012) * 1 ha (decisão de projeto) * 2,8 kgCO <sub>2</sub> /Ldiesel <sup>[52]</sup> * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) =  <b>0,618 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
Cepas de Microalga	Emissões de CO <sub>2</sub> no processo de obtenção das cepas de microalgas.	Trata-se de um valor <b>negligenciável</b> e de difícil acesso na literatura, razões por que foi desconsiderado nesta análise.
CO <sub>2</sub> desprendido	Nem toda a quantidade de CO <sub>2</sub> injetado é absorvida pelas microalgas, desta forma, há desprendimento de uma quantidade de volta à atmosfera.	Considera-se o CO <sub>2</sub> líquido, absorvido pela microalga, que seria CO <sub>2</sub> injetado – CO <sub>2</sub> desprendido.
Tratamento de Água	Neste quesito, inserem-se as emissões de CO <sub>2</sub> para atmosfera devido à utilização, principalmente, de energia elétrica necessária	5,09 gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> água <sup>[53]</sup> * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) * 62,5% (Ramirez, 2013) * 77% de

	ao tratamento da água.	Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) = <b>0,245 gCO<sub>2</sub>/kg biomassa</b>
Vapor d'Água	Há evaporação de água dos tanques <i>raceways</i> . Entretanto, esse vapor d'água é negligenciado em termos de impacto ambiental porque não persiste na atmosfera por mais do que poucos dias <sup>[54]</sup> .	<b>- gCO<sub>2</sub>/kg biomassa</b>
Nutrientes	Há também emissões de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) associadas à produção dos nutrientes. É convencionalizado então que há emissão do gás quando na utilização dos nutrientes.	2,16 gCO <sub>2</sub> /kg de biomassa (Kadam, 2002) * 0,625 (quantidade utilizada de nutriente, dado que a proporção de vinhaça é de 37,5%) = <b>1,350 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
Energia Elétrica	Trata-se das emissões de CO <sub>2</sub> associadas à transformação de outras formas de energia em energia elétrica que é consumida diretamente em todo o sistema de cultivo, necessária principalmente, para a movimentação das rodas de pá do tanque <i>raceway</i> .	0,087 kgCO <sub>2</sub> /kWh <sup>[55]</sup> * 0,225 MJ/kg (Dado de Exergia para as Variáveis) =
Energia Elétrica*	Trata-se das emissões de CO <sub>2</sub> associadas à transformação de outras formas de energia em energia elétrica utilizada para a construção dos tanques <i>raceway</i> – todos os materiais necessários também são convertidos para um gasto energético direto e como consequência emissões de dióxido de carbono.	<b>5,438 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
<b>CO<sub>2</sub> NÃO EMITIDO OU RETIRADO DA ATMOSFERA</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Vinhaça	A vinhaça, mesmo quando utilizada nas lavouras, gera uma quantidade de CO <sub>2</sub> emitida à atmosfera. As microalgas, entretanto, também não são capazes de evitar essa emissão à atmosfera, de modo que a vinhaça, em uma análise mais profunda, não representa um ganho de não emissão ou absorção de CO <sub>2</sub> de modo direto (há uma redução indireta de DBO e DQO).	<b>- gCO<sub>2</sub>/kg biomassa</b>
CO <sub>2</sub> injetado	O CO <sub>2</sub> que é injetado para o desenvolvimento das microalgas. Está sendo injetado no volume de controle, logo, é convencionalizado que está sendo retirado da atmosfera.	Trata-se do CO <sub>2</sub> líquido, estimado em:  62% (Correção para Consumo Mixotrófico, Kumar et al., 2013) * 1.830,000 gCO <sub>2</sub> /kg de biomassa

		(Chisti, 2008) = <b>1.134,600 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
<b><u>Passagem Cultivo – Flocculação</u></b>		
Da etapa do cultivo para essa etapa de pré-colheita, passa o caldo de microalgas, ou seja, uma mistura aparentemente homogênea entre o meio de cultivo e as microalgas (um líquido notadamente de coloração esverdeada, como aquele muito comum em PBR fechados). A exergia associada a essa etapa é toda aquela associada às entradas do processo de cultivo subtraída de todas as suas saídas.		
<b><u>FLOCULAÇÃO</u></b>		
<b>DESCARGAS DE CO<sub>2</sub> PARA ATMOSFERA</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Floculante	Há emissões de CO <sub>2</sub> associadas à obtenção de tal composto químico	0,150 gNaOH/LCultivo (Ferriols et al., 2012) * 0,6329 kgCO <sub>2</sub> / kg de NaOH <sup>[57]</sup> * 3500 m <sup>3</sup> de cultivo (Decisão de Projeto) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) = <b>7,339 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
Energia Elétrica*	Trata-se das emissões de CO <sub>2</sub> associadas à transformação de outras formas de energia em energia elétrica utilizada para a construção dos tanques de flocculação – todos os materiais necessários também são convertidos para um gasto energético direto e como consequência emissões de dióxido de carbono.	Vide cálculo de energia elétrica para a etapa do cultivo: <b>7,855 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
Combustível Fóssil	A obtenção do combustível fóssil gera emissões de CO <sub>2</sub> à atmosfera. Tal custo de obtenção é levado em consideração como gás emitido durante a flocculação.	130 kg de CO <sub>2</sub> /Tonelada de Óleo Produzida <sup>[51]</sup> * 10 litros/ha (Sudhakar et al., 2012) * 1 ha (decisão de projeto) * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012) * 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) * 0,832 kg de diesel/litro de diesel (Sudhakar et al., 2012) = <b>0,023 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
Gases de combustão	CO <sub>2</sub> emitido devido à queima, propriamente dita, do combustível fóssil- transformação de energia química em térmica.	10 LDiesel/haCultivo (Sudhakar et al., 2012) * 1 ha (decisão de projeto) * 2,8 kgCO <sub>2</sub> /Ldiesel <sup>[52]</sup> * 77% de Produtividade (Figura 2.17) * 16,8 gBiomassa Seca/LCultivo (Beal et al., 2012)

		* 3.500 m <sup>3</sup> de Cultivo (decisão de projeto) = <b>0,618 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
Vapor d'Água	Há evaporação de água dos tanques de floculação. Entretanto, esse vapor d'água é negligenciado em termos de impacto ambiental porque não persiste na atmosfera por mais do que poucos dias <sup>[54]</sup> .	<b>- gCO<sub>2</sub>/kg biomassa</b>

### **Passagem Floculação – Sedimentação**

Como se trata de uma divisão meramente didática para o processo amplo de cogeração, o fluxo entre os processos é do mesmo caldo microalgal anterior associado aos floculantes, à exceção das novas perdas empreendidas.

## **SEDIMENTAÇÃO**

### **DESCARGAS DE CO<sub>2</sub> PARA ATMOSFERA**

VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Energia Elétrica	Trata-se das emissões de CO <sub>2</sub> associadas à transformação de outras formas de energia em energia elétrica que é consumida diretamente em todo o sistema de sedimentação, necessária, principalmente, para o funcionamento das bombas associadas ao sistema de sedimentação, que promoverão o fluxo da água de reutilização para a etapa de cultivo.	Vide cálculo de energia elétrica para a etapa do cultivo:
Energia Elétrica*	Trata-se das emissões de CO <sub>2</sub> associadas à transformação de outras formas de energia em energia elétrica que é necessária para a construção dos tanques de sedimentação – todos os materiais necessários também são convertidos para um gasto energético direto e como consequência emissões de dióxido de carbono.	<b>0,677 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
Água vapor	Há evaporação de água dos tanques de sedimentação (mesmos do que o de floculação). Entretanto, esse vapor d'água é negligenciado em termos de impacto ambiental porque não persiste na atmosfera por mais do que poucos dias <sup>[54]</sup> .	<b>- gCO<sub>2</sub>/kg biomassa</b>

### **Passagem Sedimentação – Centrifugação**

A passagem inclui uma mistura heterogênea entre o aglomerado de microalgas (sedimentado) e uma pequena quantidade de água, que será retirada nas centrífugas.

## **CENTRIFUGAÇÃO**

### **DESCARGAS DE CO<sub>2</sub> PARA ATMOSFERA**

VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Energia Elétrica	Trata-se das emissões de CO <sub>2</sub> associadas à transformação de outras formas de energia em energia elétrica que é consumida diretamente para o funcionamento das centrífugas, que são altamente intensivas energeticamente, e das bombas.	Vide cálculo de energia elétrica para a etapa do cultivo: <b>4,955 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
Energia Elétrica*	Trata-se das emissões de CO <sub>2</sub> associadas à transformação de outras formas de energia em energia elétrica que é necessária para a construção dos tanques de centrifugação – todos os materiais necessários também são convertidos para um gasto energético direto e como consequência emissões de dióxido de carbono.	

### Passagem Centrifugação – Secagem

A passagem se refere a uma pasta úmida de microalgas (*slurry*), a qual deve ser secada para, posteriormente, ser utilizada com fins de cogeração de eletricidade.

### SECAGEM

#### DESCARGAS DE CO<sub>2</sub> PARA ATMOSFERA

VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Energia Elétrica*	Trata-se das emissões de CO <sub>2</sub> associadas à transformação de outras formas de energia em energia elétrica que é necessária para a construção das estruturas que possibilitarão a secagem pelos mecanismos solar e de passagem de gases quentes de combustão.	Vide cálculo de energia elétrica para a etapa do cultivo: <b>2,731 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
Água vapor	Há evaporação da água contida no <i>slurry</i> (pasta úmida de microalgas). Entretanto, esse vapor d'água é negligenciado em termos de impacto ambiental porque não persiste na atmosfera por mais do que poucos dias <sup>[54]</sup> .	<b>- gCO<sub>2</sub>/kg biomassa</b>

### Passagem Secagem – Cogeração

Essa passagem envolve, enfim, o objetivo do trabalho – a biomassa seca a ser queimada nas caldeiras para fins de cogeração em turbinas a vapor.

### COGERAÇÃO

#### DESCARGAS DE CO<sub>2</sub> PARA ATMOSFERA

VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
Energia de Ignição da Caldeira	Além da óbvia entrada da própria biomassa seca, é necessário o uso de eletrodos de ignição para o acionamento da caldeira, havendo então utilização de energia para ignição e como	Vide cálculo de energia elétrica para a etapa do cultivo: <b>0,024 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>

	consequência, há emissões de CO <sub>2</sub> associadas.	
Gases de Combustão	Trata-se das emissões de CO <sub>2</sub> devido à queima da própria biomassa de microalga, além do mais, também é somada a essas emissões, a geração de vapor d'água contida na biomassa e emitida durante a queima.	10,795 MJ/kg de Biomassa Seca (Energia Gerada na Queima) * 0,115 kg CO <sub>2</sub> /MJ de Energia Gerada <sup>[50]</sup> = <b>1.241,425 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>
<b>CO<sub>2</sub> NÃO EMITIDO OU RETIRADO DA ATMOSFERA</b>		
VARIÁVEL	EXPLICAÇÃO	DADO E AUTOR
<b>Energia Elétrica</b>	Trata-se, ainda, de um valor comparativo (quanto CO <sub>2</sub> seria gerado para produzir a mesma quantidade de energia com a matriz hidráulica), o qual não deve entrar no balaço de CO <sub>2</sub> .	Vide cálculo de energia elétrica para a etapa do cultivo: <b>260,903 gCO<sub>2</sub>/kg de biomassa</b>

De modo mais sintético, a Tabela 5.6 apresenta todas as variáveis termodinâmicas relevantes para cada etapa:

Tabela 5.6. Energia, Entropia e Exergia de Cada Etapa

PARÂMETRO	COM VINHAÇA	SEM VINHAÇA
<b>CULTIVO</b>		
Descargas de CO <sub>2</sub> [gCO <sub>2</sub> /kg]	7,764	8,394
Absorções/Não Emissões de CO <sub>2</sub> [gCO <sub>2</sub> /kg]	- 1.134,600	- 1.830,000
Saldo Até o Final da Etapa [gCO <sub>2</sub> /kg]	- 1.126,836	- 1.821,606
<b>FLOCULAÇÃO</b>		
Descargas de CO <sub>2</sub> [gCO <sub>2</sub> /kg]	15,835	14,000
Saldo Até o Final da Etapa [gCO <sub>2</sub> /kg]	- 1.111,001	-1.807,606
<b>SEDIMENTAÇÃO</b>		
Descargas de CO <sub>2</sub> [gCO <sub>2</sub> /kg]	0,677	0,677
Saldo Até o Final da Etapa [gCO <sub>2</sub> /kg]	- 1.110,324	- 1.806,929
<b>CENTRIFUGAÇÃO</b>		
Descargas de CO <sub>2</sub> [gCO <sub>2</sub> /kg]	4,955	4,955
Saldo Até o Final da Etapa [gCO <sub>2</sub> /kg]	- 1.105,369	- 1.801,974

<b>SECAGEM</b>		
Descargas de CO <sub>2</sub> [gCO <sub>2</sub> /kg]	2,731	2,731
Saldo Até o Final da Etapa [gCO <sub>2</sub> /kg]	- 1.102,638	- 1.799,243
<b>COGERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM A QUEIMA DA BIOMASSA</b>		
Descargas de CO <sub>2</sub> [gCO <sub>2</sub> /kg]	1.241,449	1.241,449
Saldo Até o Final da Etapa [gCO <sub>2</sub> /kg]	138,811	- 557,794
<b>PROCESSO GLOBAL</b>		
<b>Descargas de CO<sub>2</sub> [gCO<sub>2</sub>/kg]</b>	<b>1.273,411</b>	<b>1.272,206</b>
<b>Absorções/Não Emissões de CO<sub>2</sub> [gCO<sub>2</sub>/kg]</b>	<b>- 1.134,600</b>	<b>- 1.830,000</b>
<b>Saldo Total Final [gCO<sub>2</sub>/kg]</b>	<b>138,811</b>	<b>- 557,794</b>

Analisando-se os resultados obtidos na Tabela 5.6, percebe-se que a cogeração de eletricidade com base no cultivo de vinhaça em meio parcialmente composto de vinhaça gera mais CO<sub>2</sub> (primordialmente devido à etapa da queima) do que consome (primordialmente devido à absorção para o crescimento autotrófico). Em comparação ao cultivo composto apenas por água pura, em que as microalgas são cultivadas apenas de modo autotrófico (absorvem o carbono inorgânico do dióxido e o transformam em energia, por meio da fotossíntese), este apresentou resultados ambientais em termos de emissões de CO<sub>2</sub> mais interessantes. Isso acontece devido ao fato de que, utilizando-se a vinhaça, a microalga é cultivada de modo mixotrófico, ou seja, absorve parte do carbono inorgânico que seria absorvido caso o cultivo fosse em água pura e parte do carbono orgânico da vinhaça – ou seja, o cultivo em água limpa absorve mais carbono inorgânico do ambiente, o que contribui para sua aparente melhor viabilidade na comparação realizada.

Entretanto, a comparação foi feita apenas em termos de CO<sub>2</sub>, o que, na verdade, não é suficiente, já que a vinhaça apresenta um potencial danoso ao ambiente que vai além de sua emissão direta do referido gás, especialmente por apresentar DBO e DQO muito elevados – nesse sentido, a microalga é utilizada como uma fonte de biorremediação desse importante resíduo da usina Jalles Machado enquanto parte do meio sucroalcooleiro. Ademais, o cultivo em vinhaça apresenta um importante ganho econômico, já que não se gastam tantos nutrientes quanto no cultivo em água pura (meio de Guillard), além de que a pegada ecológica em termos de gasto água é bastante minorada, já que são utilizados 37,5% de vinhaça para a composição do meio (1.312,5 m<sup>3</sup> de água não utilizados).

De forma mais esquemática, a Figura 5.7 ilustra os balanços de CO<sub>2</sub> para os processos de produção da biomassa seca com e sem vinhaça (ambos apresentam valores negativos, ou seja, consomem mais dióxido do que o liberam – no gráfico, são colocados como positivos para fins de facilitar a

comparação), além da geração de dióxido de carbono quando da queima dessa biomassa seca nas caldeiras para a cogeração de eletricidade:

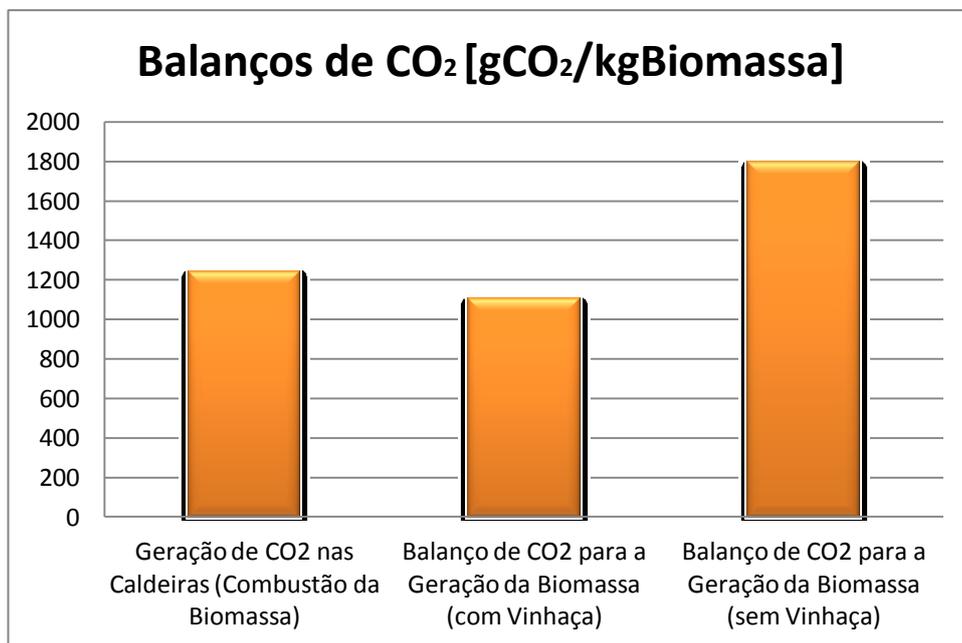


Figura 5.7. Balanços de CO<sub>2</sub> para os Processos com e sem Vinhaça e para a Combustão da Biomassa nas Caldeiras para Fins de Cogeração

## 6. CONCLUSÕES E PASSOS FUTUROS

Neste Projeto de Graduação, inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica ampla acerca da produção de biocombustível a partir do cultivo de microalgas, especialmente interessante dada a atual conjuntura de dependência de combustíveis fósseis, os quais, como é sabido, aumentam a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, além de gases de depleção da camada de ozônio, e geram uma instabilidade político-econômica em nível global.

Analisando a revisão da literatura, as microalgas representam a terceira geração de biocombustíveis, parecendo ser aquela mais promissora, especialmente no que tange à elevada produtividade específica. Assim sendo, estudaram-se as diversas configurações para o cultivo de microalgas, desde as espécies mais produtivas até a intensidade luminosa utilizada.

No decorrer da análise feita, percebeu-se que, apesar de bastante promissora, a tecnologia necessária ainda é sobremaneira custosa, de modo que sua viabilidade, em nível industrial, ainda é questionável. Dessa forma, a vinhaça, por possuir nutrientes essenciais para o crescimento das cepas, é utilizada em combinação aos meios de cultivo tradicionais, sendo uma boa opção para baratear o cultivo das cepas e para possibilitar a redução de seus potenciais DBO e DQO por meio do funcionamento das microalgas como fonte de biorremediação para o impacto proveniente da matéria orgânica altamente concentrada.

Assim sendo, resolveu-se que a melhor maneira de utilizar a biomassa das microalgas seria, após sua secagem, com sua combustão nas mesmas caldeiras onde é feita a combustão do bagaço de cana para cogeração no âmbito da usina Jalles Machado S. A., visto que os investimentos em uma biorrefinaria para beneficiamento de tal biomassa seriam demasiadamente custosos – ou seja, produz-se a biomassa seca a ser queimada, para fins de cogeração, nas caldeiras e nos grupos turbogeradores.

Decidido pela queima da biomassa, partiu-se para realização de uma análise exérgica e ambiental dos efeitos de todas as etapas do processo, incluindo: cultivo, floculação, sedimentação, centrifugação, secagem e combustão/cogeração.

Tratando-se da análise exérgica, os resultados obtidos apontaram para a viabilidade de cogeração de energia a partir da queima da biomassa, visto que houve um saldo positivo no ganho líquido de energia, além de a eficiência exérgica ter sido mais elevada (quase o dobro) quando se utilizou o meio de cultivo de Guillard modificado (37,5% de vinhaça) em detrimento do meio puro, com 100% de água tratada. Isso se deveu, principalmente, ao funcionamento da microalga como biorremediador do resíduo sucroalcooleiro, que é portador de uma grande exergia química.

Em relação ao balanço de dióxido de carbono, comparando-se o meio de cultivo tradicional ao meio de cultivo utilizando vinhaça, percebeu-se que, naquele, as absorções de CO<sub>2</sub> são maiores do que todas as emissões de todas as etapas (inclusive da queima nas caldeiras), enquanto neste as absorções

de CO<sub>2</sub> são globalmente um pouco menores do que a sua geração nas caldeiras. Esse dado poderia apontar para a inviabilidade ambiental, em termos de emissão e absorção de CO<sub>2</sub>, da utilização da vinhaça como formadora do meio de cultivo modificado. Entretanto, em uma análise mais profunda, deve-se ter em mente que a vinhaça, além de seus impactos diretamente relacionados ao carbono inorgânico, também apresenta alta carga orgânica danosa ao ambiente, a qual é consumida pelas microalgas em crescimento – após o cultivo, a vinhaça pode ser despejada diretamente nos campos, já que sofreu uma diluição e um tratamento por parte das microalgas.

Apesar das dificuldades empreendidas para a construção deste Projeto de Graduação, ele foi de suma importância para sedimentar importantes conceitos relacionados à Engenharia Mecânica, sobretudo no que tange ao aspecto de viabilidade exergética de novas tecnologias renováveis de geração de energia elétrica. Percebeu-se que, para além de um discurso superficial (quase ideológico) acerca da viabilidade de uma nova tecnologia energética, é necessária uma minuciosa e profunda análise exergética, com vistas a verificar se o processo, com fronteiras amplas devidamente escolhidas, é realmente viável do ponto de vista energético e ambiental.

Feita essa análise com base em dados colhidos da literatura e em conceitos termodinâmicos aplicáveis, sugere-se que, no futuro, tais dados possam ser conferidos experimentalmente, seja em laboratórios, seja por meio da aplicação a nível industrial da tecnologia descrita. Isso porque, apesar de terem sido estimados de modo aparentemente coerente, os efeitos da vinhaça na produção da biomassa de microalgas não são totalmente conhecidos, faltando, inclusive, alguns dados importantes para uma análise mais minuciosa. Dessa forma, acredita-se que o único modo de realmente ratificar a viabilidade exergética (energética) e ambiental do sistema proposto seja a experimentação prática de todas as escolhas descritas, construindo-se um resultado concreto e fechado em torno de um mesmo sistema.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. [https://www.repsol.com/pt\\_pt/corporacion/conocer-repsol/contexto-energetico/matriz-energetica-mundial/](https://www.repsol.com/pt_pt/corporacion/conocer-repsol/contexto-energetico/matriz-energetica-mundial/), acessado em 15/3/2015.
- [2]. <http://envolverde.com.br/noticias/emissoes-na-matriz-energetica-brasileira-cresceram-69-em-2013/>, acessado em 15/3/2015.
- [3]. [http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-9N5HUL/disserta\\_\\_o\\_vfinal\\_diasg.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-9N5HUL/disserta__o_vfinal_diasg.pdf?sequence=1), acessado em 15/3/2015.
- [4]. <http://g1.globo.com/jornal-hoje/noticia/2014/11/seca-historica-deixa-concessionarias-de-energia-eletrica-em-alerta.html>, acessado em 15/3/2015.
- [5]. <http://g1.globo.com/sao-paulo/sao-jose-do-rio-preto-aracatuba/noticia/2014/06/usina-hidreletrica-de-tres-irmaos-em-pereira-barreto-chega-nivel-0.html>, acessado em 15/3/2015.
- [6]. <http://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/2014-05-02/seca-compromete-geracao-de-energia-hidreletrica-e-ameaca-geradoras.html>, acessado em 15/3/2015.
- [7]. <http://ciencia.hsw.uol.com.br/ozonio6.htm>, acessado em 15/3/2015.
- [8]. <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>, acessado em 15/3/2015.
- [9]. <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2008/01/03/AR2008010303907.html>, acessado em 15/3/2015.
- [10]. [http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/mundo/2015/03/21/interna\\_mundo,476427/area-chinesa-conclui-primeiro-voe-comercial-movido-a-oleo-de-cozinha.shtml](http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/mundo/2015/03/21/interna_mundo,476427/area-chinesa-conclui-primeiro-voe-comercial-movido-a-oleo-de-cozinha.shtml), acessado em 21/3/2015.
- [11]. <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biocombustiveis>, acessado em 16/3/2015.
- [12]. <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf>, acessado em 16/3/2015.
- [13]. <http://www.biodieselbr.com/destaques/2007/biocombustiveis-primeira-quarta-geracao-10-03-08.htm>, acessado em 17/3/2015.
- [14]. <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/producao-de-biocombustiveis/>, acessado em 16/3/2015.
- [15]. [http://www.tetrapak.com/br/DocumentBank/Sustentabilidade/art\\_tec\\_biodiesel.pdf](http://www.tetrapak.com/br/DocumentBank/Sustentabilidade/art_tec_biodiesel.pdf), acessado em 16/3/2015.
- [16]. <http://www.epa.gov/otaq/renewablefuels/420r10006.pdf>, acessado em 16/3/2015.

- [17]. [http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/basics/jtb\\_biodiesel.pdf](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/basics/jtb_biodiesel.pdf), acessado em 16/3/2015.
- [18]. [http://reporterbrasil.org.br/documentos/o\\_brasil\\_dos\\_agrocombustiveis\\_v5.pdf](http://reporterbrasil.org.br/documentos/o_brasil_dos_agrocombustiveis_v5.pdf), acessado em 16/3/2015.
- [19]. <http://www.portaldoagronegocio.com.br/artigo/brasil-algas-e-biodiesel-uma-aposta-que-pode-gerar-riqueza>, acessado em 16/3/2015.
- [20]. [http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/programa/objetivos\\_diretrizes.html](http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/programa/objetivos_diretrizes.html), acessado em 16/3/2015.
- [21]. <http://www.estadao.com.br/noticias/geral,fonte-principal-de-biodiesel-ainda-e-a-soja,512257>, acessado em 16/3/2015.
- [22]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Microphyte>, acessado em 15/3/2015.
- [23]. <http://www.resilience.org/stories/2004-10-03/widescale-biodiesel-production-algae>, acessado em 16/3/2015.
- [24]. [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf), acessado em 17/3/2015.
- [25]. [http://whatsyourimpact.org/greenhouse-gases/carbon-dioxide-sources#footnote5\\_na7139u](http://whatsyourimpact.org/greenhouse-gases/carbon-dioxide-sources#footnote5_na7139u), acessado em 18/3/2015.
- [26]. [http://edgar.jrc.ec.europa.eu/img/part/co2\\_map\\_big.png](http://edgar.jrc.ec.europa.eu/img/part/co2_map_big.png), acessado em 17/3/2015.
- [27]. [https://www.ufpe.br/agencia/clipping/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4864:geracao-de-energia-em-pernambuco&catid=212&Itemid=228](https://www.ufpe.br/agencia/clipping/index.php?option=com_content&view=article&id=4864:geracao-de-energia-em-pernambuco&catid=212&Itemid=228), acessado em 17/3/2015.
- [28]. [http://www1.folhape.com.br/cms/opencms/folhape/pt/edicaoimpressa/arquivos/2012/Abril/14\\_04\\_2012/0022.html](http://www1.folhape.com.br/cms/opencms/folhape/pt/edicaoimpressa/arquivos/2012/Abril/14_04_2012/0022.html), acessado em 17/3/2015.
- [29]. <http://www.felsberg.com.br/novas-termeletricas-terao-de-compensar-emissoes-de-co2-com-plantio-de-arvores/>, acessado em 18/3/2015.
- [30]. <http://jornalggn.com.br/blog/luisnassif/as-usinas-termicas-e-a-emissao-de-co2>, acessado em 18/3/2015.
- [31]. [http://noticias.uol.com.br/ciencia/album/110330biopetroleo\\_album.htm#fotoNav=7](http://noticias.uol.com.br/ciencia/album/110330biopetroleo_album.htm#fotoNav=7), acessado em 17/3/2015.
- [32]. <http://www.ipam.org.br/saiba-mais/O-que-e-e-como-funciona-o-Mercado-de-Carbono-/4>, acessado em 18/3/2015.
- [33]. <http://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>, acessado em 18/3/2015.

- [34]. <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/04/entenda-como-funciona-o-mercado-de-credito-de-carbono>, acessado em 18/3/2015.
- [35]. <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/48750/1/biorrefinaria-modificado-web.pdf>, acessado em 18/3/2015.
- [36]. <http://www.revistaecoenergia.com.br/images/revistas/edicao17/pg04a06.pdf>, acessado em 18/3/2015.
- [37]. [http://www.powerplantccs.com/ccs/cap/fut/alg/algae\\_cultivation\\_systems.html](http://www.powerplantccs.com/ccs/cap/fut/alg/algae_cultivation_systems.html), acessado em 19/3/2015.
- [38]. <http://www.medicinapratica.com.br/wp-content/uploads/2012/11/clorela.jpg>, acessado em 19/3/2015.
- [39]. [http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB/Images/prokaryotes/Oscillatoriaceae/Spirulina\\_2c.jpg](http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB/Images/prokaryotes/Oscillatoriaceae/Spirulina_2c.jpg), acessado em 19/3/2015.
- [40]. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/08/CSIRO\\_ScienceImage\\_7595\\_Dunaliella.jpg/220px-CSIRO\\_ScienceImage\\_7595\\_Dunaliella.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/08/CSIRO_ScienceImage_7595_Dunaliella.jpg/220px-CSIRO_ScienceImage_7595_Dunaliella.jpg), acessado em 19/3/2015.
- [41]. <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/18209981/Descubre-como-funciona-el-biodiesel-hecho-de-algas.html>, acessado em 21/3/2015.
- [42]. [http://api.ning.com/files/IafMIWLIDtxzRyGNULG4k1ndJVAQ3Qcvf1s99TYa3-A6wP\\*hJ-RMBF570C9FXW61\\*e-YUpMt6Dcho7qkKtGIUUyp2gJdGXh2/Fotossintese.jpg](http://api.ning.com/files/IafMIWLIDtxzRyGNULG4k1ndJVAQ3Qcvf1s99TYa3-A6wP*hJ-RMBF570C9FXW61*e-YUpMt6Dcho7qkKtGIUUyp2gJdGXh2/Fotossintese.jpg), acessado em 18/3/2015.
- [43]. [http://img.weiku.com/waterpicture/2011/10/29/3/DZSF\\_High\\_Screening\\_Efficiency\\_Vibrating\\_Sieve\\_Equipment\\_For\\_Coal\\_Separation\\_634566822397199014\\_10.jpg](http://img.weiku.com/waterpicture/2011/10/29/3/DZSF_High_Screening_Efficiency_Vibrating_Sieve_Equipment_For_Coal_Separation_634566822397199014_10.jpg), acessado em 8/4/2015.
- [44]. [http://www.open.edu/openlearnworks/pluginfile.php/61436/mod\\_page/content/1/t210\\_1\\_021i.jpg](http://www.open.edu/openlearnworks/pluginfile.php/61436/mod_page/content/1/t210_1_021i.jpg), acessado em 8/4/2015.
- [45]. <http://www.manutencaoessuprimentos.com.br/conteudo/5203-processo-de-floculacao-na-industria-de-meio-ambiente/>, acessado em 8/4/2015.
- [46]. <https://www.youtube.com/watch?v=O7Yn0hmItzg>, acessado em 2/11/2015.
- [47]. <http://web.mit.edu/2.813/www/readings/APPENDIX.pdf>, acessado em 10/11/2015.
- [48]. [http://sites.unisantabr/teiadossaber/apostila/biologia/Valor\\_Energetico\\_do\\_Alimento\\_Aula%20teia-teoria3010.pdf](http://sites.unisantabr/teiadossaber/apostila/biologia/Valor_Energetico_do_Alimento_Aula%20teia-teoria3010.pdf), acessado em 10/11/2015.
- [49]. <http://www.totalautomacao.com.br/arquivos/200/original/624.pdf>, acessado em 12/11/2015.
- [50]. [http://www.advancesincleanerproduction.net/fourth/files/sessoes/5B/4/medeiros\\_et\\_al\\_presentation\\_02.pdf](http://www.advancesincleanerproduction.net/fourth/files/sessoes/5B/4/medeiros_et_al_presentation_02.pdf), acessado em 14/11/2015.

- [51]. [http://www.ssb.no/en/forskning/discussion-papers/\\_attachment/225118?\\_ts=14de17b6918](http://www.ssb.no/en/forskning/discussion-papers/_attachment/225118?_ts=14de17b6918), acessado em 14/11/2015.
- [52]. [http://www.cbcs.org.br/sbcs10/website/userFiles/palestras\\_sbcs\\_10/emissao\\_co2\\_vj.pdf](http://www.cbcs.org.br/sbcs10/website/userFiles/palestras_sbcs_10/emissao_co2_vj.pdf), acessado em 14/11/2015.
- [53]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24145013>, acessado em 14/11/2015.
- [54]. <http://climatechangeconnection.org/emissions/co2-equivalents/>, acessado em 14/11/2015.
- [55]. <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/sroc/Tables/t0305.pdf>, acessado em 14/11/2015.
- [56]. <http://www.usp.br/agen/?p=56142>, acessado em 14/11/2015.
- [57]. [http://umexpert.um.edu.my/file/publication/00003157\\_100509.pdf](http://umexpert.um.edu.my/file/publication/00003157_100509.pdf), acessado em 14/11/2015.
- [58]. Aikins, G. P., Nadim, A., El-Halwagi, M. M., Mahalec, V., 2010. Design and analysis of biodiesel production from algae grown through carbon sequestration. Springer Inc.
- [59]. Assmann, R., Soccol, C. R., Dalmas Neto, C. J., Sydney, E. B., Coraucci Neto, D., 2013. Production of Biofuels from Algal Biomass by Fast Pyrolysis. *Biofuels from Algae* (pp. 143-153). Elsevier Inc.
- [60]. Beal, C. M., Hebner, R. E., Webber, M. E., 2012. *Thermodynamic analysis of algal biocrude production*. Elsevier Inc.
- [61]. Brennan, L., Owende, P., 2010. Biofuels from microalgae: a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Ren. Sustain. Energy Rev.* 14, 557–577.
- [62]. Camargo, A. J., Pereira, N., Cabello, R. P., Teram, C. J. F., 2009. Viabilidade da aplicação do método respirométrico de *bartha* para a análise da atividade microbiana de solos sob aplicação de vinhaça. Unesp. Espírito Santo do Pinhal.
- [63]. Carvalho, M. A. S., 2011. Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis. Universidade Federal da Bahia, 2011.
- [64]. Carvalho, V. C. da H. A. de, 2014. Avaliação da implantação de fazenda de algas produtoras de biocombustível em uma usina de etanol. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.
- [65]. Çengel, Y. A., Boles, M. A., 2007. Termodinâmica. Quinta Edição. Mc Graw Hill.
- [66]. Chen, C.Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., Chang, J. S., 2010. *Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. Bioresource Technology* 102, 2011.

- [67]. Chisti, Y., 2008. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends Biotechnol.* 26, 126–131.
- [68]. Collet, P., Spinelli, D., Lardon, L., Hélias, A., Steyer, J. P., Bernard, O., 2011. Life-Cycle Assessment of Microalgal-Based Biofuels. *Biofuels from Algae* (pp. 287-312). Elsevier Inc.
- [69]. Connelly L, Koshland CP. 2001a. Exergy and industrial ecology. Part 1: An exergy-based definition of consumption and a thermodynamic interpretation of ecosystem evolution. *Exergy, An International Journal* 1:146–165.
- [70]. Connelly L, Koshland CP. 2001b. Exergy and industrial ecology. Part 2: A non-dimensional analysis of means to reduce resource depletion. *Exergy, An International Journal* 1:234–255.
- [71]. Cornelissen RL. 1997. *Thermodynamics and Sustainable Development*. Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands.
- [72]. Costa, J. A. V., & Morais, M. G. de., 2013. An Open Pond System for Microalgal Cultivation. *Biofuels from Algae* (pp. 1-22). Elsevier Inc.
- [73]. Dincer I, Rosen MA. 1999b. Energy, environment and sustainable development. *Applied Energy* 64(1–4):427–440.
- [74]. Dincer I, RosenMA.1999a. The intimate connection between exergy and the environment. *Proceeding of Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems* 221–230, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.
- [75]. Dincer I. 2000. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 4(2):157–175.
- [76]. Dincer I., Rosen M.A., 2007 Exergy.. energy, environment and sustainable development.
- [77]. Dufour, J., Moreno, J., Rodríguez, R., 2012. *Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae oil: effect of algae species and cultivation system*. Univerdiad Rey Juan Carlos, Spain.
- [78]. Ehimen, E.A., Sun, Z. F., Carrington, C. G., 2009. *Variables affecting the in-situ transesterification of microalgae lipids*. *Fuel* 89, 2010.
- [79]. Embraer, 2011. Seminário Combustíveis Alternativos para a Aviação. Organização Brasileira para o Desenvolvimento da Certificação Aeronáutica, 2011.
- [80]. Fang, S. C., 2013. Metabolic Engineering and Molecular Biotechnology of Microalgae for Fuel Production. *Biofuels from Algae* (pp. 47-65). Elsevier Inc.
- [81]. Ferriols, V. M. E. N., Aguilar, R. O., 2012. *Efficiency of various flocculants in harvesting the green microalgae Tetraselmis tetrahele*. AACL Bioflux.
- [82]. Glissen, L., Salim, S., Rinzema, A., Vermue, M. H., Wiiffels, R. H., 2013. *Modeling microalgal flocculation and sedimentation*. Elsevier Inc.

- [83]. Griffiths, M. J., Harrison, S. T. L., 2008. *Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production*. Springer Inc.
- [84]. Grima, E. M., Ación, F. G., Fernández, J. M., 2013. Economics of Microalgae Biomass Production. *Biofuels from Algae* (pp. 313-325). Elsevier Inc.
- [85]. Guedes, A. C., Amaro, H. M., Pinto, I. S., Malcata, F. X., 2013. Applications of Spent Biomass. *Biofuels from Algae* (pp. 205-233). Elsevier Inc.
- [86]. Halim, R., Gladman, B., Danquah, M. K., Webley, P. A., 2010. *Oil extraction from microalgae for biodiesel production*. *Bioresource Technology* 102, 2011.
- [87]. Holanda, L. R., Ramos, F. S., Medeiros, E. R. C., Santos, J. D., 2011. O cultivo de microalgas para geração de eletricidade. VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2011.
- [88]. International Energy Agency. CO2 Emissions from Fuel Combustion 2012. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2012.
- [89]. IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.). IGES, Kanagawa, Japan.
- [90]. Jiang, L., Luò, S., Fan, X., Yang, Z., Guo, R., 2011. *Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO2*. *Applied Energy*, 88.
- [91]. Johnson, M.B., Wen, Z., 2010. *Development of an attached microalgal growth system for biofuel production*. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2010.
- [92]. Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E. A., Embiruçu, M., Ghirardi, M. L., 2010. *Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors*. Elsevier.
- [93]. Junior S. O., 2013. Exergy- Production, Cost and Renewability, 2013.
- [94]. Kadam, K., 2002. Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring. *Energy* 27, 905–922.
- [95]. Kestin J. 1980. Availability: the concept and associated terminology. *Energy-The International Journal* 5:679–692.
- [96]. Khanna, V, Zaimes, G. G., 2013. *Microalgal biomass production pathways: evaluation of life cycle environmental impacts*. BioMed Central – The Open Access Publisher.
- [97]. Kumar, M., Sharma, M. P., Dwivedi, G., 2013. *Algae oil as future energy source in Indian perspective*. International Journal of Renewable Energy Research.
- [98]. Lam, K. M., Lee, K. T., 2013. Scale-Up and Commercialization of Algal Cultivation and Biofuel Production. *Biofuels from Algae* (pp. 261-286). Elsevier Inc.

- [99]. Liang, Y., Sarkany, N., Cui, Y., 2009. Biomass and lipid productivities of *Chlorella vulgaris* under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions. Springer Inc.
- [100]. Liaw B., Quinn J., Willson B., Bradley T., 2010. Net Energy and Greenhouse Gas Emission Evaluation of Biodiesel Derived from Microalgae.
- [101]. Lundin M, Bengtsson A. M, Molander S. 2000. Life cycle assessment of wastewater systems: influence of system boundaries and scale on calculated environmental loads. *Environmental Science Technology* 34:180–186.
- [102]. Marques, S. S. I., 2012. Microalgas como matéria-prima para geração de biocombustíveis: uso da vinhaça como alternativa de redução de custos e contribuição à sustentabilidade. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia, Instituto de Ciências da Saúde, 2014.
- [103]. Mohan, S. V., Devi, M. P., Subhash, G. V., Chandra, R., 2013. Algae Oils as Fuels. *Biofuels from Algae* (pp. 155-187). Elsevier Inc.
- [104]. National Alliance for Advanced Biofuels and Bio-products – NAAB –, Final Report.
- [105]. OECD. 1996. *Pollution Prevention and Control: Environmental Criteria for Sustainable Transport*. Organisation for Economic Co-operation and Development Report No: 96–136.
- [106]. Oliveira, T. L., 2013. Análise energética e exergetica de biomassas como fonte energética em um forno elétrico a arco. Dissertação de Mestrado, UFOP.
- [107]. Pandey, A., Lee, D. J., Chisti, Y., Soccol, C. R., 2014. Biofuels from Algae. Elsevier Inc.
- [108]. Pina, E. A., 2014. Cálculo das exergias da cana-de-açúcar, etanol anidro e vinhaça para aplicação na análise exergetica de sistemas de sistemas de cogeração na indústria sucroalcooleira. UFABC.
- [109]. Ramirez, N. N. V., 2013. Estudo do crescimento da microalga *Scenedesmus sp.* em vinhaça. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química, 2013.
- [110]. Rogers, J. N., Rosenberg, J. N., Guzman, B. J., Oh, V. H., Mimbela, L. E., Ghassemi, A., 2014. *A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales*. Elsevier Inc.
- [111]. Sander, K., Murthy, G.S., 2010. Life cycle analysis of algae biodiesel. *Intl. J. LCA* 15, 704–714.
- [112]. Sathish, A., Sims, R. C., 2012. *Biodiesel from mixed culture algae via a wet lipid extraction procedure*. *Bioresource Technology* 118, 2012.
- [113]. Scott, S. A., Davey, M. P., Dennis, J. S., Horst, I., Howe, C. J., Smith, D. J. L., Smith, A. G., 2010. *Biodiesel from algae: challenges and prospects*. Elsevier Inc.

- [114]. Sciubba E. 2001. Beyond thermoeconomics? The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. *Exergy-An International Journal* 1(2):68–84.
- [115]. Show, K. Y., Lee, D. J., 2013. Algal Biomass Harvesting. *Biofuels from Algae* (pp. 85-110). Elsevier Inc.
- [116]. Silva, M. M., Silva, J. L. G., 2012. *Ethanol from sugarcane: analysis from Brazil case*. Kungliga Teniska Högskolan, Stockholm.
- [117]. Soccol, C. R., Novak, A. C., Carvalho, J. C. de, Sydney, E. B., 2013. Respiriometric Balance and Carbon Fixation of Industrially Important Algae. *Biofuels from Algae* (pp. 67-84). Elsevier Inc.
- [118]. Soulliere, K. 2014. *Developing a life cycle analysis framework for the microalgae biodiesel industry*, 2014. *Electronic Thesis and Dissertations. Paper 5067*.
- [119]. Sudhakar K., Premalatha M., Sudhanshan K., 2012. Energy Balance and Exergy Analysis of Large Scale Algal Biomass Production.
- [120]. Sun, Z., Chen, F., Liu, J., 2013. Heterotrophic Production of Algal Oils. *Biofuels from Algae* (pp. 111-142). Elsevier Inc.
- [121]. Tangsubkul N, Waite TD, Schäfer AI, Lundie S. 2002. *Applications of Life Cycle Assessment in Evaluating the Sustainability of Wastewater Recycling Systems*, Research Report. The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- [122]. Tribus M, McIrvine EC. 1971. Energy and information. *Sci. American* 225(3):179–188.
- [123]. Vieira, T. de Q., 2013. Uso de resíduos líquidos no cultivo da microalga *Chlorella sp* com potencial para produção de biocombustíveis. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual da Paraíba, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013.
- [124]. Vilela, F. S. V., 2013. Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar. Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM-184A/2013, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107 p.
- [125]. Wang, B., Lan, C., Horsman, M., 2012. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnol. Adv.* 30, 904–912.
- [126]. Weyer, K.A., Bush, D.R., Darzins, A., Wilson, B.D., 2010. Theoretical maximum algal oil production. *Bioenerg. Res.* 3, 204–213.
- [127]. Yen, H. W., Hu, I. C., Chen, C. Y., Chang, J. S., 2013. Design of Photobioreactors for Algal Cultivation. *Biofuels from Algae* (pp. 23-45). Elsevier Inc.

## 8. APÊNDICE

### 8.1. BALANÇO RESPIROMÉTRICO E FIXAÇÃO DE CARBONO DE ALGAS INDUSTRIALMENTE IMPORTANTES

Fang (2013) divide as alternativas de redução de gases de efeito estufa (GEE) em três grupos: conservação (reduzir o consumo de eletricidade e, conseqüentemente, reduzir as emissões de GEE); redução direta (captura e remoção de CO<sub>2</sub> emitido por fontes específicas); redução indireta (ações de compensação em que os produtores de GEE suportam a sua redução). Nesse mesmo sentido, podem-se dividir as tecnologias para remoção em longo prazo de CO<sub>2</sub> e demais GEE em duas grandes categorias: aquelas baseadas em reações químicas artificialmente desenvolvidas e aquelas baseadas na própria mitigação biológica. Com mera dedução lógica, vê-se que os métodos químicos artificiais são muito caros, sendo pouco rentáveis, mesmo quando se considera a economia em créditos de carbono. Assim, desponta como processo mais viável economicamente a própria utilização da natureza, com a mitigação biológica – e, nesse escopo, surgem as microalgas, como importantes microrganismos fotossintéticos (Fang, 2013).

Os dois parâmetros mais importantes para o cultivo de microalgas, de acordo com Soccol et al. (2013), são a eficiência na utilização da luz e a disponibilidade de CO<sub>2</sub> dissolvido. Nesse mesmo sentido, apesar de a algacultura, como já discutido, ser bastante onerosa, ela pode se tornar particularmente viável economicamente quando se considera a utilização de resíduos industriais ou domésticos (para reduzir o próprio custo da cultura) e os créditos de carbono gerados pelo sequestro de GEE realizado pela microalga.

#### 8.1.1. FOTOSSÍNTESE

Como tacitamente conhecida, a fotossíntese é um processo físico-químico que ocorre a nível celular, sendo realizado exclusivamente pelos seres vivos que apresentem cloroplastos, compostos pelo pigmento clorofila, o qual provê a coloração esverdeada característica de plantas e algas, os principais seres fotossintetizantes. A fotossíntese é descrita, em brevíssimas palavras, como a conversão de energia proveniente da radiação solar em energia química, por meio de uma reação de oxirredução. A tradicional reação ocorrida é a seguinte:

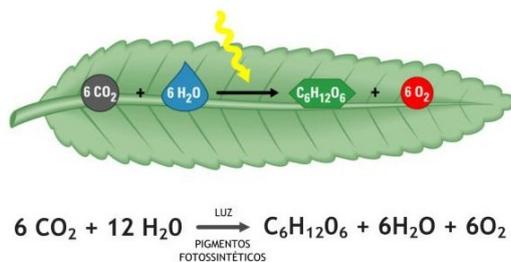


Figura 8.1. Reação Tradicional da Fotossíntese

A fotossíntese é tradicionalmente dividida em dois estágios: as reações de claro e de escuro. As primeiras acontecem na grana e requerem a energia direta da luz para produzir as moléculas transportadoras de energia que serão usadas no segundo estágio, o qual ocorre no estroma dos cloroplastos, em que os produtos do primeiro estágio são utilizados para formar ligações covalentes C-C dos carboidratos. Nas reações de escuro, o dióxido de carbono da atmosfera/ambiente aquático é capturado e reduzido por meio da adição de hidrogênio, com vistas a formar carboidratos.

Entretanto, caso se avalie o produto energético principal produzido pela fotossíntese, vê-se que se trata da glicose, a qual é um monossacarídeo, um carboidrato. Em princípio, isso não parece ser um problema, já que também é uma forma de energia química. Não obstante, como já exaustivamente afirmado, as microalgas, diferentemente das macroalgas, não produzem carboidratos como produtos finais energéticos (estes seriam interessantes para a produção de bioálcool), mas, sim, lipídios, essenciais para a produção do biodiesel. Essa sutil diferença faz que o mero ciclo de fotossíntese no cloroplasto não seja suficiente para o emprego de microalgas como fonte de biocombustível naturalmente produzido. Dessa forma, deve existir alguma reação adicional, capaz de converter os produtos da fotossíntese nos lipídios desejados.

Essa reação pode ocorrer de um modo natural, ou pode ser feita externamente, por meio da reação de transesterificação (que não é o foco no momento). Naquele modo, as microalgas realizam as operações esquematicamente apresentadas na Figura 8.2

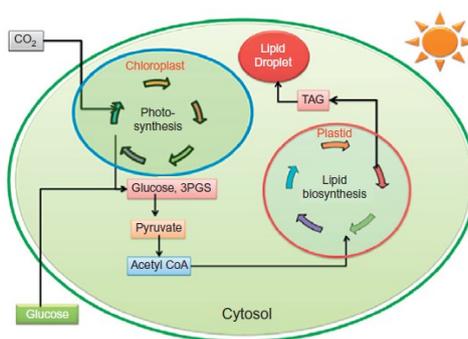


Figura 8.2. Localização dos Variados Componentes do Caminho de Biossíntese Lipídica em Células de Algas

Baseando-se na homologia da sequência, bem como em algumas características bioquímicas compartilhadas, entre algas e plantas, de parte de genes e enzimas isoladas envolvidas no metabolismo lipídico, geralmente se acredita que o caminho básico dos ácidos graxos e a biossíntese do triacilglicerol (TAG) nas algas são diretamente análogos àqueles existentes nas plantas maiores. Então, a nova síntese de ácidos graxos em algas ocorre, primariamente, nos tilacoides e na região do estroma do cloroplasto. A alga fixa CO<sub>2</sub> (fixação de carbono) durante o dia, por meio da fotofosforilação (no tilacoide) e produz carboidrato durante o ciclo de Calvin (no estroma), o qual se converte em variados produtos, incluindo TAGs, dependendo da espécie da alga e de condições específicas do citoplasma e do plastídeo. As microalgas são proficientes em sobreviver e atuar em condições fototróficas (representada na Figura 8.2) ou heterotróficas. De modo resumido, o processo de biossíntese lipídica nas algas ocorre em quatro etapas: acumulação de carboidratos dentro da célula; formação de acetil-CoA e de malonil-CoA; síntese do ácido palmítico; síntese de ácidos graxos maiores por meio da elongação da cadeia. Na Figura 8.2, o gás carbônico é consumido pelo cloroplasto, juntamente com água e a radiação solar, formando, por meio do processo de fotossíntese, a glicose, a qual é responsável pela formação do piruvato, que se transforma na acetil-CoA. Esta, por sua vez, é absorvida pelo plastídeo, o qual é responsável pelo processo da biossíntese lipídica, produzindo o TAG, o qual é responsável por criar gotículas de óleo (lipídio) na estrutura celular da alga (Soccol et al., 2013).

### 8.1.2. FIXAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO PELAS MICROALGAS

Um importante problema na maioria dos PBRs, e a primeira etapa para a fixação do CO<sub>2</sub>, é a difusão deste de sua fase gasosa para a fase aquosa. A solubilidade do dióxido de carbono no meio de cultura depende da profundidade da lagoa, da velocidade de mistura, da produtividade do sistema, da alcalinidade, da própria saída de gases e, de modo mais específico, do tempo de contato entre o gás e o líquido e da área para esse contato (fatores-chave para o aumento da transferência de massa) (Soccol et al., 2013). Em média, apenas 13-20% do CO<sub>2</sub> injetado é absorvido em *raceways* quando o gás é utilizado como fonte de carbono.

Como já discutido, as microalgas podem fixar dióxido de carbono de diversas fontes, incluindo CO<sub>2</sub> atmosférico, de gases de exaustão (os quais apresentam pouco mais de 15% de gás carbônico, configurando uma fonte rica e barata de carbono para o crescimento das microalgas), carbonatos solúveis (Soccol et al., 2013). A capacidade para armazenagem de dióxido de carbono no meio de crescimento é de suma importância porque determina a quantidade de CO<sub>2</sub> que pode ser utilizada até a saturação do meio, levando a uma alta taxa de crescimento, tornando o processo mais rentável

economicamente. Como o gás reage com a água, produzindo ácido carbônico e os seus ânions, o equilíbrio químico terá um impacto significativo na quantidade de dióxido de carbono armazenado. O pH é o fator determinante para as concentrações relativas do sistema carbonáceo na água e afeta a disponibilidade de carbono para a fotossíntese das algas em culturas intensivas. Nesse sentido, a disponibilidade de dióxido de carbono é um fator de suma relevância: caso haja excesso, haverá um aumento do desprendimento de íons formadores de ácido carbônico, o que levará a uma redução do pH e uma consequente inibição do crescimento; por outro lado, caso haja insuficiência no abastecimento do gás, as algas consumirão aquele presente nos bicarbonatos, o que levará a um aumento do pH da algacultura, que também causa uma inibição de crescimento.

Para se conhecer o potencial de fixação de CO<sub>2</sub> das microalgas, torna-se interessante a determinação das taxas globais de sequestro por meio do balanço de massa do gás nas fases líquida ou gasosa do sistema. Segundo Soccol et al. (2013), foi encontrado que números entre 70% e 88% de dióxido de carbono consumido foram utilizados na produção de biomassa no interior da microalga, o que sugere que, para explorar o potencial completo da capacidade de mitigação das microalgas (considerando as possíveis negociações no mercado de carbono), o balanço de carbono deve ser feito por meio de um complexo balanço na fase gasosa (apesar de ser meio difícil fazer tal análise em PBRs abertos).

A configuração do biorreator tem uma importante influência no consumo de gás carbônico durante o crescimento da alga. Por outro lado, o parâmetro mais importante a ser considerado para o desenvolvimento e a utilização de um tipo específico é a difusão luminosa. A produtividade de culturas fotoautotróficas é primariamente limitada pelo suprimento de luz, sofrendo de baixas eficiências de conversão energética causadas pela distribuição heterogênea de luz dentro dos tanques (Soccol et al., 2013). A própria condição natural de maior incidência luminosa na superfície, se majorada de forma não controlada, pode causar uma fotoinibição, diminuindo a eficiência de conversão da energia luminosa em biomassa, que é o interesse econômico. Além disso, essa overdose de excitação luminosa pode levar à produção de espécies tóxicas e a eventuais danos à fotossíntese (Soccol et al., 2013). Nesse sentido, para se minimizarem as influências negativas da heterogeneidade de distribuição de energia luminosa, geralmente se utiliza a estratégia da redução da profundidade dos tanques, o que gera uma redução do volume e um aumento da área comparativa, maximizando a difusão luminosa e a concentração de células de microalgas. Assim, a profundidade normalmente utilizada para PBRs abertos é em torno de 10-30 cm, enquanto o diâmetro para reatores tubulares é de 1-5cm e a espessura de placas planas é de 2-5cm (Soccol et al., 2013).

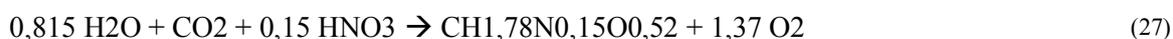
Outro aspecto bastante importante da algacultura diz respeito ao processo de mistura, que é relevante para otimizar a taxa de fotossíntese e a solubilidade de gás no meio. Nesse sentido, a mistura é significativa para uma distribuição homogênea das células, dos metabólitos, além de proporcionar uma transferência de calor e de gases mais homogênea na interface líquido-gás. Esse sistema de

misturador normalmente é baseado em rodas de pás (nos *raceways*) ou no próprio sistema de borbulhamento de gás, nos tanques fechados.

### 8.1.3. MERCADO DE CARBONO PARA TECNOLOGIAS EM MICROALGAS

O mercado mundial de carbono é baseado em um sistema "cap-and-trade" (*cap* representa o limite legal que certa economia pode emitir anualmente de determinada substância química; *trade* representa a verdadeira troca de limites). De acordo com Soccol et al. (2013), são constituídos abonos, por meio da compra ou da destinação, aos emissores cobertos pelo *cap*. Esses emissores são obrigados a apresentar licenças de emissão equivalentes ao montante de gases de efeito estufa emitidos durante um período pré-determinado. A diferença entre as emissões esperadas e aquelas aceitas no *cap* cria um preço para os subsídios (abonos). Os emissores que conseguirem reduzir as emissões para valores abaixo do preço do subsídio, fã-lo-ão. Se, no entanto, os custos abatidos forem maiores do que o preço de abono, faz sentido comprar maior quantidade de abono. Essa transferência de licenças de emissão configura a parte do *trade* (o próprio comércio no mercado de carbono). O preço é regulado pela dificuldade de abatimento de emissões ou pela própria escassez de subsídios. Na teoria, aqueles que conseguem reduzir emissões de modo mais barato, farão desse modo, alcançando a redução no menor custo possível. Por essa razão, o autor diz que o mercado de carbono parece ser uma alternativa temporária enquanto tecnologias mais limpas são desenvolvidas e melhoras são feitas nas poluidoras já existentes. De acordo com previsões apontadas pelo autor, em 2020 o mercado de carbono será responsável pela movimentação de 2 a 3 trilhões de dólares anuais.

Apenas para que se tenha uma ideia quantitativa, de acordo com estudos feitos na Universidade Federal do Paraná (Soccol et al., 2013), a equação de balanço de massa para a geração de biocombustível por meio da microalga é semelhante à seguinte:



De acordo com o autor, a composição da biomassa é dada pelo composto  $\text{CH}_{1,78}\text{N}_{0,15}\text{O}_{0,52}$ , o que implica um consumo de 1,8 g de  $\text{CO}_2$  para cada grama de biomassa seca produzida durante o crescimento da microalga. Desse modo, para a produção de 1 crédito de carbono (1 tonelada a menos de emissão do dióxido de carbono), uma área menor do que 1.000 metros quadrados é necessária (considerando-se uma concentração de biomassa de 3g/L na cultura e um tanque de 20 cm de profundidade). Dessa forma, vê-se que, quando se consideram as vantagens oferecidas pelo mercado de carbono, a produção de biomassa de microalgas para a geração de energia elétrica é bastante vantajosa, sobretudo na óptica de impacto ambiental (e, com o mercado referido, há uma melhora na comparação de viabilidade econômica em relação a outras culturas também sustentáveis).

## 8.2. PRODUÇÃO HETEROTRÓFICA DE ÓLEO DE ALGAS

Atualmente, o procedimento mais comum para a produção em massa de microalgas é a cultura autotrófica de crescimento em tanques abertos, em que as condições são idênticas às ambientais. Os mecanismos mais comuns para o cultivo da *Chlorella* (gênero normalmente utilizado para a produção de biocombustível) são os tanques circulares com grande agitador rotativo central (de diâmetros entre 30 e 50 metros) e os *raceways* (Sun et al., 2013). Como alternativa para os problemas de controle de importantes parâmetros de cultivo, surgiu a produção em PBRs fechados, especialmente em placas planas e em tubos com distintas configurações geométricas, mas sempre com a grande desvantagem de elevar bastante os custos para a produção. Nesse sentido, devido a características significativas, como o rápido crescimento, a densidade celular muito elevada e a elevada produtividade de óleo, a produção heterotrófica de óleo de algas vem recebendo significativo interesse para o aumento de escala da produção, com vistas à possibilidade de comercialização.

Como já explicado, a heterotrofia indica o fato de a microalga utilizar carbono orgânico como a única fonte de energia e de carbono para a reprodução na ausência de luz, enquanto a mixotrofia indica que a microalga cresce, na presença de luz, por meio da utilização de CO<sub>2</sub> (fotossíntese) e de fontes orgânicas de carbono. Os microrganismos em comento são capazes de utilizar uma ampla variedade de fontes de carbono orgânico, como açúcares (a glicose como o mais comum), carboidratos hidrolisados, melação residual, acetato e glicerol, bem como, é claro, carbonos orgânicos presentes em águas residuais (Sun et al., 2013).

Em comparação ao crescimento fotoautotrófico, o heterotrófico oferece vantagens substanciais, como a eliminação do requerimento de luz, a facilidade de controle da monocultura, a alta densidade celular (de cinco a nove vezes maior do que aquela conseguida em sistemas fotoautotróficos) e a grande produtividade de biomassa (três vezes maior do que a quantidade produzida em sistemas fotoautotróficos) (Sun et al., 2013). O mais interessante é que esses números expressivos ainda podem ser bastante majorados, já que ainda podem ser aplicadas técnicas utilizadas na fermentação de bactérias ou leveduras, como a reciclagem das células, a ideia do quimiostato e a alimentação em lotes (em estudos experimentais com essa técnica, a densidade celular do sistema heterotrófico foi até 50 vezes superior àquela conseguida em tanques abertos ou PBRs para o cultivo fotoautotrófico) (Sun et al., 2013). Apesar de os dados serem questionáveis quanto à variabilidade, a Figura 8.3 ilustra que a tendência central é que a produção heterotrófica realmente seja bem mais atraente do que a fotoautotrófica:

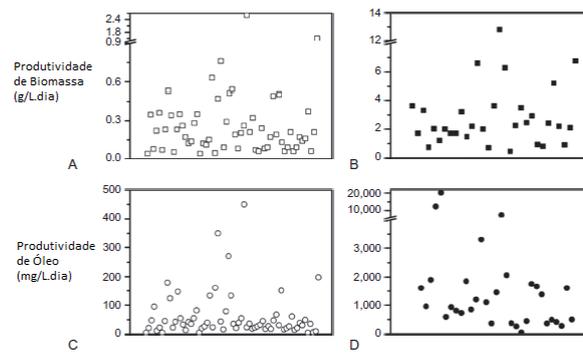


Figura 8.3. Produtividade de Biomassa e de Óleo para as Culturas Fotoautotróficas (esq.) e Heterotróficas (dir.) (Sun et al., 2013)

Em culturas fotoautotróficas, como já discutido, para induzir a formação e acumulação de lipídios dentro das células, submetem-se as microalgas a estresses, como alta intensidade luminosa e falta de nitrogênio, o que pode ser bastante desfavorável ao crescimento da alga e à produção de biomassa, levando ao paradoxo entre crescimento e síntese lipídica. Por outro lado, as algas heterotróficas são capazes de acumular óleo ao mesmo tempo em que geram o crescimento de biomassa. O óleo acumulado contém principalmente lipídios neutros, em particular os triacilgliceróis (TAG), o qual é bastante interessante para a produção de biodiesel, em virtude de sua alta concentração de ácidos graxos. Esse crescimento rápido, associado à abundância de óleos, explica a alta produtividade volumétrica de óleo das algas heterotróficas (Sun et al., 2013).

Devido à eliminação das demandas luminosas e ao avanço da tecnologia em sistemas fermentativos, o aumento de escala das culturas heterotróficas para maior densidade celular (e produtividade de óleo) é mais facilmente atingível do que em culturas autotróficas. Entretanto, a produção de culturas heterotróficas é restrita devido, sobretudo: ao número limitado de espécies heterotróficas disponíveis (o que pode ser resolvido por meio de mutação genética de algas fotoautotróficas ou por meio da melhoria da procura biológica por novas espécies); a possibilidade de contaminação por bactérias ou fungos (demanda-se uma boa esterilização e uma operação asséptica); a inibição de crescimento por substratos orgânicos solúveis (como o açúcar) em altas concentrações; o custo relativamente alto das fontes orgânicas de carbono (isso faz a produção de biodiesel de microalgas heterotróficas ser ainda menos vantajosa economicamente do que aquela a partir de microrganismos fotoautotróficos) (Sun et al., 2013).

O crescimento heterotrófico das algas requer carbonos orgânicos, água e sais inorgânicos. O crescimento, o conteúdo lipídico e a composição de ácidos graxos são específicos para cada espécie, mas podem ser amplamente influenciados pelas variações dos nutrientes no meio e pelos fatores ambientais. O carbono é o principal componente da biomassa de microalgas, sendo responsável por cerca de 50% do peso seco. O açúcar, particularmente a glicose, é a fonte mais comum de carbono orgânico para o crescimento das microalgas (as distintas espécies de algas podem preferir distintos

compostos orgânicos, mas, em geral, a lactose e a galactose não são boas para o crescimento dos microrganismos). Adicionalmente, percebe-se que o conteúdo total de ácidos graxos relativamente ao peso seco cresce à medida que a concentração de açúcar também cresce, chegando a atingir até 42,2% deste (Sun et al., 2013).

Quanto ao nitrogênio como fator de acumulação lipídica, percebe-se que a sua falta pode levar a um aumento de até 100% na concentração lipídica intracelular (em relação a condições de suficiência de fornecimento do nutriente). Considerando-se que os carbonos orgânicos são utilizados para a cultura heterotrófica, pode-se pensar em controlar a razão entre carbono e nitrogênio (C/N) como um mecanismo de controle entre síntese proteica ou lipídica: quando se aumenta a razão (mais carbono para um dado nível de nitrogênio, ou menos nitrogênio para um dado nível de carbono), tem-se a situação ideal para a acumulação lipídica, em particular de lipídios neutros, que são os mais interessantes para a produção de biodiesel. Quanto às fontes de nitrogênio, as mais viáveis economicamente seriam a amônia e a ureia, apesar de que inúmeras outras podem ser utilizadas. Entretanto, a realmente mais efetiva seria a ureia, porque ela não gera alterações muito significativas no pH da cultura (Sun et al., 2013).

Como já discutido, nas culturas heterotróficas por lotes, uma concentração inicial de substratos (açúcares) é normalmente utilizada, para prover carbono suficiente para a obtenção de uma alta densidade celular. Entretanto, essa ação traz a possibilidade de inibição de crescimento consigo, além da redução da produtividade de biomassa, o que acaba por elevar os custos da produção. Nesse sentido, para sobrepor essa inibição associação às culturas em lote, a alimentação também por lotes é a estratégia comumente utilizada, qual seja: injetar os substratos paulatinamente na cultura, de modo a mantê-lo em nível suficiente para a cultura, sem gerar a inibição. Contudo, mesmo que essa estratégia mitigue as possibilidades de inibição por excesso de substrato, não reduzirá tão significativamente a possibilidade de inibição causada por metabólitos tóxicos produzidos pelo próprio crescimento celular, o que impede o aumento da sua densidade (Sun et al., 2013).

O cultivo contínuo, por sua vez, refere-se àquele em que um meio fresco é continuamente adicionado a uma cultura bem misturada, enquanto células ou produtos são simultaneamente removidos, para manter um volume constante, o que se coaduna para a manutenção de um estado estacionário para os parâmetros cinéticos, como a taxa de crescimento específico, a densidade celular e a produtividade. A grande vantagem do sistema é conseguir eliminar efetivamente a inibição gerada por metabólitos tóxicos. E, como um aprimoramento para essa técnica, a cultura de perfusão (cultivo contínuo com reciclagem de células), a qual une as melhores características das duas anteriores: evitar a inibição pelo excesso de substrato e a inibição causada por metabólitos tóxicos acumulados pelas microalgas, enquanto mantendo uma alta densidade celular e uma alta produtividade (Sun et al., 2013).

Pensando-se, por fim, acerca da viabilidade econômica da produção de biocombustível a partir de algas heterotróficas. Inicialmente, o custo ainda é bastante elevado, sendo grade parcela dele representada pela glicose de alimentação, de modo que a utilização de fontes alternativas de carbono

orgânico pode parecer uma possível solução promissora. Outro ponto importante diz respeito à baixa taxa de conversão açúcar-biomassa: apenas 50% do total de consumo de carbono vira realmente biomassa (o restante se transforma em CO<sub>2</sub>). Para isso, tenta-se utilizar uma estratégia combinada de fermentação-fotossíntese. Além disso, como as algas não são compostas apenas por óleos, pode-se pensar na ideia de biorrefinarias para a extração de outros produtos com elevado valor agregado além do biocombustível, o que também contribuiria sobremaneira para a redução dos custos. Por fim, tem-se o claro caminho a ser seguido pelo melhoramento genético das espécies heterotróficas (Sun et al., 2013).

### **8.3. PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS A PARTIR DE BIOMASSA DE ALGAS POR PIRÓLISE RÁPIDA**

Como já discutido, a mais importante razão para a limitação econômica dos biocombustíveis produzidos a partir de microalgas é o alto custo para o meio de cultura e os processos posteriores (extração, purificação e transformação). No que tange ao meio de cultura, percebe-se que a viabilidade econômica orbita na utilização de águas residuais como fonte de nutrientes (dióxido de carbono, nitrogênio, fósforo, potássio, magnésio e outros micronutrientes – a vinhaça pode ser considerada uma dessas fontes de nutrientes para o cultivo de microalgas) para o crescimento das microalgas. E, em termos da recuperação e da transformação do óleo, a pirólise rápida surge como uma alternativa barata. No que tange aos custos com o meio de cultura, a literatura informa que eles variam entre US\$ 0,27 e US\$ 0,59 por quilograma de biomassa de microalga, o que contribui significativamente para tornar todo o processo inviável economicamente (Assmann et al., 2013).

A vinhaça é um líquido residual da indústria de etanol à base de cana-de-açúcar, o qual é rico em minerais: após a fermentação do caldo da cana pelas leveduras, a concentração de etanol restante no caldo já fermentado não é superior a 10% do volume, de modo que, após a destilação, todo o produto restante é chamado de vinhaça. Estima-se que sejam produzidos entre 12 e 15 litros de vinhaça para cada litro de etanol, de modo que, no Brasil, em 2012, foram produzidos aproximadamente 365 bilhões de litros de vinhaça (Assmann et al., 2013).

A pirólise é um processo físico-químico em que biomassa é aquecida entre 400 °C e 800 °C, resultando na produção de uma fase sólida rica em carbono e uma fase volátil composta de gases e vapores orgânicos condensados (bio-óleo e extrato ácido). Demonstra-se que, devido à tendência de preferencialmente formar os bio-óleos, com uma reação rápida e elevada produtividade, a pirólise rápida é o melhor modelo de produção de biocombustível de microalgas (Assmann et al., 2013). A Figura 8.4 ilustra, de modo bastante esquemático, as etapas de uma unidade de pirólise:

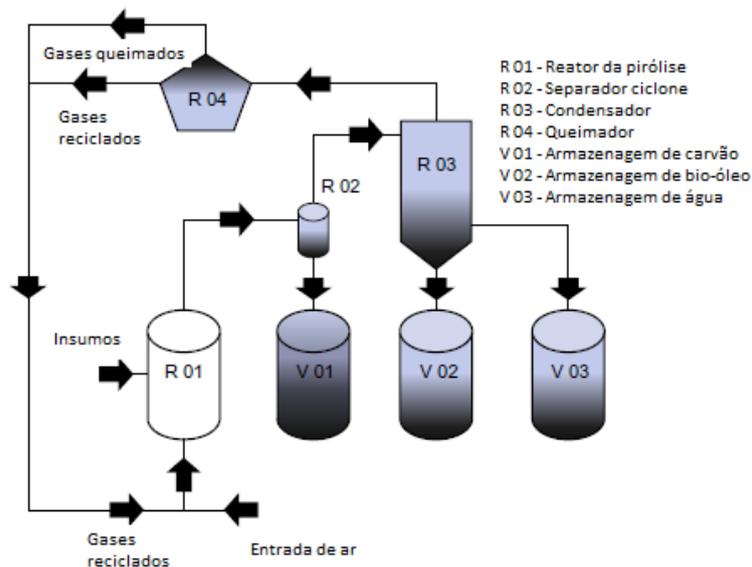


Figura 8.4. Diagrama de uma Unidade de Pirólise Rápida (Assmann et al., 2013)

O seguinte conjunto de reações sumariza o processo de pirólise (Assmann et al., 2013):

1. Secagem: Material Úmido  $\rightarrow$  Material Sólido +  $H_2O(g)$
2. Pirólise: Material Seco  $\rightarrow$  Carvão + Produtos Voláteis
3. Reações de Combustão:  $C(s) + O_2 \rightarrow CO_2(g) + Energia$
4. Reações de Combustão:  $2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g) + Energia$
5. Transferência de Calor
6. Transferência de Massa

## 8.4. SISTEMA DE LAGOA ABERTA PARA CULTIVO DE MICROALGAS

### 8.4.1. INTRODUÇÃO

Introdutoriamente, a biomassa de microalgas tem sido industrialmente aplicada em áreas como suplementação alimentar, óleos, biomassas, biopolímeros, pigmentos, biofertilizantes e biocombustíveis. De modo geral, para o seu crescimento, estes seres utilizam o dióxido de carbono e os rejeitos industriais, o que reduz os custos relacionados aos nutrientes para o meio de cultivo, bem como alivia os problemas ambientais causados pelos rejeitos citados.

Sabe-se que, embora esforços tenham sido direcionados para a otimização dos processos e dos meios de produção, o desenvolvimento de sistemas de algacultura que sejam rentáveis

economicamente e altamente eficientes deve ser significativamente melhorado, com vistas a tornar possível a produção em larga escala (Wang et al., 2012).

Nesse sentido, os sistemas de cultivo com lagoa aberta são os mais comumente aplicados industrialmente, especialmente por causa de seu baixo custo de investimento e de capital operacional (menor demanda energética e menor necessidade de limpeza, sendo apropriado para elevadas escalas). Por outro lado, a maior dificuldade nesses sistemas reside no controle das condições de operação (as quais podem causar o decréscimo da produtividade de biomassa) e no controle de contaminações (as quais podem ser dirimidas por meio da boa seleção de espécies) (Costa et al., 2013). Entretanto, quando se pensa em condições ambientais, podem-se utilizar os sistemas de estufa como um mecanismo satisfatório para o controle. Comparativamente às lagoas abertas, os PBRs fechados podem aumentar a eficiência fotossintética, elevando a produção de biomassa (Wang et al., 2012). Contudo, eles apresentam um alto custo inicial, além do fato de que apenas algumas espécies com fisiologia específica de microalgas podem ser utilizadas, razão esta que justifica os inúmeros modelos de PBRs produzidos recentemente.

As microalgas, que produzem biomassa por meio da fotossíntese (conversão da energia solar em energia química), são microrganismos procariotos (cianobactérias) ou eucariotos (algas verdes e diatomáceas) que crescem rapidamente e têm a habilidade de viver em diferentes ambientes, devido à sua estrutura unicelular ou multicelular simples. Estes organismos existem nos mais variados ecossistemas, aquáticos ou terrestres, de modo que mais de 50.000 espécies são conhecidas, das quais, 30.000 são estudadas (Costa et al., 2013). Preliminarmente, tem-se o seguinte rol de vantagens para o cultivo de microalgas como fonte de biomassa (Costa et al., 2013):

- São sistemas biológicos com alta capacidade de captar a radiação solar e produzir compostos orgânicos por meio da fotossíntese, apresentando um elevado crescimento;
- Não há competição com cultivo de fontes alimentares;
- A produção ampla pode ser carbono-negativa – segundo Chisti (2008), a geração de 100 toneladas de biomassa de algas remove o equivalente a 183 toneladas de CO<sub>2</sub> atmosférico;
- Quando sujeitos a estresses químicos ou físicos, são induzidos a produzir altas concentrações de compostos específicos, tais como proteínas, lipídios, carboidratos, polímeros e pigmentos;
- Apresentam um ciclo de divisão celular simples, sem um estágio de típica reprodução, possibilitando-os a completar seu ciclo de desenvolvimento em poucas horas (muito mais rapidamente do que quando comparados a outros organismos).
- Desenvolvem-se em diversas condições ambientais de água, temperatura, salinidade e luz.

## 8.4.2. MICROALGAS CULTIVADAS E SISTEMAS DE LAGOA ABERTA

Os tanques abertos são normalmente dados em três disposições: *raceway* (formato de uma pista de corrida), grandes lagos rasos (*shallow big ponds*) ou circulares (tanques simples) (Costa et al., 2013). Esta última configuração, com um agitador centralmente pivotado, é o sistema mais antigo de algacultura em larga escala, sendo, porém, bastante limitado: a sua área não pode exceder 10.000 m<sup>2</sup>, porque o braço rotativo não consegue manter a homogeneidade da mistura com áreas maiores (não consegue evitar a precipitação das algas). Os tanques *raceway* são o método mais utilizado para os sistemas artificiais de cultivo de microalgas.

Eles são tipicamente construídos com um circuito fechado e têm canais ovais de recirculação, apresentando, geralmente entre 0,2 e 0,5 m de profundidade, sendo agitados com uma roda de pás para assegurar a homogeneização da cultura, a fim de estabilizar o crescimento de algas e a produtividade. As pistas podem ser construídas de concreto, de fibras de vidro ou de membranas (Brennan e Owende, 2010). Em relação aos tanques fechados, os *raceways* são o método mais barato para produção de microalgas em larga escala, já que eles demandam uma pequena potência e são fáceis de serem mantidos e limpos. A Figura 8.5 ilustra as possíveis configurações:



Figura 8.5. Diferentes Tipos de Lagoas Abertas <sup>[37]</sup>

Em tanques abertos, as variações ambientais possuem influência direta sobre a produção, além de que a manutenção da densidade celular é baixa, devido ao próprio efeito de sombreamento. Ademais, as condições de intensidade luminosa, temperatura, pH, e de concentração de oxigênio dissolvido podem limitar os parâmetros de crescimento das microalgas nos tanques abertos. Os PBRs abertos têm um rendimento inferior do que aqueles sistemas fechados, sobretudo devido às perdas por evaporação, às flutuações de temperatura, à limitação de nutrientes e de luz e à homogeneização ineficiente.

Obviamente, contudo, a quantidade de água evaporada pode ser periodicamente ou continuamente adicionada à *raceway* (Costa et al., 2013).

De acordo com Lee (2001), apenas espécies com resistentes são cultivadas em sistemas abertos, como a *Dunaliella* (resistente à alta salinidade), a *Spirulina* (cultivada em alta alcalinidade) e a *Chlorella* (cultivo em alta concentração de nutrientes), sendo que esta última parece ser a mais competitiva comercialmente. Para que se possa ratificar a vasta biodiversidade de algas, tem-se a Figura 8.6

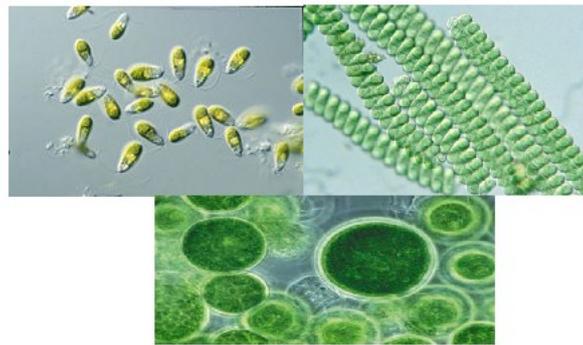


Figura 8.6. Diferentes Espécies de Algas: *Chlorella* (inf.), *Spirulina* (sup. dir.) e *Dunaliella* (sup. esq.)<sup>[38][39][40]</sup>

### 8.4.3. PROJETO DO REATOR E REGIME DE ILUMINAÇÃO

No que tange à hidrodinâmica do reator, uma mistura adequada deve prover alta concentração de biomassa, possibilitar a circulação do líquido, mantendo as algas em suspensão, o que elimina a estratificação térmica (nos *raceways*, uma velocidade de 0,05 m/s é suficiente para suprir essa condição), além de otimizar a distribuição de nutrientes, melhorar as trocas gasosas e reduzir o sombreamento e a fotoinibição das microalgas. O fluxo turbulento é essencial para a máxima produtividade destas em sistemas de lagoa aberta. Ademais, é conveniente salientar que a alta concentração de oxigênio produzido na água pode inibir o crescimento da microalga. Entretanto, quando se pensa em sistemas abertos, isso não se configura um real problema, já que o O<sub>2</sub> sai rapidamente da água, porque a profundidade é muito pequena, além da baixa solubilidade do gás nesta (Costa et al., 2013).

Destarte, percebe-se que os sistemas de mistura são essenciais para a adequada operação da fazenda de microalgas, independentemente de ser um sistema aberto ou fechado, sendo a seleção do elemento misturador dependente o reator utilizado. Nesses termos, Costa et al. (2013) fazem uma sucinta alusão monetária: para os sistemas *raceway*, a operação de mistura representa um custo de R\$ 0,28 para cada quilograma de biomassa seca.

#### 8.4.4. TEMPERATURA, pH E ESTERILIZAÇÃO DO CULTIVO

De modo geral, uma temperatura alta acelera o metabolismo das microalgas (mas não pode ser tão alta para evitar a desnaturação de proteínas e enzimas essenciais, o que acabaria por inibir a fisiologia celular), enquanto uma temperatura baixa pode inibir o crescimento, mas a temperatura ideal para o crescimento varia de acordo com a espécie em utilização. Ademais, quando se pensa em temperaturas altas, elas só são desejáveis efetivamente durante o dia, de modo a favorecer o crescimento por meio da fotossíntese – não se deseja alta temperatura à noite porque esta pode majorar a taxa de respiração, o que demanda alto gasto energético celular, diminuindo a concentração daquilo que será utilizado para a geração de eletricidade (Costa et al., 2013). Enquanto existem diversas formas de controle de temperatura para os PBRs fechados, para aqueles utilizados nos *raceways*, geralmente se utiliza um controle por estufa: durante dias frios, a estufa é mantida fechada, de modo a aumentar a sua temperatura interna em relação ao ambiente externo, tornando-a ideal para a algacultura; por sua vez, caso o ambiente já esteja em uma temperatura elevada, as paredes da estufa são abertas, de modo que a temperatura do *raceway* será a própria do ambiente (Costa et al., 2013). Outrossim, a temperatura ambiente pode afetar o grau de saturação dos lipídios da microalga, de modo diretamente proporcional.

Por sua vez, obviamente, o pH ótimo varia muito de acordo com cada espécie, mas, de modo geral, ele afeta os processos bioquímicos associados, incluindo a biodisponibilidade de CO<sub>2</sub> para a fotossíntese e o uso dos nutrientes do meio. De toda sorte, o pH ótimo intracelular é de, aproximadamente, 7,5. Especialmente para os cultivos externos, que são muito afetados por microrganismos patogênicos e por espécies invasoras de algas, faz-se necessário um controle de pH – nesses casos, deseja-se que ele seja mais elevado, podendo ser integrado ao sistema de aeração (apesar de o pH externo ser por volta de 10 ou 11, a microalga manterá a sua alcalinidade interna em 7,5 por meio do desprendimento de íons H<sup>+</sup> de sua estrutura) (Costa et al., 2013). Ainda assim, diz-se que o pH ótimo para a cultura da maioria das microalgas varia entre 7 e 9 (Costa et al., 2013).

De outra face, a contaminação das microalgas por outros microrganismos pode causar mudanças na estrutura celular, bem como reduzir a concentração daquelas em apenas alguns dias. Os principais agentes contaminantes são espécies diferentes de microalgas, bactérias, vírus, fungos, protozoários e rotíferos, os quais são controlados, em sistemas abertos, por meio de uma operação efetiva do sistema como uma cultura em lotes, reiniciando-a em intervalos regulares, com água fresca e inóculo unialgal. Outros contaminantes são insetos, folhas e materiais transportados pelo ar, muitos dos quais podem ser removidos periodicamente por meio do posicionamento de uma tela de tamanho adequado no canal de fluxo de água (Costa et al., 2013). Outras técnicas para dirimir a contaminação consistem em utilizar alta concentração de nutrientes, alta salinidade ou utilização de antibióticos. Por sua vez, o PBR deve ser periodicamente limpo, de modo a minimizar as chances de contaminação (Wang et al., 2012).

Contudo, a preocupação com a esterilização é, de certa forma, minorada quando se utiliza a biomassa de microalgas para a produção de biocombustíveis, já que algumas impurezas são aceitáveis (Costa et al., 2013).

## 8.5. PROJETO DE FOTOBIORREATORES PARA ALGACULTURA

### 8.5.1. INTRODUÇÃO

A principal decisão a ser tomada quando de algacultura consiste na utilização de PBRs abertos ou fechados. Estes podem ser tubulares verticais, tubulares helicoidais, anulares, de sacolas plásticas, painel verde ou de tela plana, apresentando alta eficiência fotossintética, bem como maior nível de controle, ou seja, uma maior produtividade (Costa et al., 2013). Os PBRs fechados são altamente eficientes na biofixação de  $\text{CO}_2$ , especialmente devido à melhor homogeneidade do meio e à melhor transferência de massa, sendo, contudo, limitados pelo excesso de  $\text{O}_2$  produzido. Para ratificar o entendimento, a Figura 8.7 representa distintos sistemas de algacultura:



Figura 8.7. Tela Plana (a), Tubulares Horizontais (b), Sacolas Plásticas (c), painéis verdes (d) e Sistemas Abertos (e) <sup>[40]</sup>

Além dos métodos convencionais, Brennan e Owende (2010) introduzem a ideia do cultivo híbrido, com diferentes estágios de crescimento. No caso de reatores abertos e fechados, o primeiro estágio do cultivo ocorre em um PBR fechado, de modo que as boas condições de controle minimizem a contaminação por outros microrganismos, promovendo a divisão celular. No segundo estágio (ideal para lagoas abertas), as células são expostas a um estresse nutricional, aumentando a síntese de um

metabólito específico, que, no caso da biomassa com vistas à queima e consequente geração de eletricidade, podem ser os lipídios (semelhantemente ao biodiesel).

### **2.3.1.1 FATORES QUE INFLUENCIAM O CRESCIMENTO DE MICROALGAS E A SÍNTESE DA BIOMASSA COM ELEVADO PODER CALORÍFICO**

De acordo com Yen et al. (2013), as fontes de carbono geralmente são o fator mais crítico para o crescimento das microalgas, sendo que aquelas podem ser o próprio gás carbônico, metanol, acetato, glicose ou outros componentes orgânicos.

Partindo-se para outro aspecto muito importante durante o cultivo de microalgas, a acumulação lipídica em microalgas, semelhantemente àquela ocorrida em humanos, ocorre, geralmente, quando elas são submetidas a condições de estresse (falta de nitrogênio, deficiência nutritiva, variações de pH e outras). Dentre essas técnicas, a de limitação de nitrogênio é a mais efetiva e comumente utilizada para estimular a acumulação referida, sendo suficiente para elevá-la acentuadamente (Yen et al., 2013). A ideia por trás dessa acumulação é que, quando da falta de nitrogênio, as microalgas convertem suas proteínas em lipídios, os quais são ricamente energéticos. Isso acontece porque o estresse nutritivo de nitrogênio leva à autofagia de alguns componentes celulares, como os ribossomos, os cloroplastos e os peroxissomos, além da liberação de substratos para o metabolismo e a biossíntese, sendo que o rearranjo do tilacoide permite que grandes corpos lipídicos se formem (NAABB). Contudo, a excessiva redução de disponibilidade de nitrogênio acaba por prejudicar a taxa de crescimento das microalgas, o que leva a um final prejuízo na produção de lipídios, levando a uma necessária otimização da disponibilidade.

Outra consideração óbvia deve ser o abastecimento de energia luminosa, seja quanto à fonte de luz ou à intensidade luminosa. Para maximizar a produtividade de biomassa, a saturação luminosa deve ser distribuída por todo o sistema de algacultura, o que é impossível na prática, haja vista os próprios efeitos de sombreamento na parte interna dos PBRs, especialmente quando a concentração de células torna-se muito alta ou quando há formação de biofilme na superfície do reator (esses efeitos podem ser minimizados por um efetivo sistema de mistura). A Figura 8.8 ilustra os efeitos da intensidade luminosa no crescimento fotoautotrófico das microalgas (Yen et al., 2013):

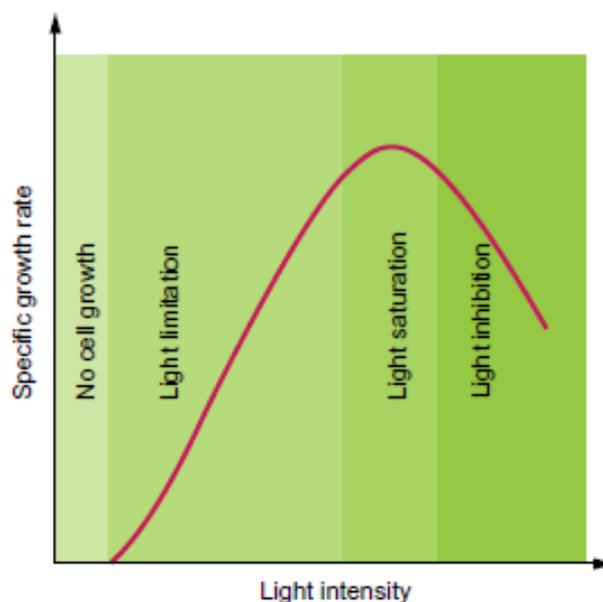


Figura 8.8. Efeitos da Intensidade Luminosa no Crescimento Fotoautotrófico das Microalgas

## 8.6. COLHEITA DA BIOMASSA DE MICROALGAS

### 8.6.1. ESPECIFICIDADES ACERCA DOS MÉTODOS DE COLHEITA DE BIOMASSA DE MICROALGAS

Para as microalgas cultivadas em um meio aquoso, o espessamento (crescimento) das algas esparsas na suspensão até um aglomerado mais espesso de algas (um bolo) é uma das fases mais importantes para a colheita. Em outras palavras, a quantidade de água na suspensão de algas deve ser reduzida o máximo possível para viabilizar a colheita e os processos posteriores. Tecnicamente, as microalgas são separadas com base nos processos simples de separação de sólido e líquido, sendo os processos mais comuns o rastreamento mecânico (tradução livre para *screening*), a coagulação, a floculação, a flotação, a sedimentação, a filtração e a centrifugação. Além desses, técnicas mais modernas, como a eletroforese, a eletrocoagulação, a eletroflotação e o ultrassom, são utilizadas em menor grau, em virtude da própria viabilidade econômica. Algumas das vantagens do método de ultrassom são a inexistência de partes móveis e de aditivos químicos, o que ainda deixa a célula colhida viável para usos posteriores, além do fato de demandar baixa energia de entrada (0,01 – 0,04 kWh/m<sup>3</sup>) e de ser de baixo custo (1 – 4 centavos por galão de lipídio) (NAABB).

O rastreamento mecânico é a primeira operação unitária utilizada na maioria das usinas de tratamento de águas residuais, bem como na colheita de algas. O princípio dessa separação por rastreio mecânico envolve a introdução da biomassa em uma tela de determinado tamanho, sendo que a

eficiência do processo depende do espaçamento entre as aberturas das telas e do tamanho das células das microalgas. Para as microalgas, os dispositivos mais comuns são apresentados na Figura 8.9:

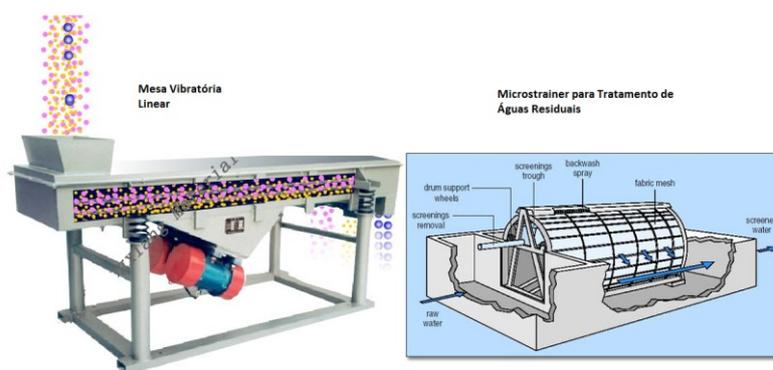


Figura 8.9. Mesa Vibratória <sup>[43]</sup> (esq.) e Microstrainer <sup>[44]</sup> (dir.)

Os microstrainers consistem em um tambor rotativo coberto por um tecido elástico de aço inoxidável ou de poliéster. O tambor gira, de modo bastante lento, parcialmente submerso em um recipiente com algas em suspensão, de modo que a tecido representa uma tela com uma malha tão fina, que somente as partículas maiores (as microalgas) são capturadas. Pelo próprio movimento do tambor, as microalgas são levadas para o topo, onde um spray de água consegue desalojá-las do tecido. De um modo geral, quando um microstrainer é utilizado para a colheita das microalgas, a concentração do produto final ainda é baixa, além de que o tecido permite que algumas células não sejam capturadas, o que contribui para aumentar a ineficiência do processo como um todo (Show et al., 2013).

Os custos da operação não são tão elevados – em torno de 5 a 15 dólares para cada milhão de litros de suspensão trabalhada. Algumas características favoráveis da operação consistem na operação simples, no baixo investimento, no desgaste insignificante devido à baixa velocidade do tambor, no baixo consumo de energia e nas altas taxas de filtração. Entretanto, alguns problemas, além da baixa eficiência de colheita, consistem na dificuldade de lidar com as flutuações particulares (mexemos com a velocidade de rotação do tambor), bem como no acúmulo de uma lama de alga no tecido cobertor do tambor (mexemos com radiação ultravioleta) (Show et al., 2013). Por sua vez, as mesas vibratórias, apesar de serem menos utilizadas do que os microstrainers, vêm apresentando alguns resultados expressivos em estudos comerciais (Show et al., 2013): eficiência de remoção de biomassa de microalgas bastante elevada, sendo superior a 95% em vazões superiores a 20 m<sup>3</sup>/h.

A seu turno, a utilização de aditivos químicos para induzir a coagulação e a floculação em microalgas é uma rotina para quase todos os demais processos de colheita, já que estes processos levam as células a formarem agregados maiores, os quais podem ser mais facilmente filtrados e, então, colhidos. Os coagulantes inorgânicos mais utilizados são os íons metálicos Al<sup>+3</sup> (e seu derivado sulfato de alumínio) e Fe<sup>+3</sup>, os quais formam complexos com pH ideal (Show et al., 2013). Esses compostos

são os mais utilizados porque o arcabouço teórico indica que os flocculantes alcalinos neutralizam os efeitos de repulsa das cargas superficiais das microalgas, permitindo o seu aglomerado em um floco.

Quanto aos coagulantes orgânicos, apenas os polieletrólitos catiônicos são eficientes, mas eles somente podem atuar em meios pouco salinos (com poucos íons livres, de modo a permitir a atuação elétrica do composto) (Show et al., 2013). Nesse sentido, Show et al. (2013) ensinam que, enquanto polieletrólitos aniônicos reforçam a flocculação do aglomerado (limo), a maioria dos polieletrólitos pode ser usada em conjunto com sulfatos de alumínio ou férrico como coagulantes auxiliares, reforçando a formação dos flocos e aumentando a colheita das microalgas, situação em que os polieletrólitos podem ser aplicados em doses reduzidas, diminuindo os custos com produtos químicos para o processo global. De um modo geral, além da espécie de microalgas, outros fatores afetam diretamente a quantidade ideal de coagulante a ser empregada: a concentração de fosfato, a alcalinidade do meio, a concentração de amônia e de matéria orgânica dissolvida e a própria temperatura do meio (Show et al., 2013).

A colheita por meio da flocculação química é um método bastante oneroso para operações maiores. A maior desvantagem desse método é o fato de que os compostos químicos adicionados são difíceis de remover das algas separadas, provavelmente tornando todo o processo ineficiente e não econômico para uso comercial, apesar de prático para estudos. Os custos para a remoção destes compostos geralmente tornam o procedimento pouco atrativo, mas uma solução plausível para a problemática seria a interrupção do fornecimento de CO<sub>2</sub>, o que leva a uma autoflocculação da microalga. Em alguns casos, esse fenômeno é associado ao elevado pH devido ao consumo fotossintético do gás correspondente à precipitação dos compostos inorgânicos, o que leva à autoflocculação. A Figura 8.10 ilustra a idealização do processo de flocculação em soluções semelhantes às daquelas das microalgas:

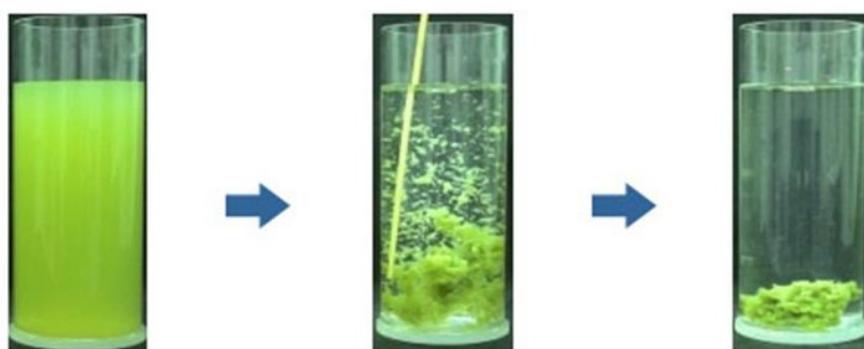


Figura 8.10. Processo de Flocculação Química <sup>[45]</sup>

A filtração ocorre por meio de forçar (por meio de gravidade, vácuo, pressão ou mecanismos magnéticos) o escoamento da suspensão de microalgas através de um meio filtrador, utilizando-se uma bomba de sucção, sendo a biomassa das algas retida e concentrada no filtro e, então, colhida. A maior vantagem do processo de filtração é permitir a colheita de microalgas em uma densidade muito baixa.

Por sua vez, os maiores problemas na utilização da filtração consistem no fato de ocorrência de entupimentos do filtro por causa de incrustações de células e, portanto, de o escoamento ser limitado a pequenos volumes. Para se resolver a problemática dos entupimentos, podem-se utilizar os microstrainers como um pré-tratamento à filtração, de modo a melhorar a colheita. Nesse mesmo sentido, a maioria das operações com filtros também inclui a retrolavagem como uma rotina de manutenção do sistema livre de entupimentos (Show et al., 2013). A Figura 8.11 ilustra um exemplo de filtração utilizada na colheita da biomassa de microalgas, como finas membranas porosas de liga metálica de níquel. Na figura, o fluxo ocorre de baixo para cima, sendo as duas regiões vazias das laterais destinadas ao depósito do permeado limpo:



Figura 8.11. Esquema da Filtração de Biomassa de Microalgas (NAABB)

Por sua vez, a sedimentação por gravidade é um processo de separação de líquido-sólido que separa uma suspensão de alimentação em uma pasta de concentração mais elevada e em um efluente líquido mais transparente. Trata-se do processo de concentração mais comum para tratamento de esgotos e de águas residuais. Normalmente, como as microalgas apresentam diâmetros muito pequenos, utiliza-se a floculação como forma de induzir a formação de partículas maiores, o que aumenta a velocidade de sedimentação para um nível mais aceitável (Show et al., 2013).

A flotação, por sua vez, consiste em uma alternativa à simples sedimentação por gravidade, especialmente quando a concentração de algas na solução não é muito elevada (ou quando as algas são tão pequenas, que sua velocidade de sedimentação é tão baixa a ponto de não ser interessante para a aplicação) e quando o investimento inicial é algo muito determinante (o processo de flotação é menos oneroso do que o de sedimentação). De modo bastante direto, a flotação consiste na atuação gravitacional de modo inverso: em vez de se esperar que as partículas se tornem mais espessas e se depositem no fundo do recipiente, essa separação sólido-líquido é realizada por meio da introdução de finas bolhas de ar na parte inferior do tanque, sendo que elas se juntam ao material particulado e, quando combinadas, são levadas à superfície pela sua simples flutuação. Feito o processo, basta realizar a coleta do material acumulado na superfície. De um modo geral, devem-se utilizar coagulantes para aumentar a eficiência da operação (Show et al., 2013). Os processos de flotação,

apenas como citação, podem ser vários: por ar dissolvido, por ar disperso, eletroflotação e flotação ozônica.

O processo de centrifugação é análogo à sedimentação em tanques, exceto pelo fato de que naquele as partículas são aceleradas por uma força centrífuga em detrimento da gravitacional. As centrífugas podem ser de paredes estacionárias (hidrociclone) e, de maneira bem mais comum, de parede rotativa (centrífugas de sedimentação). A colheita do particulado sólido em contato com as paredes da estrutura pode ser feita de modo contínuo ou periódico, no caso de processamento em lotes (método menos utilizado, já que demanda a interrupção da produção). Os tipos mais comuns de centrífugas utilizadas para a separação de microalgas, apenas como uma citação, incluem a hidrociclone, a centrífuga tubular, a centrífuga com uma bacia para decantação dos sólidos, a centrífuga do tipo bocal e a centrífuga de discos para ejeção de sólidos. Apesar de ser um mecanismo de separação bastante promissor, o seu custo bastante elevado inviabiliza a grande demanda para as aplicações comerciais (Show et al., 2013).

Destarte, existem duas grandes restrições energéticas e financeiras à geração massiva de energia a partir da biomassa de microalgas: os caros sistemas de cultura, com altos custos de capital e grandes demandas energéticas para a mistura e a troca gasosa, e o custo na colheita para o atingimento de pastas sólidas com boa concentração. Nesse sentido, certamente a colheita energeticamente eficiente e financeiramente efetiva é o maior desafio para a viabilização da produção energética a partir da biomassa de microalgas. Um dos motivos para isso é o grande volume a ser processado para produção de uma quantidade considerável de biomassa (já que, tipicamente, é obtido menos do que 0,5 kg de biomassa seca de microalga a cada mil litros da cultura) (Show et al., 2013).

Outro típico gargalo para a produção econômica de biocombustível a partir de microalgas diz respeito à necessidade de fertilizantes para promover o bom crescimento dos microrganismos, o que colocaria em dúvida, inclusive, a viabilidade de impacto ambiental da algacultura (já que os fertilizantes demandam combustíveis fósseis para serem produzidos). Entretanto, como já discutido, é nesse sentido que se insere a ideia de associar o cultivo das microalgas à produção sucroalcooleira da usina Jalles Machado, que fornece a vinhaça (meio rico em nutrientes necessários ao crescimento das microalgas) e o carbono inorgânico, proveniente dos tanques de fermentação da usina.

## **8.7. APLICAÇÕES PARA A BIOMASSA RESIDUAL**

De um modo geral, as análises econômicas acerca da produção de biocombustível a partir de microalgas vêm indicando que a sua viabilidade econômica é intrinsecamente relacionada à possibilidade de produção de coprodutos com valor de mercado a partir da biomassa utilizada. Esses produtos incluem açúcares para produção de bioetanol e biometano (via fermentação da biomassa – seriam os combustíveis secundários), produtos de valores intermediários, proteínas para a alimentação

animal e produtos de alto valor agregado (biofertilizantes, química fina, antioxidantes, princípios ativos para antibióticos, antitumorais, anti-inflamatórios e outras aplicações nutraceuticas). Destarte, para se tornarem competitivas no cenário de produção de combustíveis a partir de microalgas, as indústrias deveriam seguir uma integral abordagem de atualização via implementação de biorrefinarias de microalgas, maximizando, assim, o retorno econômico em todos os componentes da biomassa de microalgas, visando à situação de zero resíduos (Guedes et al., 2013).

No que tange à produção de combustíveis secundários, a biomassa residual (após ter sido utilizada para a produção de biodiesel) pode ser utilizada para a produção de bio-hidrogênio, de bioetanol, do próprio bio-óleo (mediante reações de pirólise ou de liquefação termoquímica da biomassa), de biocarvão e o próprio biodiesel (por meio de uma purificação por caras reações químicas, que inviabilizariam a produção primária do combustível). Por sua vez, para a utilização na produção de química fina, poder-se-ia pensar na fabricação de materiais de polissacarídeo (fibras alimentares, hidrocoloides ("*alginate*", "*carrageenans*" e "*agars*")), compostos proteicos (proteínas, peptídeos, aminoácidos livres), compostos lipídicos (fosfolipídios, glicolipídios, esteróis), materiais pigmentares (clorofila, carotenoide, ficobiliproteínas), materiais halogenados (iodo, derivados halogenados) e materiais fenólicos. Além disso, ainda se poderia pensar em uma biorremediação secundária, ou seja, utilizar a biomassa sobressalente para efetuar maiores sequestros de dióxido de carbono, bem como maior tratamento de águas residuais. Por fim, ainda se poderia pensar na aplicação da biomassa restante à alimentação, seja para o cultivo de plantas (como fertilizantes), seja para a criação animal (Guedes et al., 2013).

Obviamente, entretanto, essas aplicações para a biomassa residual não prosperam no caso concreto deste Projeto de Graduação, já que se espera realizar a queima, nas caldeiras da usina Jalles Machado, de toda a biomassa seca retirada dos processos de colheita e desidratação. A justificativa para tal escolha, como mencionado anteriormente, também é econômica: não seria interessante, para a usina, investir altas quantias para o desenvolvimento de rotas típicas de biorrefinarias, de modo que a queima da biomassa nas caldeiras já existentes parece ser a solução mais viável financeiramente. Esses aspectos econômicos serão mais bem discutidos a seguir.

### **8.7.1. PRINCIPAIS GARGALOS PARA A EXPANSÃO DA ALGACULTURA**

Feitos esses comentários propedêuticos acerca da avaliação de eficiência energética para a produção de biocombustível a partir de microalgas, pode-se iniciar a avaliação específica dos principais gargalos para a algacultura, sendo o primeiro desafio a produção massiva de biomassa de microalgas com o mínimo de entrada de energia e de uma maneira efetiva na óptica dos custos. Nesse sentido, o cultivo fototrófico surge como método preferido para o cultivo de microalgas,

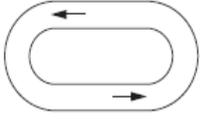
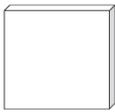
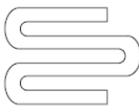
especialmente porque a luz solar é abundantemente disponível sob nenhum custo. À parte disso, as algas fototróficas são capazes de capturar CO<sub>2</sub> de gases de combustão, podendo agir, potencialmente, como um sumidouro de carbono, o que oferece uma vantagem adicional ao método. Entretanto, este também apresenta as suas limitações, especialmente em países temperados, em que a radiação luminosa do sol não está disponível de modo útil ao longo de todo o ano.

Restringindo-se ao escopo do cultivo fototrófico, os tanques abertos e os PBRs fechados são os sistemas disponíveis para o crescimento daquele tipo de cultura. Sempre se deve ter em mente que um sistema de cultivo ideal deve satisfazer os seguintes requisitos: grande área de iluminação efetiva; transferência gás-líquido ótima; ser de simples operação; manter um baixo nível de contaminação; baixos custos iniciais e operacionais; utilizar a mínima quantidade de terra (Lam et al., 2013).

O sistema de tanques *raceway* é atualmente o método de cultivo mais economicamente viável para a produção massiva de biomassa de microalgas, principalmente devido à sua facilidade operacional e ao baixo investimento de capital. O tanque normalmente é constituído por um canal de recirculação em circuito fechado (oval), em que a mistura e a circulação são fornecidas por rodas de pás, com vistas a evitar a sedimentação da biomassa, sendo o CO<sub>2</sub> aspergido na parte inferior do tanque, como já explicado exaustivamente neste trabalho. Alguns tanques, além da iluminação natural solar, também incorporam a iluminação artificial, mas esta não é prática e inviabiliza o lado financeiro do sistema. Nesse sistema, o rendimento e a produtividade são altamente dependentes da espécie utilizada, bem como das condições de cultivo e do clima local, tendo variações entre 0,3-0,5 g/L e 0,05-0,1 g/L.dia, respectivamente (Chisti, 2008). Apesar de esse sistema ter substanciais vantagens comerciais, apresenta algumas severas limitações, como a perda massiva de água (por evaporação) e a alta susceptibilidade à contaminação (que pode levar à aniquilação total da população de microalgas).

Então, para superar as limitações das técnicas de cultivo em tanques abertos, os PBRs fechados são projetados para garantir que as células de microalgas sejam sempre submetidas a condições ótimas de crescimento, com alta consistência de produtividade de biomassa. A baixa probabilidade de contaminação, por exemplo, permite o cultivo de única espécie de alga por períodos prolongados, além do fato de que as fontes de água podem ser reutilizadas para ciclos subsequentes de cultivo. Além disso, como as principais condições de crescimento (pH, temperatura, concentração de dióxido de carbono, intensidade de mistura e níveis de nutrientes) podem ser controladas e manipuladas, os PBRs fechados apresentam uma substancial maior flexibilidade do que os tanques *raceway*. Nesse sistema, a produtividade pode variar entre 0,05-3,8 g/L.dia (Brennan e Owende, 2010). A Tabela 8.1 ilustra esquematicamente, além de toda a discussão já apresentada neste trabalho, uma comparação sob a óptica de vantagens e desvantagens comparativas (principalmente comerciais) dos principais tipos de PBRs para o cultivo de microalgas.

Tabela 8.1. Prospecções e Limitações de Diversos Sistemas de Algacultura

	<b>Tanque Raceway</b>	<b>Placa Plana</b>	<b>Tubular</b>	<b>Coluna Vertical</b>
<b>Projeto Conceitual</b>				
<b>Caract. do Projeto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consiste em um canal de recirculação oval.</li> <li>- Construído com concreto ou terra compactada com plásticos brancos.</li> <li>- Mistura e circulação por meio de rodas de pás.</li> <li>- Profundidade de 0,2-0,5 m.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biorreator retangular.</li> <li>- Construído com plástico transparente ou vidro.</li> <li>- Associado a um sistema aspersor de gás.</li> <li>- Espessura variável entre 1,3 e 10 cm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Série de tubos transparentes enrolados em looping.</li> <li>- Tubos de plástico ou vidro transparentes.</li> <li>- Associado a uma bomba ou a um sistema airlift.</li> <li>- Diâmetro limitado a 0,1 m, para aumentar a razão área/vol.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cilindro em coluna vertical.</li> <li>- Colunas feitas com plástico transparente ou vidro.</li> <li>- Associado a uma bomba ou a um sistema airlift.</li> <li>- Diâmetro não superior a 0,2 m e altura inferior a 4 m.</li> </ul>
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil de construir e operar.</li> <li>- Baixa entrada de energia e baixo custo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máxima utilização da energia solar (grande área superficial).</li> <li>- Baixa concentração de oxigênio dissolvido.</li> <li>- Posicionamento de acordo com ângulo ótimo em relação ao sol.</li> <li>- Baixo consumo de potência.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande área de iluminação superficial.</li> <li>- Alta produtividade de biomassa.</li> <li>- Integridade da célula mantida, sobretudo com o sistema airlift.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta taxa de transferência de massa com boa mistura.</li> <li>- Compacto, de fácil operação e de baixo custo.</li> <li>- Baixo consumo de potência.</li> </ul>

<b>Desvant.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perda de água por evaporação.</li> <li>- Dificuldade de controlar pH e temperatura.</li> <li>- Susceptibilidade à contaminação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Expansão requer muitos compartimentos e materiais de suporte.</li> <li>- Dificuldade em controlar a temperatura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grandes áreas de terra, porque os tubos são longos.</li> <li>- Acumulação potencial de O<sub>2</sub> (veneno para as algas).</li> <li>- Pouco CO<sub>2</sub> em regiões mais avançadas do tubo.</li> <li>- Problemas de mistura em tubos mais longos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pequena área de iluminação superficial.</li> <li>- Pode haver sedimentação celular caso não se use o sistema airlift.</li> </ul>
-----------------	---	--	---	---

No mesmo sentido da Tabela 8.1, alguns estudos de LCA vêm comparando o balanço global de energia para a produção de biodiesel por meio do cultivo de biomassa de microalgas em *raceways* ou em PBRs tubulares fechados com sistema *airlift*, chegando-se à conclusão de que, nestes sistemas, a produtividade de biomassa é maior do que naqueles, mas a demanda energética para operar todo o sistema é cerca de 350% maior (isso porque os cálculos ainda não conseguem incluir a energia gasta para manter o sistema de iluminação artificial durante a noite, para fazer a colheita, a secagem, o tratamento da água, a extração lipídica e a conversão do biodiesel – o gasto energético inicial e a conversão energética final apresentariam resultados ainda muito piores caso tudo isso fosse considerado) (Lam et al., 2013).

Deixando-se a parte do cultivo em si, pode-se partir para uma análise crítica da parte pós-cultivo, sendo a primeira delas a colheita da biomassa de microalgas, a qual se refere ao processo de separação das algas da água para a posterior produção do biocombustível. O processo consiste em duas etapas distintas: colheita massiva (bruta), para separar a alga da suspensão via sedimentação gravitacional, floculação ou flotação; aglomeração/espessamento da pasta de biomassa, para concentrar a suspensão de algas após a colheita massiva, utilizando técnicas de centrifugação e filtração (Brennan e Owende, 2010). A principal dificuldade para a colheita da biomassa é a sua própria baixa concentração em relação à massa de água (em virtude da própria dimensão minorada das microalgas): a razão mássica de microalgas em relação à água, em um cultivo em PBR fechado (que apresenta a maior concentração entre os sistemas), é situada em valores entre 0,00035-0,027, de modo que, caso se expanda o sistema, uma massa de 73 toneladas de água deve ser processada para a produção de uma tonelada de biomassa de microalgas. Dessa forma, percebe-se que métodos efetivos de colheita são excepcionalmente importantes para alavancar a possibilidade de comercialização de biocombustível de microalgas. A Tabela 8.2 sumariza, de modo bastante resumido e comparativo, as principais vantagens e desvantagens de cada processo (como já previamente discutido neste trabalho).

Tabela 8.2. Diversos Métodos para Colheita de Biomassa de Microalgas (Lam et al., 2013)

<b>Método de Colheita</b>	<b>Descrição do Processo</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Centrifugação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lei de Stokes: sedimentação determinada pela densidade e pelo raio da célula.</li> <li>- Biomassa concentrada de microalga pode ser obtida.</li> <li>- Força centrífuga: 5.000-10.000 g com 95% de eficiência de remoção.</li> </ul>	Rápido e eficiente.	Intensivo gasto energético e alto custo de manutenção.
<b>Floculação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agregar a biomassa de microalgas e facilitar a sedimentação.</li> <li>- Floculantes utilizados: cloreto férrico, sulfato de alumínio e sulfato férrico.</li> <li>- Usada como etapa de pré-tratamento à centrifugação, à sedimentação ou à filtração.</li> </ul>	Efetivo sob a óptica financeira.	A biomassa residual não pode ser utilizada para algumas aplicações secundárias, como alimentação animal e digestão anaeróbica.
<b>Flotação</b>	Aprisionar a biomassa por meio da dispersão de microbolhas de ar, as quais levam as algas a rapidamente boiarem à superfície.	Aplicável para processar grandes volumes de biomassa.	A toxicidade dos floculantes pode reduzir o valor da biomassa.
<b>Filtração</b>	A operação se dá em situações de elevada pressurização ou de vácuo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtração por pressão: mais aplicável a microalgas de maior tamanho.</li> <li>- Microfiltração: efetiva para quaisquer tamanhos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtração por pressão: não recupera pequenas microalgas.</li> <li>- Microfiltração: alto custo devido à recolocação da membrana, ao seu entupimento e à manutenção.</li> </ul>

<b>Sedimentação Gravitacional</b>	Lei de Stokes: sedimentação determinada pela densidade e pelo raio da célula. As algas são sedimentadas naturalmente, por simples atuação gravitacional	Baixo custo devido à inexistente de aditivos químicos ou tratamentos físicos.	- Não efetiva para pequenas microalgas. - Tempo de sedimentação é elevado.
<b>Colheita Ultrassônica</b>	A onda ultrassônica comprime e alonga os espaços moleculares do meio pelo qual passa, criando um efeito de cavitação. As células são imediatamente rompidas, facilitando a sedimentação.	Pode ser operada continuamente, sem indução de esforços cisalhantes à biomassa.	Problemas de segurança.

Para que se tenha uma ideia da importância energética e econômica das etapas de colheita e secagem da biomassa, um recente estudo (Lam et al., 2013) mostrou que, em processos de filtração por pressão e de centrifugação, tal etapa contribui, respectivamente, com 88,6% e 92,7% do total de entrada de energia para o estudo de LCA. Então, percebe-se que a utilização de métodos não massivos (não *bulk harvesting*) para a colheita não é eficiente do ponto de vista energético, de modo que a colheita precisa ser realmente feita nas duas etapas anteriormente citadas: primeiramente, uma colheita massiva, para, depois, realizar-se a aglomeração do produto colhido, com os métodos de alto consumo energético (que representarão menor significância no novo processo, sobretudo porque a colheita bruta terá sido feita pelos processos de menor consumo energético).

Após a vênica colheita e concentração da biomassa, deve-se desidratá-la ou secá-la, com vistas a facilitar a subsequente produção de biocombustível, especialmente porque a presença de água pode inibir severamente o processamento e a conversão de biocombustível, incluindo a extração lipídica com solventes químicos e a produção de biodiesel via transesterificação. De acordo com Brennan e Owende (2010), os métodos de desidratação aplicáveis à secagem da pasta de alga são vários, incluindo a secagem solar, a secagem por spray, secagem por congelamento e por placas fluidizadas. Aquele, como já discutido, surge como o método mais promissor, porque é sem custos, apesar de necessitar de uma grande área superficial e demandar bastante tempo (além do óbvio fato de não ser viável em países temperados, em que a luz solar não é disponível continuamente).

Nesses casos de inaplicabilidade, precisa-se utilizar combustível fóssil para promover a secagem, o que, de acordo com estudos de LCA, contribui para dificultar bastante a produção de biocombustível de microalgas (estudos mostram que aproximadamente 69% da entrada total de energia no processo de

produção de biocombustível a partir de microalgas são devidos à utilização de gás natural (no exemplo) para a secagem da biomassa). Dessa forma, a alta dependência de combustíveis fósseis para a secagem da pasta de microalgas pode reduzir o potencial de mercado e a viabilidade da produção de biocombustíveis de algas, especialmente nos países temperados. Contudo, como bem se sabe, o Brasil é situado na zona tropical da Terra, de modo que a insolação é bastante elevada, sobretudo quando se considera o interior do nordeste brasileiro, como mostrado no mapa solarimétrico presente neste trabalho. Então, em princípio, a secagem por simples incidência solar não seria um problema, porque ela é praticamente contínua ao longo do ano – não seria necessária a utilização de combustíveis fósseis para promover o aquecimento do ambiente de secagem, por exemplo.

Obviamente, os conceitos aqui levantados são genéricos, sendo posteriormente aplicáveis concretamente ao caso em estudo: utilização da biomassa de microalgas para geração de energia elétrica nas caldeiras existentes na usina Jalles Machado.